



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Construcción de módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos utilizando sistemas ciberfísicos dentro de un proceso secuencial, para el desarrollo de prácticas en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Carrillo Alquina, Darwin Mauricio y Ruiz Enríquez, Bryan Steven

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Gordón Garcés, Andrés Marcelo

16 de agosto del 2023

Latacunga

Reporte de verificación de contenido



TRABAJO DE TITULACIÓN Carrillo Rui...

Scan details

Scan time:
August 22th, 2023 at 16:19 UTC

Total Pages:
93

Total Words:
23071

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	3.1%	720
Minor Changes	1.2%	275
Paraphrased	2.1%	477
Omitted Words	0%	0

AI Content Detection



Text coverage
 AI text
 Human text

🔍 Plagiarism Results: (113)

🌐 T-ESPEL-ENI-0450.pdf

1%

<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/23329/1/t-es...>

COMPU

1 CARÁTULA Diseño e implementación de un módulo didáctico de sensores industriales, utilizando sistemas embebidos, para el desarrollo de...

🌐 ESPEL-EMI-0457-P.pdf

0.8%

<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/35729/1/es...>

Kevin Rea

1 Carátula Diseño e implementación de un módulo didáctico para el monitoreo y control de variables físicas y eléctricas de un proceso ro...

🌐 FormatosTrabajosdeIntegracionCurricular2022.docx

0.6%

<https://biblioteca.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2022/04/...>

Calderon Garcia Angel David

[Image:] Nota: Colocar únicamente la página que indica el porcentaje de similitud de la herramienta contratada por la Universidad. Fir...

Ing. Gordón Garcés, Andrés Marcelo

CC: 1803698800



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
Carrera de Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Construcción de módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos utilizando sistemas ciberfísicos dentro de un proceso secuencial, para el desarrollo de prácticas en el laboratorio de mecatrónica de la universidad de las fuerzas armadas ESPE.”** fue realizado por los señores **Carrillo Alquina, Darwin Mauricio y Ruiz Enríquez, Bryan Steven**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 14 de agosto del 2023

Ing. Gordón Garcés, Andrés Marcelo

CC: 1803698800



Departamento de Ciencias de Energía y Mecánica
Carrera de Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Carrillo Alquina, Darwin Mauricio**, con cédula de ciudadanía No 1805153051 y **Ruiz Enríquez, Bryan Steven**, con cédula de ciudadanía No 1723855050, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **“Construcción de módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos utilizando sistemas ciberfísicos dentro de un proceso secuencial, para el desarrollo de prácticas en el laboratorio de mecatrónica de la universidad de las fuerzas armadas ESPE.”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 14 de agosto del 2023

.....
Carrillo Alquina, Darwin Mauricio

CC: 1805153051

.....
Ruiz Enríquez, Bryan Steven

CC: 1723855050



Departamento de Ciencias de Energía y Mecánica
Carrera de Mecatrónica

Autorización de Publicación

Nosotros, **Carrillo Alquina, Darwin Mauricio**, con cédula de ciudadanía No 1805153051 y **Ruiz Enríquez, Bryan Steven**, con cédula de ciudadanía No 1723855050, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **“Construcción de módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos utilizando sistemas ciberfísicos dentro de un proceso secuencial, para el desarrollo de prácticas en el laboratorio de mecatrónica de la universidad de las fuerzas armadas ESPE.”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 14 de agosto del 2023

Carrillo Alquina, Darwin Mauricio

CC: 1805153051

Ruiz Enríquez, Bryan Steven

CC: 1723855050

Dedicatoria

Me complace dedicar este trabajo de titulación a todas las personas que han sido parte de mi camino académico y personal, especialmente a mi familia, por su apoyo, y amor incondicional en cada paso de mi vida. Gracias por ser mi fuente de inspiración y motivación.

Finalmente, a mis profesores y compañeros de estudio, por compartir su conocimiento y por su colaboración en cada proyecto y tarea. Gracias por ser una parte fundamental en mi formación académica.

Carrillo Alquina, Darwin Mauricio

Dedicatoria

A mis padres, les agradezco por ser mis guías y por brindarme su apoyo en cada paso de este camino. A mis hermanos, por ser mis mejores amigos y por siempre estar ahí para mí, animándome y haciéndome reír en los momentos más difíciles. Y a mis amigos, por su amistad, su ayuda y su confianza en mí.

Este logro no solo es mío, sino también de ustedes, que han sido parte integral de mi vida y de mi éxito. Espero que este trabajo sea un tributo a su amor y dedicación, y que puedan sentirse orgullosos de mí como yo me siento orgulloso de tenerlos en mi vida.

Ruiz Enríquez, Bryan Steven

Agradecimiento

En primer lugar, quiero expresar mi sincera gratitud a Dios por proporcionarme la fuerza y la sabiduría necesarias para alcanzar este importante logro en mi vida. También, deseo extender mi agradecimiento a mi familia, en especial a mis padres Luis y Betty, cuyo apoyo constante, motivación y amor incondicional han sido un pilar fundamental a lo largo de mi trayectoria universitaria. Su creencia en mí y su acompañamiento en cada paso que he dado han sido invaluable, convirtiéndose en mi equipo más leal en este proyecto.

Por último, deseo expresar mi aprecio sincero a todos aquellos que de alguna manera han colaborado en la realización de esta tesis. Espero que este trabajo no solo sea valioso, sino que también aporte de manera positiva al mejoramiento de nuestra sociedad.

Carrillo Alquina, Darwin Mauricio

Agradecimiento

Queridos padres, hermanos y amigos, quiero expresar mi más profundo agradecimiento por el apoyo y la motivación que me han brindado durante todo este tiempo. Sin su constante ayuda y palabras de aliento, no habría logrado llegar hasta aquí.

Cada uno de ustedes ha sido una parte esencial en mi vida, y hoy quiero agradecerles por haberme dado la fuerza necesaria para enfrentar mis desafíos. Espero que este trabajo sea una muestra de mi agradecimiento y mi deseo de continuar aprendiendo y creciendo junto a ustedes.

Gracias por estar siempre presentes en mi vida y por ser mi apoyo incondicional.

Ruiz Enríquez, Bryan Steven

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula	1
Reporte de verificación de contenido.....	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria	6
Dedicatoria	7
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de contenidos	10
Índice de tablas	16
Índice de figuras	18
Resumen.....	22
Abstract	23
Capítulo I: Problema de Investigación.....	24
Antecedentes.....	24
Planteamiento del Problema.....	26
<i>Objetivo General</i>	<i>27</i>
<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>27</i>
Justificación e Importancia	27
Hipótesis	28

VARIABLES DE ESTUDIO	28
Variable Independiente	28
Variable Dependiente	28
Delimitación o Alcance	28
Capítulo II: Fundamentación Teórica	29
Sistemas ciberfísicos	29
¿Cómo implementar los sistemas ciberfísicos?	29
Automatización	30
Sensores	30
Actuadores	31
Clasificadora	31
Redes de sensores inalámbricos	32
Protocolos de comunicación de redes utilizados con sensores inalámbricos	33
Wifi	33
Zigbee	34
Bluetooth	34
Lora	35
Plataforma IoT	37
Firestore	38
Flutter	39
Widget	40

Capítulo III: Diseño y selección de componentes.....	41
Introducción.....	41
Diseño de concepto	42
Definición del subsistema de los módulos de sensores inalámbricos	44
Selección de componentes	44
<i>Protocolo de comunicación inalámbrica.....</i>	<i>45</i>
<i>Selección de protocolo de comunicación inalámbrica</i>	<i>45</i>
<i>Controlador</i>	<i>47</i>
<i>Selección del controlador</i>	<i>47</i>
<i>Sensor inductivo.....</i>	<i>49</i>
<i>Selección del sensor inductivo.....</i>	<i>49</i>
<i>Sensor capacitivo</i>	<i>50</i>
<i>Selección del sensor capacitivo</i>	<i>51</i>
<i>Sensor de color.....</i>	<i>52</i>
<i>Selección del sensor de color.....</i>	<i>53</i>
<i>Sensor de proximidad</i>	<i>54</i>
<i>Selección del sensor de proximidad</i>	<i>54</i>
<i>Sensor de humedad y temperatura</i>	<i>56</i>
<i>Selección del sensor de humedad y temperatura</i>	<i>56</i>
Diseño y construcción de los módulos de sensores.....	58
<i>Diseño del módulo del sensor de color.....</i>	<i>58</i>

<i>Diseño del módulo del sensor de tamaño</i>	63
<i>Diseño del módulo del sensor de material</i>	65
<i>Diseño del módulo del sensor de temperatura y humedad</i>	68
Definición del subsistema de la estación del proceso secuencial	70
<i>Material de la estructura de la estación</i>	70
<i>Selección del material de la estructura</i>	71
<i>Diseño de la banda transportadora</i>	72
<i>Cálculo del soporte de la banda</i>	75
<i>Diseño de eje motriz de la banda transportadora</i>	79
Diseño de rampas de salida y entrada	81
<i>Diseño del sistema de dispensación de piezas</i>	81
<i>Diseño de actuadores</i>	86
<i>Diseño de base para la estación de clasificación</i>	90
<i>Ensamble de parte mecánica de la estación de clasificación.</i>	91
Diseño del sistema eléctrico de la estación de clasificación	92
Diseño y conexiones del controlador de la estación de clasificación	95
Capítulo IV: Implementación y tecnologías IoT	99
Introducción	99
Construcción de los módulos de sensores	102
Programación de los módulos de sensores	103
<i>Programación del módulo del sensor de color</i>	103

<i>Programación del módulo del sensor de tamaño</i>	105
<i>Programación del módulo del sensor de material</i>	106
<i>Programación del módulo del sensor de temperatura y humedad</i>	107
<i>Programación de los controladores y maestro receptor de datos</i>	108
Implementación de tecnología IoT	111
Diseño de la aplicación: Conexión con Firebase	115
Capítulo V: Pruebas y Análisis de Resultados	119
Introducción.....	119
Pruebas del módulo inalámbrico sensor de color	119
Pruebas del módulo inalámbrico sensor de tamaño	120
Pruebas del módulo inalámbrico sensor de material	121
Pruebas del módulo inalámbrico sensor de temperatura y húmeda	121
Pruebas de comunicación entre los módulos inalámbricos y el módulo maestro	122
Pruebas de batería	123
Pruebas del dispensador de objetos	124
Pruebas de la etapa de clasificación.....	124
Pruebas de la aplicación móvil y de los códigos QR.....	125
Pruebas de funcionamiento en estudiantes	127
Análisis de resultados de encuestas	128
Interpretación de resultados de la encuesta	134
Validación de la hipótesis.....	134

Planteamiento de Hipótesis.....	135
Análisis económico del proyecto.....	138
Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones.....	142
Conclusiones.....	142
Recomendaciones.....	145
Bibliografía.....	146
Anexos.....	152

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Necesidades de los módulos de sensores inalámbricos</i>	43
Tabla 2 <i>Métricas para los módulos de sensores inalámbricos</i>	44
Tabla 3 <i>Protocolos de comunicación inalámbrica</i>	45
Tabla 4 <i>Evaluación de criterios de protocolo de comunicación inalámbrica</i>	46
Tabla 5 <i>Criterios de selección de controladores</i>	47
Tabla 6 <i>Evaluación de criterios del controlador</i>	48
Tabla 7 <i>Criterios de selección del sensor inductivo</i>	49
Tabla 8 <i>Evaluación de criterios del sensor inductivo</i>	49
Tabla 9 <i>Criterios de selección del sensor capacitivo</i>	51
Tabla 10 <i>Evaluación de criterios del sensor capacitivo</i>	51
Tabla 11 <i>Criterios de selección del sensor de color</i>	52
Tabla 12 <i>Evaluación de criterios del sensor de color</i>	53
Tabla 13 <i>Criterios de selección del sensor de proximidad</i>	54
Tabla 14 <i>Evaluación de criterios del sensor de proximidad</i>	55
Tabla 15 <i>Criterios de selección del sensor de humedad y temperatura</i>	56
Tabla 16 <i>Evaluación de criterios del sensor de humedad y temperatura</i>	57
Tabla 17 <i>Capacidades comunes de baterías marca ANERA</i>	60
Tabla 18 <i>Criterios de selección del material</i>	71
Tabla 19 <i>Evaluación de criterios del material</i>	71
Tabla 20 <i>Características NEMA 17hs19-2004s</i>	94
Tabla 21 <i>Características Altek 750w Atx</i>	95
Tabla 22 <i>Pruebas del módulo inalámbrico sensor de color</i>	120
Tabla 23 <i>Pruebas del módulo inalámbrico sensor de tamaño</i>	120
Tabla 24 <i>Pruebas del módulo inalámbrico sensor de material</i>	121
Tabla 25 <i>Pruebas del módulo inalámbrico sensor de temperatura y humedad</i>	122

Tabla 26 <i>Pruebas de comunicación entre los módulos inalámbricos y el módulo maestro</i>	123
Tabla 27 <i>Pruebas de batería</i>	123
Tabla 28 <i>Pruebas del dispensador de objetos</i>	124
Tabla 29 <i>Pruebas de la etapa de clasificación</i>	125
Tabla 30 <i>Pruebas de la aplicación móvil</i>	126
Tabla 31 <i>Pruebas de funcionamiento de los códigos QR</i>	126
Tabla 32 <i>Pruebas de funcionamiento</i>	135
Tabla 33 <i>Cálculo del método estadístico</i>	137
Tabla 34 <i>Elementos implementados en la construcción del proyecto</i>	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Transformación de datos físicos a señales eléctricas</i>	31
Figura 2 <i>Módulo Festo MPS 400 de clasificación en línea</i>	32
Figura 3 <i>Red de sensores inalámbricos para control de iluminación utilizando WLAN</i>	34
Figura 4 <i>Red centralizada de LoRa</i>	36
Figura 5 <i>Arquitectura IoT</i>	38
Figura 6 <i>Firestore</i>	39
Figura 7 <i>Logo Flutter</i>	40
Figura 8 <i>Widget en Flutter</i>	40
Figura 9 <i>Esquema de la estructura del sistema</i>	42
Figura 10 <i>Subsistema de módulo de sensor inalámbrico</i>	44
Figura 11 <i>Logo de LoRaWAN</i>	46
Figura 12 <i>Heltec WiFi LoRa 32 (V3)</i>	48
Figura 13 <i>Sensor Inductivo NPN NO 8mm LJ18A3-8Z/BX 6- 36V</i>	50
Figura 14 <i>Sensor capacitivo LJC30A3-H-Z/BX</i>	52
Figura 15 <i>Módulo sensor de color RGB TCS34725</i>	53
Figura 16 <i>Sensor de proximidad infrarrojo HW201</i>	55
Figura 17 <i>Sensor de Humedad y Temperatura DHT22</i>	57
Figura 18 <i>Respuesta espectral del fotodiodo</i>	59
Figura 19 <i>Diagrama de conexión inicial del sensor de color</i>	61
Figura 20 <i>Diagrama de conexión del módulo sensor de color</i>	61
Figura 21 <i>Partes frontales del diseño CAD del sensor de color</i>	62
Figura 22 <i>Partes posteriores del diseño CAD del sensor de color</i>	62
Figura 23 <i>Diagrama de conexión del módulo sensor de tamaño</i>	64
Figura 24 <i>Partes frontales del diseño CAD del sensor de tamaño</i>	64
Figura 25 <i>Diagrama de conexión del módulo sensor de material</i>	66

Figura 51 <i>Implementación de controladores</i>	100
Figura 52 <i>Colocación de fuente de energía</i>	101
Figura 53 <i>Construcción terminada de la estación de clasificación</i>	101
Figura 54 <i>Construcción de los módulos de sensores</i>	102
Figura 55 <i>Módulos inalámbricos de sensores</i>	103
Figura 56 <i>Importar librerías para el módulo sensor de color</i>	103
Figura 57 <i>Configuración de parámetros LoRa</i>	104
Figura 58 <i>Envío de datos de colores por radiofrecuencia</i>	105
Figura 59 <i>Envío de datos por radiofrecuencia bajo las condiciones de tamaño</i>	106
Figura 60 <i>Envío de datos por radiofrecuencia del módulo del sensor de material</i>	107
Figura 61 <i>Envío de datos por radiofrecuencia del módulo del sensor de temperatura y humedad</i>	108
Figura 62 <i>Ejemplo de comparación de datos recibidos y enviado de señal digitales a tarjeta Arduino</i>	109
Figura 63 <i>Inicialización y accionamiento del servomotor del dispensador</i>	110
Figura 64 <i>Accionamiento de los servomotores de los actuadores</i>	110
Figura 65 <i>Accionamiento del motor a pasos NEMA 17</i>	111
Figura 66 <i>Crear nuevo proyecto Firebase</i>	112
Figura 67 <i>Creación de la base de datos en tiempo real</i>	112
Figura 68 <i>Librería Firebase y colocación de usuario y contraseña de la red Wifi</i>	113
Figura 69 <i>Sobrescribir valores de los contadores y datos de temperatura y humedad en Firebase desde tarjeta embebida</i>	114
Figura 70 <i>Variables en Flutter</i>	115
Figura 71 <i>Lenguaje Dart para desarrollo de aplicaciones móviles</i>	116
Figura 72 <i>Ventanas de la aplicación móvil</i>	117
Figura 73 <i>Conexión de aplicación a proceso físico mediante Firebase</i>	118

Figura 74 <i>Implementación completa de estación de clasificación+ módulos de sensores inalámbricos</i>	118
Figura 75 <i>Grafica de testeo de datos de temperatura y humedad</i>	122
Figura 76 <i>Estudiantes utilizando el módulo y la aplicación móvil</i>	127
Figura 77 <i>Resultados de la pregunta 1</i>	128
Figura 78 <i>Resultados de la pregunta 2</i>	129
Figura 79 <i>Resultados de la pregunta 3</i>	129
Figura 80 <i>Resultados de la pregunta 4</i>	130
Figura 81 <i>Resultados de la pregunta 5</i>	131
Figura 82 <i>Resultados de la pregunta 6</i>	131
Figura 83 <i>Resultados de la pregunta 7</i>	132
Figura 84 <i>Resultados de la pregunta 8</i>	133
Figura 85 <i>Resultados de la pregunta 9</i>	133
Figura 86 <i>Distribución Chi-cuadrado</i>	138
Figura 87 <i>Estación didáctica de clasificación del fabricante Amatrol</i>	140

Resumen

El presente trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de ingeniero en mecatrónica consiste en conseguir una forma novedosa de practicar sobre la tecnología inalámbrica que se ve en la cátedra de Introducción a sistemas ciberfísicos de forma rápida, visual y con variedad de sensores donde el proyecto se basa en diseñar y construir módulos de sensores individuales que sean inalámbricos, con alimentación propia y conectados a una red mediante un protocolo específico y controlados por un solo módulo maestro, donde los datos comunicados se puedan visualizar desde diferentes dispositivos por internet (IoT). Estos módulos individuales deberán estar acoplados a la estructura del proceso secuencial, con las señales procedentes de los sensores acondicionadas y disponibles en una interfaz didáctica donde se pueda interactuar con estos. Mediante la interfaz se busca poder visualizar e interactuar con el proceso secuencial según el objetivo que el usuario requiere, desde solo monitorear una señal de un sensor específico, hasta poder realizar un proceso secuencial completo ambientado a la industria 4.0, con el fin de poder realizar clasificación de objetos ya sea por su material, color, altura o a su vez contar estos objetos, donde según el proceso se puede colocar el módulo del sensor respectivo y mediante programación poder adecuarlo para poder realizar una comunicación eficiente. Este proyecto contará con manuales de usuario y guías de laboratorio en el cual se detallarán los pasos a seguir para configurar el proceso secuencial según la actividad a desarrollar, además de las estrategias de mantenimiento y recomendaciones para utilizar los módulos didácticos, los cuales estarán disponibles en el laboratorio de mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga para contribuir con el aprendizaje y mejorar el conocimiento.

Palabras clave: actuadores, ciberfísicos, IOT, red sensores, sensores inalámbricos.

Abstract

This project consists of achieving a novel way of practicing wireless technology that is seen in the course of Introduction to cyber-physical systems in a fast, visual way and with a variety of sensors where the project is based on designing and building individual sensor modules that They are wireless, self-powered and connected to a network through a specific protocol and controlled by a single master module, where the data communicated can be viewed from different devices over the Internet (IoT). These individual modules must be coupled to the structure of the sequential process, with the signals coming from the sensors conditioned and available in a didactic interface where they can be interacted with. Through the interface, it is sought to be able to visualize and interact with the sequential process according to the objective that the user requires, from just monitoring a signal from a specific sensor, to being able to carry out a complete sequential process set to industry 4.0, in order to be able to carry out Classification of objects either by their material, color, height or in turn by counting these objects, where according to the process the respective sensor module can be placed and through programming to be able to adapt it to be able to carry out efficient communication. This project will have user manuals and laboratory guides in which the steps to follow to configure the sequential process will be detailed according to the activity to be carried out, in addition to maintenance strategies and recommendations for using the didactic modules, which will be available at the mechatronics laboratory of the University of the Armed Forces ESPE Latacunga headquarters to contribute to learning and improve knowledge.

Keywords: actuators, cyberphysicists, IOT, sensor network, wireless sensors.

Capítulo I

Problema de Investigación

Antecedentes

Desde la antigüedad la humanidad busco controlar con exactitud los procesos cotidianos e industriales monitoreando variables, la primera variable fue la temperatura, donde Fahrenheit en el año 1714 probando varios materiales logró un termómetro de mercurio después de experimentar con varios materiales, con el tiempo y la revolución industrial se notó una gran variedad de sensores manuales, mecánicos, eléctricos, etc. Siendo estos los más utilizados gracias a su rapidez de respuesta y facilidad de ser sustituidos, pero con la característica de que estos, en su mayoría, son conectados de forma cableada.

Con el descubrimiento de las ondas electromagnéticas, surgieron varias posibilidades dando paso a 1873 donde Hertz descubrió las ondas de radio y a su vez Tesla descubrió que eran viables para la comunicación. En los siglos XIX el mundo se daba cuenta que cada vez se expandía el cableado por las ciudades y con la llegada de la radio el mundo pudo notar que las comunicaciones podrían realizarse de forma inalámbrica quitando la dependencia a las redes cableadas. (Edge, 2022)

En los últimos años, en todo el mundo se ha incrementado el uso de sensores inalámbricos debido a la necesidad de monitorear y comunicar por medio de redes locales o internet de forma constante con mayor flexibilidad y con mejor movilidad que a diferencia de la cableadas, ya que brinda facilidad de instalación, menor costo, entre otras. Estos sensores son comúnmente utilizados en la domótica para hacer casas inteligentes, video vigilancia, monitoreo de tráfico, de dispositivos médicos, condiciones meteorológicas, tráfico aéreo, robótica y automatización industrial. (TechTarget, 2021)

Ecuador no es la excepción al utilizar sensores inalámbricos, se ven varios proyectos enfocados a la monitorización de variables inalámbricamente y al control de casas inteligentes,

entre ellos “Implementación de un módulo didáctico domótico para el control de sistemas de calefacción, sonido y persianas.” Donde (Calero, 2022) desarrolló un módulo didáctico para los sistemas de calefacción, sonido y altura de persianas, mediante tecnología bluetooth controla remotamente y por voz dichas variables con la ayuda del asistente de Google y la nube Adafruit.

De la misma forma se puede observar en el trabajo de (Cevallos Salgado y Chugá Rosero, 2019) “ Diseño e implementación de un prototipo de monitoreo inalámbrico de temperatura, energía y módulo de entradas/salidas con almacenamiento en la nube para la empresa GENTEC S.A.” donde se diferencia a la anterior por la tecnología utilizada ya que en este trabajo utilizan Zigbee y MODBUS RTU RS-485 mediante Raspberry Pi y un modem 3G, de esta formase encuentra trabajos donde difieren la tecnología aplicada por características de sus procesos como la rapidez de repuesta o la distancia de comunicación.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se han utilizado los sensores inalámbricos en diferentes procesos, como el del “Desarrollo de un modelo óptimo de una red de sensores inalámbricos aplicado a monitorización volcánica en tiempo real”, trabajo realizado por (Valencia Quezada, 2014) que mediante topología tipo estrella los nodos sensores Waspnote V1.1, con comunicación inalámbrica basada en la tecnología ZigBee con mecanismo CSMA, monitoriza la actividad volcánica.

En cuanto a otras tecnologías también hay diversas formas de adquirir los datos como lo presentan en su trabajo (García, 2017) titulado “Implementación de una comunicación MODBUS mediante radios inalámbricos RS485 para prácticas de control de procesos en el laboratorio de instrumentación virtual” donde presentan el uso PLCs conectados a radios inalámbricos para la comunicación entre sí. De igual forma el trabajo de “Desarrollo de un sistema de monitorización del índice de radiación ultravioleta orientado a smart campus, mediante una red de sensores inalámbricos con tecnología Sigfox” realizado por (Chicaiza,

2021) donde monitorean la radiación mediante sensores inalámbricos mediante el uso de la tecnología SigFox que consiste en IoT.

En cuanto a módulos didácticos de sensores, en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga se encuentra “Diseño e implementación de un módulo didáctico de sensores industriales, utilizando sistemas embebidos, para el desarrollo de prácticas en el Laboratorio de redes industriales y control de procesos.” Realizado por (Caicedo, 2020) donde utiliza una variedad de sensores industriales en el cual mediante un HMI se monitoriza los datos de las variables en tiempo real.

Planteamiento del Problema

El avance de la cuarta revolución industrial en América latina es muy lento en comparación a otros países como Alemania o China, en los cuales la tecnología avanza rápidamente. En Ecuador con el surgimiento de futuras profesiones como la mecatrónica, se busca formar profesionales que conduzcan al país a la nueva era industrial, lo que significa una gran inversión en modernos equipos de formación para alcanzar altos estándares de calidad educativa.

El laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga cuenta con estaciones didácticas enfocados al control y la automatización característico de la industria 3.0. La adquisición de nuevas estaciones didácticas sobre la industria 4.0 son altamente costosas para que la universidad las pueda adquirir, generando limitaciones en los estudiantes para desarrollar prácticas con equipos de última tecnología.

Por lo antes expuesto la construcción e implementación de módulos didácticos con red de sensores inalámbricos, utilizando sistemas ciberfísicos aplicados a un proceso secuencial, resulta sumamente económico lo cual permitirá el desarrollo de prácticas en el laboratorio

reforzando la formación práctica y teórica de profesionales en cuanto a la industria 4.0.

Objetivos del Proyecto

Objetivo General

Construir módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos utilizando sistemas ciberfísicos dentro de un proceso secuencial, para el desarrollo de prácticas en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Objetivos Específicos

- Investigar y recopilar información acerca de la mejor tecnología disponible para la comunicación y sobre los diferentes sensores adecuados para el sistema.
- Diseñar, seleccionar y adquirir los componentes de cada uno de los sistemas mecánico, electrónico, software y protocolos comunicación
- Construir los prototipos de módulos de sensores inalámbricos y la estructura mecánica de la estación de clasificación.
- Diseñar la red de sensores mediante un protocolo específico.
- Crear la aplicación con tecnología IoT para poder monitorear las variables del proceso en otros dispositivos.
- Realizar pruebas respectivas de todos los módulos y las diferentes combinaciones de clasificación.

Justificación e Importancia

Para la carrera de ingeniería mecatrónica, resulta sumamente útil e importante el contar con equipos que fomente el aprendizaje sobre la industria 4.0 y sus diferentes aplicaciones por medio del desarrollo de prácticas de laboratorio para estudiantes de las carreras que hagan uso de este. La construcción de módulos didácticos utilizando sistemas ciberfísicos característico

de la industria 4.0 permite complementar el aprendizaje de los estudiantes en cuanto a estas nuevas tecnologías y sus aplicaciones.

Mediante la implementación de este proyecto se pretende fortalecer los conocimientos prácticos y teóricos sobre los sistemas ciberfísicos para el desarrollo de prácticas en el laboratorio de mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga a partir de la construcción de una red sensor inalámbricos aplicado a un proceso de secuencial de clasificación de objetos ya se por color, material o tamaño.

Hipótesis

¿Es posible desarrollar prácticas de sistemas ciberfísicos con la implementación de módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE?

Variables De Estudio

Variable Independiente

Módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos.

Variable Dependiente

Desarrollo de prácticas de sistemas ciberfísicos en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Delimitación o Alcance

Finalmente, hay que mencionar que el alcance de este Trabajo de la Unidad de Integración Curricular corresponde a la construcción de los módulos de sensores inalámbricos, al igual que la estación de clasificación del proceso secuencial para que los estudiantes puedan hacer prácticas de sistemas ciberfísicos en el laboratorio de Mecatrónica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga.

Capítulo II

Fundamentación Teórica

Sistemas ciberfísicos

Los sistemas ciberfísicos son un conjunto de tecnologías que combinan la informática y los procesos físicos. Estos sistemas suelen contar con dispositivos informáticos integrados, sistemas de monitorización de redes y mecanismos de control de procesos físicos. Lo que hace que estos sistemas sean aún más fascinantes es su capacidad para permitir la interacción entre máquinas y procesos, algo que antes no era común en la industria y que hoy en día es uno de los pilares fundamentales para ingresar al mundo de la industria conectada o industria 4.0. (Herrera, 2022)

¿Cómo implementar los sistemas ciberfísicos?

Para que los sistemas ciberfísicos puedan agregar valor a los procesos físicos, se deben seguir cuatro pasos importantes durante su implementación:

Conexión: La fuente principal de un proceso físico son los datos generados. Es crucial contar con un proceso altamente conectado y con una red segura para recopilar datos de forma efectiva. (Nexus, 2019)

Nivel cibernético: Es necesario implementar objetos interconectados de manera estratégica, que, mediante el uso de algoritmos, puedan procesar los datos y convertirlos en información relevante. (Nexus, 2019)

Cognición: Las señales de las máquinas deben procesarse para obtener información y poder compararla con otros resultados. En este nivel, las máquinas pueden monitorear y diagnosticar sus propios fallos, y estar al tanto de los posibles problemas. (Nexus, 2019)

Configuración: Las máquinas pueden ajustar su funcionamiento en función de la información recopilada. Pueden modificar su funcionamiento según la carga de trabajo o en caso de que experimenten problemas. (Nexus, 2019)

Automatización

La automatización implica el empleo de tecnologías y equipos especializados para ejecutar tareas que en el pasado eran realizadas de manera manual. Esto abarca la implementación de sensores, actuadores, controladores, controladores lógicos programables (PLC) y sistemas de control con el fin de automatizar los procesos de producción. Además, se integran sistemas de supervisión y monitorización de datos. Esta metodología se aplica en diversas ramas industriales, desde la manufactura hasta la agricultura, con el propósito de mejorar los procedimientos de manufactura, el control de la calidad y la gestión de materiales. Todo esto con el objetivo último de incrementar la productividad en los procesos. (Ramírez, 2023)

Sensores

Los sensores son instrumentos con la capacidad de detectar magnitudes físicas o químicas y luego convertirlas en señales eléctricas. En otras palabras, un sensor tiene la capacidad de captar datos como temperatura, distancia, fuerza, presión, humedad, entre otros. Una vez que estos valores son recopilados, se transforman en señales eléctricas como se puede observar en la Figura 1, que desempeñan una amplia gama de funciones en nuestra rutina diaria. (Mecafenix, 2023)

Figura 1

Transformación de datos físicos a señales eléctricas



Nota. Tomado desde (Mecafenix, 2023)

Actuadores

El actuador es un componente mecánico esencial que confiere energía y movimiento a otros dispositivos, siendo capaz de generar fuerza a través de líquidos, electricidad o gases. Estos dispositivos reciben instrucciones provenientes de un regulador o controlador con el propósito de activar la salida del componente final dentro de un sistema. Su función se inicia mediante un controlador, el cual responde cuando recibe un estímulo, transformándolo en acción. La fuerza generada por estos dispositivos mecánicos proviene de tres fuentes distintas: presión neumática, presión hidráulica y potencia motriz eléctrica. (SDI, 2023)

Clasificadora

El propósito fundamental de las máquinas clasificadoras radica en la mejora del proceso de categorización de productos con los que operan. En otras palabras, su objetivo es elevar los resultados obtenidos, reducir los costos involucrados y aumentar la eficiencia en la velocidad del proceso de clasificación. (Martínez, 2015)

Existen diferentes tipos de clasificadoras didácticas como el módulo Festo MPS 400 que se puede observar en la Figura 2, de clasificación en línea que abarca diversos aspectos,

incluyendo la clasificación de diversas piezas mediante la combinación de múltiples tipos de sensores, implementación de algoritmos de aprendizaje automático en un ordenador compacto acompañado de una cámara, comprensión sólida de los beneficios y desafíos relacionados con la integración de Internet Industrial de las Cosas (IIoT) en sistemas ya existentes. (Festo, 2023)

Figura 2

Módulo Festo MPS 400 de clasificación en línea



Nota. Tomado desde (Festo, 2023)

Redes de sensores inalámbricos

Las WSN (Wireless Sensor Networks o Redes de Sensores Inalámbricas) son conjuntos de dispositivos autónomos que se despliegan por un área específica con la finalidad de realizar el monitoreo de diferentes variables físicas o ambientales, tales como sonido, temperatura, vibraciones, presión, movimiento, entre otros. Se considera que esta tecnología es esencial para la implementación del Internet de las cosas (IoT). (Tekniker, 2019)

Las WSN se componen de una variedad de sensores con distintas habilidades sensitivas que establecen una comunicación inalámbrica mediante una red ad hoc, sin necesidad de una infraestructura física previa. Esta facilidad de implementación y configuración, junto con su capacidad de autoconfiguración, ha permitido que estas redes puedan ser utilizadas en diversos entornos, como la domótica, la industria o el medio ambiente, entre otros. Otra de las características más importantes de estas redes es su capacidad de administrar de manera eficiente la energía, lo que aumenta su autonomía en comparación con otros sistemas y permite una mejor optimización de los recursos necesarios para su funcionamiento. (Ordóñez, 2019)

Protocolos de comunicación de redes utilizados con sensores inalámbricos

Existen en el mercado una gran variedad de protocolos inalámbricos utilizados en la comunicación de sensores donde estos se diferencian por su tasa de datos, consumo de energía y su distancia de comunicación. Entre los diferentes protocolos se encuentran los siguientes:

Wifi

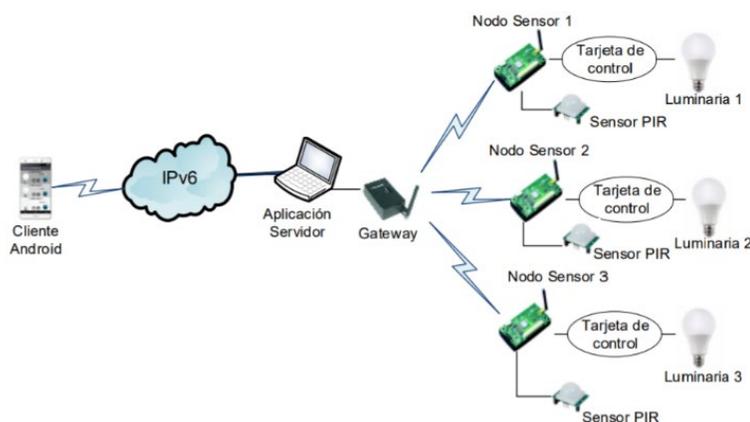
IEEE 802.11 es un conjunto de normas que establecen los protocolos para la transmisión de datos en redes de área local inalámbricas (WLAN), también conocidas como LAN inalámbricas. La tecnología que respalda estos estándares es conocida por los consumidores como Wi-Fi. Es frecuente que las personas se refieran a los "estándares 802.11" o a la "familia de estándares 802.11", aunque en realidad solo existe un estándar (IEEE 802.11-2007) con varias enmiendas. Entre las enmiendas más populares se encuentran 802.11a, 802.11b, 802.11g y 802.11n. Sería más preciso referirse a ellas como enmiendas o modificaciones del estándar original. (Techopedia, 2023)

En la actualidad las tarjetas de desarrollo como ESP utilizan el protocolo IEEE 802.11 a, b, g y n, donde este último cuenta con una velocidad que puede llegar hasta los 600 Mbps.

Este estándar utiliza simultáneamente las frecuencias de 2,4 GHz y 5 GHz. Además, fue el primer estándar en implementar la tecnología MIMO (Multiple Input - Multiple Output), que permite el uso de múltiples canales para la transmisión y recepción de datos utilizando hasta 3 antenas, un ejemplo se observa en la Figura 3. (Castillo, 2020)

Figura 3

Red de sensores inalámbricos para control de iluminación utilizando WLAN



Nota. Tomado desde (Egas, 2019).

Zigbee

Zigbee es una tecnología de comunicación inalámbrica creada como un estándar global y abierto para cubrir las necesidades específicas de las redes de datos inalámbricas de bajo coste y consumo para IoT. El estándar de conectividad de Zigbee está basado en la especificación de radiofrecuencia IEEE 802.15.4 y utiliza frecuencias de radio no licenciadas como 2,4 GHz, 900 MHz y 868 MHz. (Digi, 2021)

Bluetooth

Bluetooth es un protocolo de comunicación inalámbrica que permite la conexión entre dispositivos a través de una frecuencia de radio segura en la banda ISM de 2,4 GHz. Con esta

tecnología es posible transmitir datos y voz entre los dispositivos sin la necesidad de una conexión física mediante cables. (Fernandez, 2021)

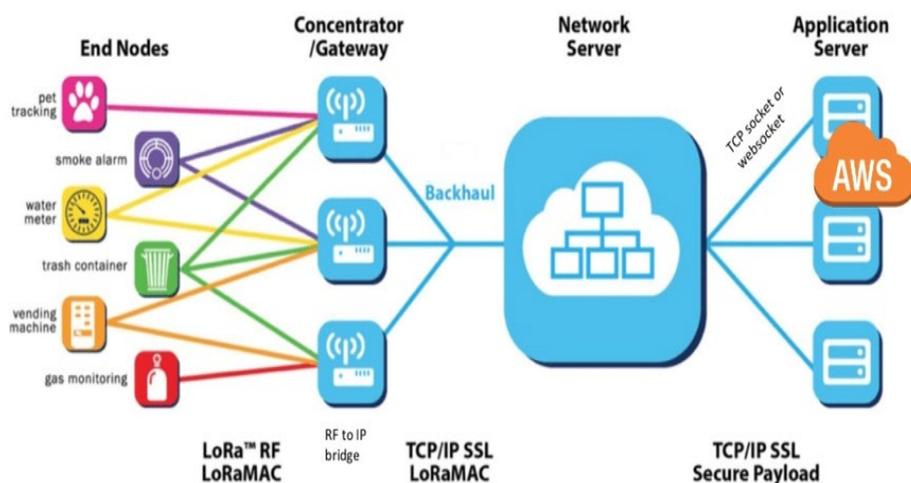
En la actualidad se maneja el Bluetooth 4.0 por la gran variedad de dispositivos que la utilizan, a partir de esta llegó el Bluetooth de baja energía (BLE), lo que permitió que la tecnología se extendiera a más tipos de dispositivos gracias a su menor consumo de energía, manteniendo una velocidad de transferencia de 24 Mb/s. Con esta tecnología se introdujo la banda ISM de los 2,4 GHz, lo que permitió un alcance de hasta 60 metros y una velocidad de transferencia de hasta 32 Mbps. (Carmona, 2021)

Lora

LoRa es un protocolo inalámbrico de larga distancia y baja velocidad que permite la conexión de dispositivos y sensores con un bajo consumo de energía, lo que permite que las baterías duren años. Estas características hacen que LoRa sea ideal para su uso en IoT, donde los dispositivos necesitan comunicarse a grandes distancias y sin la intervención de los operadores. Para procesar correctamente la información enviada por los dispositivos, se utiliza una arquitectura de red llamada LoRaWan, que incluye gateways que actúan como transmisores de radio en la red y se comunican directamente con los sensores, así como con varios servidores, incluyendo los de red, aplicación y seguridad, así como se observa en la Figura 4, donde se muestra una red centralizada de Lora donde se divide los niveles de Lora. (Yubero, 2020)

Figura 4

Red centralizada de LoRa



Nota. Tomado desde (Becolve, 2022)

Las ventajas de utilizar LoRaWAN incluyen:

- Comunicación a larga distancia: permite la comunicación entre dispositivos a distancias de varios kilómetros, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren la transmisión de datos a larga distancia.
- Bajo consumo de energía: el protocolo de LoRaWAN utiliza muy poca energía, lo que permite que los dispositivos puedan durar años con una sola batería.
- Costo asequible: el costo de los dispositivos LoRaWAN es asequible para cualquier proyecto, lo que permite su uso en proyectos de diferentes tamaños y presupuestos.
- Escalabilidad: LoRaWAN es escalable y permite la comunicación de miles de dispositivos a través de uno o varios gateways.
- Curva de aprendizaje rápida: el protocolo de LoRaWAN es fácil de aprender y de implementar, lo que facilita su uso incluso para personas con poca experiencia técnica.

- Alto nivel de seguridad: LoRaWAN ofrece un alto nivel de seguridad para la comunicación entre dispositivos, desde los nodos hasta el servidor de aplicaciones, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que manejan datos sensibles. (Becolve, 2022)

Plataforma IoT

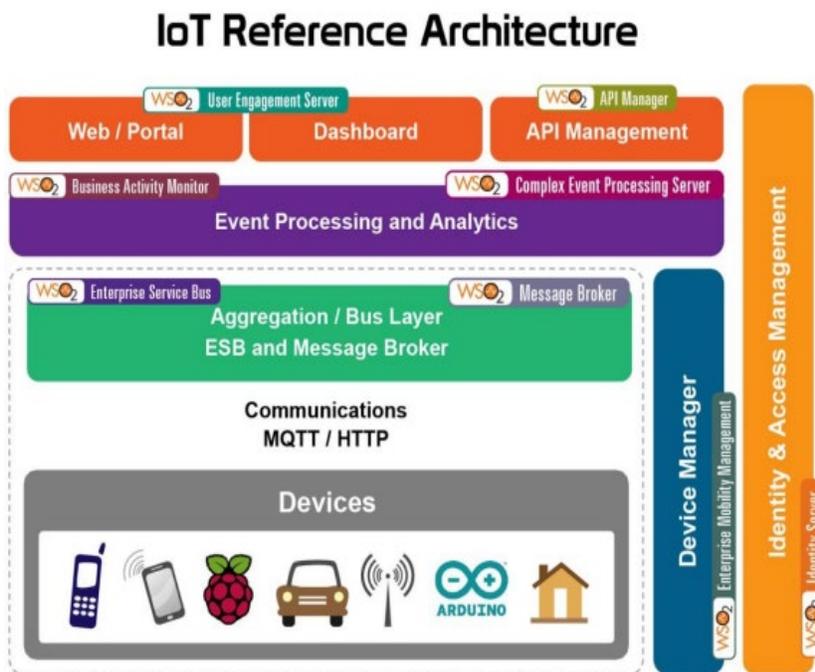
Se considera una plataforma IoT aquella que recoja la información envía por el dispositivo, que almacene o analice la informe y represente e indique la información de tal manera que el usuario pueda utilizarla. Además, la seguridad del sistema se debe asegurar en todo momento, para no exponer los datos a nadie que no haya sido autorizado con anterioridad. (Jacobson, 2017)

Por lo tanto, una plataforma IoT debe presentar los siguientes módulos o bloques:

- Conectividad y normalización: utiliza protocolos de comunicación, para la toma de diversos formatos de datos en una interfaz que permita la precisa emisión de datos y la intercomunicación con los dispositivos.
- Almacenamiento de datos: la información recibida debe ser almacenada para realizar un análisis o integración con una herramienta propia o de terceros.
- Procesamiento y gestión de la acción: la información obtenida es procesada, según un conjunto de reglas, ejecutando acciones dependiendo del resultado obtenido.
- Analítica y visualización: la información debe ser transformada y analizada, para posteriormente ser visualizados mediante gráficos o expuesto en APIs para aplicaciones externas a la plataforma.

Figura 5

Arquitectura IoT



Nota. Tomado desde (Jacobson, 2017)

Firestore

Firestore es una base de datos en tiempo real para desarrollar aplicaciones móviles y el control de la información por medio de HTTP para adquirir datos proporcionada por Google. Esta plataforma integra diversos lenguajes de programación como Swift, Objective-C, Java, JavaScript, C++, etc (Firestore, 2023).

Presenta diversas herramientas o servicios como:

- **Authentication:** Permite autenticar la información de los usuarios de forma simple y segura. Para poder acceder, esta dispone de diferentes métodos como las cuentas Google, Facebook, email y contraseña, etc.

- Realtime Database: Permite almacenar y sincronizar datos en tiempo real, además permite la creación de base de datos no relacional, donde cualquier cambio que se realice automáticamente se refleja en los usuarios conectados.
- Cloud Firestore: Utiliza el Realtime Database con un modelo de datos nuevo y más intuitivo para el usuario, en el cual se realiza consultas más rápidas.
- Google Analytics: Esta herramienta permite obtener datos de analítica ilimitados sobre la aplicación desplegada.

Figura 6

Firestore



Nota. Tomado desde (Firebase, 2023)

Flutter

Flutter es un framework que permite el desarrollo de software de interfaz de usuario creado por Google. Se caracteriza por ser de código abierto y permitir construir aplicaciones para iOS y Android. Construido por capas utilizando como motor escrito en C/C++ y las librerías en Dart. Permite construir aplicaciones multiplataforma a partir de una única base de código, la cual compila a código nativo para cada una de las plataformas objetivo. (Flutter, 2023)

Figura 7

Logo Flutter



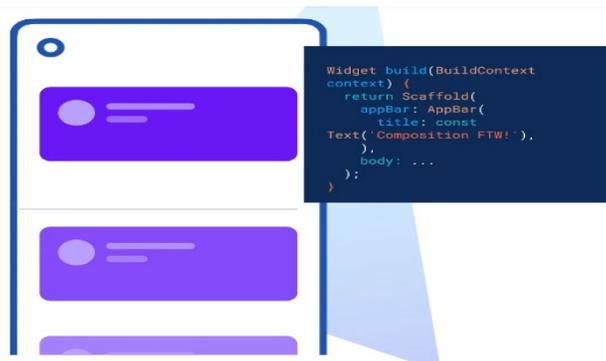
Nota. Tomado desde (Flutter, 2023)

Widget

Un widget en Flutter describe la interacción, lógica y el diseño de un elemento de la interfaz de usuario. Cada elemento como gráficos y texto, formas, y animaciones creadas son widgets. La vista de una pantalla dependerá de la secuencia y de la elección de los widgets. Se pueden crear widgets complejos combinando otros más sencillos. (Flutter, 2023)

Figura 8

Widget en Flutter



Nota. Tomado desde (Flutter, 2023)

Capítulo III

Diseño y selección de componentes

Introducción

En la actualidad la Industria 4.0 ha tenido un impacto significativo en la forma en que las empresas fabrican, mejoran y distribuyen sus productos. La adopción de tecnologías como IoT, análisis y cloud computing, IA y machine learning está transformando las instalaciones de producción y las operaciones de las empresas. Las fábricas inteligentes utilizan sensores avanzados, software integrado y robótica para recopilar y analizar datos en tiempo real, lo que mejora la toma de decisiones. (IBM, 2023)

El diseño de concepto es un proceso que se utiliza en la parte inicial del diseño de producto, servicio o sistema, donde consiste en explorar ideas y soluciones para cumplir objetivos y necesidades del usuario, para ello es necesario seguir las sugerencias y la metodología que describe (Ulrich, 2013) en su libro con el título “Diseño de desarrollo de productos”

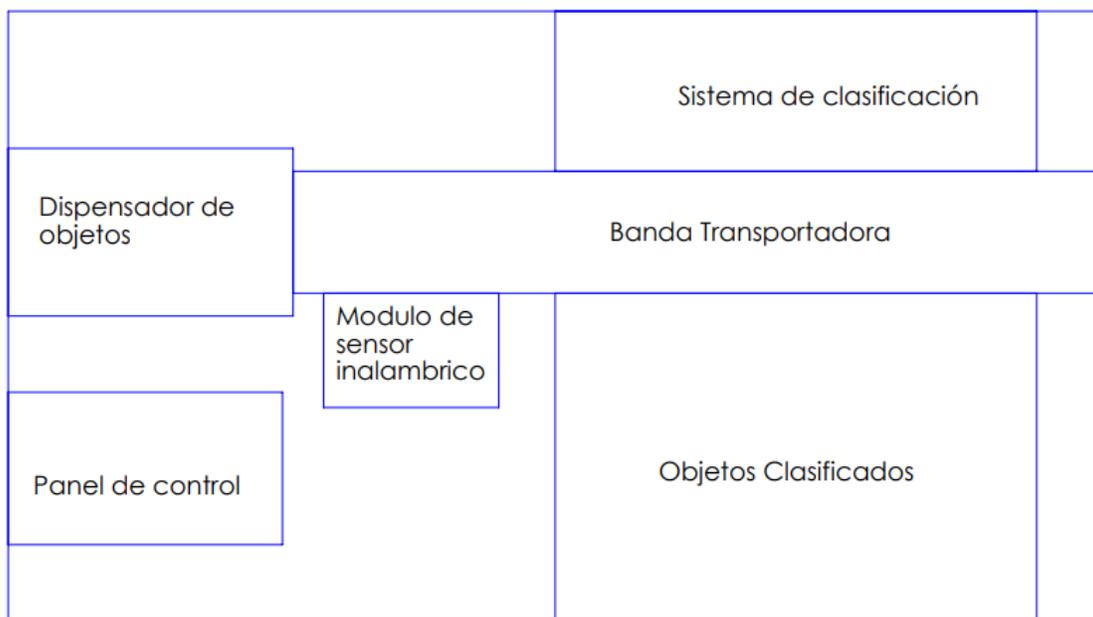
El diseño y construcción de módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos utilizando sistemas ciberfísicos dentro de un proceso secuencial ayuda al estudiante a interactuar y practicar sobre la Industria 4.0, consiguiendo que esté preparado para lo que posiblemente encuentre en su vida laboral, buscando llegar a tener familiaridad con la tecnología inalámbrica, las redes de sensores, el internet de las cosas y los procesos secuenciales.

La finalidad de este proyecto es la construcción de una estación de aprendizaje de los sistemas ciberfísicos utilizando redes de sensores inalámbricos dentro de un proceso secuencial, el cual se divide en dos partes:

- Módulos de sensores inalámbricos independientes, cada uno con su respectivo controlador, su fuente de poder y el sensor respectivo, los cuales se van a comunicar a una puerta de enlace y al controlador de la estación.
- Estación con un proceso secuencial, con una cinta transportadora que traslada una pieza a través de los módulos de sensores inalámbricos hasta los actuadores que llevarán a cabo la acción correspondiente como se requiera con la distribución que se observa en la Figura 9, al igual que los módulos de sensores, esta lleva su fuente de poder y controlador.

Figura 9

Esquema de la estructura del sistema



Nota. La Figura 9 indica como quedará distribuida las diferentes secciones de la estación didáctica.

Diseño de concepto

Una vez establecido el fin que se busca llegar, el cual es el construir módulos de sensores inalámbricos para su uso en un proceso secuencial, hay que determinar las

especificaciones del producto, basado en la metodología de (Ulrich, 2013) donde nos sugiere evaluar las necesidades que debe cubrir el proyecto para un correcto funcionamiento y tener un equilibrio entre costos y beneficios para que los estudiantes puedan utilizar los elementos del proyecto sin ningún problema, estas necesidades se especifican en la Tabla 1. Para posteriormente generar una lista de métricas las cuales ayudan a reflejar el grado de satisfacción del estudiante para llegar a obtener una comparativa entre elementos de las mismas características y así poder tener una selección de componentes más objetiva y da la oportunidad de reflexionar y establecer que característica es más relevante que otra.

Tabla 1

Necesidades de los módulos de sensores inalámbricos

Orden	Necesidades
1	Conexión rápida
2	Fácil de usar
3	Uso de larga duración
4	Tamaño
5	Alta durabilidad
6	Costo
7	Distancia de transmisión de datos
8	Peso de datos
9	Cantidad de nodos
10	Precisión

El siguiente paso es detallar las métricas para lograr satisfacer las necesidades mencionadas en la Tabla 1, siendo evaluadas según la importancia, como se indica en la Tabla 2, de 1 a 5, donde 5 es la calificación más alta y 1 es la más baja.

Tabla 2

Métricas para los módulos de sensores inalámbricos

N.º de métrica	N.º de necesidad	Métrica	calif.	Unidades
1	3,4,6	Capacidad de la batería	5	mAh
2	1	Velocidad de comunicación	4	Kbps
3	4	Dimensiones de los módulos	3	m
4	7,8,10	Protocolo de comunicación	5	subj
5	2,6,9	Controlador	5	subj
6	6,10	Tipo de sensor	4	subj
7	5	Resistencia del material	3	kN

Definición del subsistema de los módulos de sensores inalámbricos

Cada módulo de sensor inalámbrico tiene la capacidad de transmitir la información correspondiente de los objetos acorde se vayan colocando y si dicho sensor tiene la capacidad de hacerlo, cada módulo cuenta con su controlador y su fuente de poder como se observa en la Figura 10.

Figura 10

Subsistema de módulo de sensor inalámbrico



Selección de componentes

En este punto se analiza y selecciona los componentes más relevantes de los módulos de sensores inalámbricos para llegar a satisfacer las necesidades y optimar recursos, logrando seleccionar el componente adecuado para el sistema según las características importantes de estos, dando calificaciones a dichas características según corresponda al diferenciar elementos

del mismo tipo y sumando la calificación de todas estas para llegar a un criterio de superioridad y poder elegirlo.

Protocolo de comunicación inalámbrica

En el mercado ecuatoriano existen diversas tarjetas embebidas y otros controladores que funcionan con protocolos de comunicación inalámbrica, específicos según el fabricante para los requisitos que requiera el consumidor por las características de estos, esas pueden ser por su topología, alcance, velocidad etc. Para el proyecto es necesario buscar un protocolo que sea en especial fácil de usar y con velocidad suficiente para mandar datos pequeños, para ello en la Tabla 3 se observa las principales características de los principales protocolos de comunicación inalámbrica disponibles.

Tabla 3

Protocolos de comunicación inalámbrica

Criterios	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee	LoraWan	SigFox
Velocidad máxima de datos	5Mbps	2Mbps	250Kps	50Kbps	100bps
Distancia máxima	hasta 100 metros	hasta 100 metros	hasta 70 metros	varios kilómetros	varios kilómetros
Consumo de energía	Moderado a alto	Bajo a moderado	Bajo	Muy bajo	Muy bajo
Frecuencia	2.4 GHz o 5 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz o 915 MHz	868 MHz o 915 MHz	868 MHz o 915 MHz
Inmunidad a interferencias	Muy susceptible	Muy susceptible	Buena inmunidad	Buena inmunidad	Buena inmunidad

Selección de protocolo de comunicación inalámbrica

En la Tabla 4 se detalla la selección del tipo de protocolo de comunicación inalámbrica según los criterios de selección.

Tabla 4

Evaluación de criterios de protocolo de comunicación inalámbrica

Criterios de selección	Peso	Wi-Fi		Bluetooth		ZigBee		LoraWan		SigFox	
		Calificación	Evaluación ponderada								
Velocidad máxima de datos	0,2	10	2	8	1,6	7	1,4	6	1,2	4	0,8
Distancia máxima	0,05	7	0,35	5	0,25	4	0,2	10	0,5	10	0,5
Consumo de energía	0,4	3	1,2	6	2,4	7	2,8	10	4	10	4
Frecuencia	0,05	7	0,35	7	0,35	8	0,4	8	0,4	8	0,4
Inmunidad a interferencias	0,3	5	1,5	5	1,5	9	2,7	9	2,7	9	2,7
Suma	1		5,4		6,1		7,5		8,8		8,4
¿Selección?			NO		NO		NO		SI		NO

Considerando los criterios de la Tabla 4, se elige el protocolo de comunicación inalámbrica LoraWan por su bajo consumo de energía y su buena inmunidad a interferencia ya que no se necesita comunicar datos pesados ni a mucha distancia, su logo se puede apreciar en la Figura 11.

Figura 11

Logo de LoRaWAN



Nota. Tomado desde (Alliance, 2023)

Controlador

Una vez seleccionado el protocolo de comunicación inalámbrica se puede seleccionar el controlador, este debe tener entradas y salidas tanto digitales y analógicas, que funcione adecuadamente con el protocolo, en la Tabla 5 se observa las características de los principales controladores disponibles en el mercado.

Tabla 5

Criterios de selección de controladores

Criterios	Heltec Lora 32 V3	Dragino LT-22222
Procesador	Dual-core ESP32 de 240MHz	ARM Cortex-M3 de 32 bits a 72MHz
Voltaje de alimentación	5v USB o 3.7v por batería	5-24Vdc
Entradas y salidas	36 pines (28 GPIO, UART, I2C, SPI, ADC, etc.)	2 entradas digitales-2 salidas digitales-2 salidas de relé- 2 x 0~20mA Entradas Análogas de Corriente- 2 x 0~30V Entradas Análogas de Voltaje
Costo	moderado	alto
Protocolos utilizados	LoraWan, WiFi, Bluetooth	LoraWAN
Pantalla	Oled de 0.96"	s/n
Forma de programar	Arduino IDE	Comandos AT
Tamaño	50.2*25.5*10.2mm	140x80x50 mm

Selección del controlador

En la Tabla 6 se mencionan las características comparadas de los controladores y cuál es la elección según los criterios de selección.

Tabla 6

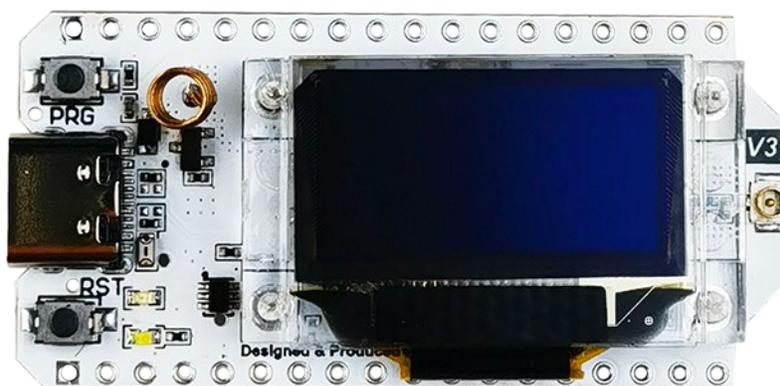
Evaluación de criterios del controlador

Criterios de selección	Peso	Heltec Lora 32 V3		Dragino LT-22222	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Procesador	0,1	9	0,9	7	0,7
Voltaje de alimentación	0,3	10	3	5	1,5
Entradas y salidas	0,1	9	0,9	8	0,8
Costo	0,3	8	2,4	5	1,5
Forma de programar	0,2	9	1,8	8	1,6
Suma	1		9		6,1
¿Selección?			SI		NO

Considerando los criterios de selección para los dos dispositivos controladores se determina que la tarjeta embebida Heltec Lora 32 V3 es la más adecuada para el proyecto debido a su bajo voltaje de alimentación y costo moderado con respecto al controlador Dragino LT-22222 ya que trabaja con voltaje alto considerando que es para un módulo inalámbrico. En la Figura 12 se observa la tarjeta Heltec Lora 32 V3.

Figura 12

Heltec WiFi LoRa 32 (V3)



Nota. Tomado desde (Heltec, 2023)

Sensor inductivo

Para los sensores se han identificado los diferentes tipos de clasificación que se puede realizar mediante sensores y una banda transportadora, estos son mediante características como el material, color y tamaño, para comenzar con el material se utiliza un sensor inductivo que capte la presencia de materiales metálicos ferrosos. En la Tabla 7 se observa los criterios de selección del sensor inductivo.

Tabla 7

Criterios de selección del sensor inductivo

Criterios	Sensor Inductivo NPN LJ18A3-8Z/BX	Sensor Inductivo NPN SN04-N
Distancia de detección	8 mm \pm 10%	4mm \pm 10%
Voltaje de alimentación	6- 36V	10-30Vdc
Corriente	300mA	300mA
Costo	moderado	moderado
Peso	80g	39g

Selección del sensor inductivo

En la Tabla 8 se mencionan las características comparadas de los sensores inductivos disponibles y cuál es la elección según los criterios de selección.

Tabla 8

Evaluación de criterios del sensor inductivo

Criterios de selección	Peso	Sensor Inductivo NPN LJ18A3-8Z/BX		Sensor Inductivo NPN SN04-N	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Distancia de detección	0,35	6	2,1	4	1,4
Voltaje de alimentación	0,3	8	2,4	6	1,8
Corriente	0,2	7	1,4	7	1,4
Costo	0,05	8	0,4	8	0,4
Peso	0,1	5	0,5	7	0,7
Suma	1		6,8		5,7
¿Selección?			SI		NO

Se selecciona mediante la evaluación de criterios al sensor inductivo NPN LJ18A3-8Z/BX ya que en comparación con el sensor SN04-N funciona con menor voltaje de alimentación y tiene más distancia de detección, en la Figura 13 se observa al sensor inductivo NPN LJ18A3-8Z/BX.

Figura 13

Sensor Inductivo NPN NO 8mm LJ18A3-8Z/BX 6- 36V



Nota. Tomado desde (NOVAtronic, 2023)

Sensor capacitivo

De la misma forma para el sensor capacitivo se utiliza la misma metodología, para las necesidades del proyecto se necesita una distancia de detección considerable y como es para un sensor inalámbrico debe ser de bajo voltaje de alimentación, en la Tabla 9 se detallan los criterios de selección para el sensor capacitivo.

Tabla 9*Criterios de selección del sensor capacitivo*

Criterios	Sensor capacitivo PNP LJC18A3-H-Z/BY	Sensor capacitivo LJC30A3-H-Z/BX (NPN-NO)
Rango de detección	1mm a 5mm	3mm a 10mm
Voltaje de alimentación	6- 36V DC	6 - 36V DC
Corriente	300mA	300mA
Costo	moderado	moderado
Peso	108g	167g

Selección del sensor capacitivo

Dadas las características de los sensores capacitivos disponibles en el mercado se procede a evaluar los criterios de selección en la Tabla 10.

Tabla 10*Evaluación de criterios del sensor capacitivo*

Criterios de selección	Peso	Sensor capacitivo PNP LJC18A3-H-Z/BY		Sensor capacitivo LJC30A3-H-Z/BX (NPN-NO)	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Rango de detección	0,4	7	2,8	9	3,6
Voltaje de alimentación	0,3	8	2,4	8	2,4
Corriente	0,1	8	0,8	8	0,8
Costo	0,05	6	0,3	6	0,3
Peso	0,15	8	1,2	6	0,9
Suma	1		7,5		8
¿Selección?			NO		SI

El sensor capacitivo LJC30A3-H-Z/BX gana la comparación entre los dos ya que tiene un mejor rango de detección. Este sensor se muestra en la Figura 14.

Figura 14*Sensor capacitivo LJC30A3-H-Z/BX**Nota. Tomado desde (Naylamp, 2023)***Sensor de color**

Para el sensor de color se utiliza un módulo integrado aprovechando la utilización del controlador Heltec LoRa 32 V3, para este módulo de sensor se detallan en la Tabla 11 las características principales de dos de los módulos disponible en el mercado para la respectiva comparación. Este sensor ayuda a la detección de los colores primarios RGB.

Tabla 11*Criterios de selección del sensor de color*

Criterios	Modulo Sensor de color RGB TCS34725	Sensor de Color TCS230 - TCS3200
Voltaje de alimentación	6- 36V DC	3V ~ 5V DC
Corriente	20mA	20mA
Costo	moderado	moderado
Tamaño	20 (mm) x20 (mm)	31,6 (mm) x24,4 (mm)

Selección del sensor de color

De la misma forma que las anteriores selecciones se comparan en la Tabla 12 los dos módulos de sensor de color disponibles.

Tabla 12

Evaluación de criterios del sensor de color

Criterios de selección	Peso	Módulo Sensor de color RGB TCS34725		Sensor de Color TCS230 - TCS3200	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Voltaje de alimentación	0,5	10	5	10	5
Distancia de detección	0,3	9	2,7	8	2,4
Costo	0,1	8	0,8	8	0,8
Tamaño	0,1	9	0,9	9	0,9
Suma	1		9,4		9,1
¿Selección?			SI		NO

Comparando los dos módulos para el sensor de color, se puede observar que son muy parecidos, con una ligera diferencia de las distancias en las que se utilizan que no es muy relevante para el proyecto y se puede elegir cualquiera, pero gracias a la metodología de criterios de evaluación se escoge el módulo sensor de color RGB TCS34725 que se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Módulo sensor de color RGB TCS34725



Nota. Tomado desde (GeekFactory, 2023)

Sensor de proximidad

Para la clasificación de objetos según el tamaño se necesita que una forma de detectar los objetos con precisión de tal manera que sea el material de este irrelevante. Para medir el tamaño de un objeto se puede hacer de varias formas, ya sea poniendo muchos sensores de forma vertical para detectar por altura, pero la mejor forma es colocar el objeto en vertical según la cara más importante y con el sensor infrarrojo medir el tiempo en el que pasa el objeto a través del sensor y así medir su tamaño. En la Tabla 13 se puede ver las características de dos de los sensores disponibles en el mercado.

Tabla 13

Criterios de selección del sensor de proximidad

Criterios	Sensor de Proximidad Infrarrojo E18 D80NK	Sensor infrarrojo HW201
Voltaje de alimentación	>5V DC	3.3V ~ 5V DC
Distancia de detección	3cm a 80cm	2 a 30 cm
Costo	moderado	Bajo
Tamaño	D18mm*L50mm	32 x 14 mm
Tipo de sensor	Industrial	Proyecto educativo

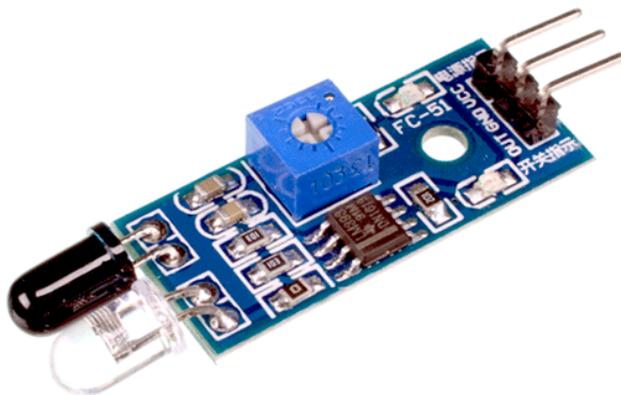
Selección del sensor de proximidad

De la misma forma que las anteriores selecciones se comparan en la Tabla 14 los dos tipos de sensores de proximidad disponibles y mediante la metodología de criterios de selección se obtiene la comparativa adecuada.

Tabla 14*Evaluación de criterios del sensor de proximidad*

Criterios de selección	Peso	Sensor de Proximidad Infrarrojo E18 D80NK		Sensor infrarrojo HW201	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Voltaje de alimentación	0,5	8	4	10	5
Distancia de detección	0,3	9	2,7	8	2,4
Costo	0,05	6	0,3	8	0,4
Tamaño	0,1	5	0,5	9	0,9
Tipo de sensor	0,05	8	0,4	6	0,3
Suma	1		7,9		9
¿Selección?			NO		SI

Mediante los criterios de selección de la evaluación de la Tabla 14. Para este proyecto se selecciona el sensor infrarrojo HW201 gracias a su cómodo voltaje de alimentación y su costo bajo. En la Figura 16 se puede observar al sensor de proximidad seleccionado.

Figura 16*Sensor de proximidad infrarrojo HW201*

Nota. Tomado desde (HI-FI, 2023)

Sensor de humedad y temperatura

Para el análisis pertinente de la comunicación de las tarjetas embebidas por el protocolo LoRa es necesario un sensor que varíe los datos detectados, ya que con los otros módulos de sensores inalámbricos se tiene datos fijos que son máximo 3 palabras, para lo cual es necesario la incorporación de un sensor que nos arroje datos numéricos que varíen en el tiempo, para lo cual se escoge las variables de temperatura y humedad ambiental, para el cual en la Tabla 15 se presenta los criterios de selección de sensores disponibles.

Tabla 15

Criterios de selección del sensor de humedad y temperatura

Criterios	Sensor de Humedad y Temperatura DHT22	Sensor de Humedad y Temperatura AM2305B
Voltaje de alimentación	3,3V ~ 5V DC	3,3V ~ 5V DC
Rango de temperatura	-40°C a 80 °C	-40~125 °C
Costo	bajo	alto
Precisión	±0,5 °C	±0,3°C

Selección del sensor de humedad y temperatura

De igual forma que las anteriores selecciones, es necesario la comparación como se puede observar en la Tabla 16, con los dos tipos de sensores de humedad y temperatura disponibles y mediante la metodología de criterios de selección se obtiene la comparativa adecuada.

Tabla 16

Evaluación de criterios del sensor de humedad y temperatura

Criterios de selección	Peso	Sensor de Humedad y Temperatura DHT22		Sensor de Humedad y Temperatura AM2305B	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Voltaje de alimentación	0,1	10	1	10	1
Costo	0,4	10	4	6	2,4
Precisión	0,3	7	2,1	9	2,7
Rango de temperatura	0,2	8	1,6	9	1,8
Suma	1		8,7		7,9
¿Selección?			SI		NO

Basado en los criterios de selección de la evaluación de la Tabla 16. Para esta aplicación se selecciona el sensor de Humedad y Temperatura DHT22 ya que en lo que más se diferencia es en el costo, ya que en otras características son muy parecidos. En la Figura 17 se puede observar al sensor de temperatura y humedad seleccionado.

Figura 17

Sensor de Humedad y Temperatura DHT22



Nota. Tomado desde (Robotics, 2023)

Diseño y construcción de los módulos de sensores

Cada uno de los módulos de sensores como ya se menciono debe tener su fuente de poder que va a ser una batería, a esta se conecta el controlador donde mediante acondicionamiento ya sea por software o eléctrico se conectara los sensores respectivos, para este tipo de módulos es importante tener un método de programación, encendido y reinicio al igual que una forma de cargar la batería sin tener que abrir el módulo.

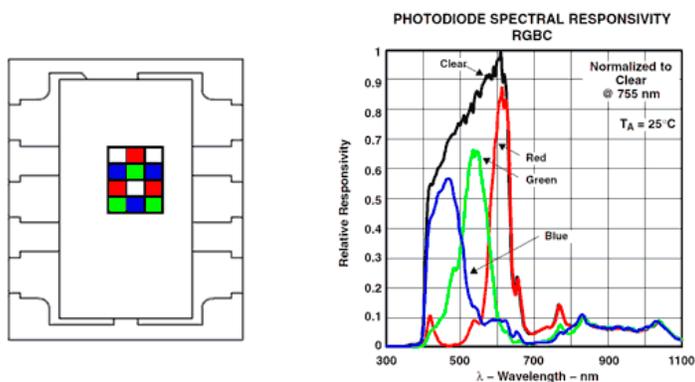
Ya que las tarjetas embebidas Heltec LoRa Wifi 32 V3 cuentan con puerto USB tipo C para reprogramar, para el método de encendido es factible utilizar un interruptor y para el reinicio de la misma tarjeta se puede utilizar el botón de la misma función, para cargar la batería se puede utilizar cargador externos lo cual hace un proceso demoroso e incómodo por lo que lo mejor es utilizar un módulo para cargar con un regulador incorporado para proteger el suministro de energía a la tarjeta embebida y a la vez procurar facilitar la vida útil de la batería.

Diseño del módulo del sensor de color

El sensor de color RGB TCS34725 tiene una gran variedad de configuraciones para los colores gracias a las posibles combinaciones de los colores básicos de la luz blanca, pero para mayor facilidad de detección se utiliza los tres básicos que son rojo, azul y verde, donde los rangos de longitud de onda vienen dados en una matriz de 3x4 donde se extrae las posibles variaciones del color como se puede observar en la Figura 18.

Figura 18

Respuesta espectral del fotodiodo



Nota. Tomado desde (Baker, 2018)

Donde se puede determinar que la longitud de onda para el color azul está dentro del rango de 400 a 500 nm, el color verde entre 500 y 572 nm y el color rojo entre 572 y 650 nm, donde para su programación los datos ya vienen incluidos en la librería Adafruit, donde mediante líneas de código se puede leer adecuadamente las señales del sensor.

Ya que el sensor puede funcionar con voltajes de 3,3v y 5v, facilita el uso correspondiente ya que se puede conectarlo directamente a la tarjeta embebida y está a la batería, para la selección de batería se debe tomar en cuenta el uso que va a tener el sensor en horas clases que puede ser de 2 a 4 horas al día, para ello se debe calcular la duración de la batería contemplando la carga que va a efectuar el sensor, tanto como la tarjeta embebida.

Datos:

Corriente consumida por el sensor = 20 mA

Corriente consumida por la tarjeta embebida + uso del protocolo Lora = 200mA

Tiempo de uso estimado = 4 horas

Para calcular la capacidad de la batería se debe tomar en cuenta el consumo de cada elemento y multiplicarlo por las horas de uso.

$$\text{Consumo de batería} = \text{Corriente consumida} * \text{tiempo} \quad (1)$$

$$\text{Consumo de batería} = 220\text{mA} * 4 \text{ horas}$$

$$\text{Consumo de batería} = 880 \text{ mAh}$$

Tabla 17

Capacidades comunes de baterías marca ANERA.

Capacidades de batería
200 mAh
350 MAh
500 mAh
850 mAh
1000 mAh
1200 mAh
1320 mAh
1750 mAh
2000 mAh

En la Tabla 17 se puede observar las capacidades comunes de baterías LiPo de la marca ANERA, donde se selecciona la de 1000 mAh ya que la inferior a esta no cumple con las características requeridas.

Se calcula la vida útil de un ciclo de carga de las baterías con la capacidad seleccionada y se verifica si cumple con lo requerido.

$$\text{Vida estimada de la batería en 1 ciclo de carga} = \frac{\text{Capacidad de la batería}}{\text{Consumo de la batería}} \quad (2)$$

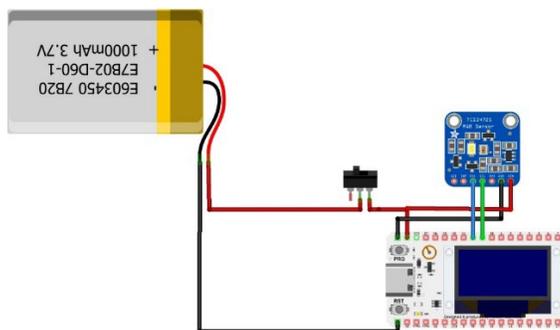
$$\text{Vida estimada de la batería en 1 ciclo de carga} = \frac{1000 \text{ mAh}}{220 \text{ mAh}}$$

$$\text{Vida estimada de la batería en 1 ciclo de carga} = 4 \text{ hrs } 32\text{min}$$

Una vez seleccionado todos los elementos del circuito electrónico del módulo sensor de color, se procede a diseñar el diagrama de conexión como se observa en la Figura 19.

Figura 19

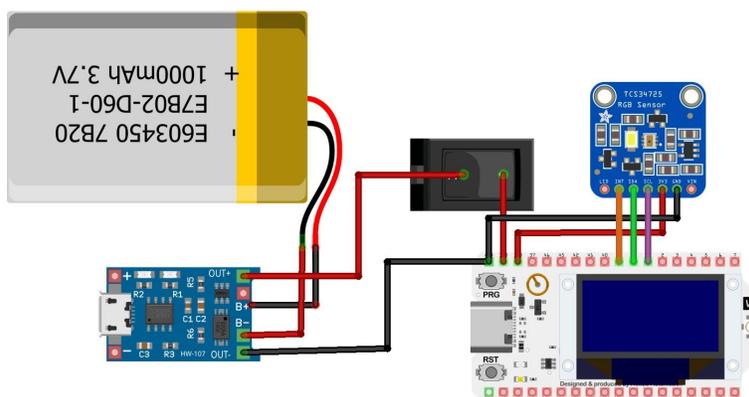
Diagrama de conexión inicial del sensor de color



Para poder hacer el sensor completamente autónomo, es necesario buscar una forma de cargar directamente en el módulo del sensor, para ello se utiliza el módulo TP4056 cargador de baterías de litio con protección incluida, este módulo cuenta con entrada USB para poder cargarlo y salidas con pines para cargar la batería y a la vez poder conectar la carga que va a hacer la tarjeta embebida, donde mediante un interruptor pasar del modo de carga de batería al encendido de la tarjeta, teniendo en cuenta que mientras se usa la tarjeta no puede cargarse el módulo.

Figura 20

Diagrama de conexión del módulo sensor de color



Para la carcasa del sensor se establece el material de PLA ya que se puede imprimir dentro de la caja los soportes respectivos para los diferentes elementos y a la vez brinda la facilidad de poder modificarlo o hacer alguna perforación, para el tamaño de esta hay que tomar en cuenta el elemento más grande que es la batería, dejando espacio suficiente para el cableado, el diseño en CAD se puede ver en la Figura 21 y la Figura 22 donde se detallan las partes del módulo.

Figura 21

Partes frontales del diseño CAD del sensor de color

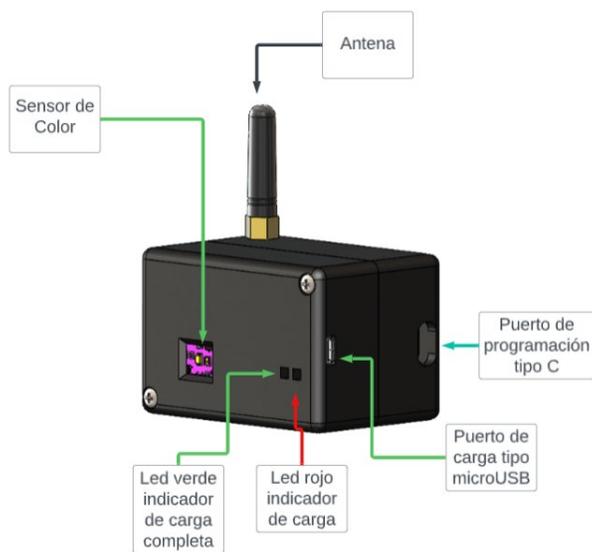
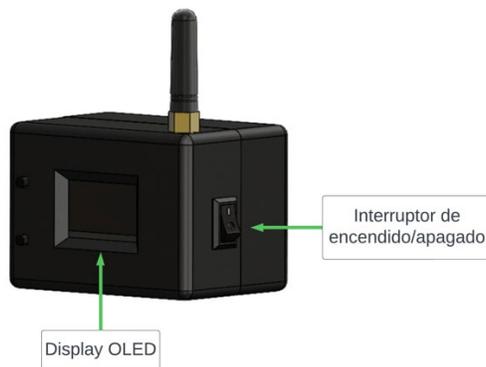


Figura 22

Partes posteriores del diseño CAD del sensor de color



Diseño del módulo del sensor de tamaño

Utilizando los sensores infrarrojos digitales, se puede configurar mediante programación para hacer que se puedan utilizar para clasificar piezas por tamaño, colocándolos uno encima del otro, y así si solo detecta el sensor más próximo a la base, se puede decir que la pieza es pequeña, en cambio sí detecta señal el sensor de en medio y el inferior, la pieza es mediana y a la vez si detectan todos los sensores, la pieza es grande. Ya que cada sensor consume 23mA hay que calcular la autonomía de la batería ya que va a diferir con el anterior sensor. Considerando de igual forma las 4 horas de clase estimadas que deben durar los módulos sin cargar.

Datos:

$$\text{Corriente consumida por el sensor} = 23 \text{ mA} * 3 = 69 \text{ mA}$$

$$\text{Corriente consumida por la tarjeta embebida} + \text{uso del protocolo Lora} = 200 \text{ mA}$$

$$\text{Tiempo de uso estimado} = 4 \text{ horas}$$

Para calcular la capacidad de la batería se debe tomar en cuenta el consumo de cada elemento y multiplicarlo por las horas de uso.

$$\text{Consumo de batería} = 269 \text{ mA} * 4 \text{ horas}$$

$$\text{Consumo de batería} = 1076 \text{ mAh}$$

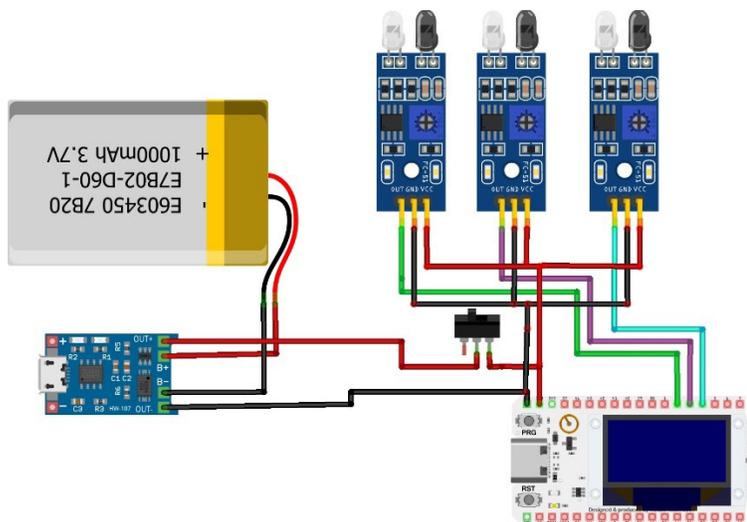
Se selecciona de la tabla 15 la batería superior a la del consumo calculado, siendo esta la 1200 mAh y se procede a calcular el tiempo nuevo de duración de la batería con lo seleccionado.

$$\text{Vida estimada de la batería en 1 ciclo de carga} = \frac{1200 \text{ mAh}}{269 \text{ mAh}}$$

$$\text{Vida estimada de la batería en 1 ciclo de carga} = 4 \text{ hrs } 27 \text{ min}$$

Figura 23

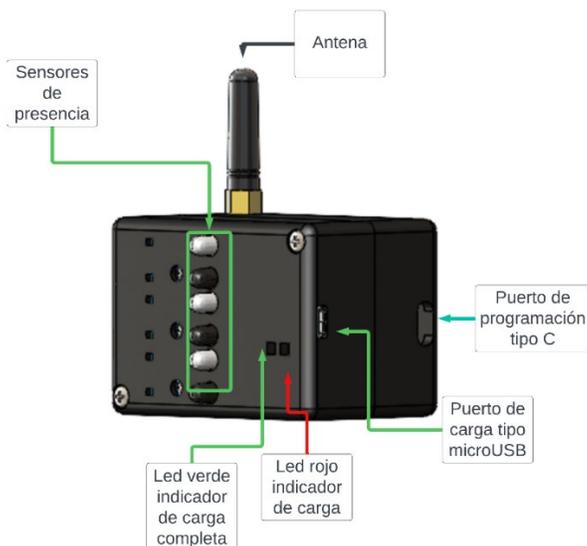
Diagrama de conexión del módulo sensor de tamaño



De igual forma que el sensor anterior, funciona con 3,3v, se puede conectarlos directo a la tarjeta embebida, donde la diferencia con la anterior es el tamaño, ya que necesita establecer una distancia correcta entre sensores ya que cada uno tiene un margen de 35° y para que estos no interfieran entre sí, se estima una distancia de 1cm entre estos.

Figura 24

Partes frontales del diseño CAD del sensor de tamaño



Diseño del módulo del sensor de material

A diferencia de los dos módulos anteriores, este módulo no puede utilizarse simplemente conectado a la batería de 3,7v con la que funciona la tarjeta embebida ya que los sensores inductivo y capacitivo trabajan con mínimo a 6v, para ello se requiere otro diseño para poder acondicionar las señales de los sensores y a la vez garantizar que la tarjeta embebida tenga el voltaje adecuado para su funcionamiento.

Para la selección de la batería se debe tomar en consideración la carga que efectúa cada sensor, que son de 300mA, al igual que la tarjeta embebida que es de 220mA con el uso del protocolo LoRa, para lo cual las mejores alternativas son conseguir una batería de 11.1v y utilizar un regulador de voltaje para la tarjeta embebida, o a su vez utilizar la batería de los anteriores sensores y utilizar un elevador de voltaje, pero esta forma no es muy recomendable por la caída de corriente, entonces es necesario utilizar un regulador de voltaje LM2596 para garantizar la entrada de la tarjeta embebida que puede ser alimentada con 5v o 3,3v por sus pines de entradas, y para acondicionar la señal de comunicación de los sensores se puede hacer un divisor de voltaje pero esto no es recomendable ya que si se daña alguna resistencia puede haber sobrevoltaje y quemar la tarjeta, la opción óptima es utilizar optoacopladores 4N35 y así garantizando que la entrada en los pines de la tarjeta sea la misma de la salida propia de 3,3v.

Datos:

*Corriente consumida por el sensor = 300mA * 2 = 600mA*

Corriente consumida por la tarjeta embebida + uso del protocolo Lora = 200mA

Tiempo de uso estimado = 2 horas

Para calcular la capacidad de la batería se debe tomar en cuenta el consumo de cada elemento y multiplicarlo por las horas de uso.

$$\text{Consumo de batería} = 800\text{mA} * 2 \text{ horas}$$

$$\text{Consumo de batería} = 1600 \text{ mAh}$$

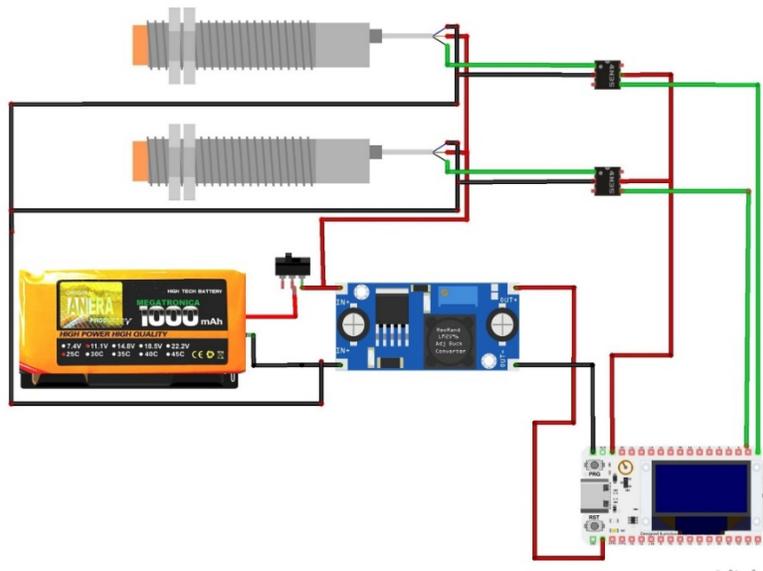
Se selecciona de la tabla 15 la batería superior a la del consumo calculado, siendo esta la 1750 mAh y se procede a calcular el tiempo nuevo de duración de la batería con lo seleccionado.

$$\text{Vida estimada de la batería en 1 ciclo de carga} = \frac{1750 \text{ mAh}}{800 \text{ mAh}}$$

$$\text{Vida estimada de la batería en 1 ciclo de carga} = 2 \text{ hrs } 11\text{min}$$

Figura 25

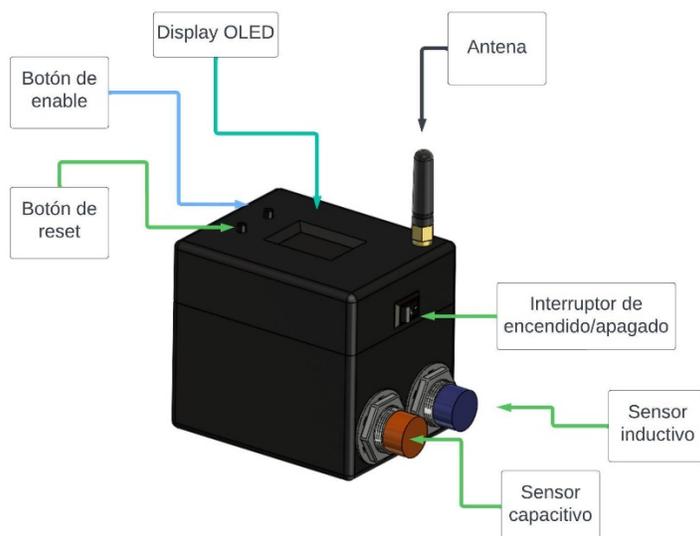
Diagrama de conexión del módulo sensor de material



De igual forma se considera el material de PLA para la construcción de la carcasa ya que sirve para fijar los elementos y es de fácil manejo, al mismo tiempo se puede imprimir del grosor que se adecue al uso del usuario.

Figura 26

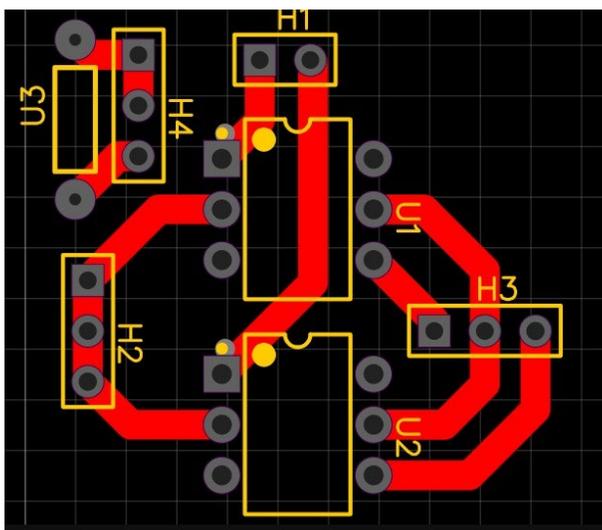
Partes frontales del diseño CAD del sensor de material



Ya que se utilizan sensores industriales que necesitan un acondicionamiento para utilizarlos, es necesario el diseño de una placa de circuito impreso para una mejor colocación de los elementos dentro de la estructura y así ahorrar espacio y cables.

Figura 27

Diseño de PCB para sensor de material



Diseño del módulo del sensor de temperatura y humedad

Para tener un sensor extra que nos entregue valores diversos, ya que los demás sensores utilizados son de señales binarias o palabras, se puede utilizar un módulo de sensor de temperatura y humedad DHT22, que es un sensor digital de fácil uso que puede trabajar con el voltaje proporcionado de la tarjeta de 3,3v. Para lo cual hay que calcular el consumo de la corriente para escoger la batería adecuada.

Datos:

Corriente consumida por el sensor = 2,5 mA

Corriente consumida por la tarjeta embebida + uso del protocolo Lora = 200mA

Tiempo de uso estimado = 4 horas

Para calcular la capacidad de la batería se debe tomar en cuenta el consumo de cada elemento y multiplicarlo por las horas de uso.

$$\text{Consumo de batería} = 202,5\text{mA} * 4 \text{ horas}$$

$$\text{Consumo de batería} = 810 \text{ mAh}$$

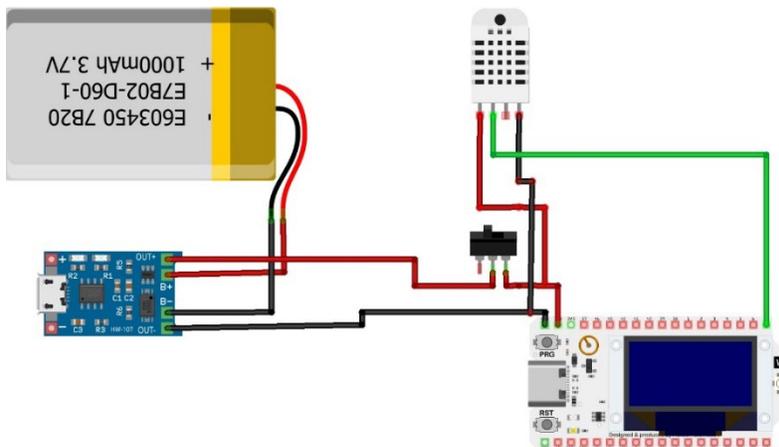
Se selecciona de la tabla 15 la batería superior a la del consumo calculado, siendo esta la 1000 mAh y se procede a calcular el tiempo nuevo de duración de la batería con lo seleccionado.

$$\text{Vida estimada de la batería en 1 ciclo de carga} = \frac{1000 \text{ mAh}}{202,5 \text{ mAh}}$$

$$\text{Vida estimada de la batería en 1 ciclo de carga} = 4 \text{ hrs } 56\text{min}$$

Figura 28

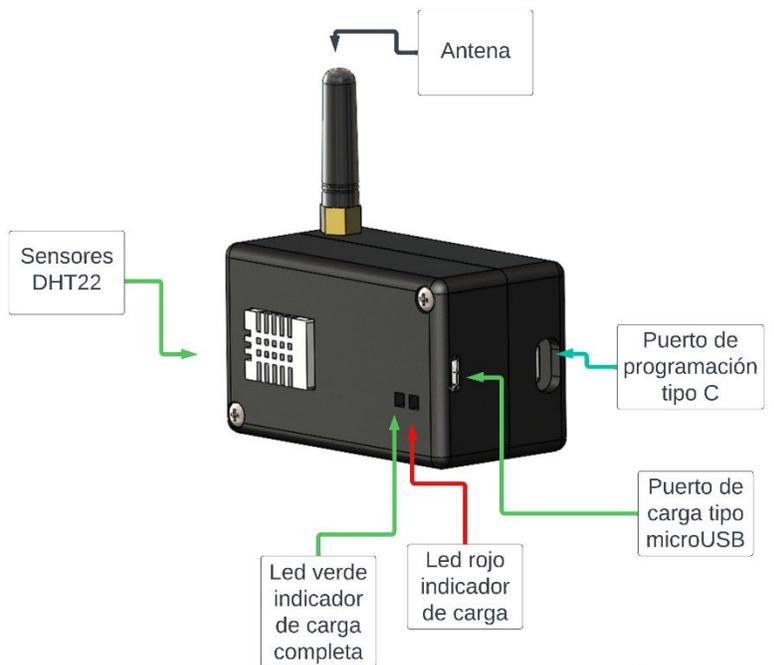
Diagrama de conexión del módulo sensor de humedad y temperatura



Para el diseño se toma en consideración el diseño del sensor de color con la diferencia que este sensor debe estar expuesto para una mejor recepción de señales, utilizando el mismo material.

Figura 29

Partes frontales del diseño CAD del sensor de humedad y temperatura



Definición del subsistema de la estación del proceso secuencial

Para la utilización de casi todos los sensores dentro del proceso secuencial, se define el proceso de clasificación, donde los objetos serán dispensados a una banda transportadora, donde según la señal recibida que fue detectada por los sensores, el objeto será clasificado mediante un actuador específico a una rampa, donde el objeto permanecerá hasta que lo quiten de estas.

Para el subsistema de la estación del proceso secuencial se ve la necesidad de acoplar una banda transportadora con rampas y actuadores para poder clasificar objetos según las características de los sensores y como estos se pueden combinar, para esta estación tendrá un dispensador de objetos, el cual coloca uno de estos en la banda transportadora para que pase a través de los sensores para que estos comanden las respectivas órdenes para que se activen los actuadores, para esta estación se necesita seleccionar el material.

Material de la estructura de la estación.

En el mercado hay una gran variedad de materiales para hacer estructuras, donde los más comunes para las máquinas son de diferentes aleaciones de acero inoxidable o aluminio, para lo cual mediante la misma metodología en la Tabla 18 se compara las características de estos.

Tabla 18

Criterios de selección del material

Criterios	Aluminio	Acero Inoxidable
Resistencia	Bajo grado de resistencia	Elevado grado de resistencia
Soldadura	Material suave, más difícil para soldar	Material duro, fácil de soldar
Densidad	2700 kg/m ³	7850 kg/m ³
Magnético	No	Si
Ductilidad	Es un material más suave, fácil de cortar y fácil de moldear.	Es un material duro, por lo que es un poco más trabajo de moldear.
Costo	Económico	Elevado
Corrosión	Las aleaciones del aluminio hacen que sea un material no corrosivo	El acero inoxidable no es corrosivo

Selección del material de la estructura

Al analizar las características ya antes mencionadas en la Tabla 18, se califica las características similares mediante los criterios de selección en la Tabla 19 para proceder a seleccionar el material más adecuado.

Tabla 19

Evaluación de criterios del material

Criterios de selección	Peso	Aluminio		Acero Inoxidable	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Resistencia	0,45	8	3,6	9	4,05
Densidad	0,25	8	2	8	2
Ductilidad	0,15	10	1,5	8	1,2
Costo	0,15	10	1,5	5	0,75
Suma	1		8,6		8
¿Selección?			SI		NO

Se considera el aluminio ya que presta una buena resistencia, gran ductilidad y bajo costo en comparativa al acero inoxidable.

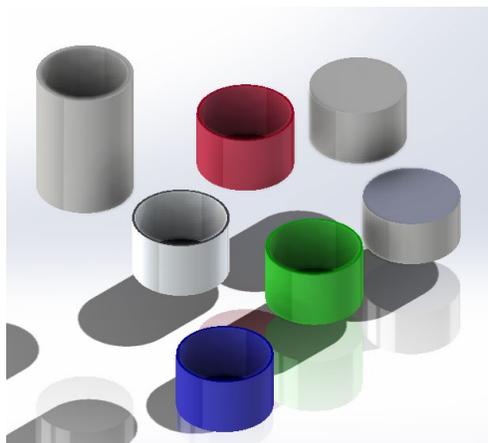
Diseño de la banda transportadora

Para garantizar el correcto funcionamiento de la banda transportadora y sus respectivos instrumentos, es necesario fundamentar la estructura con cálculos mecánicos considerando las cargas y esfuerzos que cada parte efectúa, para el diseño de la estructura de la banda transportadora es necesario un diseño modular, para procurar que en un futuro, ya sea por desgaste por uso o el propio material, pueda reemplazarse cada parte por separado, por ello se considera el diseño de las diferentes piezas para poder ser mecanizadas o a su vez utilizar perfiles disponibles en el mercado y poder construir cada parte por separado y después unirlos por módulos.

Los objetos para clasificados, al igual que las estaciones existentes en el laboratorio de Mecatrónica de la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga, son de 40 mm de diámetro exterior donde la altura es de diferente tamaño, como se observa en la Figura 30 para poder ser clasificados por el módulo de sensores infrarrojos para clasificar por tamaño ya que son los únicos sensores donde hay que tener en cuenta la altura de las piezas.

Figura 30

Objetos de clasificación



Para permitir el correcto funcionamiento de la banda transportadora para que las piezas a ser transportadas no se choquen en los filos se considera una tolerancia de 5 mm por lado para que la pieza pueda desplazarse.

Dato:

$$tol = 5mm$$

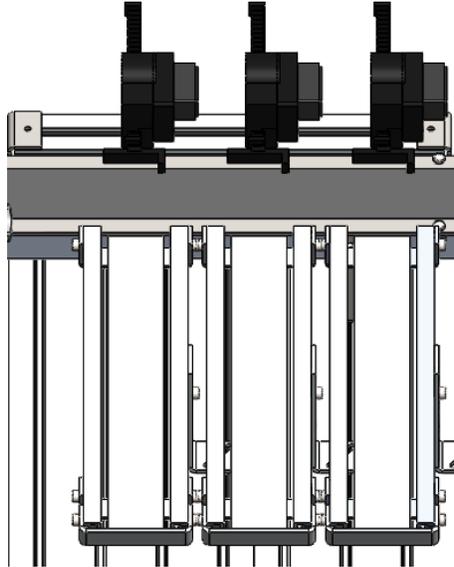
$$\text{Ancho de banda} = \text{diametro de la pieza} + 2 * tol \quad (3)$$

$$\text{Ancho de banda} = 40mm + 2 * 5mm$$

$$\text{Ancho de banda} = 50mm$$

Para el largo de la banda transportadora hay que considerar todas las etapas que constituye el proyecto, desde la parte donde van a colocarse los diferentes módulos de los sensores, los actuadores y las respectivas rampas donde van a almacenarse las piezas clasificadas, considerando un espacio para que los actuadores funcionen correctamente.

Para la etapa de los actuadores y rampas se debe considerar el tamaño de los actuadores que en este caso son tres, dejando un espacio para evitar alguna colisión, el tamaño de las rampas al igual que las bandas son de 50mm más los bordes de 15mm dando un tamaño total de 80mm por rampa-actuador, donde entre ellos exista una separación de 20mm, por lo tanto, la etapa de actuadores-rampas tiene una distancia de 280mm como se observa en la Figura 31.

Figura 31*Etapa actuadores-rampas*

Para la etapa de los sensores se considera dos veces el espacio promedio de los módulos de sensores, para considerar un espacio adecuado para el procesamiento de la información y la correspondiente activación de los sensores, para ello se considera un espacio de 200mm para la colocación de los sensores y el espacio mencionado, para el largo de la banda transportadora total se considera las dos etapas que esta abarca como se puede apreciar a continuación.

Datos:

Etapa de actuadores_rampas = 280mm

Etapa de sensores = 210mm

$$Largo\ de\ la\ banda = etapa\ de\ actuadores_rampas + etapa\ de\ sensores \quad (4)$$

$$Largo\ de\ la\ banda = 280mm + 210mm$$

Largo de la banda = 490mm

Hay que considerar el inicio y el fin de la banda transportadora, para ello se debe tomar el radio de los rodillos que es de 20mm ya que en esta distancia no se va a transportar nada, pero se debe tener en cuenta para el tamaño de la mesa.

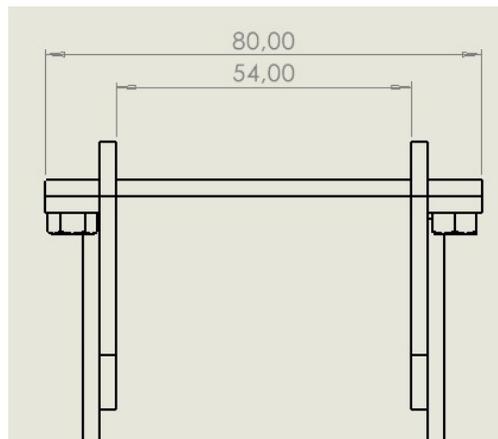
Largo de la banda = 530mm

Cálculo del soporte de la banda

Ya que las piezas a ser transportadas tienen un peso despreciable para el diseño del soporte de la banda se debe considerar la fuerza promedio que un hombre puede aplicar en su mano, que es de 27,5 Kgf que equivale a 269,5 newtons según (Lázaro y otros, 2008), así mismo como la sección transversal del soporte como se observa en la Figura 32. Donde se debe considerar el punto de mayor flexión posible que es en el centro del soporte.

Figura 32

Perfil de la estructura del soporte de la banda



Datos:

$$F = 269.5 \text{ N}$$

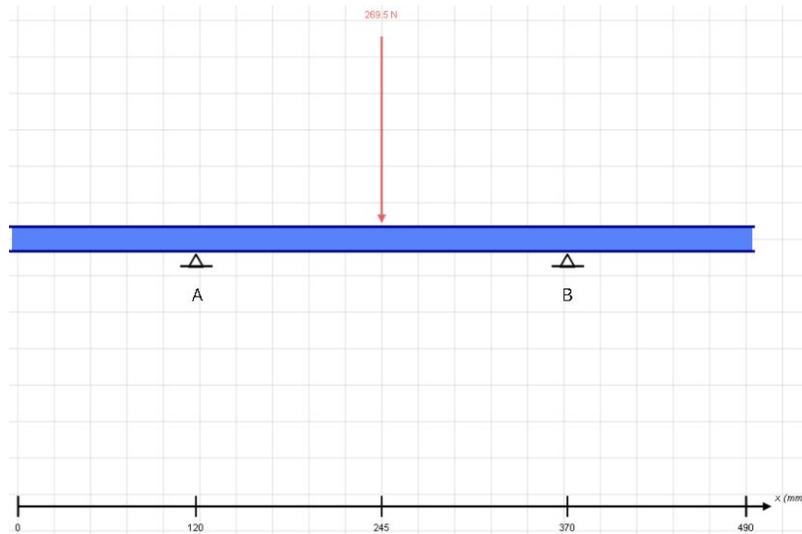
$$g = 9.81 \text{ m/s}$$

$$d = 490\text{mm}$$

$$\text{Aluminio 6061 - T4 } S_y = 241 \text{ MPa}$$

Figura 33

Diagrama de cargas del soporte de la banda



Cálculo de momentos

$$M_A = M_B$$

$$M_A = F * \frac{d_{(A-B)}}{2} \quad (5)$$

$$M_A = 269.5 \text{ N} * 0.125\text{m}$$

$$M_A = 33.69\text{N} \cdot \text{m}$$

Para el cálculo del esfuerzo máximo, es necesario determinar el momento de inercia de la figura compuesta, separando la figura por secciones y mediante la ecuación 6 calcular el momento de inercia de una figura rectangular.

$$\bar{I}_1 = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (6)$$

Se procede a determinar la inercia por separado de cada sección:

$$Area = b \cdot h \quad (7)$$

$$Area_A = 3mm \cdot 34mm$$

$$Area_A = 102mm^2$$

$$Area_B = 240mm^2$$

$$Area_C = 102mm^2$$

$$\sum Areas = 444mm^2$$

Para el centro de masa de la figura completa:

$$\bar{y} = \frac{\sum A \cdot y}{\sum A} \quad (8)$$

$$\bar{y} = \frac{1734mm^3 + 8520mm^3 + 1734mm^3}{444mm^2}$$

$$\bar{y} = 27mm$$

Se saca el momento de inercia de cada figura teniendo en cuenta la distancia al centro de masa:

$$I = \bar{I} + A \cdot d^2 \quad (9)$$

$$\sum I = \bar{I}_A + A_A \cdot d_A^2 + \bar{I}_B + A_B \cdot d_B^2 + \bar{I}_C + A_C \cdot d_C^2$$

$$\sum I = 9826 \text{ mm}^4 + 102\text{mm}^2 \cdot 10200\text{mm}^2 + 180 \text{ mm}^4 + 80\text{mm}^2 * 2564.875\text{mm}^2 + 9826 \text{ mm}^4 \\ + 102\text{mm}^2 * 10200\text{mm}^2$$

$$\sum I = 20026 \text{ mm}^4 + 17520 \text{ mm}^4 + 20026 \text{ mm}^4$$

$$\sum I = 57572 \text{ mm}^4$$

Para determinar el máximo esfuerzo:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{M \cdot c}{I} \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{33,69\text{N} \cdot \text{m} * 10 \cdot 10^{-3}\text{m}}{57572 \text{ mm}^4 \frac{1 * 10^{-12}\text{m}^4}{1\text{mm}^4}}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 5,85\text{MPa}$$

Para el diseño eficiente del soporte de la banda se elige un factor de seguridad de 2 como lo recomienda (Mott, 2006) para el diseño de estructuras estáticas de máquinas bajo cargas dinámicas.

$$\sigma = \frac{S_y}{N} \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{241 \text{ MPa}}{2}$$

$$\sigma = 120,5\text{MPa}$$

$$\sigma \geq \sigma_d$$

$$120,5\text{MPa} \geq 5,85\text{MPa}$$

Ya que la resistencia a la fluencia del material considerando el factor de seguridad es mayor al esfuerzo calculado se comprueba que el diseño es correcto.

Diseño de eje motriz de la banda transportadora

La banda transportadora debe contar con dos ejes iguales, a los extremos, lo cuales efectuarán el movimiento rotatorio, uno para acoplarse al eje de motor y uno de movimiento libre, donde el eje que está acoplado al motor es donde más esfuerzos va a efectuar.

De la misma forma que el diseño del cálculo del soporte se parte de la fuerza que un hombre adulto puede aplicar en su mano ya que el peso de las piezas es despreciable y se corre el riesgo de que pueda ocurrir un incidente y alguien se apoye en los extremos de la banda.

Para el cálculo correspondiente al diseño del eje motriz, se considera una carga distribuida al largo del eje:

$$W = \frac{F}{L} \quad (12)$$

$$W = \frac{269,5 \text{ N}}{0,050 \text{ m}}$$

$$W = 5390 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Para el cálculo del momento máximo:

$$M_A = 269,5 \text{ N} * \frac{0,005 \text{ m}}{2}$$

$$M_A = 0,672 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Esfuerzo máximo:

$$I = \frac{\pi \cdot R^4}{4} \quad (13)$$

$$I = \frac{\pi * 0,002^4}{4} = 1,256 * 10^{-11} m^4$$

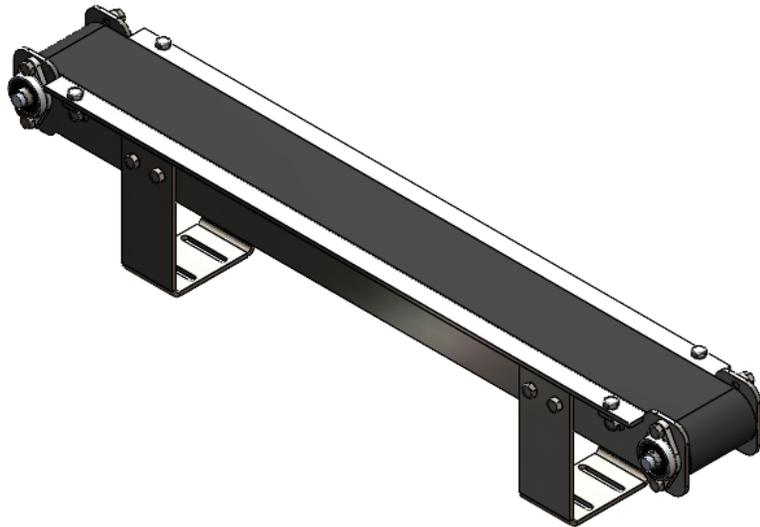
$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{0,672 N \cdot m * 0,002m}{1,256 \cdot 10^{-11} m^4}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 107 MPa$$

Para la selecci3n del eje se contempla que el material tenga una resistencia a la fluencia mayor a 107 MPa, con lo cual se elige un eje de acero cuya resistencia $S_y = 320 MPa$. En la Figura 34 se observa el dise1o CAD de la banda transportadora.

Figura 34

Dise1o CAD de la banda transportadora

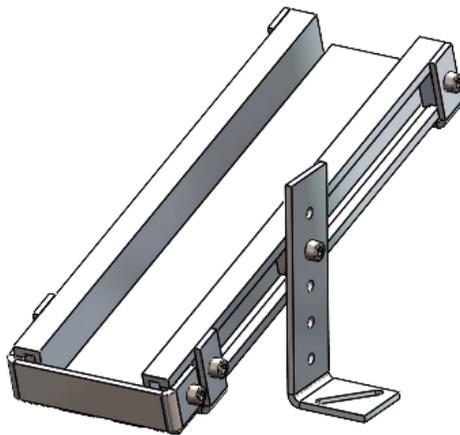


Diseño de rampas de salida y entrada

Se debe contar con tres rampas de salida para que por lo menos se pueda clasificar 3 colores diferentes y una a la entrada para dispensar las piezas automáticamente, para ello y para cumplir la modularidad establecida, se procede a armarlos con perfiles de aluminio 6061-T4 en el mercado y conociendo el tamaño de la pieza de 40mm, al igual que la banda, se utiliza las tolerancias ya antes previstas, para poder garantizar el correcto desplazamiento de las piezas y una inclinación de 140° para garantizar el movimiento, como se observa en la Figura 35.

Figura 35

Diseño CAD de las rampas

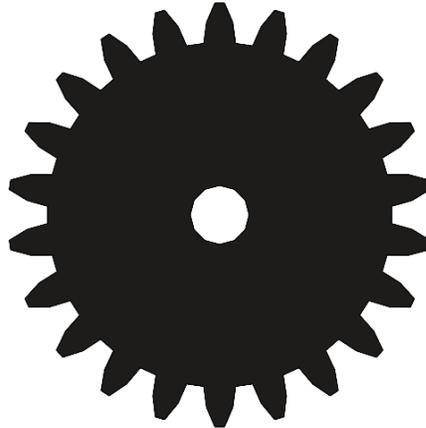


Diseño del sistema de dispensación de piezas

Las piezas necesitan desplazarse de manera individual y alineadas a la parte de sensores, para ello se necesita establecer un sistema que dispense las piezas una por una, garantizando que no exista colisiones, ni múltiples piezas en la banda a la vez, para ello utilizando el mecanismo de engrane cremallera para convertir el desplazamiento angular de un servomotor de 180° a movimiento lineal.

Figura 36

Engrane recto del dispensador



Datos:

módulo = 1,5mm

numero de dientes = 22

Cálculo del diámetro primitivo

$$\text{diámetro primitivo} = \text{módulo} * \text{numero de diente} \quad (14)$$

$$\text{diámetro primitivo} = 1,5\text{mm} * 22$$

$$\text{diámetro primitivo} = 33\text{mm}$$

Cálculo del diámetro exterior

$$\text{diámetro exterior} = \text{módulo} * (\text{numero de dientes} + 2) \quad (15)$$

$$\text{diámetro exterior} = 1,5\text{mm} * (22 + 2)$$

$$\text{diámetro exterior} = 36\text{mm}$$

Cálculo de la altura del diente

$$\text{altura del diente} = \text{módulo} * 2,167 \quad (16)$$

$$\text{altura del diente} = 1,5\text{mm} * 2,167$$

$$\text{altura del diente} = 3,2505\text{mm}$$

Cálculo del diámetro interior

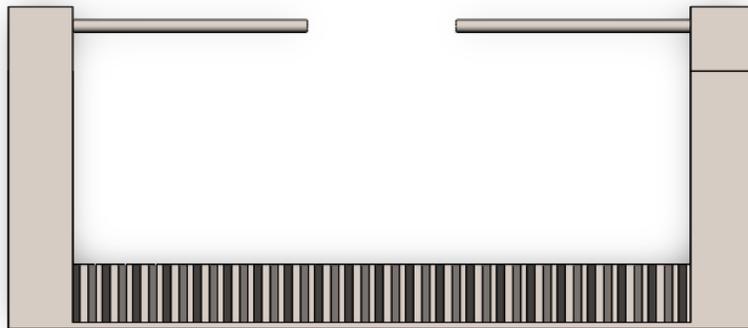
$$\text{diámetro interior} = \text{diámetro exterior} - (2 * \text{altura del diente}) \quad (17)$$

$$\text{diámetro interior} = 36\text{mm} - (2 * 3,2505)$$

$$\text{diámetro interior} = 29,499\text{mm}$$

Figura 37

Cremallera métrica del dispensador



Datos:

$$\text{módulo} = 1,5\text{mm}$$

$$\text{largo de la cremallera} = 96\text{mm}$$

recorrido del dispensador = 26mm

Cálculo del paso

$$paso = \text{módulo} * 3,1416 \quad (18)$$

$$paso = 1.5mm * 3,1416$$

$$paso = 4,71mm$$

Cálculo de la altura del diente total

$$altura \text{ del diente total} = 1,5mm * 2,167$$

$$altura \text{ del diente total} = 3,25mm$$

Cálculo del espesor del diente

$$espesor \text{ del diente} = 0,5 * paso \quad (19)$$

$$espesor \text{ del diente} = 0,5 * 4,71$$

$$espesor \text{ del diente} = 2,35mm$$

Cálculo del espacio entre dientes

$$espacio \text{ entre dientes} = 0,5 * paso \quad (20)$$

$$espacio \text{ entre dientes} = 0,5 * 4,71$$

$$espacio \text{ entre dientes} = 2,35mm$$

Cálculo del número de dientes

$$\text{número de dientes} = \frac{\text{largo de la cremallera}}{\text{paso}} \quad (21)$$

$$\text{número de dientes} = \frac{\text{largo de la cremallera}}{\text{paso}}$$

$$\text{número de dientes} = \frac{96\text{mm}}{4,71}$$

$$\text{número de dientes} = 20,38 \approx 20$$

Cálculo del desplazamiento angular del engrane recto

$$\text{desplazamiento angular} = \frac{\text{recorrido del dispensador}}{\frac{\text{diámetro primitivo}}{2}} * \frac{180^\circ}{\pi} \quad (22)$$

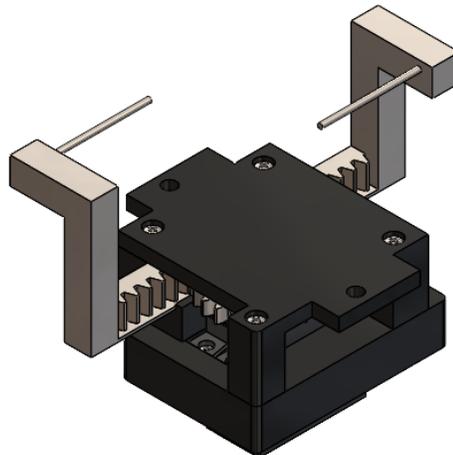
$$\text{desplazamiento angular} = \frac{26\text{mm}}{16,5\text{mm}} * \frac{180^\circ}{\pi}$$

$$\text{desplazamiento angular} = 90,29^\circ \approx 90^\circ$$

Para poder dispensar las piezas la cremallera deberá desplazarse 26mm, lo que corresponde al desplazamiento angular del engrane recto en 90°, siendo suficiente para liberar las piezas del dispensador alimentando a la banda uno por una.

Figura 38

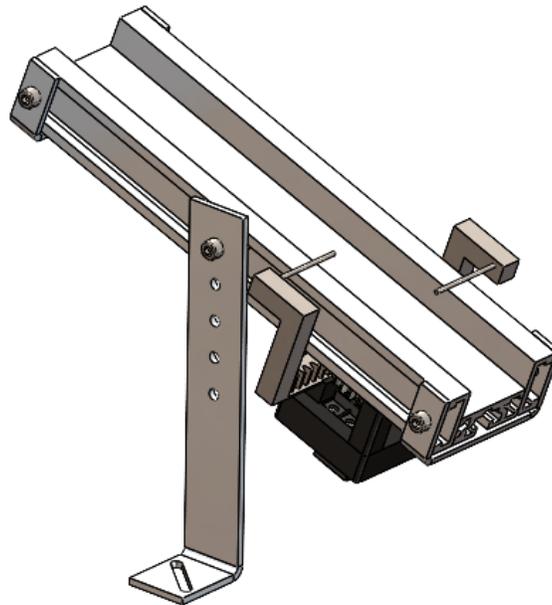
Diseño CAD del mecanismo de engranaje-cremallera para el dispensador



Para la altura a la cual colocar el dispensador, se tiene en cuenta la altura de la banda para que caiga la pieza directo a esta.

Figura 39

Diseño CAD del mecanismo de engranaje-cremallera colocado en la rampa de entrada

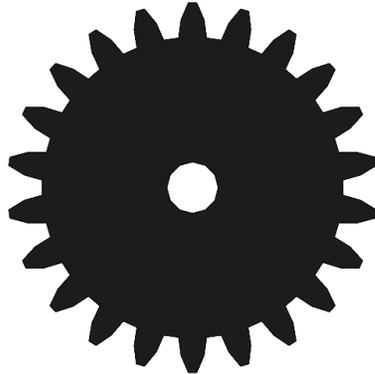


Diseño de actuadores

Al igual que el dispensador, se necesita transformar el desplazamiento angular a lineal y para ello se emplea el mismo mecanismo engrane cremallera para que la cremallera haga el papel de pistón y empuje a las piezas fuera de la banda hacia su respectiva rampa. Para el material y por su diseño se emplea PLA gracias a la posibilidad de imprimir las piezas y carcasas con precisión y de manera repetitiva ya que se necesita tres, un actuador para cada rampa, ya que el peso de las piezas es despreciable, el único parámetro en tomar en cuenta es el tamaño de la cremallera y su relación con el engrane ya que los servomotores tienen un giro total de 180° y debe contemplar el ancho de la estructura de la banda.

Figura 40

Engrane recto del actuador lineal



Datos:

módulo = 1,5mm

numero de dientes = 22

Cálculo del diámetro primitivo

$$\text{diámetro primitivo} = 1,5\text{mm} * 22$$

$$\text{diámetro primitivo} = 33\text{mm}$$

Cálculo del diámetro exterior

$$\text{diámetro exterior} = 1,5\text{mm} * (22 + 2)$$

$$\text{diámetro exterior} = 36\text{mm}$$

Cálculo de la altura del diente

$$\text{altura del diente} = 1,5\text{mm} * 2.167$$

$$\text{altura del diente} = 3,2505\text{mm}$$

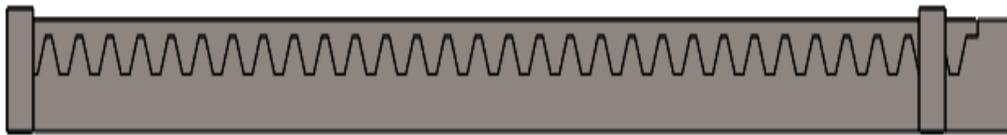
Cálculo del diámetro interior

$$\text{diámetro interior} = 36\text{mm} - (2 * 3,2505)$$

$$\text{diámetro interior} = 29,499\text{mm}$$

Figura 41

Cremallera métrica del actuador lineal



Datos:

$$\text{módulo} = 1,5\text{mm}$$

$$\text{largo de la cremallera} = 145\text{mm}$$

$$\text{recorrido del actuador} = 51\text{mm}$$

Cálculo del paso

$$\text{paso} = 1,5\text{mm} * 3,1416$$

$$\text{paso} = 4,71\text{mm}$$

Cálculo de la altura del diente total

$$\text{altura del diente total} = 1,5\text{mm} * 2,167$$

$$\text{altura del diente total} = 3,25\text{mm}$$

Cálculo del espesor del diente

$$\text{espesor del diente} = 0,5 * 4,71$$

$$\text{espesor del diente} = 2,35\text{mm}$$

Cálculo del espacio entre dientes

$$\text{espacio entre dientes} = 0,5 * 4,71$$

$$\text{espacio entre dientes} = 2,35\text{mm}$$

Cálculo del número de dientes

$$\text{número de dientes} = \frac{\text{largo de la cremallera}}{\text{paso}} \quad (23)$$

$$\text{número de dientes} = \frac{145\text{mm}}{4,71}$$

$$\text{número de dientes} = 30,78 \approx 31$$

Cálculo del desplazamiento angular del engrane recto

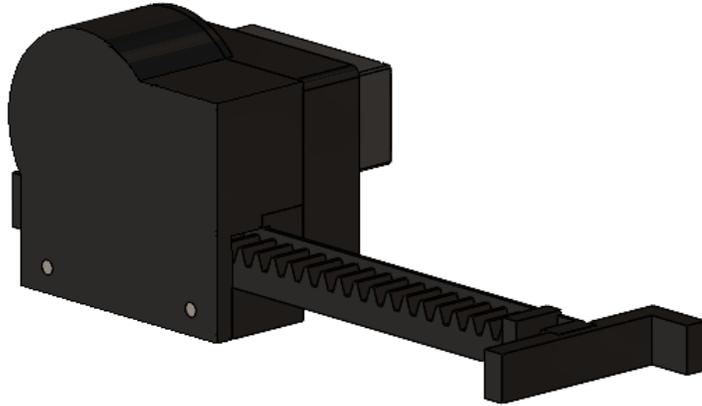
$$\text{desplazamiento angular} = \frac{51\text{mm}}{16,5\text{mm}} * \frac{180^\circ}{\pi}$$

$$\text{desplazamiento angular} = 177,09^\circ \approx 177^\circ$$

Para poder empujar las piezas de 40mm de diámetro sobre la banda que tiene un ancho de 50mm, la cremallera deberá desplazarse 51mm, lo que corresponde al desplazamiento angular del engrane recto en 177° , suficiente para que la pieza caiga en la rampa de salida.

Figura 42

Diseño CAD del mecanismo de engranaje-cremallera para los actuadores

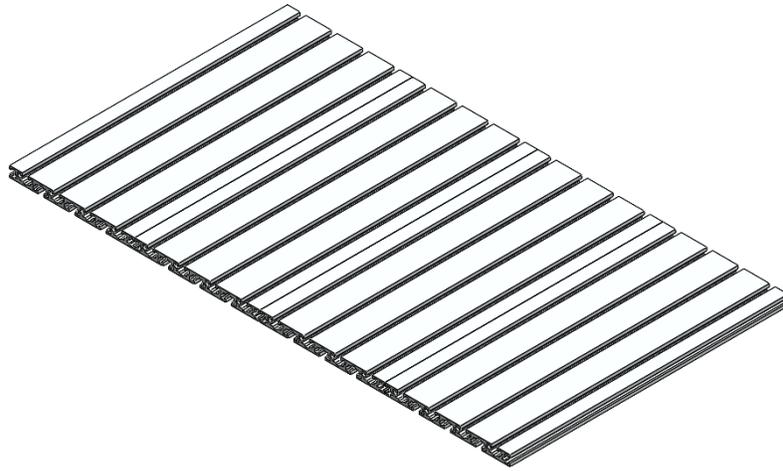
***Diseño de base para la estación de clasificación***

Siguiendo la arquitectura modular que se quiere establecer en la estación, con perfiles con la capacidad de encajar mediante ranuras y tuercas entre la base y los respectivos elementos de la estación, por lo que se requiere una base ranurada que permita el paso de tuercas tipo T de 25mm M5, permitiendo un diseño flexible e intercambiable.

Para ello en el mercado existe perfiles ranurados de 180x400mm por lo cual se necesita unirlos para las necesidades actuales, ya que deben abarcar todos los componentes que tiene la estación que tienen un largo de 720mm y de ancho 400mm por lo que se requiere de 4 perfiles iguales para la base.

Figura 43

CAD del perfil ranurado para tuercas tipo T



Ensamble de parte mecánica de la estación de clasificación.

Una vez diseñadas todos los elementos mecánicos de la estación de clasificación se puede ensamblar en la base como se puede observar en la Figura 44.

Figura 44

Diseño CAD de la estación de clasificación



Pero para mayor facilidad de utilización se utiliza una mesa para empotrar la base a esta, teniendo en cuenta la altura de las estaciones disponibles en el laboratorio de mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas sede Latacunga que son de 765mm, para ello se utiliza tubo cuadrado de 20x20x1, para asegurar el diseño se debe considerar una carga distribuida que es de toda la base de la estación en la parte más larga de la mesa, que son aproximadamente 10 Kg sumado a lo antes establecido.

Datos:

$$F = 369,5N$$

$$I = 0,5cm^4 * \frac{1 \cdot 10^{-8}m^4}{1cm^4} = 5 * 10^{-9}m^4$$

Para el cálculo del momento máximo:

$$M_A = 369,5N * \frac{0,720m}{2}$$

$$M_A = 133,02 N \cdot m$$

Esfuerzo máximo:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{133,02 N \cdot m * 0,01m}{5 * 10^{-9}m^4}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 266 MPa$$

El esfuerzo de diseño es menor a la resistencia a la tracción del acero SAE 1008 que es de 285 MPa, así que se puede determinar que el diseño es correcto.

Diseño del sistema eléctrico de la estación de clasificación

Para el sistema propuesto es necesario contar con una fuente de energía para la activación y el control de la estación de clasificación, donde para el accionamiento de la banda

transportadora, actuadores y dispensador se debe utilizar energía eléctrica para interconectar con los controladores e instrumentos.

Para la selección del motor para mover la banda transportadora, hay que considerar que para esta aplicación no se necesita un motor rápido sino con un torque medio para acoplarlo al eje de la banda y esta se pueda mover sin inconvenientes.

Datos:

$$Q = \text{Piezas clasificadas} = 3/\text{min} = 240/\text{hora}$$

$$L = \text{longitud de banda} = 490\text{mm} = 0,49\text{m}$$

$$r_m = \text{radio eje motriz} = 2\text{mm} = 0,002\text{m}$$

Para el cálculo de la velocidad:

$$V = Q \cdot L \quad (24)$$

$$V = 240 \frac{\text{piezas}}{\text{hora}} \cdot 0,49\text{m}$$

$$V = 117,6 \frac{\text{m}}{\text{hora}} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{3600\text{s}}$$

$$V = 0,0327 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La velocidad angular se calcula de la siguiente manera:

$$\omega = \frac{V}{r_m} \quad (25)$$

$$\omega = \frac{0,0327 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,002\text{m}}$$

$$\omega = 16,35 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 156,13 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

Este motor recibirá una alimentación de 12 VDC de la fuente de poder, ya que los motores comunes utilizan este voltaje, donde para el fácil control y según las necesidades calculadas, se utiliza el motor NEMA 17hs19-2004s, con características descritas en la Tabla 20.

Tabla 20

Características NEMA 17hs19-2004s

Características	Datos
Modelo	NEMA 17hs19-2004s
Voltaje de alimentación	12 VDC
Velocidad angular	600 RPM
Torque	0,42 Nm
Diámetro del eje	5mm
Corriente por fase	2 ^a

Para la fuente de alimentación general se necesita conocer la potencia que va a consumir cada elemento para poder seleccionar según este criterio la fuente de poder, ya que es necesario una fuente de 12 VDC para alimentar el motor y 5 VDC para alimentar los actuadores y el dispensador de piezas, al igual que las tarjetas embebidas que controlan la estación de clasificación.

$$P = P_{\text{motor}} + 4 \cdot P_{\text{servomotor}} + P_{\text{tarjetas}} + P_{\text{luces piloto}} \quad (26)$$

$$P = 24\text{w} + 4 \cdot 5,5\text{w} + 3\text{w} + 1\text{w}$$

$$P = 50\text{w}$$

Para la potencia requerida es posible utilizar una fuente de alimentación Altek 750w Atx cuyas características son presentadas en la Tabla 21, donde tiene salidas de 12 VDC Y 5 VDC, para facilitar las conexiones y ahorrar el uso de componentes reguladores.

Tabla 21

Características Altek 750w Atx

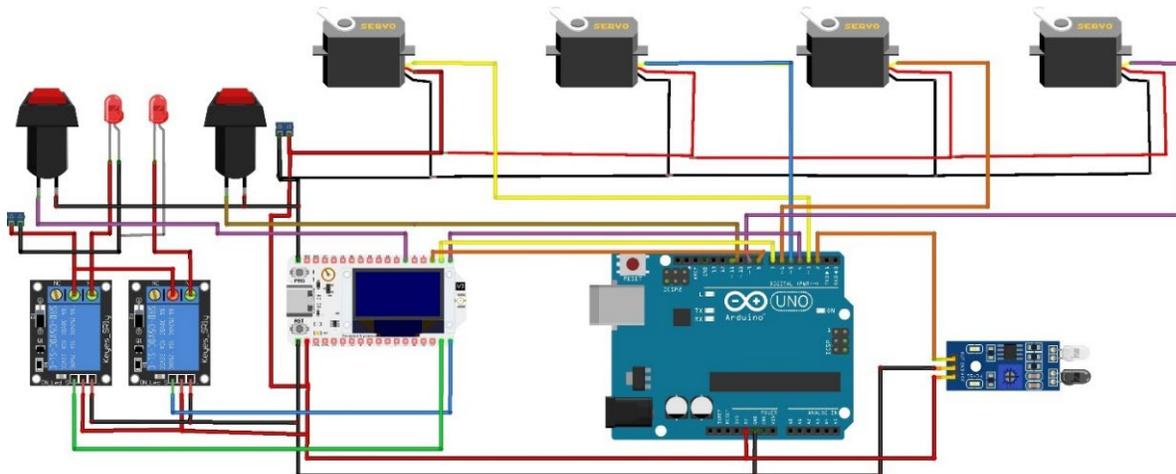
Características	Datos
Modelo	Altek 750w Atx
Voltaje de alimentación	110 VAC
Voltaje de salida	12VDC/5VDC/3,3VDC
Potencia	200w
Corriente	30 ^a

Diseño y conexiones del controlador de la estación de clasificación

Al principio se consideró la utilización de un solo controlador para la estación de clasificación, utilizando una tarjeta Heltec LoRa Wifi V3 al igual que en los módulos de sensores inalámbricos, lo que no fue posible ya que dicha tarjeta embebida es incompatible con librerías para la utilización de servomotores, lo que hizo falta la integración de otra tarjeta embebida para el accionamiento de los servomotores de los actuadores y del dispensador, para ello se utiliza una tarjeta embebida Arduino UNO, ya que cumple con los pines suficientes para la aplicación y fácil integración a la tarjeta Heltec LoRa Wifi V3, donde esta última se encarga de recibir los datos por radiofrecuencia y comandar a la tarjeta Arduino para que accione los actuadores, en la Figura 47 se observa el diagrama de conexión correspondiente.

Figura 45

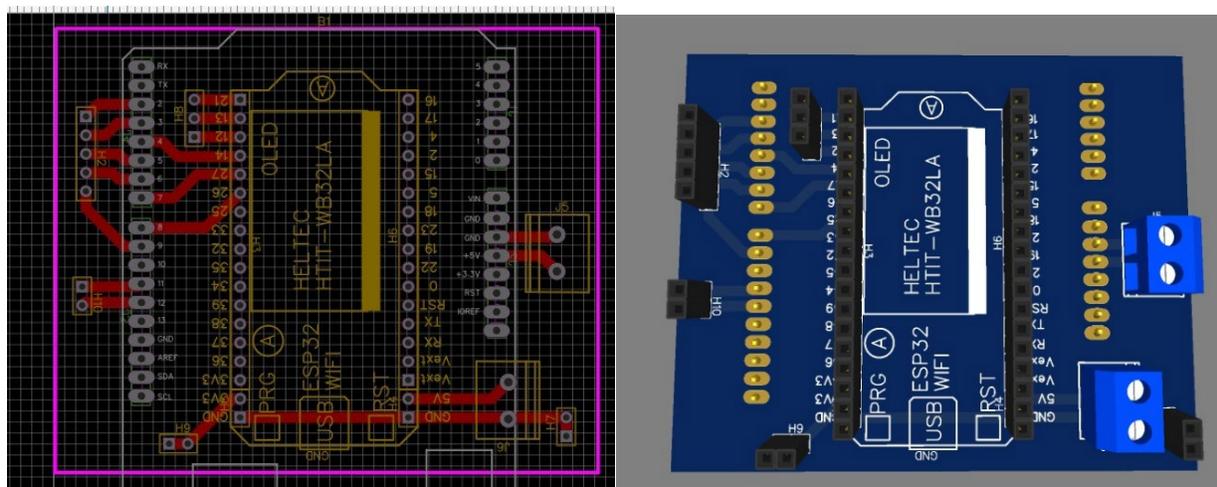
Diagrama de conexión para el comando de los actuadores



Es necesario el diseño de una placa de circuito impreso para el ahorro de espacio y cantidad de cables para un diseño más confiable, como la tarjeta embebida Arduino UNO tiene los pines tipo hembra al contrario de la Heltec LoRa V3, se considera realizar un PCB tipo Shield para ahorrar aún más espacio.

Figura 46

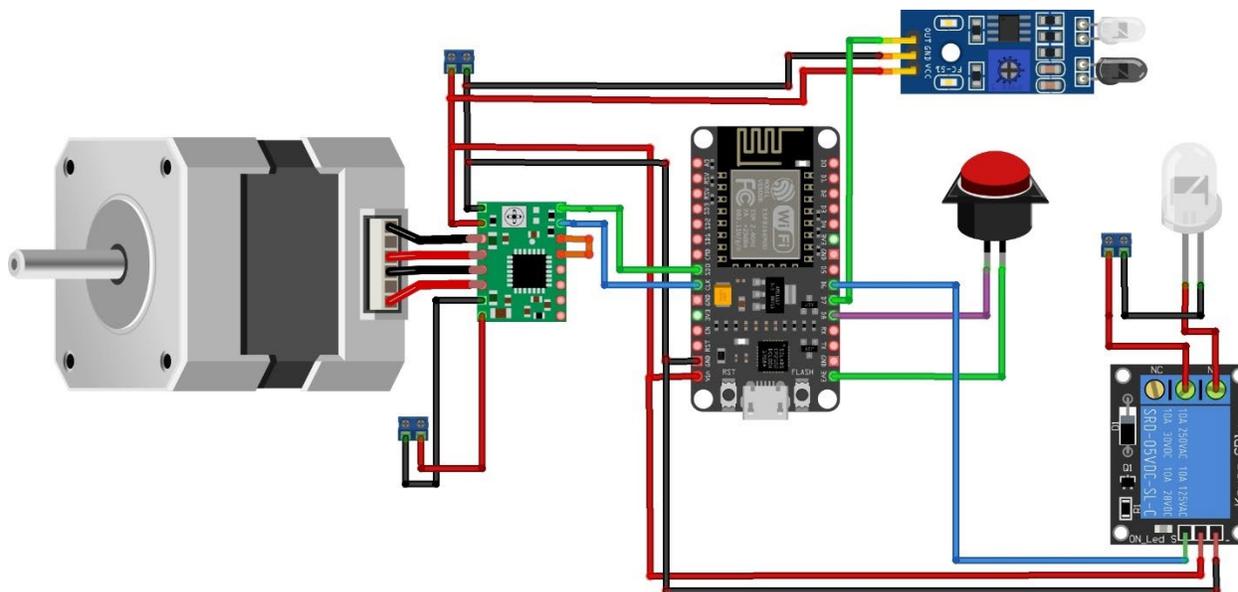
Diseño de PCB tipo Shield para Arduino UNO y Heltec LoRa V3



Para el accionamiento del motor NEMA es necesario el uso de un controlador que se pueda conectar a internet mediante una red Wifi ya que la tarjeta Heltec LoRa V3 ya está utilizada, para ello es necesario incorporar una tarjeta embebida ESP32 DevKit V1, la cual debe estar conectada a parte del motor, al sensor de presencia de la rampa del dispensador de piezas y al paro de emergencia para poder parar la banda por cualquier colisión o incidente, para ello se diseña el diagrama de conexión como se observa en la Figura 49 .

Figura 47

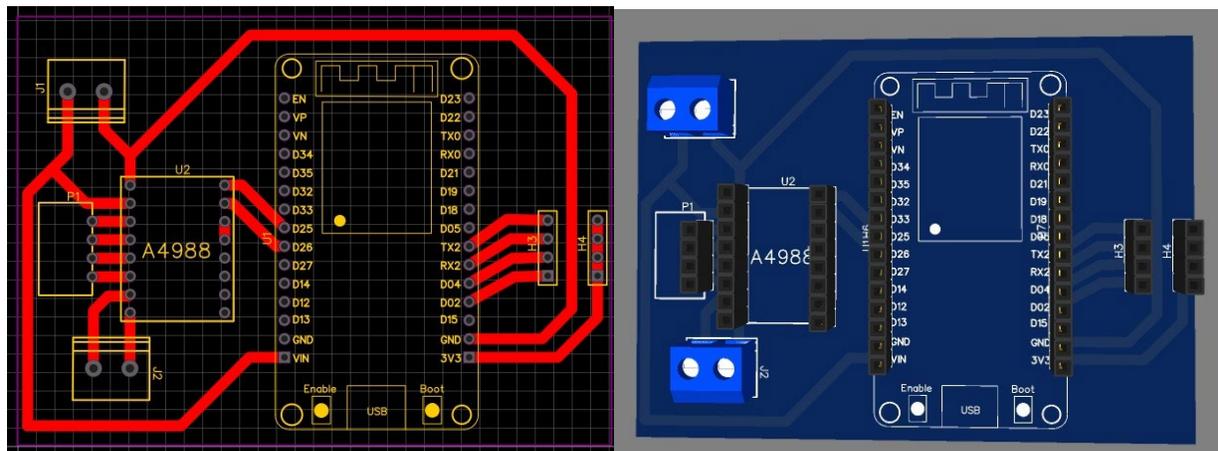
Diagrama de conexión para el comando del motor NEMA



De la misma forma es necesario el diseño de una tarjeta PCB para tener los elementos conectados correctamente y ahorrar cables al igual que espacio, el cual se puede observar en la Figura 50.

Figura 48

Diseño de PCB para el accionamiento del motor NEMA



Estas tarjetas de circuito impreso deben estar dentro del tablero de control, en el cual se colocan los respectivos pulsadores y luces piloto, donde se considera el material de acrílico para fines estéticos.

Capítulo IV

Implementación y tecnologías IoT

Introducción

Una vez diseñado y seleccionado los componentes eléctricos y mecánicos de los diferentes subsistemas, es necesario proceder a la construcción de la estación de clasificación, la colocación de los diferentes elementos y su cableado a la fuente de energía, al igual que los diferentes módulos de sensores inalámbricos.

Se presenta la conexión y la programación de los diferentes módulos de los sensores al igual que de los controladores de la estación de clasificación, donde para programar se utiliza el IDE de Arduino para las tarjetas embebidas utilizadas y para el monitorio de datos en tiempo real se utiliza la plataforma en la nube Firebase de Google, donde se conecta mediante está a la aplicación móvil.

Construcción de la estación de clasificación

Para la construcción de la estación de clasificación se ensambló las piezas de aluminio manufacturas en corte laser las cuales fueron colocadas en la mesa ranura con tuercas tipo T y pernos M5 como se indica en la Figura 49 donde para la banda transportadora se consideró el uso de la cuerina gracias a su textura antideslizante y revés áspero para un mejor agarre a los rodillos.

Figura 49

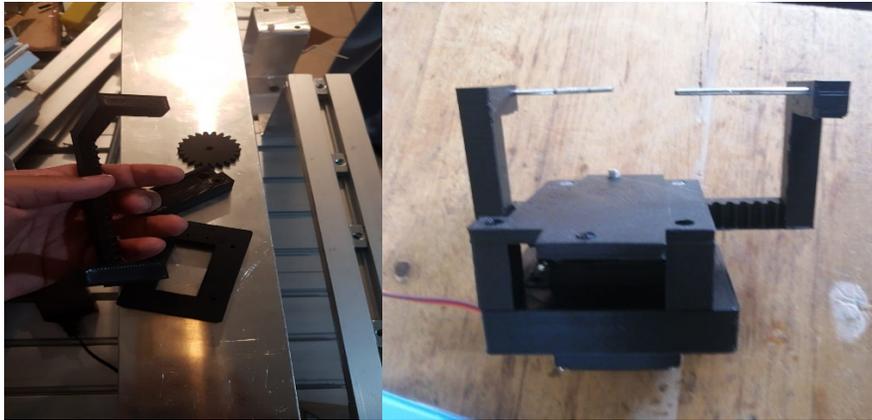
Estructura mecánica de la estación de clasificación



Donde como ya se mencionó para los actuadores y el dispensador, se los construyó armándolos con PLA de color negro, una vez diseñados e impresos mediante impresión 3D y unidos mediante pernos M3.

Figura 50

Construcción de actuadores y dispensador



Una vez construida la parte mecánica de la estación de clasificación, se procede a armar y cablear la caja de control, donde van a estar los controladores, pulsadores y luces pilotos, donde al principio se cableó de forma rápida como se puede observar en la Figura 51.

Figura 51

Implementación de controladores



Donde una vez probado el correcto funcionamiento se usa cable de protección PE en espiral, para el aislamiento y estética de los diferentes cables como se observa en Figura 52, donde la fuente de energía se coloca en la parte inferior de la mesa para una mejor organización.

Figura 52

Colocación de fuente de energía



Una vez colocados y cableados todos los elementos, en la estación de clasificación, queda armando como se muestra en la Figura 53.

Figura 53

Construcción terminada de la estación de clasificación



Construcción de los módulos de sensores

Para la construcción de los módulos inalámbricos se manufacturó en una impresión 3D Prusa FDM utilizando filamento PLA negro como material para las estructuras de las tapas en donde se colocó en el interior de la estructura la batería, el sistema de carga, el controlador Heltec LoRa 32 v3, un interruptor y el sensor correspondiente a cada módulo para realizar las conexiones respectivas de cada componente electrónico y utilizando pernos M3 se ensambló las tapas de la estructura.

Figura 54

Construcción de los módulos de sensores



Para lo que corresponde a la parte didáctica se agregaron código QR impresos en papel adhesivo y colocados en zonas en las cuales los estudiantes puedan escanear además se colocó el nombre de las partes principales de los módulos.

Figura 55

Módulos inalámbricos de sensores



Programación de los módulos de sensores

Programación del módulo del sensor de color

Para la comunicación por radiofrecuencia con el protocolo LoRa desde las tarjetas Heltec LoRa V3 es necesario la utilización de la librería "LoRaWan_App.h" ya que el fabricante recomienda la librería "Heltec.h" pero es incompatible hasta el momento con la versión del chip LoRa SX1262, para el empleo del sensor de color TCS34725 es imprescindible la librería "Adafruit_TCS34725.h" e inicializarlo.

Figura 56

Importar librerías para el módulo sensor de color

```
#include "LoRaWan_APP.h"
#include "Arduino.h"
#include "Adafruit_TCS34725.h"
Adafruit_TCS34725 tcs = Adafruit_TCS34725(TCS34725_INTEGRATIONTIME_50MS, TCS34725_GAIN_4X);
const char TX_Value[] = {};
```

Para configurar de manera adecuada la red de sensores LoRa, aunque en el país no este regulado una frecuencia específica, el fabricante recomienda que al igual que en Estados Unidos y otros países de Sudamérica, se utilice el ancho de frecuencia 902-928 MHz, donde se selecciona el de 920 MHz

Figura 57

Configuración de parámetros LoRa

```
#define RF_FREQUENCY 920000000

#define TX_OUTPUT_POWER 14

#define LORA_BANDWIDTH 0

#define LORA_SPREADING_FACTOR 7
#define LORA_CODINGRATE 1

#define LORA_PREAMBLE_LENGTH 8
#define LORA_SYMBOL_TIMEOUT 0
#define LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON false
#define LORA_IQ_INVERSION_ON false

#define RX_TIMEOUT_VALUE 500
#define BUFFER_SIZE 30

char txpacket[BUFFER_SIZE];
char rxpacket[BUFFER_SIZE];
```

Para el envío de datos, como ya se ha mencionado se ha seleccionado los tres colores RGB, donde se envía la palabra “Rojo” cuando el objeto percibido es de color rojo, de la misma forma con las palabras “Verde” y “Azul”.

Figura 58*Envío de datos de colores por radiofrecuencia*

```

void loop() {
float red,green,blue;
tcs.getRGB(&red,&green,&blue);
int R= int(red);
int G=int(green);
int B=int(blue);
String color = "";
if((R-G>40)&(R-B>40)){
  color= "Rojo";
  Serial.print("Sent ");
  const char *TX_Value="Rojo";
  Serial.println(TX_Value);
  Radio.Send((uint8_t *)TX_Value, strlen(TX_Value));
  delay(1000);
}
if((G-B>20)&(G-R>30)){
  color= "Verde";
  Serial.print("Sent ");
  const char *TX_Value="Verde";
  Serial.println(TX_Value);
  Radio.Send((uint8_t *)TX_Value, strlen(TX_Value));
  delay(1200);
}
if((B-G>10)&(B-R>30)){
  color= "Azul";
  Serial.print("Sent ");
  const char *TX_Value="Azul";
  Serial.println(TX_Value);
  Radio.Send((uint8_t *)TX_Value, strlen(TX_Value));
  delay(1000);
}
}

```

Programación del módulo del sensor de tamaño

De la misma forma que el anterior, se utilizan las mismas librerías para la comunicación pero sin la necesidad de utilizar una librería específica para el sensor, ya que este sensor envía una señal en bajo cuando detecta la presencia de un objeto, para lo cual para el sensor de tamaño es necesario colocar condiciones para cuando solo detecte el sensor de abajo, envíe por radiofrecuencia la palabra “pequeño”, cuando detecte el sensor de abajo y el de la mitad, la palabra “mediano” y si detectan los tres sensores, la palabra “grande”.

Figura 59

Envío de datos por radiofrecuencia bajo las condiciones de tamaño

```

if (hayObstaculoA == LOW && hayObstaculoB== LOW && hayObstaculoC == LOW ) {
    size= "grande";
    Serial.print("Sent ");
    const char *TX_Value="grande";
    Serial.println(TX_Value);
    Radio.Send((uint8_t *)TX_Value, strlen(TX_Value));

    delay(1000);
}
if (hayObstaculoA == HIGH && hayObstaculoB == LOW && hayObstaculoC == LOW) {
    size= "mediano";
    Serial.print("Sent ");
    const char *TX_Value="mediano";
    Serial.println(TX_Value);
    Radio.Send((uint8_t *)TX_Value, strlen(TX_Value));

    delay(500);
}
if (hayObstaculoA == HIGH && hayObstaculoB == HIGH && hayObstaculoC == LOW) {
    size= "pequeño";
    Serial.print("Sent ");
    const char *TX_Value="pequeño";
    Serial.println(TX_Value);
    Radio.Send((uint8_t *)TX_Value, strlen(TX_Value));
}

```

Programación del módulo del sensor de material

Al igual que los anteriores, se necesita que envíe palabras cuando el objeto es de algún metal ferroso o no, para ello se utiliza la condición siguiente para cuando el sensor inductivo detecta la presencia de un objeto metálico ferroso envíe la palabra "si", donde al contrario cuando el sensor capacitivo detecte la presencia de un objeto, pero el sensor inductivo no detecte la presencia de un objeto metálico ferroso, envíe la palabra "no".

Figura 60

Envío de datos por radiofrecuencia del módulo del sensor de material

```

bool state = digitalRead(sensorPin);
bool stateI = digitalRead(sensorPinI);

if (state == 0)
{
    count+=1;

    if(count == 1){
        digitalWrite(2,HIGH);
        Serial.print("Sent ");
const char *TX_Value="no";
        Serial.println(TX_Value);
        Radio.Send((uint8_t *)TX_Value, strlen(TX_Value));

    }
}
if(state == 1){
    count = 0;
    digitalWrite(2,LOW);

}
if (stateI == 0)
{
    countI+=1;

    if(countI == 1){
        digitalWrite(2,HIGH);
        Serial.print("Sent ");
const char *TX_Value="si";
        Serial.println(TX_Value);
        Radio.Send((uint8_t *)TX_Value, strlen(TX_Value));
    }
}

```

Programación del módulo del sensor de temperatura y humedad

Para la utilización del sensor de temperatura y humedad DTH22 es necesario la incorporación de la librería "DHT.h" para su correcto manejo, con la diferencia en los anteriores sensores que este detecta los datos de la temperatura y humedad a la vez, donde para transformar a dato de texto se unen los datos, por lo cual es necesario adherir una letra antes del dato para separarlos al momento de enviar y recibir, la letra "T" para diferenciar el dato de la temperatura de la de humedad, como se observa en la Figura 61.

Figura 61

Envío de datos por radiofrecuencia del módulo del sensor de temperatura y humedad

```
void loop()
{
  temperatura = dht.readTemperature();
  humedad = dht.readHumidity();
  String txpacket_str = "T"+String(temperatura)+String(humedad);

  if(lora_idle == true)
  {
    txpacket_str.toCharArray(txpacket, BUFFER_SIZE);

    Serial.printf("\r\nSending Temperatura: \"%0.2f\" , length %d\r\n",temperatura, strlen(txpacket));
    Serial.printf("\r\nSending Humedad: \"%0.2f\" , length %d\r\n",humedad, strlen(txpacket));
    delay(1000);
    Radio.Send( (uint8_t *)txpacket, strlen(txpacket));
  }
}
```

Programación de los controladores y maestro receptor de datos

Para la programación de la tarjeta embebida Heltec LoRa V3 para la recepción de los datos se necesita inicializarlas de la misma forma que los módulos individuales, ya que para la comunicación debe utilizar la misma frecuencia, donde para la aplicación, lo importante es llevar un conteo de las piezas detectadas por los módulos de sensores, para lo cual se deben colocar contadores y cada vez que reciba el dato de texto el contador suma según los objetos detectados, donde para el accionamiento de los actuadores es controlado con la tarjeta Arduino UNO, para lo cual cuando reciba la palabra del sensor, según corresponda, mande una señal digital al Arduino, comparando la primera letra del dato recibido según el caso.

Figura 62

Ejemplo de comparación de datos recibidos y enviado de señal digitales a tarjeta Arduino

```

    rssi=rssi;
    rxSize=size;
    memcpy(rxpacket, payload, size );
    rxpacket[size]='\0';
    Radio.Sleep( );
    Serial.printf("\r\nreceived packet \"%s\" with rssi %d , length %d\r\n",rxpacket,rssi,rxSize);
    switch (rxpacket[0]){
        case 'R':
            countR++;
            contadorR = countR;
            digitalWrite(2,HIGH);
            delay(100);
            digitalWrite(2,LOW);
            break;
        case 'V':
            countG++;
            contadorG = countG;
            digitalWrite(3,HIGH);
            delay(100);
            digitalWrite(3,LOW);
            break;
        case 'A':
            countB++;
            contadorB = countB;
            digitalWrite(4,HIGH);
            delay(100);
            digitalWrite(4,LOW);
            break;
    }

```

En la tarjeta Arduino UNO es necesario inicializar los servomotores e incluir la librería “Servo.h”, donde aquí se puede ajustar los tiempos según el actuador el cual se debe accionar ya que están a diferentes distancias del dispensador, donde para el accionamiento de este es necesario colocar una condición inicial que solo este encendido cuando exista la presencia de un objeto en la rampa de entrada y a la vez se presione el pulsador de inicio.

Figura 63

Inicialización y accionamiento del servomotor del dispensador

```

unsigned long currentMillis = millis();
if (digitalRead(sensorPin1) != sensor1State) {
  if (digitalRead(sensorPin1) == HIGH) {
    isInitialized = false;
    sensor1State = true;
  } else {
    sensor1State = false;
  }
}
if (digitalRead(sensorPin1) == LOW && !sensor1State && currentMillis - previousMillis1 >= interval1) {
  servo1.write(55);
  delay(2000);
  servo1.write(145);
  delay(1000);
  previousMillis1 = currentMillis;
}

```

De forma parecida para el accionamiento de los actuadores, cuando la señal digital provenga de la tarjeta Heltec LoRa V3, accione un servomotor en específico según corresponde.

Figura 64

Accionamiento de los servomotores de los actuadores

```

if (digitalRead(sensorPin2) == HIGH) {
  delay(3800);
  servo2.write(180);
  delay(2000);
  servo2.write(0);
  delay(1400);
  Serial.println("paso 2");
}

if (digitalRead(sensorPin3) == HIGH) {
  delay(2800);
  servo3.write(180);
  delay(2000);
  servo3.write(0);
  delay(1400);
  Serial.println("paso 3");
}

if (digitalRead(sensorPin4) == HIGH) {
  delay(1500);
  servo4.write(180);
  delay(2000);
  servo4.write(0);
  delay(1400);
  Serial.println("paso 3");
}

```

En la Tarjeta ESP32 para el accionamiento del motor NEMA 17, es necesario la condición inicial que solo pueda accionarse cuando exista piezas en la rampa de entrada y se presione el pulsador de inicio, donde para el encendido o apagado desde una aplicación móvil, hay que incluir las condiciones desde la plataforma de Firebase.

Figura 65

Accionamiento del motor a pasos NEMA 17

```

void loop() {
  if(Firebase.RTDB.getInt(&fbdo, "/user1/banda") ){
    banda=fbdo.intData();
  }
  if (digitalRead(inicio)==HIGH || banda==1) {
    Firebase.RTDB.setInt("/user1/banda",1);
    while(digitalRead(sensor)==LOW){
      if(Firebase.RTDB.getInt(&fbdo, "/user1/banda") ){
        banda=fbdo.intData();
      }
      if(banda == 0){
        break;
      }
      digitalWrite(led, LOW);
      digitalWrite(dirPin, LOW);
      for (int i = 0; i < stepsPerRevolution; i++) {
        digitalWrite(stepPin, HIGH);
        delayMicroseconds(2000);
        digitalWrite(stepPin, LOW);
        delayMicroseconds(2000);
      }
      digitalWrite(dirPin, HIGH);
      digitalWrite(led, HIGH);
      delayMicroseconds(6000);
    }
  }
}

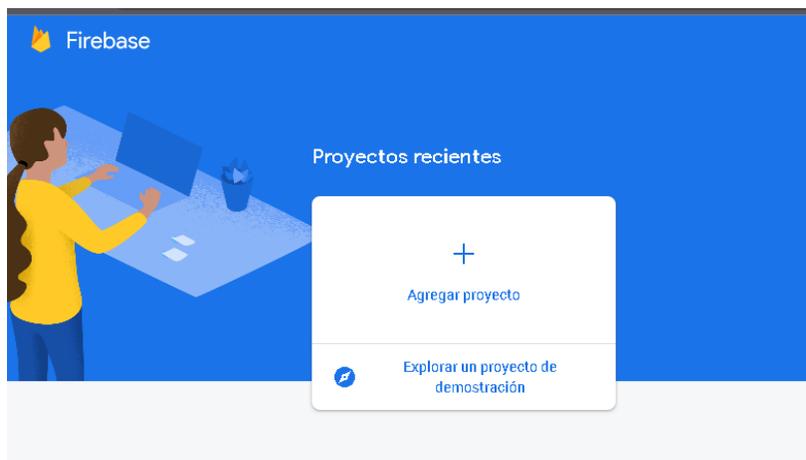
```

Implementación de tecnología IoT

La tarjeta embebida Heltec LoRa V3 permite la facilidad que a la vez la posibilidad de recibir los datos de los sensores y mediante el protocolo Wifi enviar los datos a una plataforma de nube de datos en tiempo real, para ello se utiliza la plataforma Firebase, donde para su uso es necesario la creación y configuración de la cuenta, para ello se utiliza una cuenta de Google, donde en la página de Firebase, buscar el apartado de “Nuevo Proyecto”, donde hay que colocar un nombre para el proyecto.

Figura 66

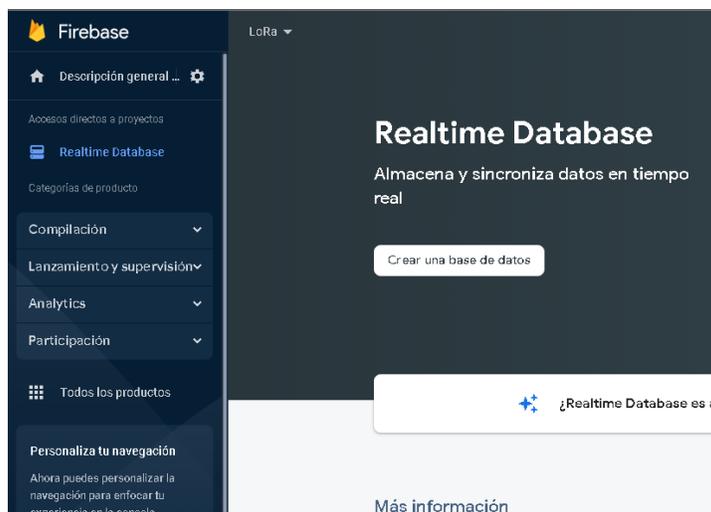
Crear nuevo proyecto Firebase



Es importante habilitar la opción Google Analytics para añadir esta herramienta a nuestro proyecto para poder medir y analizar las iteraciones que sucedan en este, se copia el Host de nuestro proyecto y la clave de autenticación para poder vincular a las tarjetas embebidas, el siguiente paso es crear la base de datos dentro de Firebase, donde en el menú izquierdo se selecciona “Realtime Database” y se procede a crear la base de datos en tiempo real.

Figura 67

Creación de la base de datos en tiempo real



Ahora resta configurar la tarjeta embebida Heltec LoRa V3, con la cual, para el manejo de la base de datos en tiempo real, se debe añadir la librería "FirebaseESP32.h" y ya que utiliza el protocolo Wifi se debe colocar el usuario y contraseña de una red para su conexión a internet.

Figura 68

Librería Firebase y colocación de usuario y contraseña de la red Wifi

```
#include "LoRaWan_APP.h"
#include <WiFi.h>
#include <FirebaseESP32.h>

#define WIFI_SSID "-----"
#define WIFI_PASSWORD "-----"
#define DATABASE_URL "-----"

WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);
Serial.print("Connecting to Wi-Fi");
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED){
  Serial.print(".");
  delay(100);
}
if(WiFi.status() == WL_CONNECTED){
  status_wifi = true;
}

Serial.println();
Serial.print("Connected with IP: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
Serial.println();

config.database_url = DATABASE_URL;
config.signer.test_mode = true;
config.signer.tokens.legacy_token = "-----";

Firebase.begin(&config, &auth);
Firebase.reconnectWiFi(true);
Firebase.setwriteSizeLimit(fbdo,"tiny");
```

Donde con los contadores ya antes mencionados se sobrescribe el dato que se está cambiando, por ejemplo, si detecta el módulo sensor de color, el color rojo, se verá afectado el contador ya que cambiará su valor de 0 a 1 y así sucesivamente, hasta que se reinicien los valores.

Figura 69

Sobrescribir valores de los contadores y datos de temperatura y humedad en Firebase desde tarjeta embebida

```
void Task0code( void * pvParameters ){
    for(;;){
        for (int i = 0; i <1; i++) {
            if(status_wifi){
                delay(10);
                Firebase.RTDB.setInt(&fbdo, "/user1/contadorR",contadorR);
                Firebase.RTDB.setInt(&fbdo, "/user1/contadorG",contadorG);
                Firebase.RTDB.setInt(&fbdo, "/user1/contadorB",contadorB);
                Firebase.RTDB.setInt(&fbdo, "/user1/piezas_p",contadorp);
                Firebase.RTDB.setInt(&fbdo, "/user1/piezas_m",contadorm);
                Firebase.RTDB.setInt(&fbdo, "/user1/piezas_g",contadorg);
                Firebase.RTDB.setInt(&fbdo, "/user1/alerta",alerta);
                Firebase.RTDB.set(&fbdo, "/user1/temperatura",temperatura);
                Firebase.RTDB.set(&fbdo, "/user1/humedad",humedad);
                if(Firebase.RTDB.getBool(&fbdo,"/user1/statusReset")){
                    bool statusReset = fbdo.boolData();
                    if(statusReset){
                        countR = 0;
                        countG = 0;
                        countB = 0;
                        contadorR = 0;
                        contadorG = 0;
                        contadorB = 0;
                        countp = 0;
                        countg = 0;
                        countm = 0;
                        contadorp = 0;
                        contadorg = 0;
                        contadorm = 0;
                        alerta=0;
                        Firebase.RTDB.setBool(&fbdo, "/user1/statusReset",false);
                    }
                }
            }
        }
    }
}
```

Diseño de la aplicación: Conexión con Firebase

Para el desarrollo de la aplicación móvil se utiliza el kit de herramientas Flutter que mediante su lenguaje Dart se puede crear aplicaciones móviles mediante la creación de elementos llamados "widget", creando así las variables que son las mismas de los contadores para poder vincularlas con Firebase y así con el proceso físico.

Figura 70

Variables en Flutter

```
24 class HomePageState extends State<HomePage> {  
25   String _counterR = '';  
26   String _counterG = '';  
27   String _counterB = '';  
28   double _temperatura = 0;  
29   double _humedad = 0;  
30   String _counterMetalicas = '';  
31   String _counterNoMetalicas = '';  
32   String _alerta = '0';  
33   String _piezasP = '';  
34   String _piezasM = '';  
35   String _piezasG = '';  
36  
37   final _database = FirebaseDatabase.instance.ref();  
38 }
```

Para lo cual mediante programación orientada a objetos con el lenguaje Dart se crea los eventos que enlazan a Firebase para que en la aplicación se muestren los valores de los contadores y los datos de la temperatura y humedad según como estos vayan cambiando.

Figura 71

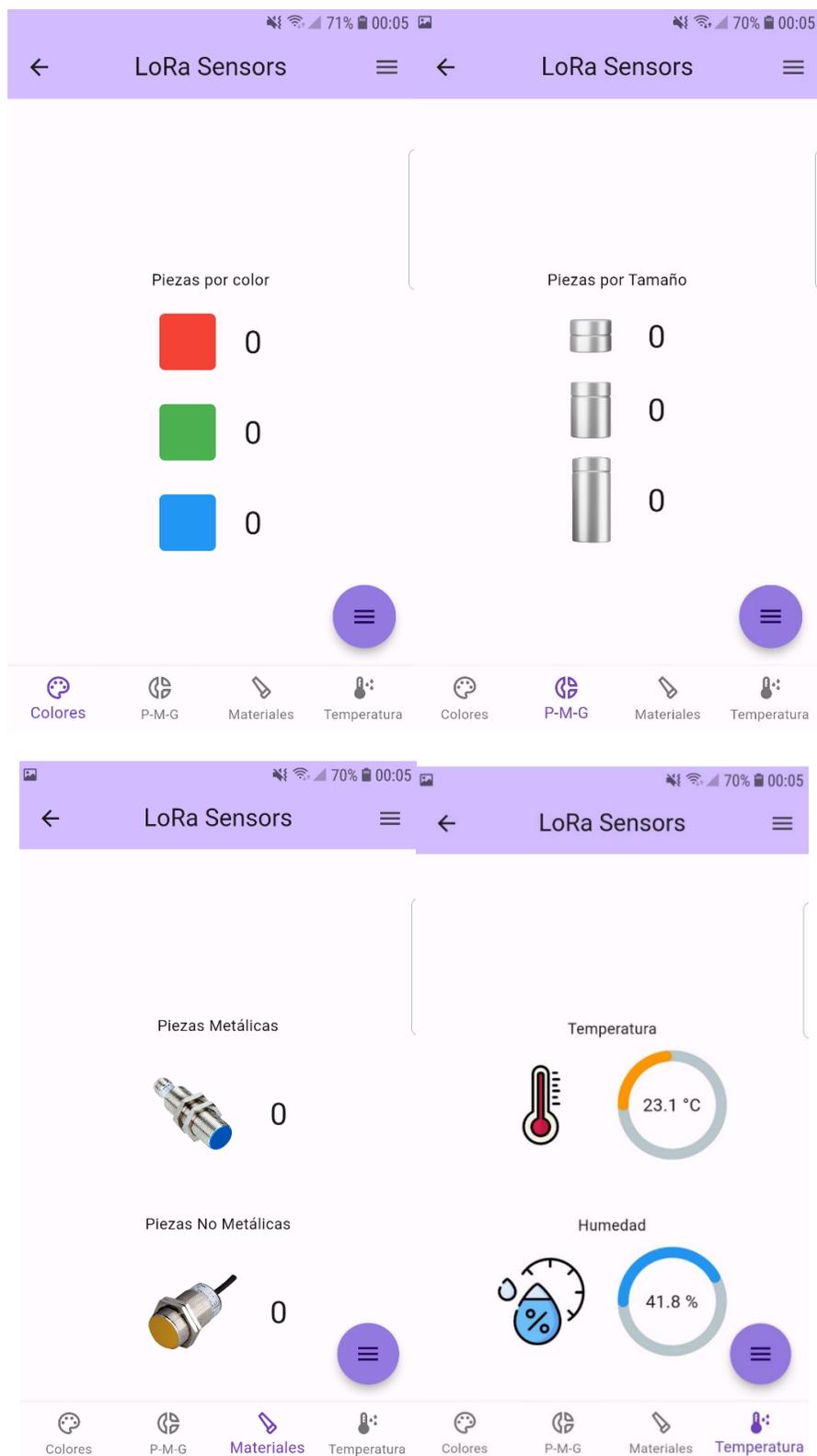
Lenguaje Dart para desarrollo de aplicaciones móviles

```
_readData() {  
  _database.child('user1/contadorR').onValue.listen((event) {  
    final dataR = event.snapshot.value.toString();  
    setState(() {  
      | _counterR = dataR;  
    });  
  });  
  _database.child('user1/contadorG').onValue.listen((event) {  
    final dataG = event.snapshot.value.toString();  
    setState(() {  
      | _counterG = dataG;  
    });  
  });  
  _database.child('user1/contadorB').onValue.listen((event) {  
    final dataB = event.snapshot.value.toString();  
    setState(() {  
      | _counterB = dataB;  
    });  
  });  
  _database.child('user1/temperatura').onValue.listen((event) {  
    final dataTemp = event.snapshot.value.toString();  
    setState(() {  
      | _temperatura = double.parse(dataTemp);  
    });  
  });  
  _database.child('user1/humedad').onValue.listen((event) {
```

Teniendo así la aplicación separada por pestañas según el sensor que se pueda utilizar, ya sea el de color, tamaño, material o el de temperatura y humedad, con sus respectivos contadores e imágenes referenciales de las variables medidas.

Figura 72

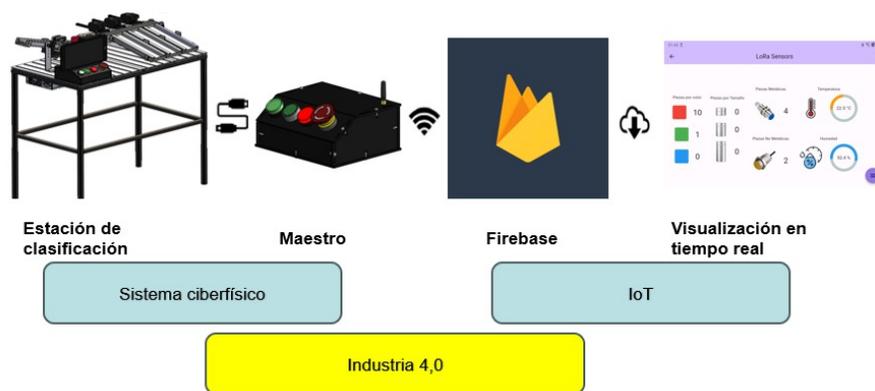
Ventanas de la aplicación móvil



Llegando así a un monitoreo constante de los datos en tiempo real del proceso aplicado al igual que si se requiere utilizar los sensores por si solos para medir variables externas como son las de la humedad y temperatura, para llevar un registro de datos o a su vez controlar otro proceso.

Figura 73

Conexión de aplicación a proceso físico mediante Firebase



Teniendo así la implementación completa de todos los subsistemas establecidos, donde en la Figura 74 se puede observar la estación de clasificación con los diferentes módulos de sensores inalámbricos.

Figura 74

Implementación completa de estación de clasificación+ módulos de sensores inalámbricos



Capítulo V

Pruebas y Análisis de Resultados

Introducción

Terminada la construcción de los módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos dentro de un proceso secuencial incorporando herramientas IoT, se realizan diferentes pruebas para verificar el adecuado funcionamiento, estas pruebas se basarán en dos tipos: pruebas preliminares las cuales consisten en poner en funcionamiento cada módulo inalámbrico junto con la estación de clasificación y la aplicación móvil, y la segunda prueba se realiza en conjunto a los estudiantes de la materia de Introducción a los Sistemas Ciberfísicos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga los cuales harán uso de los módulos inalámbricos con la estación de clasificación y las herramientas IoT implementadas.

Los módulos inalámbricos de sensor de color, temperatura y humedad, material y de tamaño son evaluados mediante varias pruebas para comprobar su correcto funcionamiento dentro de la estación de clasificación, para lo cual se tomarán datos que serán tabulados con la finalidad de ser evaluados de 0% a 100% de funcionalidad, además se obtendrán datos por medio de encuestas aplicadas a los estudiantes en donde se pondrá a prueba el funcionamiento de los módulos de sensores inalámbricos junto con la estación de clasificación y la aplicación móvil.

Pruebas del módulo inalámbrico sensor de color

El módulo inalámbrico sensor de color tiene como funcionalidad detectar y contabilizar los objetos de clasificación por color para lo cual utilizando Arduino se calibró correctamente los colores que debe identificar el sensor de color, en las pruebas se colocó objetos de color azul rojo y verde para verificar su funcionalidad, para las pruebas del encendido y apagado del módulo se comprueba que el interruptor ON/OFF encienda y apague la pantalla verificando así su funcionamiento, los datos obtenidos en las pruebas se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22*Pruebas del módulo inalámbrico sensor de color*

Elemento	Número de pruebas	Cumple con su función	Número de aciertos	% de acierto
Azul	15	Si	14	93,33%
Rojo	15	Si	15	100%
Verde	15	Si	15	100%
Interruptor ON/OFF	15	Si	15	100%
Display Oled	15	Si	15	100%

Pruebas del módulo inalámbrico sensor de tamaño

El módulo inalámbrico sensor de tamaño detecta los objetos según su altura, dichos objetos de clasificación son pequeño, mediano y grande, el módulo se caracteriza por utilizar 3 sensores infrarrojos en el cual se han condiciona en Arduino para identificar los diferentes tamaños, se realizó pruebas utilizando un objetos de 25 mm de alto para detectar como pequeño, un objeto de 40 mm como mediano y otro de 56 mm para grande, estos parámetros serán contabilizados para verificar su funcionamiento, para las pruebas de funcionamiento de la pantalla Oled se comprueba con un interruptor ON/OFF encienda y apague el mismo, estas pruebas son detalladas en la Tabla 23.

Tabla 23*Pruebas del módulo inalámbrico sensor de tamaño*

Elemento	Número de pruebas	Cumple con su función	Número de aciertos	% de acierto
Pequeño	15	Si	14	93,33%
Mediano	15	Si	15	100%
Grande	15	Si	14	93,33%
Interruptor ON/OFF	15	Si	15	100%
Display oled	15	Si	15	100%

Pruebas del módulo inalámbrico sensor de material

El módulo inalámbrico sensor de material se caracteriza por detectar y contabilizar objetos de material metálico y no metálico para lo cual se utilizó un objeto con características metalizas y otro objeto de material plástico donde se realizó pruebas para comprobar su funcionamiento, este moduló utiliza un sensor capacitivo para detectar objetos no metálicos y un sensor inductivo para detectar objetos metálicos los cuales fueron programas en Arduino, además se comprobó que el interruptor ON/OFF encienda y apague la pantalla Oled verificando así su funcionalidad, en la Tabla 24 se detallan las pruebas aplicadas a este módulo inalámbrico.

Tabla 24

Pruebas del módulo inalámbrico sensor de material

Elemento	Número de pruebas	Cumple con su función	Número de aciertos	% de acierto
Metal	15	Si	15	100%
No metal	15	Si	14	93,33%
Interruptor ON/OFF	15	Si	15	100%
Display Oled	15	Si	15	100%

Pruebas del módulo inalámbrico sensor de temperatura y húmeda

El módulo inalámbrico sensor de temperatura y húmeda detecta la temperatura y humedad presente en el ambiente, este módulo durante 1 hora se mantuvo encendido donde se aplicó perturbaciones como frio y calor para verificar la detección de datos que recolectaba de la misma forma que los anteriores módulos se acondiciono en Arduino, utilizando un led el cual se encienda o apague con un interruptor ON/OFF se comprobó que el módulo se encuentre encendido o apagado, las pruebas se detallan a continuación en la Tabla 25.

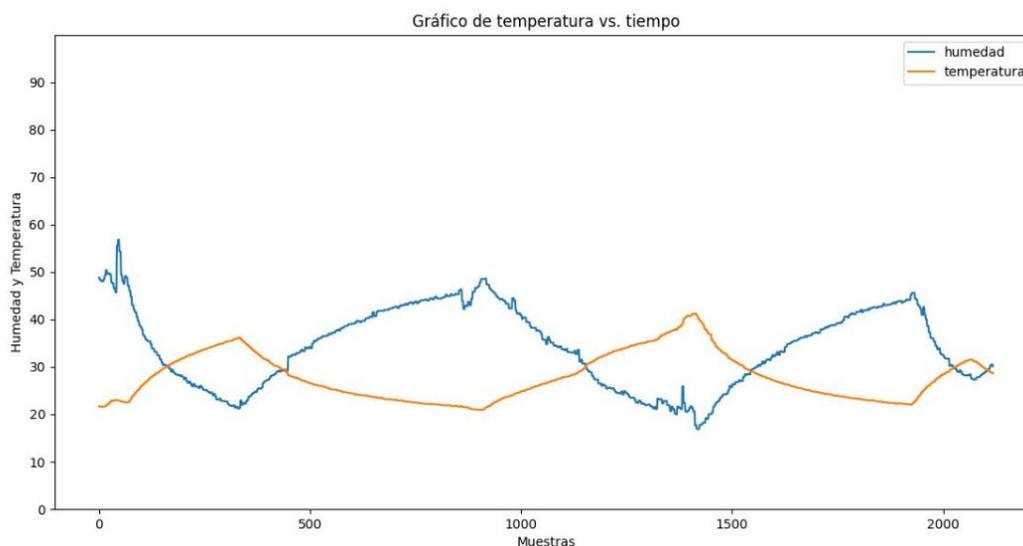
Tabla 25

Pruebas del módulo inalámbrico sensor de temperatura y humedad

Elemento	Número de pruebas	Cumple con su función	Número de aciertos	% de acierto
Temperatura	15	Si	15	100%
Humedad	15	Si	15	100%
Interruptor ON/OFF	15	Si	15	100%
Led indicador	15	Si	15	100%

Figura 75

Grafica de testeo de datos de temperatura y humedad



Pruebas de comunicación entre los módulos inalámbricos y el módulo maestro

Implementando el protocolo de comunicación inalámbrica Lora se comprobó la comunicación entre los módulos inalámbricos y el módulo maestro, donde cada módulo inalámbrico envió diferentes datos a partir de una distancia de separación 1km del módulo maestros verificando así su alcance de comunican, para lo cual se utiliza el monitor serial del módulo maestro para comprobar que dichos datos sean recibidos, esto se detalla en la Tabla 26.

Tabla 26*Pruebas de comunicación entre los módulos inalámbricos y el módulo maestro*

Módulo	Número de pruebas	Cumple con su función	Número de aciertos	% de acierto
Maestro-Color	15	Si	14	93,33%
Maestro-Tamaño	15	Si	14	93,33%
Maestro-Material	15	Si	14	93,33%
Maestro-Temperatura y humedad	15	si	15	100%

Pruebas de batería

Para las pruebas de la batería de los módulos de color, tamaño y temperatura y humedad se conectó un cargador al micro USB del sistema de carga donde se comprobó que se enciende un led rojo cuando la batería se está cargando y un led azul cuando está completamente cargada además que con un multímetro se verificó que el voltaje de salida sea de 3.7v como lo indica el fabricante, sin embargo para las pruebas de la batería LiPo del módulo de material se utilizó un cargador externo donde indica cuando la batería está completamente cargada para verificar esto con un multímetro se comprobó que el voltaje de salida sea de 12v, estas pruebas se detallan en la Tabla 27.

Tabla 27*Pruebas de batería*

Elemento	Número de pruebas	Cumple con su función	% de acierto
Batería módulo color	15	Si	100%
Batería módulo tamaño	15	Si	100%
Batería módulo temperatura y humedad	15	Si	100%
Batería módulo material	15	Si	100%

Pruebas del dispensador de objetos

El dispensador de objetos tiene como finalidad alimentar la banda con los objetos uno por uno sin que se acumulen facilitando la detección en los módulos de sensores y la clasificación de estos, por lo cual se implementó un sensor infrarrojo donde si no hay objetos por dispensar el actuador del dispensador se detiene y el led del sensor se mantiene apagado y cuando haya objeto para dispensar el led del sensor se prende y el actuador del dispensador se activa liberando el objeto, comprobando así su funcionalidad la cual se encuentra detallada en la Tabla 28.

Tabla 28

Pruebas del dispensador de objetos

Elemento	Número de pruebas	Cumple con su función	Número de aciertos	% de acierto
Sensor	15	Si	14	93,33%
Actuador	15	Si	15	100%
Objeto dispensado	15	Si	14	93,33%

Pruebas de la etapa de clasificación

Para comprobar el correcto funcionamiento de la etapa de clasificación se utiliza una banda transportado la cual se encarga de transportar los objetos, los módulos de sensores inalámbricos que detectan los objetos para ser clasificados y el sistema de clasificación compuesto por 3 actuadores para clasificar los objetos según el módulo utilizado en donde se alimentara a la banda con objetos de diferentes característica como color, tamaño y material para de esta forma comprobar el correcto funcionamiento del sistema de clasificación.

Tabla 29

Pruebas de la etapa de clasificación

Elemento	Número de pruebas	Cumple con su función	Número de aciertos	% de acierto
Banda	15	Si	15	100%
Color Rojo-Actuador 1	15	Si	14	93,33%
Color Verde-Actuador 2	15	Si	15	100%
Color Azul-Actuador 3	15	Si	14	93,33%
Tamaño Pequeño-Actuador 1	15	si	14	93,33%
Tamaño Mediano-Actuador 2	15	si	15	100%
Tamaño Grande-Actuador 3	15	si	14	93,33%
Material no metal-Actuador 2	15	si	15	100%
Material metal-Actuador 3	15	si	14	93,33%

Pruebas de la aplicación móvil y de los códigos QR

La aplicación móvil está conformado por diferentes elementos los cuales permitiente su correcto funcionamiento como es la plataforma IoT en este caso es Firebase el cual se encarga de recolectar los datos enviados por el maestro al internet, los widgets de la aplicación móvil que se encargan de proporcionar la información recolectada como son el número de objetos clasificados por color, tamaño, material y además de brindar datos sobre la temperatura y humedad del ambiente, el panel de control el cual dispone de botones para activar y desactivar la banda y un botón de reinicio para resetear los contadores y la parte de la información que proporciona sobre los diferentes módulos inalámbricos utilizando los códigos QR.

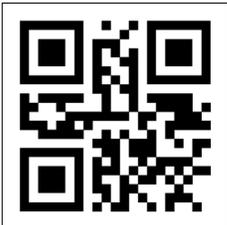
Tabla 30

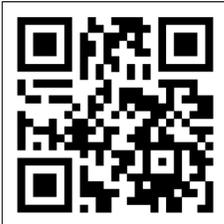
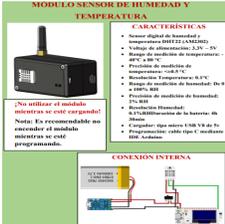
Pruebas de la aplicación móvil

Elemento	Número de pruebas	Cumple con su función	Número de aciertos	% de acierto
Firestore	15	si	15	100%
Contador color	15	si	14	93,33%
Contador tamaño	15	si	14	93,33%
Contador material	15	si	14	93,33%
Indicador de temperatura y humedad	15	si	15	100%
Botón de inicio	15	si	14	93,33%
Botón de paro	15	si	14	93,33%
Botón de reset	15	si	15	100%

Tabla 31

Pruebas de funcionamiento de los códigos QR

Código QR	Información	Número de pruebas	Cumple con su función	Número de aciertos	% de acierto
	<p>MÓDULO SENSOR DE COLORES</p> <p>CARACTERÍSTICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensor de color RGB-Ti2 • Voltaje de alimentación: 2 – 5 VDC • Corriente nominal de operación: máx. 100 mA • Distancia de la batería: 40 Ohms • Cargador: tipo micro USB 5Vdc/2A • Programación: cable tipo C mediante IDE Arduino <p>CONEXIÓN INTERNA</p> <p>¡No utilizar el módulo mientras se está cargando! Nota: Es recomendable no exceder el módulo mientras se está programando.</p>	15	si	15	100%
	<p>MÓDULO SENSOR DE MATERIALES</p> <p>CARACTERÍSTICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensor capacitivo • 4 x I2C/SMB/1-Wire • Sensor inductivo I2C/I2C+SDA • Voltaje de alimentación de los sensores de 2 a 5V • Rango de detección: 0mm • Distancia de la batería: 2 Ohms • Cargador: tipo L-PA • Programación: cable tipo C mediante IDE Arduino <p>CONEXIÓN INTERNA</p> <p>¡No utilizar el módulo mientras se está cargando! ¡No utilizar el módulo mientras se está programando!</p>	15	si	15	100%
	<p>MÓDULO SENSOR DE TAMAÑO</p> <p>CARACTERÍSTICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 sensores de presencia P1-01 • Voltaje de alimentación: 2,5V – 5V • Distancia de detección: 20 mm – 300 mm (ajustable) • Ángulo de detección: 30° • Distancia de la batería: 40 Ohms • Cargador: tipo micro USB 5V dc/2A • Programación: cable tipo C mediante IDE Arduino <p>CONEXIÓN INTERNA</p> <p>¡No utilizar el módulo mientras se está cargando! Nota: Es recomendable no exceder el módulo mientras se está programando.</p>	15	si	15	100%

Código QR	Información	Número de pruebas	Cumple con su función	Número de aciertos	% de acierto
	 <p>MÓDULO SENSOR DE HUMEDAD Y TEMPERATURA</p> <p>CARACTERÍSTICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> Sensor digital de humedad y temperatura DHT22 (AM2302). Alimentación por cableado 3,3V - 5V. Algoritmo de medición de temperatura: 10°C a 40°C, resolución de 0,1°C. Alimentación: 3,3V - 5V. Resolución Temperatura: 0,1°C. Rango de medición de humedad: 20% a 90% RH. Algoritmo de medición de humedad: 10% a 90% RH. Resolución Humedad: 0,1%. Alimentación en la batería de litio. Compatible: Uno micro USB V3 de PC. Programación: cable USB C compatible USB Android. <p>CONEXIÓN INTERNA</p> 	15	si	15	100%

Pruebas de funcionamiento en estudiantes

Junto con los estudiantes de Sexto Nivel de la Carrera de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga en la materia de Introducción a los Sistemas Ciberfísicos se han realizado pruebas en las cuales interactuaron con los módulos de sensores inalámbricos, utilizando el módulo para verificar el funcionamiento de cada tipo de sensor con los objetos de clasificación diseñados, en conjunto con la estación de clasificación, la aplicación móvil y guías de laboratorio como se indica en la Figura 76.

Figura 76

Estudiantes utilizando el módulo y la aplicación móvil



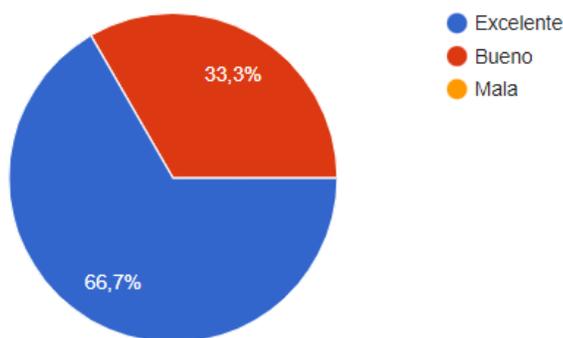
Análisis de resultados de encuestas

Finaliza la práctica de pruebas donde los estudiantes verificaron la detección y envió de datos instantánea de cada sensor para comprobar el funcionamiento con la estación de clasificación, se realizó un total de 12 encuesta para aplicar el método de investigación descriptiva que permite analizar el resultado de cada una de las preguntas propuestas. Los resultados de cada pregunta fueron representados en porcentaje utilizando graficas de sectores, las encuestas se encuentran en el Anexo 4.

Pregunta 1: ¿Cómo evaluaría la funcionalidad de los módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos?

Figura 77

Resultados de la pregunta 1

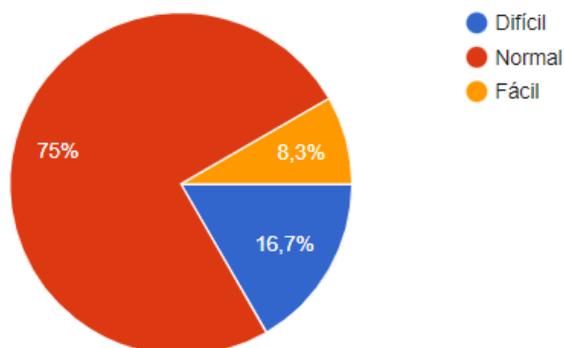


La Figura 74 indica las respuestas de los 12 estudiantes, donde el 66.7% afirma que los módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos funcionan de manera excelente y el 33.3% responde como Bueno, por lo tanto, se tiene un 100% de aceptación al no contar una respuesta negativa, afirmando que los módulos inalámbricos funcionan en su totalidad.

Pregunta 2: ¿Cuál fue el nivel de dificultad presente en los módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos al utilizarlos con la estación de clasificación?

Figura 78

Resultados de la pregunta 2

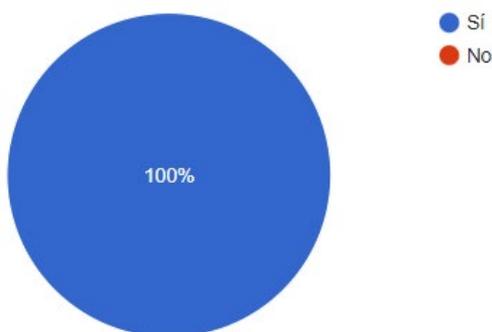


En la Figura 75, muestra la complejidad que obtuvieron los estudiantes al utilizar los módulos didácticos con red de sensores inalámbricos en la estación de clasificación, donde se observa que el 83.3% respondió entre fácil y normal, y el 16.7% respondió difícil, es decir, al obtener una respuesta positiva por parte de la mayoría de encuestados se concluye que no existe mucha dificultad al momento de realizar prácticas.

Pregunta 3: ¿Considera que los módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos complementan lo aprendido en clases?

Figura 79

Resultados de la pregunta 3

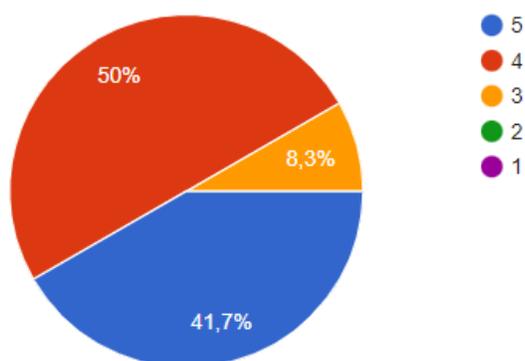


En la Figura 79, se puede observar que el 100% de los encuestados afirma que el uso de módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos complementa lo aprendido en clases, confirmando que el uso de diferentes herramientas didácticas permite reforzar tanto el conocimiento teórico como práctico de los estudiantes.

Pregunta 4: Siendo 5 la puntuación más alta y 1 la puntuación más baja, ¿Cómo calificaría usted el diseño robusto de la estación didáctica de clasificación?

Figura 80

Resultados de la pregunta 4

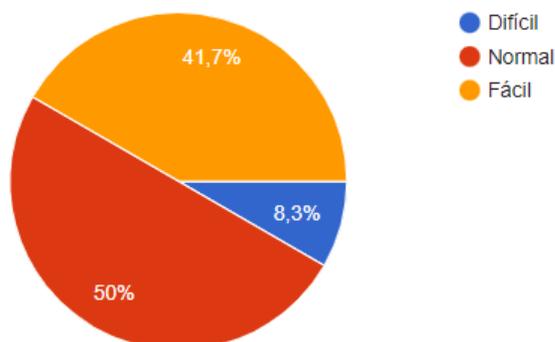


La Figura 80 muestra las respuestas sobre el diseño robusto en donde el 41.7% da una calificación máxima de 5, el 50% califica con 4 y el 8.3% con 3, siendo así se obtuvo que el 91.7% de los estudiantes encuestados da una calificación alta concluyendo que la estación de clasificación presenta una excelente robustez.

Pregunta 5: ¿Cuál fue el nivel de complejidad al momento de usar aplicación móvil?

Figura 81

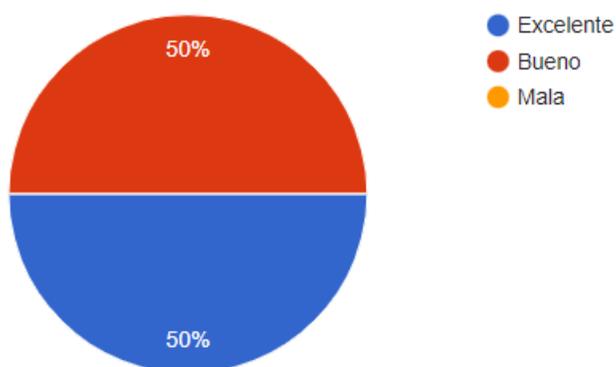
Resultados de la pregunta 5



La Figura 81 indica el nivel de complejidad al momento de utilizar la aplicación móvil donde obtuvo que el 41.7% como fácil, el 50% normal y el 8.3% difícil, demostrando que el 91.7% de los encuestados dominan el uso de la aplicación móvil, permitiendo a los alumnos conseguir la información necesaria para utilizar los diferentes módulos.

Pregunta 6: ¿Cómo evalúa la información que muestra la aplicación móvil?**Figura 82**

Resultados de la pregunta 6



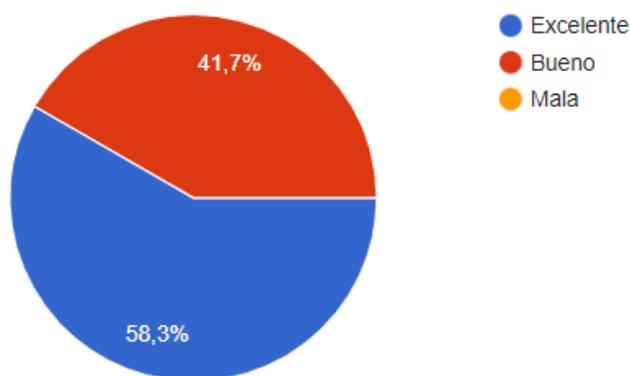
La Figura 82 muestra la calificación sobre la información contenida en la aplicación móvil, donde se tiene respuestas del 50% como excelente y el 50% buena, además de no

presentar respuestas negativas se demuestra que la aplicación contiene información útil para los estudiantes al momento de utilizar los módulos didácticos.

Pregunta 7: ¿Cómo evalúa la experiencia de utilizar el protocolo Lora en un proceso de clasificación didáctico?

Figura 83

Resultados de la pregunta 7

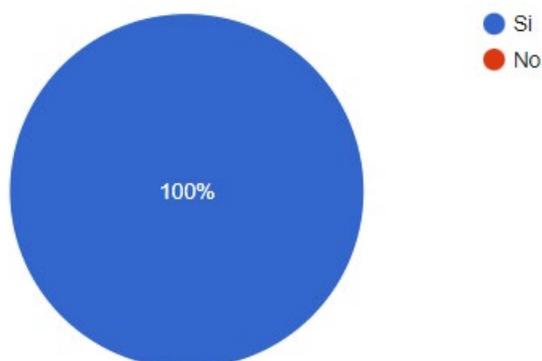


En la Figura 83 se puede apreciar que el 58.3% califica como excelente, el 41.7% bueno, resultando que el 100% de los encuestados responde de manera positiva, con lo cual se afirman que utilizar el protocolo Lora en un proceso de clasificación didáctico resulta sumamente útil para que los estudiantes aprendan sobre esta nueva tecnología.

Pregunta 8: ¿Creé usted que la aplicación móvil sirve de apoyo o guía cuando utiliza la estación de clasificación?

Figura 84

Resultados de la pregunta 8

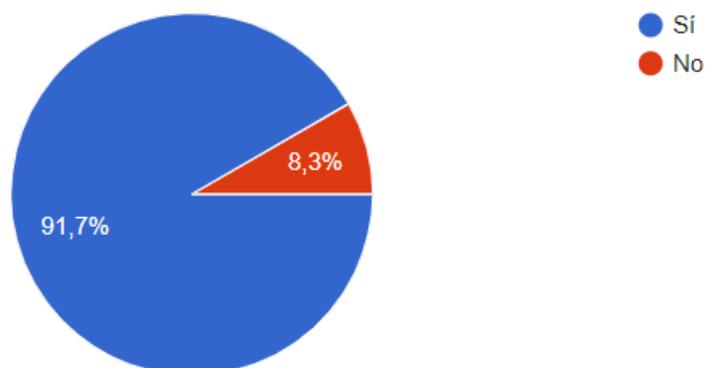


La Figura 84, muestra el 100% de aceptación la utilidad que tiene la aplicación móvil cuando los estudiantes realicen prácticas de laboratorio con la estación de clasificación, permitiendo obtener la información necesaria sobre los módulos además de cómo poner en marcha al sistema de clasificación.

Pregunta 9: ¿Al utilizar los códigos QR pudo identificar las características de los módulos de sensores inalámbricos?

Figura 85

Resultados de la pregunta 9



La Figura 85 permite observar que el 91.7% pudo identificar las características de los módulos de sensores inalámbricos y el 8.3% respondió de manera negativa, sin embargo, al

obtener la mayoría de aceptación se afirma que los códigos QR cumplen con su objetivo de permitir a los estudiantes identificar las características de los módulos.

Pregunta 10: ¿Cuál es su opinión o recomendación para mejorar la estación de clasificación didáctica?

Por medio de las encuestas realizadas a los estudiantes se obtuvo algunas sugerencias, entre las cuales la más redundante fue el problema de latencia de internet en la universidad debido a que este proyecto se caracteriza por utilizar IoT, por lo que se procedió a utilizar otro medio para poderse conectar a internet como es el uso de datos móviles con lo cual el problema mencionado fue resuelto.

Interpretación de resultados de la encuesta

Una vez finalizado el análisis de datos recolectados utilizando encuestas se afirma que se logra cumplir con los parámetros abordados en el diseño de concepto, consiguiendo que los estudiantes de la materia de Introducción a los Sistemas Ciberfísicos puedan realizar prácticas de laboratorio con los módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos en un proceso secuencia de clasificación, obteniendo de esta forma nuevos conocimiento teóricos y prácticos sobre la tecnología LoRa, logrando una aceptación positiva del 95,4% de parte de los estudiantes el uso de dicho sistema.

Validación de la hipótesis

Utilizando el método estadístico Chi-cuadrado se comprueba si el proyecto desarrollado ha obtenido buenos resultados para lo cual es necesario validar la siguiente hipótesis planteada en el proyecto: ¿Es posible desarrollar prácticas de sistemas ciberfísicos con la implementación de módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE?

Planteamiento de Hipótesis

(Ho)= No es posible desarrollar prácticas de sistemas ciberfísicos con la implementación de módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

(Hi)= Es posible desarrollar prácticas de sistemas ciberfísicos con la implementación de módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Se ha realizado diferentes pruebas funcionamiento a los módulos de sensores inalámbricos con la estación de clasificación para validar la hipótesis, como se detallan en la Tabla 32.

Tabla 32

Pruebas de funcionamiento

Ítem	Sistema	Funcional	No funcional	Nº Pruebas
1	Módulo inalámbrico sensor de color	14	1	15
2	Módulo inalámbrico sensor de tamaño	13	2	15
3	Módulo inalámbrico sensor de temperatura y humedad	15	0	15
4	Módulo inalámbrico sensor de material	14	1	15
5	Comunicación entre los módulos y el maestro	12	3	15
6	Baterías	15	0	15
7	Dispensador de objetos	13	2	15
8	Etapas de clasificación	10	5	15
9	Aplicación móvil y códigos QR	10	5	15
	Total	116	19	135

Para aplicar el método de chi-cuadrado se calcula la frecuencia esperada utilizando la ecuación (27).

$$f_t = \frac{T_i \times T_j}{N} \quad (27)$$

Donde:

T_i = Número de pruebas

T_j = Total de funcional o no funcional

N = Total de pruebas

Se calcula la frecuencia esperada funcional:

$$\text{frecuencia esperada funcional} = \frac{15 \times 116}{135} = 12,89$$

Y se calcula la frecuencia esperada no funcional:

$$\text{frecuencia esperada no funcional} = \frac{15 \times 19}{135} = 2,11$$

Aplicando la ecuación (28) se calcula el valor de chi-cuadrado

$$X^2 = \sum \frac{(f_0 - f_t)^2}{f_t} \quad (28)$$

Donde:

X^2 = valor chi – cuadrado

f_0 = frecuencia absoluta

f_t = frecuencia esperada

En la Tabla 33 se muestran los valores para el cálculo de chi-cuadrado y el valor resultante.

Tabla 33

Cálculo del método estadístico

Datos	f_0	f_t	$(f_0 - f_t)$	$(f_0 - f_t)^2$
Funcional 1	14	12,89	1,11	1,23
Funcional 2	13	12,89	0,11	0,01
Funcional 3	15	12,89	2,11	4,46
Funcional 4	14	12,89	1,11	1,23
Funcional 5	12	12,89	-0,89	0,79
Funcional 6	15	12,89	2,11	4,46
Funcional 7	13	12,89	0,11	0,01
Funcional 8	10	12,89	-2,89	8,35
Funcional 9	10	12,89	-2,89	8,35
No funcional 1	1	2,11	-1,11	1,23
No funcional 2	2	2,11	-0,11	0,01
No funcional 3	0	2,11	-2,11	4,46
No funcional 4	1	2,11	-1,11	1,23
No funcional 5	3	2,11	0,89	0,79
No funcional 6	0	2,11	-2,11	4,46
No funcional 7	2	2,11	-0,11	0,01
No funcional 8	5	2,11	2,89	8,35
No funcional 9	5	2,11	2,89	8,35
Total				15,92559

Con la ecuación (29) se calcula los grados de libertad

$$(r - 1) * (c - 1) \quad (29)$$

Donde:

$r = \#$ de filas

$c = \#$ de columnas

$$(9 - 1) * (2 - 1) = 8$$

Por último, se trabajó con un nivel de confianza de valor "p" 0,95 que corresponde al 95%.

Figura 86*Distribución Chi-cuadrado*

p	0.005	0.01	0.025	0.05	0.1	0.9	0.95	0.975	0.99	0.995
$v-1$										
1	0.00004	0.0002	0.001	0.004	0.016	2.706	3.841	5.024	6.635	7.879
2	0.010	0.020	0.051	0.103	0.211	4.605	5.991	7.378	9.210	10.597
3	0.072	0.115	0.216	0.352	0.584	6.251	7.815	9.348	11.345	12.838
4	0.207	0.297	0.484	0.711	1.064	7.779	9.488	11.143	13.277	14.860
5	0.412	0.554	0.831	1.145	1.610	9.236	11.070	12.833	15.086	16.750
6	0.676	0.872	1.237	1.635	2.204	10.645	12.592	14.449	16.812	18.548
7	0.989	1.239	1.690	2.167	2.833	12.017	14.067	16.013	18.475	20.278
8	1.344	1.646	2.180	2.733	3.490	13.362	15.507	17.535	20.090	21.955
9	1.735	2.088	2.700	3.325	4.168	14.684	16.919	19.023	21.666	23.589
10	2.156	2.558	3.247	3.940	4.865	15.987	18.307	20.483	23.209	25.188
11	2.603	3.053	3.816	4.575	5.578	17.275	19.675	21.920	24.725	26.757
12	3.074	3.571	4.404	5.226	6.304	18.549	21.026	23.337	26.217	28.300
13	3.565	4.107	5.009	5.892	7.042	19.812	22.362	24.736	27.688	29.819
14	4.075	4.660	5.629	6.571	7.790	21.064	23.685	26.119	29.141	31.319
15	4.601	5.229	6.262	7.261	8.547	22.307	24.996	27.488	30.578	32.801
16	5.142	5.812	6.908	7.962	9.312	23.542	26.296	28.845	32.000	34.267

La Figura 86, indica la tabla de distribución Chi-cuadrado con la cual se trabajó, dado que el grado libertad calculado es 8 y se considera un nivel confianza del 95% se obtiene un valor crítico de 15,507 designado por la tabla, sin embargo con los datos calculados se obtuvo un chi-cuadrado de 15,92 resultando este mayor, lo que significa que la hipótesis nula es rechazada y la hipótesis alternativa es aceptada con 95% de confiabilidad, donde se menciona que es posible desarrollar prácticas de sistemas ciberfísicos con la implementación de módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Análisis económico del proyecto

Para determinar la factibilidad y la viabilidad del proyecto se aplica un análisis económico según la inversión empleada para la construcción del proyecto. En la Tabla 34 se detallan los diferentes elementos implementados además de la inversión para la construcción de la estación de clasificación y los módulos inalámbricos.

Tabla 34

Elementos implementados en la construcción del proyecto

No.	Elementos	Cant.	P. Unit. \$	P. Total \$
1	Motor nema 17D/Paso 34MM	1	15	15
2	Servomotor MG-995	4	9,5	38
3	Estructura de la mesa	1	30	30
4	Interruptor ON/OFF	4	0,5	2
5	Heltec Lora 32 V3	5	19,5	97,5
6	Aluminio 6061-T4 3mmx500mmx600mm	1	24,5	24,5
7	Rollo de PLA color negro	1	20,5	20,5
8	Altek 750w Atx	1	30	30
9	Sensor Inductivo NPN LJ18A3-8Z/BX	1	12,5	12,5
10	Sensor RGB TCS34725	1	7	7
11	Sensor infrarrojo HW201	4	2,5	10
12	Sensor capacitivo LJC30A3-H-Z/BX	1	12,5	12,5
13	DHT22	1	8,5	8,5
14	ANERA LiPo 1000mAh	3	13,5	40,5
15	Eje 8mm	1	8,5	8,5
16	Chumacera KFL08	4	2,5	10
17	Perfil de aluminio T 15x180x2300	1	110	110
18	Alcatel 9032T	1	60	60
19	Tuercas T y pernos M5	50	0,1	5
20	Polea GT2-6mm	2	2,5	5
21	Corte láser	1	60	60
22	ESP 32	1	12,5	12,5
23	Arduino uno	1	16	16
24	Cuerina negra 1m	1	2	2
25	Pulsador tipo hongo	1	3,25	3,25
26	Luces piloto 24v	2	2,5	5
27	TP4056	3	2,5	7,5
28	Batería LiPo 3s 11,1v	1	30	30
29	Cable flexible AWG 20 2m	1	1,5	1,5
30	Acrílico 50x50cm	1	15	15
31	Placa PCB	3	7,5	22,5

No.	Elementos	Cant.	P. Unit. \$	P. Total \$
32	Driver A4988	1	3,5	3,5
33	Modulo relé 2 canales	1	4,5	4,5
34	Perno M3 y tuerca	20	0,1	2
35	Impuestos y aduanas	1	100	100
36	Otros	1	150	150
	Total			982,25

Para la construcción de los módulos inalámbricos y la estación de clasificación se invirtió un total de 982,25 \$, cabe señal que en el mercado existente muchas empresas destinadas a la construcción de este tipo de sistemas didácticos orientados a la industria 4.0 como Amatrol, donde el modelo más semejante al proyecto propuesto es la Estación de clasificación, como se indica en la Figura 87, que tiene un costo de 10475,00\$. Al comparar el costo de inversión del sistema diseñado y construido por los tesisistas con el módulo disponible en el mercado se obtiene un ahorro de 9492,75\$.

Figura 87

Estación didáctica de clasificación del fabricante Amatrol



Nota. Tomado desde (Amatrol, 2023)

Por lo cual se concluye que la construcción de módulos didácticos con redes de sensores inalámbricos utilizando sistemas ciberfísicos dentro de un proceso secuencial, para el desarrollo de prácticas en el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se puede implementar y construir con materiales y equipos disponibles en el país.

Capítulo VI

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Se construyó de manera exitosa módulos didácticos con red de sensores inalámbricos para identificar temperatura humedad, color, tamaño y material aplicados a un proceso secuencial de clasificación utilizando como enlace el protocolo de comunicación inalámbrica Lora donde se implementó la plataforma Firebase para la recolección de datos en tiempo real y una aplicación móvil para la visualización de los mismo así como también brindar información a los estudiantes sobre las características de los módulos.

Mediante la investigación bibliográfica se logró recopilar suficiente información para seleccionar los diferentes componentes del proyecto como el protocolo de comunicación inalámbrico Lora, el material empleado para los soportes y la mesa aluminio 6061-T4, el controlador Heltec LoRa 32 V3, el sensor de color RGB TCS34725, sensor infrarrojo, sensor capacitivo inductivo, sensor DHT22 y para alimentar a los módulos 3 baterías de litio de 3,7v y una batería LiPo de 12v.

Se diseñó la estructura de los módulos inalámbricos en un software CAD con base a las dimensiones de los componentes electrónicos seleccionados, tomando en cuenta cierto criterios como aberturas para la visualización de la pantalla Oled, la antena y botones para el controlador, resultando en una tapa frontal y una tapa posterior unida por dos pernos M3 para finalmente ser manufacturados en impresión 3D con filamento PLA, de la misma forma se diseñó la estructura de la estación de clasificación compuesta por una mesa ranura de 720mm por 400mm, una banda transportadora, 4 rampas y 8 soportes que fueron adquiridos y manufacturados en aluminio 6061-T4.

Se construyó los módulos inalámbricos utilizando las tapas manufactura en impresión 3D en donde se colocó en el interior de la estructura la batería, el sistema de carga, el controlador Heltec ESP32 LoRa v3, un interruptor y el sensor correspondiente a cada módulo para realizar las conexiones respectivas de cada componente electrónico y finalmente utilizando pernos M3 se ensambló las tapas de la estructura. Para la construcción de la estación de clasificación se ensambló las piezas de aluminio manufacturas en corte laser las cuales fueron colocadas en la mesa ranura con tuercas tipo T y pernos M5 y se acoplo tres actuadores lineales en la etapa de clasificación y un dispensador para dispensar los objetos de clasificación.

Se diseñó la red de sensores inalámbricos utilizando el protocolo de comunicación Lora, en el cual se implementó un módulo maestro conectado a Firebase para recibir los diferentes datos enviados por los módulos inalámbricos en un canal de radio frecuencia especifico de 920000000 Hz, así como también se acondiciono en Arduino el módulo de color para que detecte objetos de color rojo, verde y azul, el módulo de tamaño para detectar objetos pequeños, medianos y grandes, el módulo de material para detectar materiales no metálicos y metálicos y finalmente el módulo de temperatura y humedad para detectar la temperatura en el ambiente.

Se creó la aplicación móvil en Flutter la cual utiliza los datos recolectados por Firebase para crear los widgets donde se visualizan el contador para el color rojo, verde y azul, el contador para el tamaño pequeño, mediano y grande, el contador para el materia metal y no metal y el indicador de temperatura y humedad, se incluyó un botón de inicio y paro para la banda y un botón de reseteo para los contadores y también se incorporó un escáner QR el cual activa la cámara para escanear los QR de los módulos y desplegar las información de estos mismo.

Por medio de pruebas y encuestas realizadas a los estudiantes de la materia de Introducción a los Sistemas Ciberfísicos de la Carrera de Mecatrónica se comprobó la funcionalidad de los módulos de sensores inalámbricos en conjunto con la estación de clasificación y la aplicación móvil obteniendo un promedio de 95,4% de aceptación con respecto a la funcionalidad y utilidad que brinda para el desarrollo de prácticas de laboratorio.

Recomendaciones

Al momento de realizar prácticas de laboratorio con los módulos inalámbricos verificar que estén cargados completamente, además de verificar el estado del internet local, en caso de no disponer de internet para el envío de datos a la nube se recomienda utilizar datos móviles.

Para tener una mejor experiencia al momento de utilizar la estación de clasificación se recomienda revisar el manual de usuario para la puesta en marcha del sistema en caso de tener dudas puede utilizar el código QR de los diferentes módulos los cuales brindaran de la información necesaria en la aplicación móvil.

Al momento conectar los módulos inalámbricos al computador se recomienda que este apagado, de la misma forma para cargar los módulos deben estar apagados además se puede utilizar un cargador de celular con clave micro USB.

En caso de tener problema con la comunicación entre el módulo maestros y el módulo inalámbrico se recomienda apagar y encender los módulos, si el problema persiste revisar la programación y verificar que estén en la mi radiofrecuencia (920000000 Hz) y verificar que el maestro se conecte a la red local.

Antes de utilizar los módulos inalámbricos verificar que los diferentes sensores detecten los objetos de clasificación correctamente en caso de tener problemas con el módulo de tamaño calibrar los sensores infrarrojos con un desarmador plano para borneras y calibrarlos debido a que estos son sensibles a la luz.

Cuando se utilice la estación de clasificación verificar que el módulo inalámbrico este colocado correctamente para que no obstruya el paso de los objetos a clasificar y pueda detectar correctamente los mismos.

Bibliografía

- Lázaro, M., Losantos, B., y Bayo, P. (2008). *Nuevas tablas de fuerza de la mano para población adulta de Teruel*. *Nutrición Hospitalaria*:
http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112008000100006&lng=es&tlng=es.
- Alliance, L. (2023). *LoRaWAN*. <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>
- Amatrol. (2023). *Almacenamiento y clasificación mecatrónica*.
<https://amatrol.com/product/sorting-buffering-training/>
- Baker, B. (2018). *Cómo optimizar el brillo de la pantalla para potencia baja en tiempo real*.
<https://www.digikey.com.mx/es/articles/how-to-optimize-display-brightness-for-low-power-in-real-time>
- Becolve. (2022). *Conceptos técnicos básicos que te ayudarán a entender LoRa y LoRaWAN (Low Power Wide Area Network) en pocos minutos*. <https://becolve.com/blog/conceptos-tecnicos-basicos-que-te-ayudaran-a-entender-lora-y-lorawan-low-power-wide-area-network-en-pocos-minutos/>
- Caicedo, L. M. (2020). *Diseño e implementación de un módulo didáctico de sensores industriales, utilizando sistemas embebidos, para el desarrollo de prácticas en el Laboratorio de redes industriales y control de procesos*.
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/23329>
- Calero, L. (2022). *Implementación de un módulo didáctico domótico para el control de sistemas de calefacción, sonido y persianas*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22165>

- Carmona, J. (11 de Octubre de 2021). *Bluetooth y su evolución: estas son las diferencias entre las distintas clases y versiones*. <https://www.xatakahome.com/curiosidades/bluetooth-su-evolucion-estas-diferencias-distintas-versiones>
- Castillo, J. A. (7 de Marzo de 2020). *WLAN: Qué es, definición, estándar 802.11 y diferencias con LAN*. Profesional Review: <https://www.profesionalreview.com/2020/03/07/wlan-que-es/>
- Cevallos Salgado, M. P., y Chugá Rosero, M. A. (2019). *Diseño e implementación de un prototipo de monitoreo inalámbrico de temperatura, energía y módulo de entradas/salidas con almacenamiento en la nube para la empresa GENTEC S.A.* <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20597>
- Chandy, J. C. (2010). *Desafíos en el diseño de sistemas Ciber-Físicos*. Ingenierías USBMed: <https://doi.org/10.21500/20275846.231>
- Chicaiza, J. D. (2021). *Desarrollo de un sistema de monitorización del índice de radiación ultravioleta orientado a smart campus, mediante una red de sensores inalámbricos con tecnología Sigfox*. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/25648>
- Digi. (2021). *Red de malla inalámbrica Zigbee*. <https://es.digi.com/solutions/by-technology/zigbee-wireless-standard#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20Zigbee%3F,coste%20y%20bajo%20consumo%20IoT%20>.
- Edge. (2022). *Sofisticación y diversificación de los sensores - La evolución de la tecnología de los sensores*. <https://blog.stratus.com/es/advanced-and-wide-variety-of-sensors/#:~:text=La%20evoluci%C3%B3n%20de%20los%20sensores%20es%20esencial%20para%20la%20evoluci%C3%B3n,la%20informaci%C3%B3n%20obtenida%20por%20ellos>.

- Egas, C. (26 de Septiembre de 2019). *Implementación de una red inalámbrica de sensores para la gestión de luminarias utilizando IPv6*. UTE:
<https://doi.org/10.29019/enfoque.v10n4.553>
- Fernandez, Y. (21 de Abril de 2021). *Bluetooth: diferencias y características de sus clases y versiones*. <https://www.xataka.com/basics/bluetooth-diferencias-caracteristicas-sus-clases-versiones>
- Festo. (2023). *Estación de clasificación en línea MPS 400* .
https://www.festo.com/mx/es/p/estacion-de-clasificacion-en-linea-id_PROD_DID_8129438/?page=0
- Firebase. (14 de Julio de 2023). *Plataforma de desarrollo de apps*. <https://firebase.google.com>
- Flutter. (10 de Julio de 2023). *Open source framework*. <https://flutter.dev/>
- García, C. R. (2017). *Implementación de una comunicación MODBUS mediante radios inalámbricos RS485 para prácticas de control de procesos en el laboratorio de instrumentación virtual*. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/25753>
- GeekFactory. (2023). *Geek Factory*. <https://www.geekfactory.mx/tienda/sensores/tcs34725-sensor-de-reconocimiento-de-color/>
- Heltec. (2023). *Heltec Automation*. <https://heltec.org/project/wifi-lora-32-v3/>
- Herrera, M. (06 de Juino de 2022). *Fragmentos de la Industria 4.0: Sistemas ciber físicos*. MagazIEEE Ecuador: <https://r9.ieee.org/ecuador-magaz/fragmentos-de-la-industria-4-0-sistemas-ciber-fisicos/>
- HI-FI. (2023). *Sensor de obstáculos infrarrojo para Arduino en PCB HW-201A*.
<https://hifisac.com/shop/ard-ir5mm-sensor-de-obstaculos-infrarrojo-para-arduino-en-pcb-hw-201a->

1482?order=name+desc&category=44&product=product.template%281482%2C%29#att
r=

IBM. (2023). *Cómo las tecnologías de la Industria 4.0 están cambiando la fabricación.*

[https://www.ibm.com/es-es/topics/industry-4-](https://www.ibm.com/es-es/topics/industry-4-0#:~:text=La%20Industria%204.0%20est%C3%A1%20revolucionando,computing%2C%20IA%20y%20machine%20learning.)

[0#:~:text=La%20Industria%204.0%20est%C3%A1%20revolucionando,computing%2C%20IA%20y%20machine%20learning.](https://www.ibm.com/es-es/topics/industry-4-0#:~:text=La%20Industria%204.0%20est%C3%A1%20revolucionando,computing%2C%20IA%20y%20machine%20learning.)

Jacobson, R. M. (2017). *Comparativa y estudio de plataformas IoT.*

[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/113622/TFG-](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/113622/TFG-RodrigoMartinezJacobson.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[RodrigoMartinezJacobson.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/113622/TFG-RodrigoMartinezJacobson.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Martínez, F. (2015). MÁQUINA CLASIFICADORA DE FLORES: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.

Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, I(27).

<https://doi.org/10.24054/16927257.v27.n27.2016.2534>

Mecafenix. (13 de Abril de 2023). *Que son los sensores, que tipos existen y como funcionan.*

<https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensores/guia-sensores/>

Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas.* SIMON & SCHUSTER INTERNATIONAL GROUP .

Naylamp. (2023). *SENSOR DE PROXIMIDAD CAPACITIVO LJC18A3-H-Z/BX (NPN-NO).*

<https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/296-sensor-de-proximidad-capacitivo-ljc18a3-h-zbx-npn-no.html>

Nexus. (2019). *¿Cómo implementar sistemas ciberfísicos? INDUSTRIA 4.0,*

TRANSFORMACIÓN DIGITAL: <https://nexusintegra.io/es/implementar-sistemas-ciberfisicos/>

NOVAtronic. (2023). *Sensor Inductivo NPN NO 8mm LJ18A3-8Z/BX 6- 36V.*

<https://novatronicec.com/index.php/product/sensor-inductivo-npn-no-8mm-lj18a3-8z-bx-6-36v/>

Ordóñez, Á. (25 de Enero de 2019). *Un primer vistazo a las Redes de Sensores Inalámbricos (RSI).* CIT-Universidad Nacional de Loja:

<https://telecomunicaciones.edu.ec/repositorio/articulos-blog/iot/un-primer-vistazo-a-las-redes-de-sensores-inala-mbricos-rsi>

Ramírez, L. (9 de Marzo de 2023). *¿Qué es la automatización industrial?*

<https://www.iebschool.com/blog/que-es-la-automatizacion-industrial-empresas-tecnologia/>

Robotics. (2023). *SENSOR DE HUMEDAD Y TEMPERATURA DHT22.*

<https://roboticsec.com/producto/sensor-de-humedad-y-temperatura-dht22/>

SDI. (2023). *¿Qué es un actuador?* <https://sdindustrial.com.mx/blog/actuadores/>

Techopedia. (Abril de 2023). *¿Qué es ieee 802.11?* [https://es.theastrologypage.com/ieee-802-](https://es.theastrologypage.com/ieee-802-11)

11

TechTarget. (2021). *Red de sensores inalámbricos o WSN.*

<https://www.computerweekly.com/es/definicion/Red-de-sensores-inalambricos-o-WSN>

Tekniker. (29 de Mayo de 2019). *REDES DE SENSORES.* <https://www.tekniker.es/es/redes-de-sensores>

Ulrich, K. (2013). *Diseño y desarrollo de productos.* México, D.F.: McGRAW-

HILL/INTERAMERICANA EDITORES S.A DE C.V.

Valencia Quezada, L. L. (2014). *Desarrollo de un modelo óptimo de una red de sensores inalámbricos aplicado a monitorización volcánica en tiempo real.*

<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/9543>

Yubero, Ó. U. (23 de Noviembre de 2020).

<https://www.comunicacionesinalambricashoy.com/wireless/que-es-lora-y-lorawan/>.

<https://www.comunicacionesinalambricashoy.com/wireless/que-es-lora-y-lorawan/>

Anexos