



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,**  
**ELECTRÓNICA Y SISTEMAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**ELÉCTRICA**



**SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL DE LOS  
PARÁMETROS DEL VIENTO CON IoT LoRaWAN EN PUNO  
PARA ESTIMAR EL RECURSO EÓLICO DISPONIBLE**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

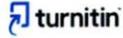
**JHOSEP BRAYAM HUARACHI MAMANI**

**EVER MARTIN CALCINA QUISPE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PUNO – PERÚ**

**2024**



# JHOSEP BRAYAM & EVER MARTIN HUARACHI MAM... SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL DE LOS PARÁMETROS DEL VIENTO CON IoT LoRaWAN EN PUNO PAR...

Universidad Nacional del Altiplano

## Detalles del documento

Identificador de la entrega  
trn:oid::8254:415460052

208 Páginas

Fecha de entrega  
12 dic 2024, 11:47 a.m. GMT-5

34,909 Palabras

Fecha de descarga  
12 dic 2024, 12:08 p.m. GMT-5

190,038 Caracteres

Nombre de archivo  
12\_12\_SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL DE LOS PARÁMETROS DEL VIENTO CON IoT L....docx

Tamaño de archivo  
43.6 MB





## 14% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

### Fuentes principales

- 12% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 9% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



-----  
JOSE MANUEL RAMOS CUTIPA  
ING MECANICO ELECTRICISTA  
CIP 78419



-----  
M.Sc. Felipe Condori Chambilla  
SUBDIRECTOR DE INVESTIGACIÓN  
EPIME





## DEDICATORIA

*Primero y por, sobre todo, a Dios, quien con su infinita guía y fortaleza ha iluminado mi camino, dándome la capacidad de avanzar en mi vida personal y profesional, superando retos y dificultades, y alcanzando con su gracia los objetivos que me propuse.*

*Con cariño y gratitud a mi madre, Valeriana Mamani, y a mi padre, Domingo Huarachi, por su apoyo incondicional y por acompañarme en todo momento, tanto en los desafíos como en los logros, brindándome siempre su amor y guía. Gracias por la educación y formación que me han inculcado, permitiéndome crecer como persona.*

*A mis hermanos, Ruben y Jose, por su apoyo constante, su presencia y su confianza en mí, que han sido una fuente constante de motivación en cada paso de este camino.*

*A todos ustedes, que han sido parte fundamental de mi camino, dedico este trabajo con todo mi reconocimiento y gratitud por su constante apoyo y confianza.*

**JHOSEP BRAYAM HUARACHI MAMANI**



## DEDICATORIA

*A Dios, por ser mi guía constante en el camino del bien, por acompañarme en los momentos de alegría y dificultad, y por colmar mi vida con bendiciones que iluminan cada paso de mi recorrido.*

*A mi madre, María Quispe, fuerza inquebrantable y alma generosa, por ser la raíz de mis sueños y la luz que guía cada uno de mis pasos. Tu amor infinito, tu sacrificio silencioso y tu fe inquebrantable son el motor que me impulsa a superar cada obstáculo; este logro es un reflejo de tu dedicación y amor.*

*A mis hermanos, Rony, Mirian y Martha, mi refugio y apoyo incondicional, gracias por estar siempre a mi lado en cada desafío y en cada logro.*

*Y a mi padre, Martin Calcina, cuya ausencia se llena con su eterna presencia. Desde el cielo, sé que sus manos invisibles sostienen mis pasos y me dan fuerzas para seguir adelante en esta vida.*

*Este logro es el resultado del apoyo, la fe y la confianza que todos ustedes han depositado en mí. A cada uno de ustedes, les dedico este trabajo con todo mi agradecimiento.*

**EVER MARTIN CALCINA QUISPE**



## AGRADECIMIENTOS

*A la prestigiosa Universidad Nacional del Altiplano, Alma Mater, por darnos la oportunidad de estudiar y formarnos profesionalmente, brindándonos una educación de excelencia que ha sido la base de nuestro desarrollo académico y personal.*

*A la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica, una de las mejores carreras profesionales, por guiarnos y forjarnos como futuros profesionales, ofreciéndonos una formación integral y de alta calidad.*

*A nuestro director y asesor de tesis, el M.Sc. Jose Manuel Ramos Cutipa, por su constante orientación, paciencia y por los valiosos conocimientos que contribuyeron de manera significativa al desarrollo de este trabajo de investigación.*

*A los miembros del jurado, el Dr. Norman Jesus Beltran Castañon, el M.Sc. Roberto Jaime Quiroz Sosa, y el M.Sc. Omar Chayña Velasquez, por sus observaciones, tiempo y aportes, los cuales mejoraron y enriquecieron este proyecto académico.*

*De manera especial, expresamos nuestro más profundo agradecimiento a nuestras familias, por su confianza, consejos y apoyo incondicional, que han sido fundamentales en este camino académico y personal.*

**JHOSEP BRAYAM HUARACHI MAMANI**

**EVER MARTIN CALCINA QUISPE**



# ÍNDICE DE GENERAL

	<b>Pág.</b>
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>ÍNDICE DE GENERAL</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b>	
<b>ACRÓNIMOS</b>	
<b>RESUMEN .....</b>	<b>22</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>23</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>26</b>
1.1.1. Problema general .....	26
1.1.2. Problemas específicos.....	27
<b>1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>27</b>
1.2.1. Objetivo General.....	27
1.2.2. Objetivos Específicos .....	27
<b>1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>28</b>
1.3.1. Hipótesis general.....	28
1.3.2. Hipótesis específica .....	28
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b>	
<b>2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO .....</b>	<b>29</b>



<b>2.2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>33</b>
2.2.1. Internet de las cosas (IoT).....	33
2.2.2. Arquitectura de IoT.....	35
2.2.2.1. Capa de percepción .....	36
2.2.2.2. Capa de red.....	37
2.2.2.3. Capa de procesamiento.....	37
2.2.2.4. Capa de aplicación .....	37
2.2.3. Tecnologías de comunicación inalámbrica en IoT .....	38
2.2.4. Red de área amplia de baja potencia LPWAN .....	39
2.2.4.1. Desarrollo de la tecnología LPWAN .....	39
2.2.4.2. Arquitectura de una red LPWAN.....	41
2.2.4.3. Tecnologías LPWAN .....	42
2.2.4.4. Comparativa de las tecnologías LPWAN más importantes .....	43
2.2.5. LoRa y LoRaWAN .....	45
2.2.6. LoRa.....	45
2.2.6.1. Modulación.....	45
2.2.6.2. Modulación de amplitud (AM) .....	46
2.2.6.3. Modulación de frecuencia (FM).....	46
2.2.6.4. La modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) .....	46
2.2.6.5. La modulación de espectro ensanchado (CSS) de chirp .....	46
2.2.6.6. Parámetros de transmisión en LoRa.....	47
2.2.6.7. Potencia de transmisión (TP) .....	47
2.2.6.8. Frecuencia portadora (CF) .....	47
2.2.6.9. Factor de dispersión (SF) .....	48
2.2.6.10. Ancho de banda (BW).....	48



2.2.7. LoRaWAN .....	49
2.2.8. Arquitectura LoRaWAN .....	51
2.2.8.1. Nodo Final .....	51
2.2.8.2. Gateway .....	51
2.2.8.3. Network Server .....	51
2.2.8.4. Application Server .....	52
2.2.9. Frecuencias y parámetros regionales .....	53
2.2.10. Clases de dispositivos LoRaWAN .....	54
2.2.10.1. Nodo clase A .....	54
2.2.10.2. Nodo clase B .....	55
2.2.10.3. Nodo clase C .....	56
2.2.11. Modos de Activación de Nodos Finales y su seguridad .....	57
2.2.11.1. Activación por Aire (OTAA) .....	58
2.2.11.2. Activación por Personalización (ABP) .....	60
2.2.12. Cobertura LoRaWAN .....	60
2.2.13. Naturaleza del viento .....	62
2.2.13.1. Gradiente de presión .....	62
2.2.13.2. Cinturón de presión .....	62
2.2.13.3. Efecto coriolis .....	63
2.2.13.4. Efecto fricción y cizalladura .....	64
2.2.14. Escala Beaufort .....	65
2.2.15. Vientos locales .....	66
2.2.15.1. Brisas de mar y brisas de tierra .....	66
2.2.15.2. Brisas de valle y de montaña (vientos anabáticos y catabáticos) .....	67





2.2.20.1. Parámetro de forma y escala de Weibull.....	80
2.2.20.2. Distribución acumulada de Weibull ( $F_v$ ) - CDF.....	80
2.2.20.3. Distribución acumulada complementaria de Weibull $\bar{F}'(v)$ - CCDF .....	81
2.2.20.4. La probabilidad de intervalo utilizando la CDF.....	82
2.2.20.5. Ley de Rayleigh .....	82
2.2.21. Determinación de los parámetros de Weibull .....	83
2.2.21.1. Método de los mínimos cuadrados.....	83
2.2.21.2. Método de máxima verosimilitud (MLE) .....	85
2.2.22. Densidad de potencia eólica media anual .....	86
2.2.23. Densidad de potencia eólica disponible ( $P_d$ ).....	87
2.2.24. Densidad de potencia eólica aprovechable ( $P_a$ ) .....	88
2.2.24.1. La densidad del aire en función de la humedad .....	88
2.2.24.2. Impacto en la energía eólica debido a la altura sobre el nivel del mar .....	90
2.2.25. Densidad de potencia eólica real ( $P_r$ ).....	90
2.2.25.1. Eficiencia global de un aerogenerador ( $n_g$ ).....	90

### CAPÍTULO III

#### MÉTODOS Y MATERIALES

<b>3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO.....</b>	<b>92</b>
3.1.1. Simulación del radio de cobertura del sistema de monitoreo IoT LoRaWAN utilizando Radio Mobile .....	93
3.1.1.1. Perfil de elevación del Gateway a los nodos.....	93
3.1.2. Simulación de cobertura en Radio Mobile .....	95
<b>3.2. PERIODO DE DURACIÓN DEL ESTUDIO .....</b>	<b>96</b>



<b>3.3.</b>	<b>HARDWARE Y SOFTWARE.....</b>	<b>97</b>
3.3.1.	Softwares .....	97
3.3.1.1.	The Things Network (TTN) .....	97
3.3.1.2.	Ide Arduino .....	97
3.3.1.3.	Thigspeak .....	98
3.3.1.4.	Google Colab.....	98
3.3.1.5.	Gogle Earth .....	99
3.3.1.6.	Radio Mobile.....	99
3.3.2.	Hardwares .....	99
3.3.2.1.	Gateway Dragino LPS8N.....	99
3.3.2.2.	Esp32.....	102
3.3.2.3.	Rak 3172 .....	104
3.3.2.4.	Anemómetro WH2081 .....	106
3.3.2.5.	Veleta de viento WH2081 .....	106
3.3.2.6.	BME280 .....	107
3.3.2.7.	Power bank Xiaomi de 20000 mAh.....	109
3.3.2.8.	Controlador de carga .....	110
3.3.2.9.	Panel Solar Bossney BS3509 18W .....	110
<b>3.4.</b>	<b>POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO .....</b>	<b>111</b>
3.4.1.	Población .....	111
3.4.2.	Muestra .....	112
<b>3.5.</b>	<b>ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>112</b>
<b>3.6.</b>	<b>TIPO INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>113</b>
<b>3.7.</b>	<b>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>113</b>
<b>3.8.</b>	<b>NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>113</b>





## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>143</b>
4.1.1. Resultados para el objetivo específico 1 .....	143
4.1.1.1. Muestra de datos sin procesar del sistema de monitoreo .....	144
4.1.1.2. Discusión.....	145
4.1.2. Resultado para el objetivo específico 2 .....	146
4.1.2.1. Gráficos del Nodo 1 .....	147
4.1.2.2. Gráficos del Nodo 2 .....	156
4.1.2.3. Discusión.....	161
4.1.3. Resultados para el objetivo específico 3.....	162
4.1.3.1. Análisis estadístico, cálculo de potencias eólicas y rosa de vientos de los datos recolectados del nodo 1 .....	163
4.1.3.2. Análisis estadístico, cálculo de potencias eólicas y rosa de vientos de los datos recolectados del nodo 2 .....	170
4.1.3.3. Resumen de resultados para el Nodo 1 y el Nodo 2.....	176
4.1.3.4. Discusión.....	179
4.1.4. Comparativa de datos medidos por el nodo 1 y 2, NASA y SENAMHI	180
4.1.4.1. Discusión.....	182
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>184</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>187</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>188</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>193</b>

**ÁREA:** Control de Procesos

**TEMA:** Energías Renovables

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 19 de diciembre del 2024



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Comparativa de tecnologías LPWAN más populares.....	43
<b>Tabla 2</b> Frecuencias de Transmisión LoRa permitidas por País y Región .....	53
<b>Tabla 3</b> Comparativa de cobertura LoRaWAN con otras tecnologías LPWAN.....	61
<b>Tabla 4</b> Escala Beaufort de intensidades de viento.....	65
<b>Tabla 5</b> Dirección del viento en grados.....	70
<b>Tabla 6</b> Ubicación de los componentes del sistema de monitoreo IoT LoRaWAN .	92
<b>Tabla 7</b> Parámetros técnicos del Gateway y nodos del sistema IoT LoRaWAN.....	93
<b>Tabla 8</b> Planes que ofrece Thisgspeak .....	98
<b>Tabla 9</b> Especificaciones técnicas del Esp 32 Dev Module de 30 pines.....	103
<b>Tabla 10</b> Relación entre Dirección y Resistencia de la veleta WH2081.....	106
<b>Tabla 11</b> Especificaciones técnicas del sensor BME 280 .....	107
<b>Tabla 12</b> Muestra de la data recolectada del Nodo 1 .....	145
<b>Tabla 13</b> Resumen de resultados del Nodo 1 .....	177
<b>Tabla 14</b> Resumen de resultados del Nodo 2.....	178



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Pronóstico global del mercado de IoT en miles de millones de dispositivos conectados .....	34
<b>Figura 2</b> Capas de la arquitectura IoT: percepción, red, procesamiento y aplicación .....	36
<b>Figura 3</b> Clasificación de redes inalámbricas según el rango de proximidad y tecnologías asociadas.....	38
<b>Figura 4</b> Número de conexiones LPWAN en todo el mundo del 2017 al 2023 .....	40
<b>Figura 5</b> Arquitectura básica de una red LPWAN .....	41
<b>Figura 6</b> Comparativa de Spreading Factor, Bitrate y Alcance en LPWAN .....	49
<b>Figura 7</b> Arquitectura LoRaWAN .....	50
<b>Figura 8</b> Arquitectura de red .....	52
<b>Figura 9</b> Clases nodos LoRaWAN.....	54
<b>Figura 10</b> Envío y recepción de datos en un nodo clase A .....	55
<b>Figura 11</b> Envío y recepción de datos en un nodo clase B .....	56
<b>Figura 12</b> Envío y recepción de datos en un nodo clase C .....	57
<b>Figura 13</b> Proceso de activación OTAA .....	59
<b>Figura 14</b> Proceso de activación ABP .....	60
<b>Figura 15</b> Cinturones de circulación por convección .....	63
<b>Figura 16</b> Circulaciones atmosféricas idealizadas .....	64
<b>Figura 17</b> Gradiente del viento y cizalladura.....	65
<b>Figura 18</b> Formación de brisas de mar y de tierra .....	67
<b>Figura 19</b> Formación de brisas de valle y montaña .....	67
<b>Figura 20</b> Anemómetro de 3 copas .....	73
<b>Figura 21</b> Densidad de probabilidad de Weibull .....	79
<b>Figura 22</b> Ubicación geográfica del Gateway LPS8N y nodos de la red LoRaWAN	92
<b>Figura 23</b> Perfil de elevación del Gateway a Nodo 1 (Ruta 1) .....	94
<b>Figura 24</b> Perfil de elevación del Gateway a Nodo 2 (Ruta 2) .....	94
<b>Figura 25</b> Simulación de cobertura LoRaWAN en Radio Mobile.....	95
<b>Figura 26</b> Integración de cobertura LoRaWAN en Google Earth .....	96
<b>Figura 27</b> Estructura del sistema de hardware del Gateway LPS8N .....	101



<b>Figura 28</b>	Gateway LPS8N Dragino .....	102
<b>Figura 29</b>	Rak 3172.....	104
<b>Figura 30</b>	Conexiones y Configuración del Sensor BME280.....	108
<b>Figura 31</b>	Power bank Xiaomi de 20000 mAh .....	109
<b>Figura 32</b>	Controlador de carga .....	110
<b>Figura 33</b>	Panel sola Bossney BS3509 de 18W .....	111
<b>Figura 34</b>	Arquitectura IoT del sistema de monitoreo eólico .....	115
<b>Figura 35</b>	Diagrama de flujo de la capa de percepción.....	117
<b>Figura 36</b>	Diagrama de Conexiones en la Capa de Percepción .....	119
<b>Figura 37</b>	Diagrama de flujo de la capa de percepción.....	120
<b>Figura 38</b>	Esquema de conexión para la transmisión de datos entre el módulo RAK3172 y el Gateway Dragino LPS8N.....	121
<b>Figura 39</b>	Configuración de LoRa en el Gateway LPS8N.....	123
<b>Figura 40</b>	Configuración de LoRaWAN en el Gateway LPS8N .....	124
<b>Figura 41</b>	Registro del Gateway en The Things Network .....	125
<b>Figura 42</b>	Descripción general del estado del Gateway y sus componentes.....	126
<b>Figura 43</b>	Creación de una aplicación en The Things Network.....	126
<b>Figura 44</b>	Registro de end device en la aplicación creada en The Things Network .	129
<b>Figura 45</b>	Diagrama de flujo de la capa de procesamiento .....	130
<b>Figura 46</b>	Configuración y programación del Payload Formatters.....	132
<b>Figura 47</b>	Visualización Correcta de Datos Decodificados en Live Data de The Things Network .....	132
<b>Figura 48</b>	Creación y personalización del Channels en ThingSpeak.....	133
<b>Figura 49</b>	Obtención del Channel ID y Write API Key en ThingSpeak.....	134
<b>Figura 50</b>	Integración de Thingspeak en el Webhooks de The Things Network.....	135
<b>Figura 51</b>	Estado de integración de Webhook en The Things Network .....	136
<b>Figura 52</b>	Almacenamiento de datos en Thingspeak .....	136
<b>Figura 53</b>	Diagrama de flujo de la capa de aplicación .....	137
<b>Figura 54</b>	Read API Key en ThingSpeak y Google Colab .....	139
<b>Figura 55</b>	Datos y Cálculos Guardados en Carpetas a través de Google Colab para el Nodo 1 y Nodo 2 .....	142
<b>Figura 56</b>	Nodo 1 y Nodo 2 del sistema de monitoreo .....	144
<b>Figura 57</b>	Velocidad y dirección del viento sensados por el Nodo 1 .....	148
<b>Figura 58</b>	Temperatura y humedad del viento censados por el Nodo 1 .....	149



<b>Figura 59</b>	Presión y voltaje censado por el Nodo 1 .....	150
<b>Figura 60</b>	Velocidad promedio y velocidad máxima del viento registrado por el Nodo 1 .....	151
<b>Figura 61</b>	Comparativa de la velocidad promedio del viento con las variables climáticas .....	152
<b>Figura 62</b>	Densidad del aire calculada en función de la temperatura, humedad y presión .....	153
<b>Figura 63</b>	La Velocidad del Viento, Promedio, Medida y Máxima con Variables Climáticas .....	154
<b>Figura 64</b>	Comportamiento del voltaje del Power Bank durante un día.....	155
<b>Figura 65</b>	Comparativa de la velocidad promedio del viento con las variables climáticas .....	156
<b>Figura 66</b>	Densidad del aire calculada en función de la temperatura, humedad y presión .....	158
<b>Figura 67</b>	La Velocidad del Viento, Promedio, Medida y Máxima con Variables Climáticas .....	159
<b>Figura 68</b>	Comportamiento del voltaje del Power Bank durante un día.....	160
<b>Figura 69</b>	Resultados Diarios del Análisis Estadístico y Cálculo de Potencia Eólica en Google Sheets Generados con Google Colab.....	162
<b>Figura 70</b>	Gráfico de la regresión lineal para el día 20 septiembre del 2024 .....	164
<b>Figura 71</b>	Histograma de frecuencias relativas y distribución de Weibull – PDF (Regresión) para el día 20 de septiembre del 2024 .....	165
<b>Figura 72</b>	Histograma de frecuencias relativas y la distribución de Weibull – PDF (MLE) para el día 20 de septiembre del 2024 .....	165
<b>Figura 73</b>	Frecuencia complementaria relativa y distribución acumulada de Weibull – CDF (Regresión) para el día 20 de septiembre del 2024.....	166
<b>Figura 74</b>	Frecuencia complementaria relativa y distribución acumulada de Weibull – CDF (MLE) para el día 20 de septiembre del 2024 .....	167
<b>Figura 75</b>	Las densidades de potencia eólica para el día 20 de septiembre del 2024	168
<b>Figura 76</b>	La rosa del viento para el día 20 septiembre del 2024 .....	169
<b>Figura 77</b>	Gráfico de la regresión lineal para el día 6 de octubre del 2024 .....	170
<b>Figura 78</b>	Histograma de frecuencias relativas y distribución de Weibull – PDF (Regresión) para el día 6 de octubre del 2024 .....	171



<b>Figura 79</b>	Histograma de frecuencias relativas y la distribución de Weibull – PDF (MLE) para el día 6 de octubre del 2024.....	172
<b>Figura 80</b>	Frecuencia complementaria relativa y distribución acumulada de Weibull – CDF (Regresión) para el día 6 de octubre del 2024 .....	173
<b>Figura 81</b>	Frecuencia complementaria relativa y distribución acumulada de Weibull – CDF (MLE) para el día 6 de octubre del 2024 .....	174
<b>Figura 82</b>	Las densidades de potencia eólica para el día 6 de octubre del 2024.....	175
<b>Figura 83</b>	La rosa del viento para el día 6 de octubre del 2024 .....	176
<b>Figura 84</b>	Comparativa de la velocidad del viento por Hora entre Nodo 1, SENAMHI Y NASA .....	181
<b>Figura 85</b>	Comparativa de la velocidad del viento por Hora entre Nodo 2, SENAMHI Y NASA .....	182



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO 1:</b> Código de programación del Nodo 1 y Nodo 2.....	193
<b>ANEXO 2:</b> Código de programación del Payload Formatters .....	201
<b>ANEXO 3:</b> Conexión de componentes del Nodo 1 y Nodo 2 .....	203
<b>ANEXO 4:</b> Matriz de consistencia del presente proyecto de investigación.....	204
<b>ANEXO 5:</b> Declaración jurada de autenticidad de tesis.....	205
<b>ANEXO 6:</b> Autorización para el depósito de tesis en el repositorio institucional .....	207



## ACRÓNIMOS

ADR:	Adaptive Data Rate
AES:	Advanced Encryption Standard
API:	Application Programming Interface
AppEUI:	Application Identifier
AppKey:	Application Key
AT:	Attention Command
CSS:	Chirp Spread Spectrum
DB:	Data Bitrate
DBm:	Decibel-milliwatt
DevEUI:	Device Identifier
EUI:	Extended Unique Identifier
FSK:	Frequency Shift Keying
GPIO:	General-Purpose Input/Output
GPUs:	Graphics Processing Units
HTML:	HyperText Markup Language
HTTP:	Hypertext Transfer Protocol
I2C:	Inter-Integrated Circuit
IoT:	Internet of Things
JS:	JavaScript
LoRa:	Long Range
LoRaWAN:	Long Range Wide Area Network
LPWAN:	Low Power Wide Area Network
MAC:	Media Access Control
NASA:	National Aeronautics and Space Administration
RSSI:	Received Signal Strength Indicator
SENAMHI:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SNR:	Signal-to-Noise Ratio
SPI:	Serial Peripheral Interface
TTN:	The Things Network
UTM:	Universal Transverse Mercator
P2P:	Peer-to-Peer



## RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo implementar un sistema de monitoreo en tiempo real de los parámetros del viento mediante IoT LoRaWAN en Puno, para estimar el recurso eólico disponible en zonas de interés. Se adoptó un enfoque cuantitativo con un diseño cuasiexperimental y nivel exploratorio-descriptivo. La población de estudio incluye zonas con potencial eólico y cobertura del Gateway, instalando dos nodos de monitoreo en puntos estratégicos para validar el sistema. El sistema mide la velocidad y dirección del viento, junto con la temperatura, humedad y presión atmosférica. Los nodos, ubicados a 1.86 km y 7.12 km del Gateway, lograron una comunicación estable con solo un 0.87% de pérdida de datos. Los registros se almacenaron en ThingSpeak y fueron analizados automáticamente en Google Colab utilizando la distribución de Weibull. Las rosas de viento revelaron que los vientos predominantes provienen del sureste y noroeste en el Nodo 1, y del sureste, este-sureste y sur-sureste en el Nodo 2. El análisis mostró que la velocidad del viento aumenta cuando baja la presión atmosférica, alcanzando su punto máximo entre las 14 y 18 horas, mientras que la temperatura más alta y la humedad más baja ocurren alrededor de las 13 a 15 horas. Durante los días 1 al 5 de octubre, la energía generada en el Nodo 1 osciló entre 0.257 y 0.639 kWh, mientras que en el Nodo 2 varió entre 0.185 y 0.447 kWh. No obstante, se requiere un monitoreo continuo durante al menos un año para estimar con precisión el potencial eólico. La comparación con datos del SENAMHI mostró patrones similares, mientras que los datos globales de la NASA presentaron variaciones significativas. Esto subraya la necesidad de ampliar los sistemas IoT LoRaWAN para mejorar la estimación del recurso eólico en Puno.

**Palabras clave:** IoT, LoRaWAN, Parámetros del viento, Recurso eólico, Sistema de monitoreo.



## ABSTRACT

This study adopted a quantitative approach with a quasi-experimental design and an exploratory-descriptive level to implement a real-time monitoring system for wind parameters using IoT LoRaWAN in Puno and estimate the available wind resource in areas of interest. The study population includes areas with wind potential and gateway coverage, with two monitoring nodes installed at strategic points to validate the system. The system measures wind speed and direction, along with temperature, humidity, and atmospheric pressure. The nodes, located 1.86 km and 7.12 km from the gateway, achieved stable communication with only 0.87% data loss. The records were stored in ThingSpeak and automatically analyzed in Google Colab using the Weibull distribution. Wind roses showed that the prevailing winds come from the southeast and northwest at Node 1, and from the southeast, east-southeast, and south-southeast at Node 2. The analysis revealed that wind speed increases as atmospheric pressure drops, peaking between 2:00 p.m. and 6:00 p.m., with the highest temperature and lowest humidity occurring around 1:00 p.m. Between October 1 and 5, the energy produced at Node 1 ranged from 0.257 to 0.639 kWh, while at Node 2 it varied between 0.185 and 0.447 kWh. However, continuous monitoring for at least one year is required to accurately estimate the wind potential. The comparison with SENAMHI data showed similar patterns, though with less precision, while NASA's global data exhibited significant variability. This highlights the need to expand IoT LoRaWAN monitoring systems to improve the accuracy of wind resource estimation in Puno.

**Keywords:** IoT, LoRaWAN, Wind parameters, Wind resource, Monitoring system.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, el uso de energías renovables está en expansión, y la energía eólica es una de las opciones más destacadas. Sin embargo, en Puno, este recurso no se aprovecha debido a la falta de sistemas de monitoreo que permitan medir los parámetros del viento y evaluar su potencial eólico. La falta de datos precisos sobre el viento dificulta el cálculo del potencial eólico en las zonas de interés, generando incertidumbre sobre la viabilidad de instalar parques eólicos. Aunque SENAMHI y NASA ofrecen información sobre el viento, estos datos presentan limitaciones significativas para este propósito. En el caso de SENAMHI, sus estaciones están ubicadas lejos de las áreas de interés y se centran en el monitoreo ambiental general, no específicamente en el viento. Por otro lado, la NASA proporciona datos de viento a diferentes alturas y ubicaciones, pero no siempre es posible asegurar que estos datos reflejen con precisión el comportamiento local del viento. Además, ambos sistemas ofrecen información con una frecuencia de una vez por hora, lo cual no es suficiente para un análisis detallado del potencial eólico. Por estas razones, se propone implementar un sistema de monitoreo inalámbrico de largo alcance que permita recolectar datos más precisos y frecuentes, facilitando así una evaluación más adecuada del potencial eólico en Puno.

En este proyecto de investigación se implementará un sistema de monitoreo IoT LoRaWAN de largo alcance, que permitirá medir y registrar en tiempo real la velocidad, dirección, temperatura, humedad y presión del viento.

En el capítulo I, se aborda el planteamiento del problema, objetivos e hipótesis de la presente investigación.



En el capítulo II se abordan los antecedentes de investigaciones locales, regionales, nacionales e internacionales sobre sistemas de monitoreo con IoT LoRaWAN. En el marco teórico, se presentan los conceptos fundamentales de IoT, junto con una descripción de las tecnologías de comunicación inalámbrica utilizadas en este campo. Además, se explican las redes de área amplia de baja potencia (LPWAN), dentro de las cuales se encuentra LoRaWAN y también se define el concepto de LoRa. Para la medición y estimación de la energía eólica, se incluyen conceptos relacionados con la naturaleza de los vientos, la escala Beaufort, los vientos locales, las características del viento, así como el análisis estadístico de la distribución de Weibull y la estimación de la potencia eólica.

En el capítulo III se detalla la ubicación geográfica del Gateway, Nodo 1 y Nodo 2, así como el periodo de duración del presente proyecto y la procedencia del material empleado. Además, se define la población y muestra de estudio. Por otro lado, se establece el enfoque, tipo, diseño y nivel de la investigación. El procedimiento se desarrolló siguiendo una arquitectura IoT de cuatro capas: la capa de percepción, la capa de red, la capa de procesamiento y la capa de aplicación. Cada una de estas capas se explica en detalle, describiendo el procedimiento seguido en cada caso. Asimismo, en este capítulo, se definen las variables independientes y dependientes.

En el capítulo IV se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos específicos planteados en el capítulo I. Por cada resultado, se realiza una discusión en comparación con investigaciones previas. Tras la interpretación de los resultados y el análisis de los gráficos obtenidos, se llega a las conclusiones y se formulan las recomendaciones. Además, en este capítulo se incluyen las referencias bibliográficas y los anexos correspondientes a este proyecto de investigación.



## **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En Puno, la falta de datos precisos y específicos sobre el potencial eólico dificulta la evaluación y planificación de proyectos de energía eólica, como la instalación de parques eólicos. Los sistemas de medición actuales, como los de SENAMHI y NASA ofrecen información sobre el viento, estos datos presentan limitaciones significativas para este propósito. En el caso de SENAMHI, sus estaciones están ubicadas lejos de las áreas de interés y se centran en el monitoreo ambiental general, no específicamente en el viento. Por otro lado, la NASA proporciona datos de viento a diferentes alturas y ubicaciones, pero no siempre es posible asegurar que estos datos reflejen con precisión el comportamiento local del viento. Además, ambos sistemas ofrecen información sobre los parámetros del viento cada hora, lo cual no es suficiente para un análisis detallado del potencial eólico.

En el estudio realizado por Jimenes (2018) sobre el diseño de un mini parque eólico en Ventilla Alto Puno, la ausencia de datos precisos sobre la velocidad y dirección del viento afectó la exactitud en el cálculo de la potencia aprovechable. Esta carencia de información sobre los parámetros del viento resalta la necesidad de implementar un sistema de monitoreo del viento adecuado para estimar con mayor precisión el potencial eólico en distintas zonas de interés.

### **1.1.1. Problema general**

¿Como implementar un sistema de monitoreo en tiempo real en Puno para estimar el recurso eólico en zonas de interés?



### **1.1.2. Problemas específicos**

¿Qué tecnologías pueden implementarse para la medición de los parámetros del viento de manera continua y en tiempo real en Puno?

¿Cómo integrar una plataforma para el almacenamiento de datos y la visualización en tiempo real que facilite el análisis gráfico de los parámetros del viento?

¿Cómo se puede automatizar el análisis estadístico de la distribución de Weibull para estimar el recurso eólico disponible?

## **1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.2.1. Objetivo General**

Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real de los parámetros del viento con IoT LoRaWAN en Puno para estimar el recurso eólico disponible en zonas de interés.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

Implementar un sistema de monitoreo con IoT LoRaWAN para la medición en tiempo real de la velocidad, dirección, temperatura, humedad y presión del viento en Puno.

Integrar una plataforma de almacenamiento de datos y visualización en tiempo real utilizando ThingSpeak para analizar gráficamente los parámetros del viento.



Automatizar el análisis estadístico de la distribución de Weibull de los parámetros del viento utilizando Google Colab, Google Drive y Google Sheets para estimar el recurso eólico disponible.

### **1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.3.1. Hipótesis general**

La implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real basado en IoT LoRaWAN permite la medición continua de los parámetros del viento, facilitando la estimación precisa del recurso eólico disponible en las zonas de interés de Puno.

#### **1.3.2. Hipótesis específica**

La implementación de un sistema de monitoreo con IoT LoRaWAN permite la medición en tiempo real de los parámetros del viento.

La integración de la plataforma ThingSpeak permite almacenar datos, visualizar en tiempo real y analizar gráficamente los parámetros del viento.

La automatización del análisis estadístico de la distribución de Weibull de los parámetros del viento utilizando Google Colab, Google Drive y Google Sheets permite estimar con precisión el recurso eólico disponible.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

En el estudio realizado por Mejía, (2020) en su tesis titulada Desarrollo de soluciones de monitorización remota del recurso eólico mediante la técnica SODAR, analiza el uso de la tecnología Long Range (LoRa), la cual opera mediante redes de área amplia de baja potencia (LPWAN), que requieren de una infraestructura de red reducida para cubrir grandes áreas con un bajo consumo energético. Mejía destaca el potencial de LoRa en el contexto de las redes de monitoreo y la energía eólica, señalando que esta tecnología puede respaldar aplicaciones de monitoreo y servir como dispositivo de retroalimentación para los sistemas de control en turbinas eólicas. Esto se debe a su capacidad para transmitir pequeñas cantidades de datos de manera asincrónica a través de la red. No obstante, la literatura aún es escasa en evaluaciones de LoRa para la transmisión de información relacionada con el viento. En su estudio, Mejía evalúa el rendimiento de esta tecnología en un entorno urbano-rural, utilizando dispositivos LoRa junto a un sistema de medición meteorológica remota (Sonic Detection and Ranging (SODAR)) y una unidad receptora LoRa. La información recopilada se envía a un centro de control mediante un protocolo híbrido ARQ, evaluándose métricas clave como la tasa de entrega de paquetes (PDR), el indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI), la relación señal-ruido (SNR) y el tiempo de transmisión. También desarrolla un estudio de caso sobre la red de área amplia de largo alcance (LoRaWAN) en entornos laborales reales, enfocado en evaluar la confiabilidad, el error y otros beneficios prácticos de la tecnología. Los experimentos, realizados en el campus del Tecnológico de Monterrey (ITESM) en México, demuestran la aplicabilidad de LoRa en la transmisión de información para el



análisis del recurso eólico, así como su uso como sistema de retroalimentación para controladores. Los resultados revelan que las métricas evaluadas son consistentes con el monitoreo remoto y que, en periodos cortos, es posible enviar información a los sistemas de retroalimentación de las turbinas o del parque eólico.

En el estudio realizado por Hinojosa et al. (2024), en el artículo titulado Desarrollo socioambiental en Puno: análisis del potencial eólico en la región altiplánica del Perú, se analizó el potencial eólico en la región altiplánica del Perú, utilizando datos meteorológicos del SENAMHI y de la NASA correspondientes al periodo 2022-2023. El estudio se centró en la caracterización de la velocidad del viento a diferentes altitudes mediante la comparación de velocidades medias horarias y mensuales. Se observó una diferencia promedio del 29,67% entre los datos de SENAMHI y NASA, particularmente durante los meses de primavera y verano, destacando la confiabilidad de la base de datos de la NASA. La densidad de potencia eólica anual estimada fue de 17,7 W/m<sup>2</sup> a 25 metros de altura, alcanzando los 44,27 W/m<sup>2</sup> a 100 metros, con mayor densidad en octubre y noviembre. El estudio concluyó que estos resultados proporcionan información clave para el desarrollo de sistemas eólicos de baja potencia en la región altiplánica, subrayando la importancia de contar con datos meteorológicos confiables para la planificación y desarrollo de proyectos de energías renovables. La investigación también valida la confiabilidad de los datos de la NASA y SENAMHI para la caracterización del recurso eólico, destacando el potencial de la región de Puno para la implementación de sistemas eólicos de baja potencia.

En el estudio realizado por Aguilar, (2020) en su tesis titulada Diseño de una solución basada en el Internet de las Cosas (IoT) empleando LoRaWAN para el monitoreo de cultivos agrícolas en Perú, el objetivo principal fue diseñar una solución basada en el IoT, utilizando la tecnología LoRaWAN, para mejorar los indicadores de supervisión y



control de los parámetros de producción en los cultivos agrícolas en Perú. El estudio se desarrolló en el distrito de Pachacútec, en la provincia de Ica. La investigación incluyó la definición de la arquitectura de la red, estableciendo las características técnicas de los sensores agrícolas, el circuito de control de riego, el equipamiento de comunicaciones y los servicios en la nube necesarios. Se analizaron tres alternativas para cada uno de estos elementos. También se determinó la banda de frecuencia de operación para LoRaWAN en Perú y los requerimientos de energía para las estaciones de monitoreo en campo. El cálculo de enlace para los dispositivos LoRaWAN en el área de estudio se realizó mediante el modelo Okumura-Hata, obteniéndose las pérdidas de propagación, la distancia máxima de enlace y la cobertura en el terreno. Estos resultados se validaron utilizando un simulador de cobertura, que arrojó resultados similares. Además, se simuló un nodo final LoRaWAN y se desarrolló un servidor LoRaWAN e IoT alojado en nubes computacionales, junto con una aplicación móvil para Android que permite visualizar los registros almacenados y gráficos con la información. Finalmente, se realizó una evaluación económico-financiera del proyecto como una solución privada, evaluando los costos de inversión, operación y los ingresos proyectados. Se presentaron los indicadores financieros y un cronograma de implementación mediante un diagrama de Gantt.

En el estudio realizado por Romero, (2020), titulado Monitoreo de indicadores durante el transporte de un tanque de leche en comunidades altoandinas aplicando redes LPWAN, se aborda la expansión de la industria láctea en el Perú, con un enfoque particular en la provincia altiplánica de Puno. En esta región, los métodos ecológicos y los procesos de monitoreo semi-manual en los parámetros de calidad han permitido avances significativos en proyectos de estandarización de insumos a nivel nacional. Sin embargo, esta expansión ha quedado rezagada en comparación con grandes industrias y mercados internacionales debido a la insuficiencia tecnológica en el control de la calidad



y en el incremento del volumen de la leche ofertada. El proyecto propone una solución a través del diseño de un sistema de monitoreo digital de calidad, el cual permite medir, controlar y gestionar parámetros clave del insumo alimenticio, como la temperatura, el pH y la geolocalización del medio de transporte de la leche hasta el centro de acopio. Para implementar este sistema, se utilizó la tecnología inalámbrica LoRa, que emplea la modulación de radiofrecuencia Chirp Spread Spectrum, facilitando la transmisión de pequeñas cantidades de información a largas distancias con bajo consumo energético.

En el estudio realizado por Sagua, (2020) titulado Diseño e implementación del prototipo de una comunicación LoRa para el monitoreo meteorológico en la bahía del lago Titicaca en la ciudad de Puno, se desarrolló un sistema para monitorear variables meteorológicas mediante un prototipo de comunicación LoRa. El objetivo principal fue diseñar e implementar este sistema, considerando que la falta de información precisa sobre las variables meteorológicas afecta diversas actividades económicas clave en la ciudad de Puno, tales como el turismo, la agricultura, la ganadería, la apicultura, la pesca, y la navegación. Además, se identificó la falta de acceso directo a esta información por parte de las instituciones públicas como un problema que limita los beneficios para la población. El prototipo implementado permitió el monitoreo en tiempo real de variables como la radiación UV, la temperatura, la humedad, la presión atmosférica y la velocidad del viento. Asimismo, se determinó la capacidad de la comunicación LoRa para cubrir una distancia de 2,46 km en una comunicación punto a punto. Mediante la investigación experimental, se diseñó un sistema que permite la transmisión de datos a largas distancias, generando información accesible en tiempo real y un registro para los usuarios. La implementación incluyó dos puntos de comunicación LoRa y sensores para medir el estado de las variables meteorológicas, utilizando instrumentos como pirómetros, termómetros, higrómetros, barómetros y anemómetros. El rendimiento del sistema fue



satisfactorio, logrando una transmisión eficaz de las variables medidas a lo largo de la distancia especificada.

En el estudio realizado por Quispe, (2021) titulado Diseño e implementación de un sistema de comunicación LoRaWAN para la localización de vicuñas en la comunidad Primer Chimpa Jilahuata - Azángaro - Puno, se aborda la problemática del riesgo que enfrentan las vicuñas, un camélido sudamericano silvestre y símbolo nacional del Perú, debido a actividades delictivas. El objetivo principal de esta investigación es diseñar e implementar un sistema de comunicación LoRaWAN para la localización de estos camélidos, asegurando su protección y monitoreando su traslado para prevenir el acceso a zonas peligrosas. El sistema propuesto incluye dos tipos de equipos: el Gateway, que se ubica de forma estática y tiene la función de transmitir la información obtenida a través de la comunicación LoRa hacia Internet, y el End Node, que se desplaza con las vicuñas y proporciona su localización. Los resultados de la investigación indican que el sistema cuenta con una amplia cobertura, logrando un radio de hasta 3 kilómetros de manera continua y un alcance máximo de 6 kilómetros, dependiendo del estado de línea de vista. Además, la exactitud de localización promedio se estableció en 9.11 metros. Estos resultados demuestran la aplicabilidad del sistema en la comunidad Primer Chimpa Jilahuata, con la posibilidad de extender su uso a comunidades aledañas, contribuyendo así a la conservación de la riqueza animal del Perú.

## **2.2. MARCO TEÓRICO**

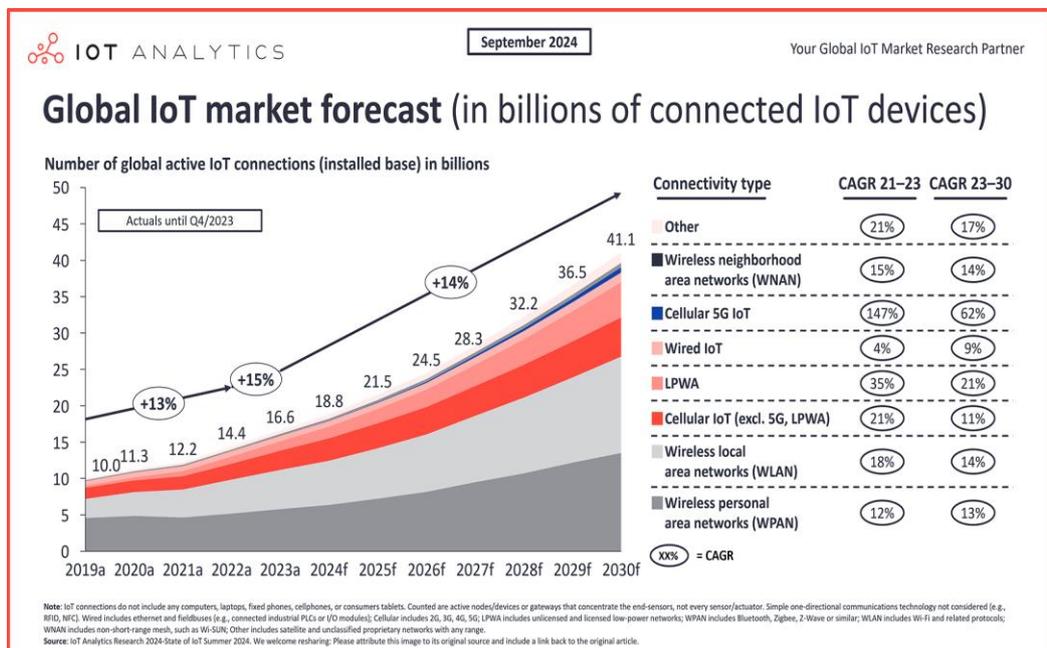
### **2.2.1. Internet de las cosas (IoT)**

El Internet de las cosas (IoT) es un concepto que interconecta diversos dispositivos y sistemas a través de Internet, permitiendo la recopilación, análisis y utilización de datos para ejecutar operaciones específicas. Al integrar sensores,

actuadores y objetos físicos, el IoT facilita la comunicación entre dispositivos y la automatización de tareas. Esta tecnología elimina las barreras entre diferentes redes y crea un mundo más conectado. Gracias a los protocolos de Internet y a los dispositivos de detección de información, el IoT permite el monitoreo, el reconocimiento inteligente y la administración eficiente. A través de la conectividad inalámbrica y el uso de dispositivos de bajo costo, el IoT transforma objetos simples en inteligentes. Además, destaca por su capacidad para recopilar, investigar, analizar y gestionar datos de manera remota, con mínima intervención humana (Soni, 2022).

**Figura 1**

*Pronóstico global del mercado de IoT en miles de millones de dispositivos conectados*



Nota: Adaptado de IOT Analytics 2024, *Number of connected IoT devices worldwide*. <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>.

En la Figura 1 se muestra un pronóstico global del mercado de IoT, donde se espera que en 2024 haya 18.8 billones de dispositivos conectados y que para



2030 esta cifra alcance los 41.1 billones. El 21% de estos dispositivos estarán conectados mediante la tecnología LPWA, siendo una de las más importantes después de la tecnología celular 5G IoT, que representa el 62%. Dentro de las tecnologías LPWA, LoRaWAN destaca por su alto pronóstico de crecimiento.

El IoT enfocado en el sector energético de las energías renovables tiene un papel importante en su producción, facilitando su diseño, construcción y almacenamiento energético. De esta forma impulsa a la implementación de energías renovables eficientes (Villa & Morales, 2023).

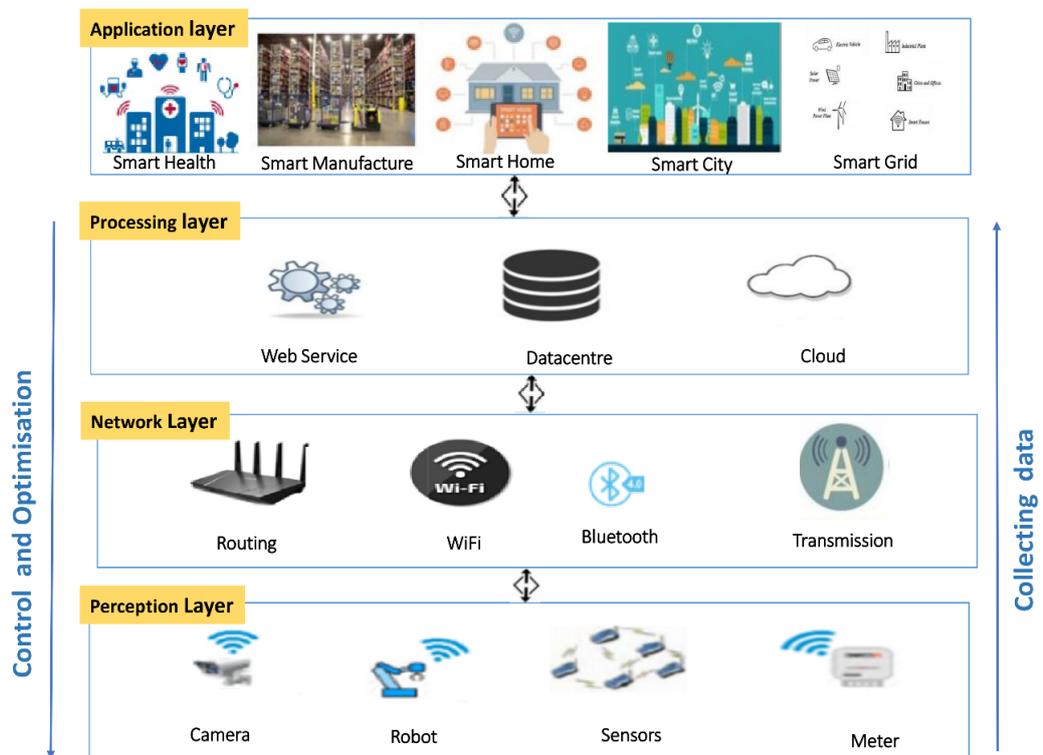
### **2.2.2. Arquitectura de IoT**

El internet de las cosas engloba una variedad de tecnologías, en consecuencia, hay una división de tecnologías dentro de cualquier tipo de sistema de IoT.

El IoT se encarga de conectar estas tecnologías, para un funcionamiento en conjunto para generar resultados. Si no se logra que estas tecnologías trabajen en conjunto, no hay posibilidad de que generen un resultado. El IoT incorpora estas tecnologías en un marco único para ofrecer soluciones confiables e integradas. Una arquitectura sólida es esencial para implementar cualquier tipo de IoT ya que la eficiencia del IoT dependerá íntegramente de su infraestructura interna, por lo que es importante seguir estándares de arquitecturas para garantizar el éxito en el desarrollo de soluciones IoT (Soni, 2022).

**Figura 2**

*Capas de la arquitectura IoT: percepción, red, procesamiento y aplicación*



Nota: Adaptado de Internet of Things for System Integrity: A Comprehensive Survey on Security, Attacks and Countermeasures for Industrial Applications por N. Abosata, S. Al-Rubaye, G. Inalhan, y C. Emmanouilidis, 2021, *Sensors*, 21(11), Art. 3654, <https://doi.org/10.3390/s21113654>. Licencia CC BY 4.0.

### 2.2.2.1. Capa de percepción

La capa de percepción de la arquitectura IoT conecta objetos físicos con sensores y actuadores con el objetivo de recopilar datos de su entorno en tiempo real, como la temperatura, humedad, velocidad, etc. Los actuadores posibilitan que los dispositivos realicen acciones en estos datos, por ejemplo, una cafetera inteligente, que prepara café y se apaga automáticamente. La comunicación de sensores y actuadores puede ser cableada o inalámbrica independientemente. Esta capa tiene por finalidad la comunicación entre sensores y actuadores para tener mejores resultados en IoT (Soni, 2022).



#### **2.2.2.2. Capa de red**

La capa de red también conocida como capa de puertas de enlace y redes, es fundamental para la agregación, conversión y enrutamiento de los datos proveniente de los sensores para la gestión de los datos. Esta capa tiene por finalidad convertir los datos recopilados y reducir el volumen para enviarlo a la nube. Esta capa garantiza una comunicación bidireccional segura para ello requiere diferentes protocolos de red debido a la diversidad de dispositivos IoT.

#### **2.2.2.3. Capa de procesamiento**

La capa de procesamiento o también llamada capa de gestión de servicios de datos, se enfoca en el procesamiento de datos, mediante métodos de análisis de datos y modelado de procesos. Su objetivo principal es gestionar los servicios de IoT, facilitando el acceso y control de datos, posibilitando la extracción de información relevante de grandes volúmenes de datos mediante el uso de Big Data y minería de datos. La seguridad en esta capa es fundamental para evitar amenazas que puedan comprometer la integridad de los datos.

#### **2.2.2.4. Capa de aplicación**

Es la capa superior de la arquitectura IoT, encargada de realizar un efectivo uso de los datos recopilados para así establecer una interacción con los usuarios mediante diversas aplicaciones como: hogar inteligente, ciudad inteligente y entre otros. Estas aplicaciones se dividen en dos partes, la primera específicamente a la industria (manufactura, salud y

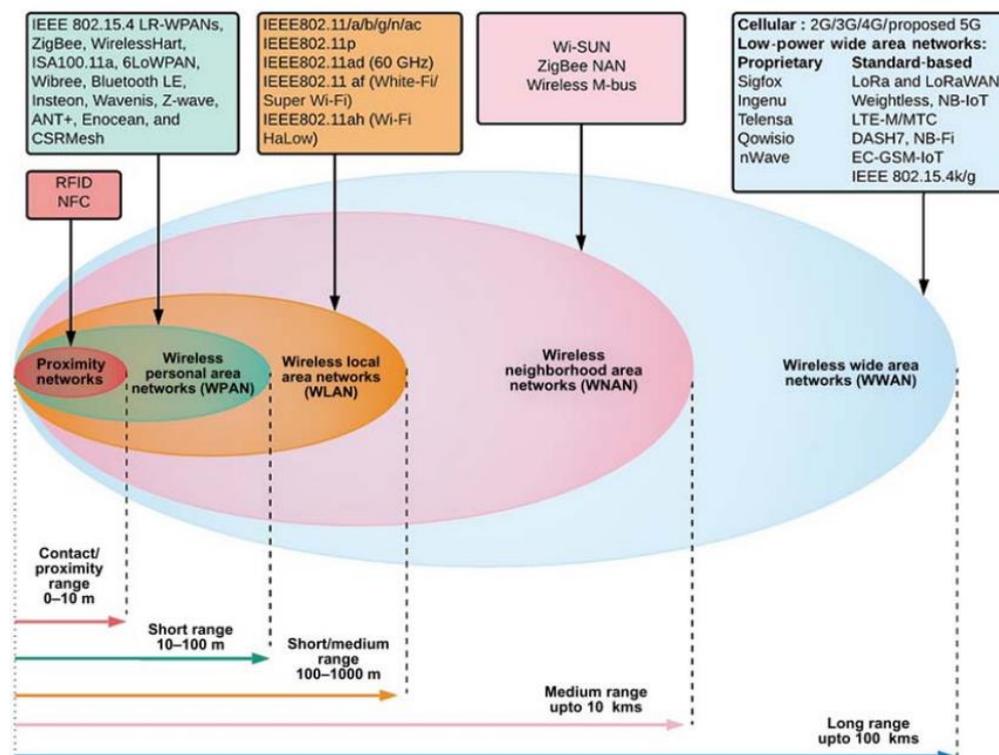
energía) y la otra para para desarrollar mercados horizontales relacionado con la gestión de suministros (Abosata et al., 2021).

### 2.2.3. Tecnologías de comunicación inalámbrica en IoT

Las tecnologías de comunicación inalámbrica, brindan opciones óptimas para la conexión de cosas a internet, existe una variedad de tecnologías de comunicaciones inalámbricas y cada uno de estos tienen un uso particular.

**Figura 3**

*Clasificación de redes inalámbricas según el rango de proximidad y tecnologías asociadas*



Nota: Adaptado de *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications* (p. 8), editado por B. S. Chaudhari & M. Zennaro, 2020, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818880-4.00001-6>.

En la Figura 3 se muestran las tecnologías de comunicación inalámbrica para IoT, comparando su alcance de comunicación. Dentro de estas tecnologías,



la tecnología WWAN destaca por su alcance de hasta 100 km. En el ámbito de las tecnologías LPWAN, se encuentra LoRaWAN, que es una de las que ofrece mayor alcance de comunicación con un bajo consumo de energía, y que es la tecnología empleada en esta tesis.

Tecnologías de comunicación inalámbrica de IoT:

La Identificación por Radio Frecuencia (RFID), realizando comunicación de área cercana con los dispositivos de proximidad.

Red de Área Personal Inalámbrica (WPAN), realizan una comunicación de datos a baja velocidad, tiene eficiencia energética y corto alcance.

Red de Área Local Inalámbrica (WLAN), intercambia datos a alta velocidad con una cobertura limitada.

Red de Área Vecinal Inalámbrica (WNAN), evolucionó como una distribución local inalámbrica de banda ancha, con un área de servicio más pequeña que las redes metropolitanas, pero más grande que las LAN.

Red de Área Amplia Inalámbrica (WWAN) está diseñada para la comunicación de voz y datos a larga distancia. Dentro de esta familia también se encuentra la Red de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN, por sus siglas en inglés, Low Power Wide Area Network).

#### **2.2.4. Red de área amplia de baja potencia LPWAN**

##### **2.2.4.1. Desarrollo de la tecnología LPWAN**

El internet de las cosas es básicamente conectar las cosas a internet, técnicamente era posible pero no resultaba viable por los altos costos de

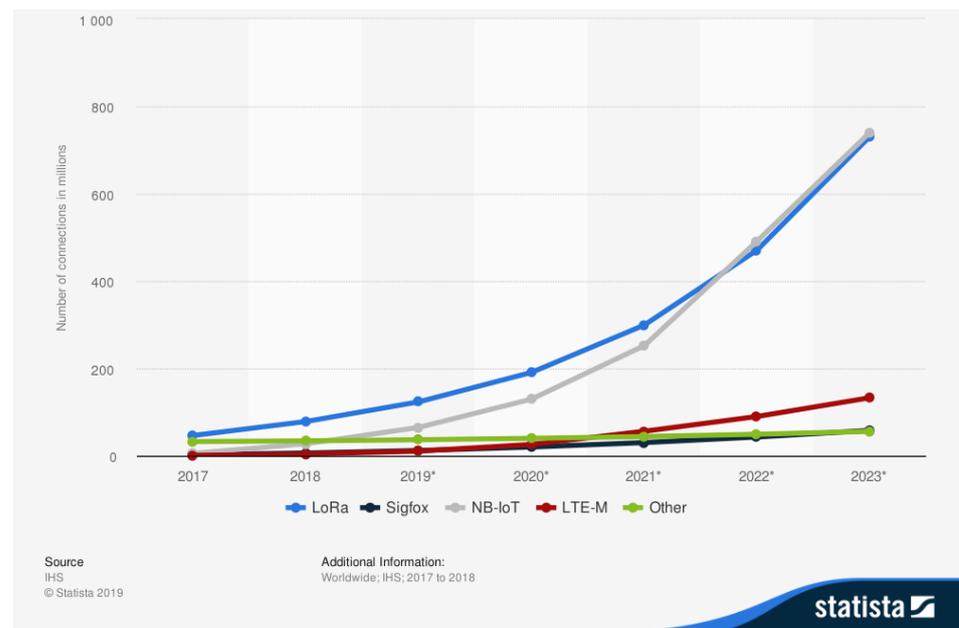
implementación y sus limitaciones. Con los avances tecnológicos permitieron hacer realidad el Internet de las Cosas a un costo aceptable y que tengan las siguientes propiedades.

- Gran cobertura o largo alcance.
- Conexión inalámbrica a la red.
- Uso de baterías de larga duración.
- Bajo precio o bajo costo de implementación.

La red de área amplia de baja potencia (LPWAN), es un término que engloba varios protocolos de comunicación, entre los más resaltantes se encuentra LoRaWAN, que compite directamente con NB-IoT, Sigfox, LTE-M y algunos otros. En la Figura 4 se representa el número de conexiones LPWAN en todo el mundo.

#### Figura 4

*Número de conexiones LPWAN en todo el mundo del 2017 al 2023*



Nota: Adaptado de Develop and Operate Your LoRaWAN IoT Nodes (p. 10), por C. Kühnel, 2022, Elektor International Media. Copyright 2022 por Elektor International Media B.V.

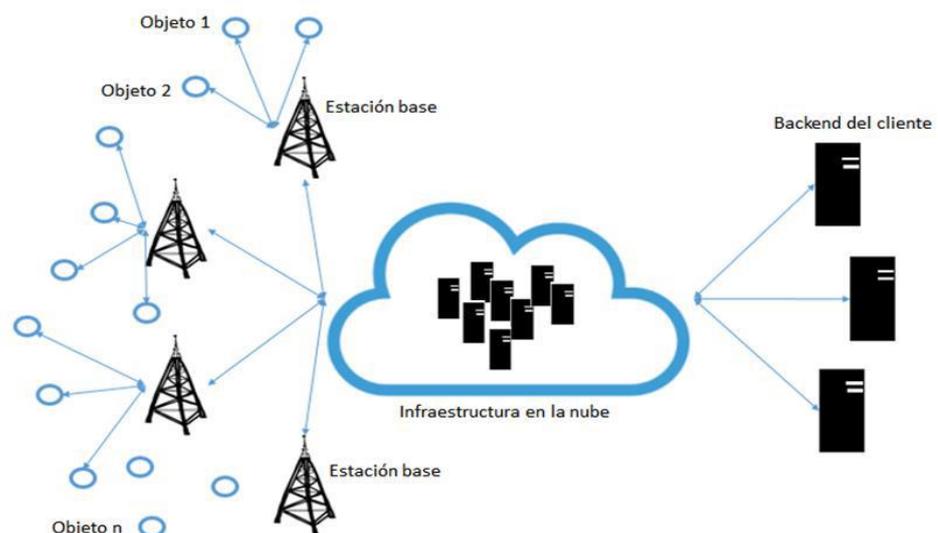
La Figura 4 muestra el número de conexiones LPWAN en todo el mundo entre 2017 y 2023. Destacan especialmente las tecnologías LoRa y NB-IoT, cada una con aproximadamente 750 millones de dispositivos conectados en 2023. Estas dos tecnologías han registrado la mayor tasa de crecimiento, gracias a sus beneficios y características clave, como bajo consumo de energía, amplia cobertura.

#### 2.2.4.2. Arquitectura de una red LPWAN

La arquitectura básica de una red LPWAN requiere estaciones de acceso inalámbrico, Gateways o concentradores, servidores LPWAN y nubes, además de dispositivos LPWAN. Los dispositivos recolectan datos que se envían a través de una conexión de radio a las estaciones de acceso, que aseguran la integridad de la conexión y gestionan tareas.

**Figura 5**

*Arquitectura básica de una red LPWAN*





Nota: Adaptado de *Gaszen: Plataforma para monitorizar el nivel de gas L.P.* (p. 9), por J. Dávila, R. Aguilar, J. Ruiz, J. R. Parra-Michel, & R. Martínez-Peláez, 2018, Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica. Copyright 2018 por los autores.

Los Gateways actúan como intermediarios entre las estaciones de acceso y la red IoT, manejando el tráfico de control y de usuario. Los servidores LPWAN se encargan de la provisión, registro y gestión de los dispositivos LPWAN, mientras que los servidores de aplicaciones y la nube gestionan la base de datos de mensajes y realizan análisis de datos para habilitar diversas aplicaciones y servicios. La implementación y funciones específicas pueden variar según la tecnología LPWAN utilizada, pero estos elementos fundamentales conforman la estructura esencial para la comunicación eficiente en el Internet de las Cosas (Chaudhari & Zennaro, 2020).

#### **2.2.4.3. Tecnologías LPWAN**

Los LPWAN (Redes de Área Amplia de Bajo Consumo de Energía) son fundamentales para aplicaciones IoT que requieren largas distancias, bajo costo y eficiencia energética. Estimaciones sugieren que una cuarta parte de todos los dispositivos IoT/M2M se conectarán a través de LPWAN, ya sea utilizando tecnologías patentadas o estándar. Se espera que los LPWAN representen un tercio de todas las aplicaciones de IoT. A diferencia de otras tecnologías que priorizan velocidades de datos altas y baja latencia, los LPWAN se centran en un gran número de dispositivos finales que envían mensajes poco frecuentes de tamaño reducido y toleran retrasos razonablemente largos. Aunque la fiabilidad varía según la aplicación, los LPWAN complementan o sustituyen a tecnologías

celulares e inalámbricas de corto alcance en diversos escenarios emergentes (Chaudhari & Zennaro, 2020).

- Tecnologías LPWAN con tecnología patentada que destacan.
  - Sigfox
  - Telensa
- Tecnologías LPWAN con tecnología estándar que destacan.
  - LoRa
  - NB-IoT
  - LTE – M/MTC

#### 2.2.4.4. Comparativa de las tecnologías LPWAN más importantes

En la Tabla 1 se visualiza la comparativa de las principales tecnologías LPWAN, comparando las principales características: Tecnología, espectro, banda de frecuencia, modulación, restricción de transmisión del ciclo de trabajo, frecuencia, ancho de banda (BW), cobertura, duración de la batería, implementación, estándar y seguridad (Jouhari et al., 2023).

**Tabla 1**

*Comparativa de tecnologías LPWAN más populares*

	<b>LoRa</b>	<b>SIGFOX</b>	<b>NB-IoT</b>	<b>LTE-M</b>
Technology	Proprietary (PHY), Open (MAC)	Proprietary	Open LTE	Open LTE
Spectrum Frequency band	Sub-GHz ISM	Unlicensed Sub-GHz ISM	Cellular band	Licensed cellular band

	<b>LoRa</b>	<b>SIGFOX</b>	<b>NB-IoT</b>	<b>LTE-M</b>
Modulation	css	D-BPSK	$\frac{\pi}{2} - BPSK, \frac{\pi}{2} - QPSK$	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Duty cycle Tx restriction	1%	140 msg/day	-	-
Frequency	433, 868, 915MHz	868, 915MHz	700-2100MHz	700-2600MHz
Bandwidth (BW)	125, 250, 500 kHz	100, 600 Hz	200 kHz	1.4 MHz
Coverage	1 - 10 km	10 - 40 km	15 km	11 km
Battery life	10 years	10 years	10 years	10 years
Deployment	multi-operator, Self-deployment	-	In Band, Guard Band LTE and GSM Standalone	In Band LTE
Standard	LoRaWAN	No	3GPP Release 13	3GPP Release 12
Security	AES-128	AES-128	LTE security	LTE security

Nota: Adaptado de A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges (p. 2), por M. Jouhari, E. M. Amhoud, N. Saeed, & M.-S. Alouini, 2023.

La comparativa realizada en la Tabla 1 resalta cómo cada tecnología LPWAN está diseñada para satisfacer necesidades específicas en el mundo del IoT. Si el objetivo es maximizar la cobertura y minimizar el costo, LoRa y SIGFOX son opciones destacadas, especialmente para redes privadas o aplicaciones de bajo consumo. Por otro lado, NB-IoT y LTE-M ofrecen mayor robustez y seguridad al operar sobre redes celulares, siendo ideales para aplicaciones críticas o de mayor movilidad. La clave está en seleccionar la tecnología que equilibre mejor los requisitos de costo, consumo de energía, cobertura y seguridad, según el caso de uso.



### **2.2.5. LoRa y LoRaWAN**

Cuando nos referimos a LoRa y LoRaWAN es fundamental entender sus diferencias a pesar de su estrecha relación. LoRa se enfoca en la radiofrecuencia, es decir la capa física y LoRaWAN es el protocolo de comunicación y la arquitectura para el sistema en la red. Todos los conceptos enfocados a LoRa y LoRaWAN se desarrollarán a continuación.

### **2.2.6. LoRa**

LoRa, abreviatura de (Long Range) traducido "Largo Alcance", es una tecnología de comunicación desarrollada por Semtech que se basa en la modulación de espectro ensanchado por chirrido (CSS). Esta técnica permite una transmisión eficiente de datos a largas distancias con bajo consumo de energía, lo que la hace ideal para aplicaciones de Internet de las cosas (IoT). Con la capacidad de integrarse fácilmente en diferentes tipos de redes y ofrecer seguridad en la transmisión de datos, LoRa es una opción versátil y económica para implementaciones de IoT de bajo costo (Seneviratne, 2019).

#### **2.2.6.1. Modulación**

Para poder comprender como funciona la modulación de espectro ensanchado LoRa. Una señal de radio simple no lleva ninguna información aparte de que el transmisor se deja encendido. La señal debe modificarse de alguna manera para transmitir información. Hay varias formas de hacerlo. Dos de los métodos más populares son modificar la amplitud y modificar la frecuencia (Seneviratne, 2019).



### **2.2.6.2. Modulación de amplitud (AM)**

La señal del mensaje ajusta la amplitud de la señal transmitida. Esta se mezcla con una señal portadora de frecuencia fija, generada por un oscilador. El resultado es una señal modulada que cambia en amplitud, mientras la frecuencia se mantiene igual.

### **2.2.6.3. Modulación de frecuencia (FM)**

La modulación de frecuencia (FM) se usa ampliamente en la transmisión de radio. En FM, la frecuencia de la señal portadora cambia según la intensidad de la señal de información, mientras que su amplitud y fase permanecen constantes. Cuando la señal de información es cero, la frecuencia de la portadora no varía. Al acercarse a los picos positivos de la señal, la frecuencia aumenta, y en los picos negativos, disminuye. El resultado es una señal modulada con amplitud constante y frecuencia variable.

### **2.2.6.4. La modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)**

Una señal digital puede representarse usando dos frecuencias: una para el 1 digital y otra para el 0 digital. Se emplea una señal portadora y estas dos frecuencias diferentes para indicar los estados HIGH y LOW. La señal de datos digitales se combina con la portadora y se convierte en una señal analógica modulada (Seneviratne, 2019).

### **2.2.6.5. La modulación de espectro ensanchado (CSS) de chirp**

Esta técnica mantiene las características de baja potencia de la modulación FSK. Utiliza pulsos de chirrido con modulación de frecuencia



lineal de banda ancha para codificar información. CSS, desarrollada en la década de 1940 para aplicaciones de radar, ha sido empleada durante años en comunicaciones militares y espaciales debido a su capacidad de cubrir largas distancias, requerir poca potencia de transmisión y generar menos interferencia (Seneviratne, 2019).

#### **2.2.6.6. Parámetros de transmisión en LoRa**

Parámetros de transmisión son aquellos que puedes ajustar o configurar para controlar el comportamiento de la red y la eficiencia de la comunicación. Cada uno de estos factores afecta aspectos clave como el alcance, la robustez, el consumo de energía y la velocidad de transmisión.

#### **2.2.6.7. Potencia de transmisión (TP)**

Es la cantidad de energía que una antena o transmisor emite en forma de ondas electromagnéticas para transportar una señal. En el caso de un radio LoRa, la potencia de transmisión se puede ajustar entre -4 dBm y 20 dBm, en incrementos de 1 dBm. No obstante, debido a las limitaciones del hardware, este rango suele restringirse de 2 dBm a 20 dBm (Bor & Roedig, 2017).

#### **2.2.6.8. Frecuencia portadora (CF)**

La frecuencia portadora (CF) en LoRa es la frecuencia central que se ajusta en incrementos de 61 Hz, cubriendo un rango de 137 MHz a 1020 MHz. Este rango puede estar limitado entre 860 MHz y 1020 MHz en algunos chips, dependiendo del hardware y normativas locales. Las frecuencias más bajas proporcionan mayor alcance y penetración, mientras

que las más altas ofrecen mayor velocidad de datos, pero menor alcance, permitiendo que LoRa se adapte a diversas aplicaciones de IoT según el entorno (Bor & Roedig, 2017).

#### **2.2.6.9. Factor de dispersión (SF)**

El factor de dispersión (SF) determina la cantidad de chirridos que codifican un símbolo. Un SF más alto mejora la relación señal/ruido (SNR), lo que aumenta la sensibilidad y el alcance, pero alarga el tiempo de emisión del paquete. Cada incremento en SF reduce a la mitad la velocidad de transmisión, duplicando así la duración de la transmisión y en consecuencia, el consumo de energía. El SF puede elegirse entre 6 y 12, permitiendo la ortogonalidad entre comunicaciones LoRa con diferentes SF, lo que posibilita la separación de redes (Kühnel, 2022).

#### **2.2.6.10. Ancho de banda (BW)**

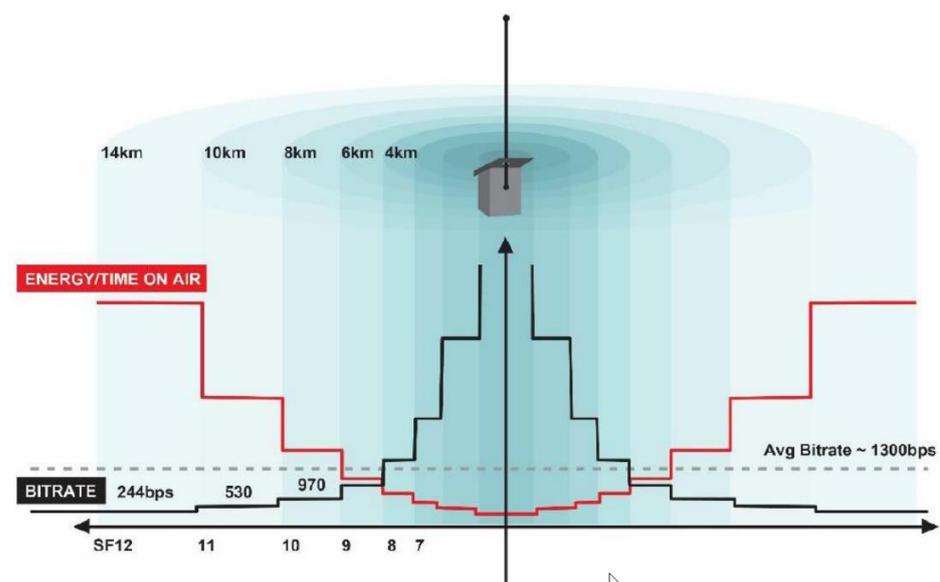
El ancho de banda (BW) en LoRa se refiere al rango de frecuencias que se utilizan para transmitir datos. Si se usa un ancho de banda más amplio, se puede enviar información más rápido, pero la sensibilidad a la interferencia es menor. Por otro lado, un ancho de banda más estrecho hace que la comunicación sea más sensible, pero la velocidad de transmisión es más lenta. Además, usar un ancho de banda más bajo requiere componentes más precisos. Por lo general, se elige entre tres opciones: 500 kHz, 250 kHz o 125 kHz, dependiendo de las necesidades específicas de la red (Bor & Roedig, 2017).

*La Figura 6 muestra el comportamiento de los parámetros de transmisión en redes LPWAN, específicamente en LoRaWAN. Se observa*

que el Spreading Factor (SF) aumenta de 8 a 12, lo que incrementa el rango de alcance de la comunicación. Sin embargo, este aumento conlleva una reducción en la tasa de bits (bitrate), es decir, en la cantidad de datos que se pueden transmitir. Además, se prolonga el tiempo en el aire, o la duración de la transmisión, lo que incrementa el consumo de energía.

### Figura 6

#### *Comparativa de Spreading Factor, Bitrate y Alcance en LPWAN*



Nota: Adaptado de Sistema basado en internet de las cosas para el monitoreo del ganado vacuno usando una red LoRaWAN (Guzmán, 2021).

En resumen, a mayor alcance, disminuye la cantidad de datos transmisibles y aumenta el consumo energético, debido al tiempo adicional requerido para completar la transmisión.

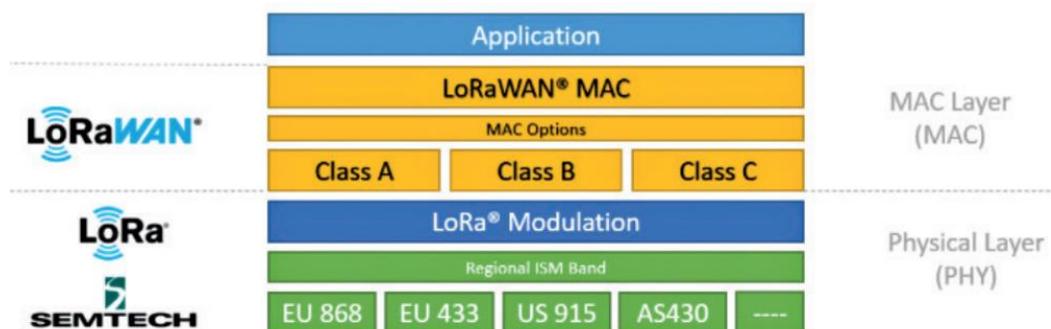
#### 2.2.7. LoRaWAN

El protocolo de conectividad LoRa, patentado por Semtech, permite establecer comunicaciones de largo alcance. Este protocolo funciona en bandas sin licencia asignadas a usos industriales, científicos y médicos (ISM) y utiliza una técnica de modulación conocida como espectro ensanchado por chirrido

(CSS) a frecuencias inferiores a 1 GHz, tales como 169 MHz, 433 MHz, 868 MHz (en Europa) y 915 MHz (en América del Norte). La capa física de LoRa es patentada y constituye el fundamento de la comunicación, mientras que LoRaWAN es una especificación de acceso al medio (MAC) es estándar que se basa en esta capa física para gestionar la conectividad en redes de dispositivos (Ledesma et al., 2024).

### Figura 7

#### Arquitectura LoRaWAN



Nota: Adaptado de Develop and Operate Your LoRaWAN IoT Nodes: Ready-to-use Devices and Self-built Arduino Nodes in The Things Network (p. 24), por C. Kühnel, 2022, Elektor International Media.

El protocolo LoRaWAN (MAC) es un protocolo de código abierto, diseñado para operar sobre la capa física de LoRa y estandarizado por la LoRa Alliance. Su función es gestionar el control de acceso al medio, permitiendo la comunicación entre múltiples nodos finales (end devices) y las puertas de enlace de la red (Gateways). En las redes LoRaWAN, los dispositivos acceden al canal inalámbrico de forma aleatoria mediante un modo Aloha puro, según lo define el estándar LoRaWAN, y deben cumplir con un ciclo de trabajo específico (Jouhari et al., 2022).

## **2.2.8. Arquitectura LoRaWAN**

### **2.2.8.1. Nodo Final**

Los Nodos Finales de LoRaWAN o End Device, se caracterizan por su bajo consumo energético, tamaño reducido y bajo costo. Estos dispositivos están equipados por un transceptor de LoRa lo que les permite comunicarse con los Gateways o puertas de enlace. Un dispositivo LoRaWAN no se conecta exclusivamente a una puerta de enlace, en su lugar se comunica con todas las puertas de enlace que están dentro de su cobertura, para transferir o recibir datos (Montagny, 2022).

### **2.2.8.2. Gateway**

Gateway o puerta de enlace es el encargado de recibir los mensajes enviados por los nodos de LoRaWAN. La puerta de enlace escucha todos los canales y spreading factor (SF) al mismo tiempo. La comunicación de un nodo al gateway se conoce como enlace uplink y la comunicación del gateway al nodo se conoce como downlink. Cuando se recibe una trama de un nodo LoRa, se transmite su contenido por medio de internet al Network Server, que se configuró previamente en Gateway. El Gateway es un puente entre los nodos de LoRaWAN y el Network Server (Montagny, 2022; Román et al., 2023).

### **2.2.8.3. Network Server**

El Network server o servidor de red, es el encargado de recibir los mensajes transmitidos por los Gateways y eliminar mensajes duplicados, varios Gateways pueden recibir el mismo mensaje y transmitirlo al mismo

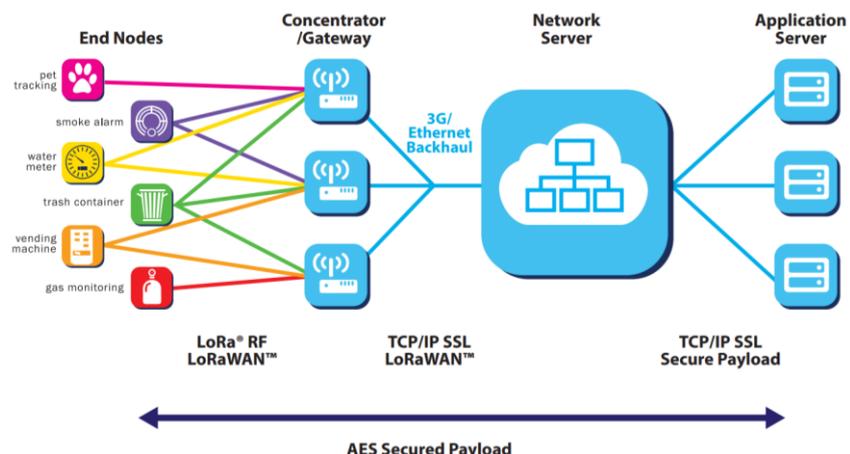
Network Server. El Network Server también se encarga de la autenticación de mensaje, si en el proceso de autenticación se produce un error, se descarta el mensaje. Si el proceso de autenticación se realiza correctamente, el Network Server transfiere el mensaje al Application Server (Román et al., 2023).

#### 2.2.8.4. Application Server

La Application server o servidor de aplicaciones es donde se procesa los mensajes recibidos de los nodos finales y tiene la posibilidad de tomar de acciones de acuerdo a los mensajes. Los mensajes se reciben de manera cifrada y se descifra gracias a las claves AES de 128 bits, llamada appkey (Román et al., 2023).

**Figura 8**

*Arquitectura de red*



Nota: Adaptado de Technical Overview of LoRa and LoRaWAN, por LoRa® Alliance Technical Marketing Workgroup, 2015, LoRa Alliance.

La Figura 8 muestra la arquitectura LoRaWAN, donde los End Nodes (dispositivos IoT) envían datos a un Gateway mediante LoRa. Los gateways transmiten la información al Network Server usando redes 3G o

Ethernet con conexiones seguras (TCP/IP SSL). El servidor procesa los datos y los dirige al Application Server para su uso final. Todo el flujo de datos está protegido con cifrado AES, garantizando seguridad. Esta arquitectura destaca por su gran cobertura, bajo consumo energético y alta seguridad, ideal para aplicaciones como monitoreo remoto y seguimiento de activos.

### 2.2.9. Frecuencias y parámetros regionales

Las frecuencias permitidas para la transmisión de LoRa varían según cada país o región, y están definidas por las normativas locales. La Tabla 2 muestra las frecuencias específicas asignadas para LoRa en diferentes áreas del mundo.

**Tabla 2**

*Frecuencias de Transmisión LoRa permitidas por País y Región*

Country/Region	Frequency (MHz)
Europe	433-434, 863-870
USA, Canada, South America	902-928
Australia, New Zealand	915-928
Hong, Singapore, Malaysia, Thailand, Vietnam	920-923
China	470-510, 779-787
Taiwan	922-928
Brunei, Cambodia, Indonesia, Laos	923-925
South Korea, Japan	920-925
India	865-867

Nota: Adaptado de Internet of Things (IoT): Systems and Applications (p. 114), por J. Khan y M. Yuce, 2019, Jenny Stanford Publishing Pte. Ltd.

La información sobre las bandas de frecuencia permitidas en Perú para tecnologías como LoRaWAN proviene del Decreto Supremo N.º 024-2021-MTC,

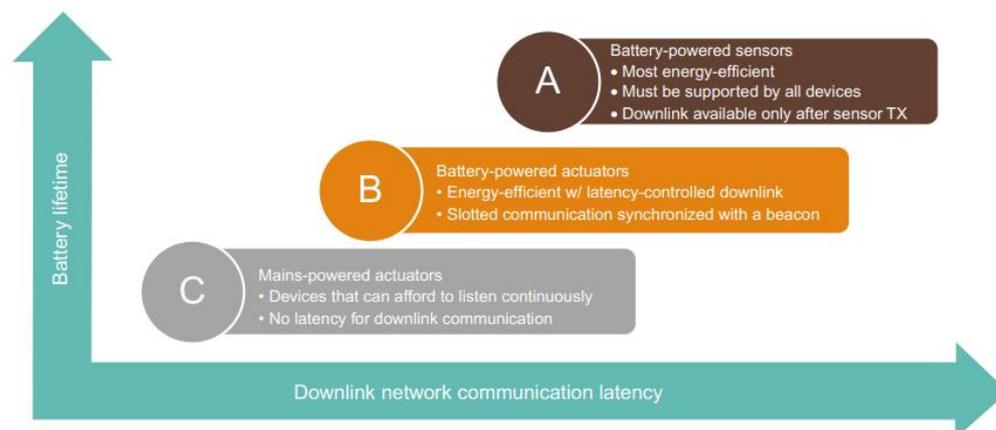
el cual regula el uso del espectro radioeléctrico en el país. Según este decreto, la banda 915-928 MHz está habilitada para su uso en aplicaciones como IoT bajo el espectro ISM. Esta normativa facilita la implementación de redes IoT y se alinea con las regulaciones internacionales para evitar interferencias.

### 2.2.10. Clases de dispositivos LoRaWAN

LoRaWAN define tres clases de dispositivos: A, B y C. Las clases B y C son variantes de la clase A, con la finalidad de obtener menor latencia en los mensajes a cambio de un mayor consumo de energía. En la Figura 9 se puede observar las principales características de las clases de dispositivos LoRaWAN (Kühnel, 2022).

**Figura 9**

*Clases nodos LoRaWAN*



Nota: Adaptada de LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications (p. 42), por B. S. Chaudhari y M. Zennaro, 2020, Elsevier.

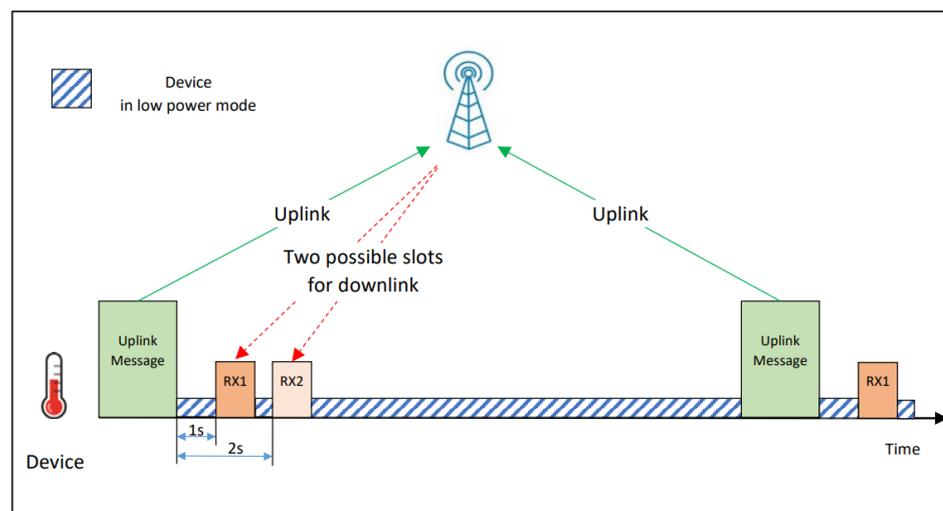
#### 2.2.10.1. Nodo clase A

Los dispositivos de Clase A admiten la comunicación bidireccional entre un dispositivo final y una puerta de enlace. Después de enviar

mensajes ascendentes, abren dos ventanas de recepción en momentos específicos Rx1 y Rx2. Si el servidor no responde durante estas ventanas, el dispositivo final no puede recibir mensajes hasta la próxima transmisión ascendente. Este enfoque es ideal para dispositivos con restricciones de energía, como aquellos alimentados por baterías (Kühnel, 2022).

### Figura 10

*Envío y recepción de datos en un nodo clase A*



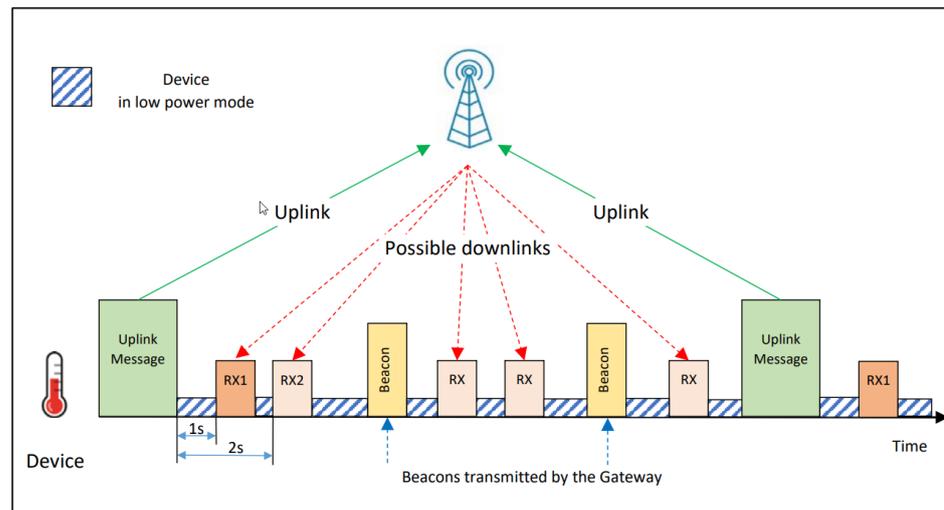
Nota: Adaptada de LoRa - LoRaWAN and Internet of Things for beginners (p. 45), por S. Montagny, 2022, Savoie Mont Blanc University.

#### 2.2.10.2. Nodo clase B

Los dispositivos de clase B extienden la funcionalidad de clase A al incluir ventanas de recepción programadas para mensajes descendentes del servidor.

**Figura 11**

*Envío y recepción de datos en un nodo clase B*



Nota: Adaptada de LoRa - LoRaWAN and Internet of Things for beginners (p. 46), por S. Montagny, 2022, Savoie Mont Blanc University.

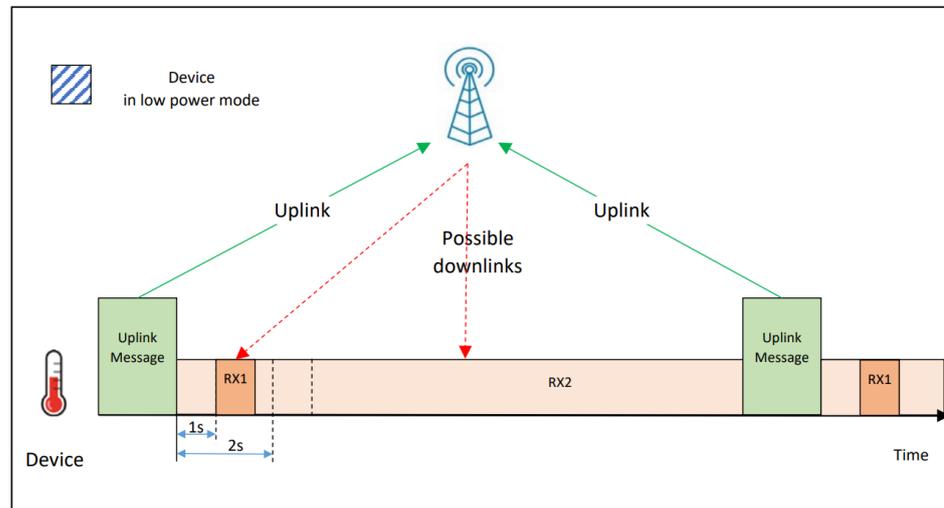
Estas ventanas son activadas por marcadores sincronizados enviados por la puerta de enlace, con un intervalo de tiempo denominado "periodo de marcadores". El tiempo que el dispositivo final espera para recibir estos mensajes es una "ranura de ping". Además, los dispositivos de clase B también abren ventanas de recepción después de enviar mensajes ascendentes (Kühnel, 2022).

### 2.2.10.3. Nodo clase C

Los dispositivos de clase C mantienen ventanas de recepción abiertas casi constantemente, cerrándose solo durante la transmisión. Aunque consumen más energía que los dispositivos de Clase A o B, ofrecen la menor latencia en la comunicación entre el servidor y el dispositivo final (Chaudhari & Zennaro, 2020).

**Figura 12**

*Envío y recepción de datos en un nodo clase C*



Nota: Adaptada de LoRa - LoRaWAN and Internet of Things for beginners (p. 47), por S. Montagny, 2022, Savoie Mont Blanc University.

### 2.2.11. Modos de Activación de Nodos Finales y su seguridad

LoRaWAN incorpora medidas de seguridad para proteger tanto el protocolo de red como los datos del usuario. Utiliza el cifrado AES 128 para proteger los datos en las comunicaciones entre el nodo y la aplicación, así como entre el nodo final (End device) y el servidor de red (Network Server). Para que un dispositivo LoRaWAN pueda comunicarse en la red, necesita tres elementos clave: una Dirección de Dispositivo (DevAddr) y dos claves: la Clave de Sesión de Red (NwkSKey), que asegura la comunicación entre el nodo final (End device) y el servidor de red (network Server), y la clave de sesión de la aplicación (AppSKey) (Chaudhari & Zennaro, 2020; Guzmán, 2021).

- DevAddr: Identificador de dispositivo de 32 bits.
- AppEUI: Identificador único de aplicación según IEEE UI64.
- NwkSKey: Clave de sesión de red (AES-128), utilizada para cifrar la comunicación entre el dispositivo final y el NS.



- AppSKey: Clave de sesión de la aplicación (AES-128), empleada para proteger datos específicos de la aplicación.

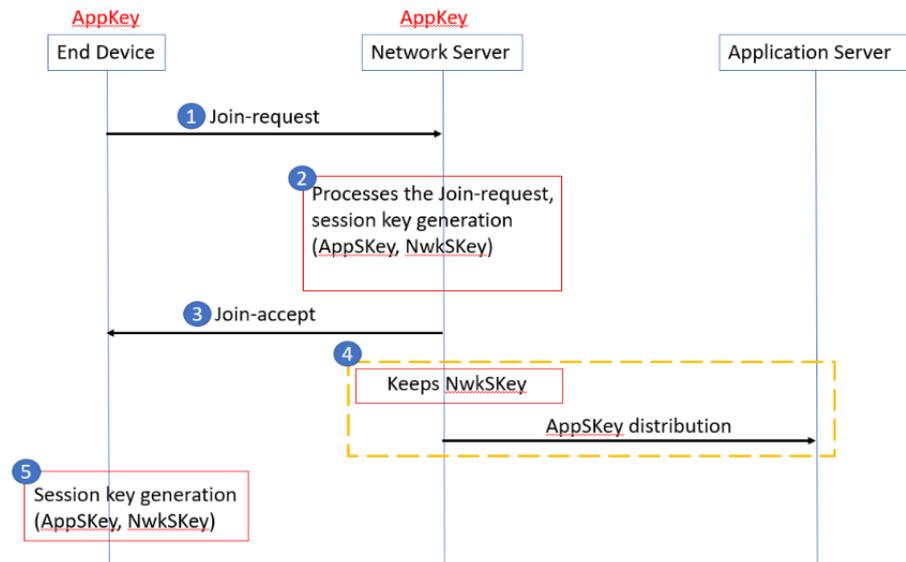
LoRaWAN ofrece dos métodos de activación del nodo final.

#### **2.2.11.1. Activación por Aire (OTAA)**

En el proceso de activación OTAA en una red LoRaWAN, el nodo final (End Device) inicia enviando una solicitud de unión al gateway, que incluye su identificador global (DevEUI), la identificación de la aplicación (AppEUI), y la clave de aplicación (AppKey) para la autenticación. Esta solicitud es transmitida al servidor de red, que responde con un mensaje de "join accept". Este mensaje, retransmitido a través del gateway, puede ser recibido por el nodo final durante la primera o segunda ventana de recepción. Al recibir el "join accept", el nodo final adquiere los parámetros de configuración necesarios, como la dirección de dispositivo (DevAddr), la clave de sesión de red (NwkSKey) y la clave de sesión de aplicación (AppSKey), generados por el servidor de red. Estos parámetros permiten al nodo final establecer una conexión segura con la red LoRaWAN, facilitando la comunicación segura y confiable entre el nodo y el servidor de red a través del gateway.

**Figura 13**

*Proceso de activación OTAA*



Nota: Adaptado de End Device Activation, por The Things Network, s.f., <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/end-device-activation/>

De esta manera, el proceso de activación OTAA garantiza la autenticación y configuración adecuadas del nodo final en la red LoRaWAN, asegurando una conexión estable y segura para la transmisión de datos (Chaudhari & Zennaro, 2020; Masache, 2022).

- DevEUI: Identificador único del dispositivo LoRaWAN, similar a una dirección MAC en Ethernet. Algunos dispositivos ya tienen un DevEUI fijo que no se puede cambiar.
- AppKey: Clave AES 128 utilizada para autenticar y cifrar la conexión del dispositivo, así como para generar claves de sesión. Debe mantenerse en secreto.
- AppEUI/JoinEUI: Identificador de la aplicación (AppEUI) en versiones anteriores de LoRaWAN, y el identificador del servidor de unión (JoinEUI) en las versiones más recientes.

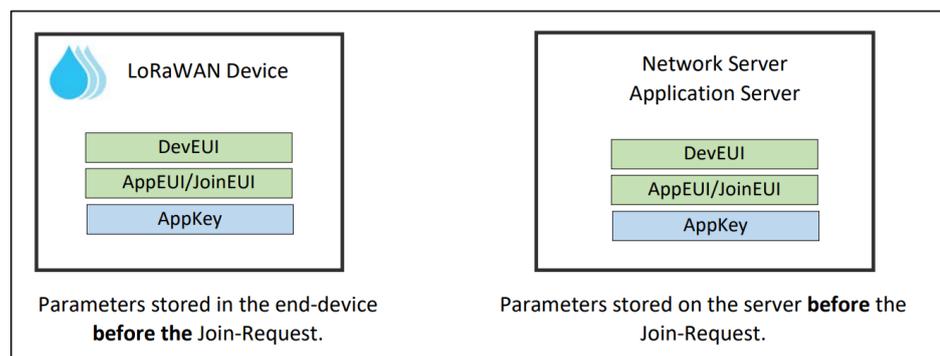
Nota: Para simplificar, actualmente no estamos utilizando ningún servidor de unión. Por lo tanto, podemos asignar "000000000000000000" como el valor de AppEUI/JoinEUI (Montagny, 2022).

### 2.2.11.2. Activación por Personalización (ABP)

En este método de conexión, durante la fabricación o configuración del dispositivo final, se suministran las claves de conexión (DevAddr, NwkSKey, AppSKey), eliminando así la necesidad de solicitar autorización a la red para su conexión. A pesar de su aparente simplicidad y menor consumo de ancho de banda, esta aproximación plantea significativas preocupaciones en cuanto a seguridad, por lo que no se recomienda su implementación en entornos comerciales (Montagny, 2022).

#### Figura 14

##### *Proceso de activación ABP*



Nota: Adaptada de LoRa - LoRaWAN and Internet of Things for beginners (p. 50), por S. Montagny, 2022, Savoie Mont Blanc University.

### 2.2.12. Cobertura LoRaWAN

Una puerta de enlace puede llegar a tener cobertura en ciudades enteras, cientos de millas, cuerdas o kilómetros. La cobertura va depender en gran medida

de las obstrucciones presentes en el alrededor, arboles, edificios, geografía del terreno etc.

**Tabla 3**

*Comparativa de cobertura LoRaWAN con otras tecnologías LPWAN*

Technical metrics	NB-IoT	LTE-M	LoRaWAN	SigFox
Carrier bandwidth	200 kHz	1.4 MHz	125 and 250 kHz	100 Hz
Uplink	SC-FDMA	SC-FDMA	Wide-band linear frequency	Ultra-narrowband
Downlink Modulation	OFDMA QPSK	OFDMA 16 QAM	Frequency-modulated pulses CSS	(UNB) BPSK
Bands	Licensed LTE	Licensed LTE	915 MHz	<1 GHz
MCL	164dB	156 dB	155dB	160dB
Data rate	250 kbps	1 Mbps	50 kbps	100 bps
Coverage	<25 km	5 km	<20 km	<40 km
Power consumption (battery life)	>10 years	10 years	<10 years	>10 years
Cost	Low	High	Low	Lower than NB-IoT
MAC layer Connection density (maximum number of devices)	LTE based 50,000 per cell	LTE >50,000 per cell	Aloha based 100,000 per cell	Aloha based 100,000 per cell
Mobility	No	Yes	Yes	No

Nota: Adaptado de LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications (p. 136), por B. S. Chaudhari y M. Zennaro, 2020, Elsevier.

El entorno, condiciones climáticas y el factor técnico, interferencia de radio en alto nivel. La cobertura que ofrece LoRa es mucho mayor que cualquier otra tecnología estandarizada como son bluetooth, WiFi o celular (Chaudhari & Zennaro, 2020).



## 2.2.13. Naturaleza del viento

### 2.2.13.1. Gradiente de presión

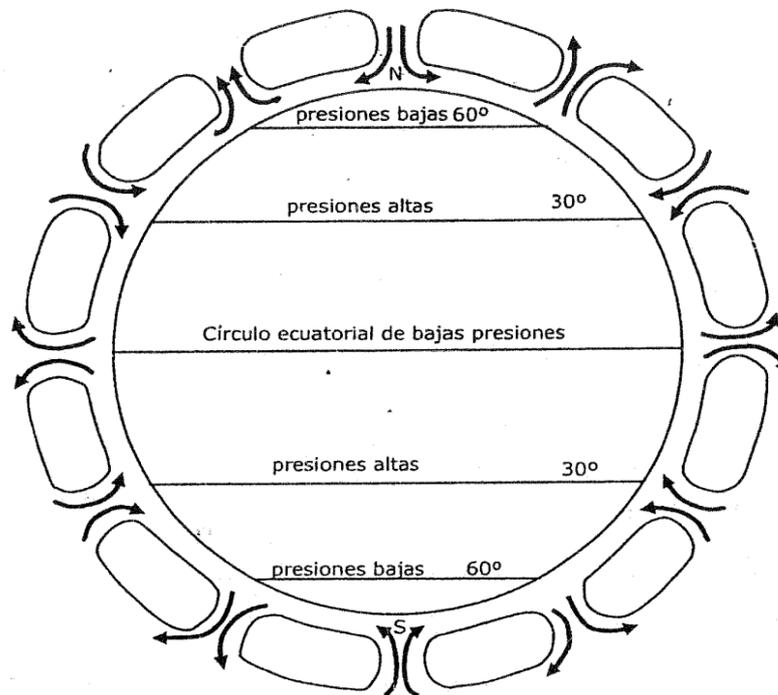
El viento se mueve impulsado por el gradiente de presión, avanzando de zonas de alta presión a zonas de baja presión, con una velocidad que depende de la intensidad del gradiente. Este fenómeno ocurre debido al calentamiento desigual de la Tierra por la radiación solar, que es más intenso en el ecuador y disminuye hacia los polos (Manwell et al., 2009).

### 2.2.13.2. Cinturón de presión

Los cinturones de presión son zonas atmosféricas donde se encuentran áreas con presiones similares. Estas zonas se forman debido a la distribución desigual del calor solar y la rotación de la Tierra. En el ecuador, el sol calienta el aire, haciendo que ascienda; luego, al enfriarse, este aire se mueve hacia latitudes más altas, descendiendo cerca de los 30° de latitud. En los polos ocurre el proceso inverso: el aire frío desciende y luego se desplaza hacia los 60°, donde vuelve a ascender. Estos cinturones de presión desempeñan un papel clave en los patrones climáticos globales, ya que influyen en la circulación del aire, la formación de vientos y el transporte de calor, elementos esenciales para el clima (Creus Solé, 2008).

**Figura 15**

*Cinturones de circulación por convección*



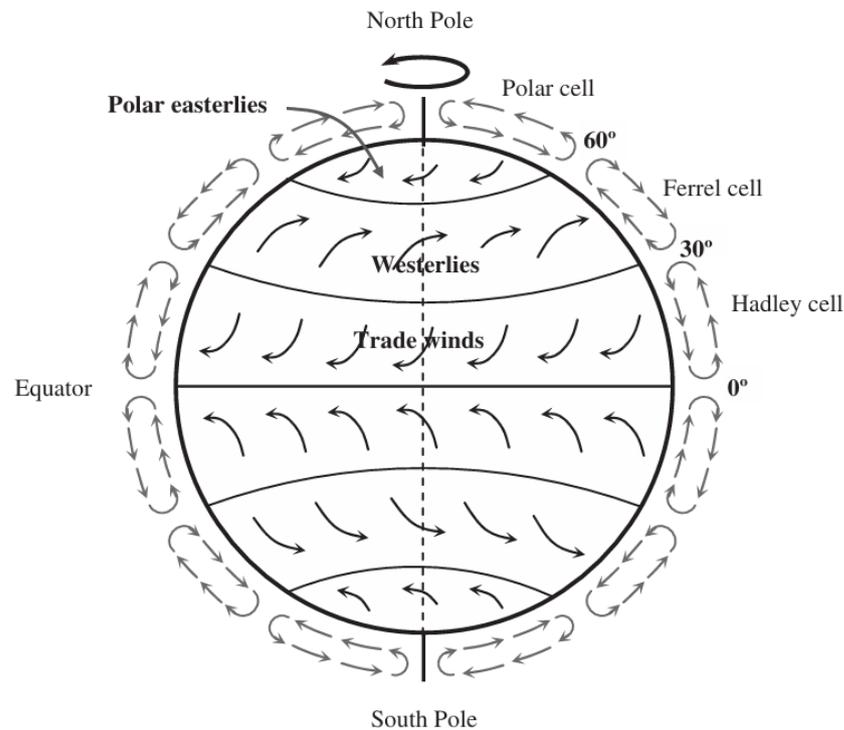
Nota: Adaptada de Aerogeneradores (p. 42), por A. Creus Sole, 2008, Cano Pina S.L.

### 2.2.13.3. Efecto coriolis

La rotación de la Tierra y la fuerza de Coriolis influyen en la dirección y velocidad del viento. En el hemisferio norte, los vientos tienden a desviarse hacia la derecha, mientras que en el hemisferio sur se desvían hacia la izquierda, siendo este efecto más fuerte en los polos y prácticamente inexistente en el ecuador. Junto con las diferencias de presión causadas por la desigual radiación solar, esto da lugar a tres zonas de circulación de aire en cada hemisferio: la célula de Hadley (entre  $0^\circ$  y  $30^\circ$ ), la célula de Ferrel (entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$ ), y la célula Polar (entre  $60^\circ$  y  $90^\circ$ ). Estas células de convección ayudan a regular el flujo de aire, generando patrones de viento y presión que afectan el clima a nivel mundial (Tong, 2010).

**Figura 16**

*Circulaciones atmosféricas idealizadas*



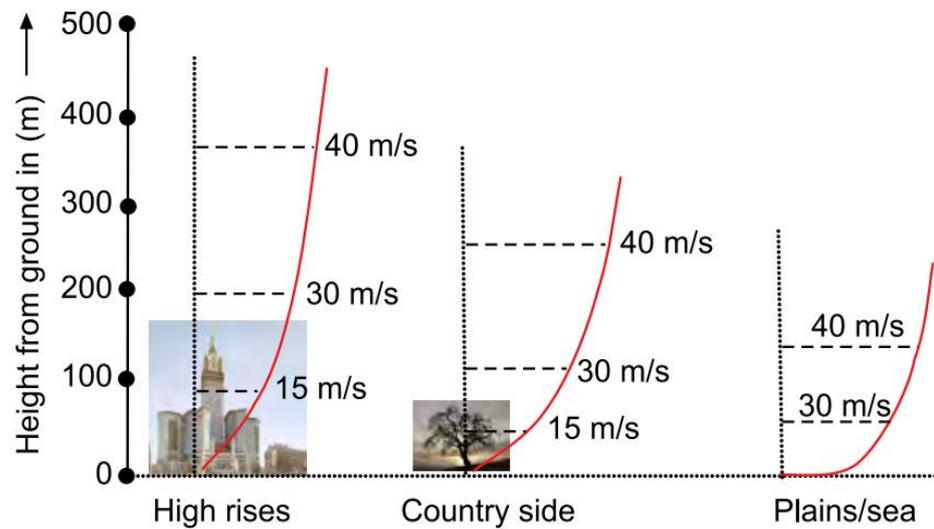
Nota: Adaptada de Wind Power Generation and Wind Turbine Design (cap. 6), por W. Tong, 2010, WIT Press.

#### **2.2.13.4. Efecto fricción y cizalladura**

La rugosidad de la superficie terrestre, originada tanto por la geografía natural como por estructuras construidas por el ser humano, genera fricción, lo que reduce la velocidad del viento cerca del suelo y provoca cambios en su velocidad a diferentes alturas, conocidos como cizalladura. A medida que aumenta la altura, la velocidad del viento crece aproximadamente un 10% por cada duplicación de altura y se intensifica en terrenos irregulares. Elementos naturales, como los pasos de montaña, pueden acelerar el viento, creando corrientes de alta velocidad. Esto implica que los aerogeneradores ubicados a mayor altura pueden producir entre un 20% y un 25% más de energía (Earnest & Rachel, 2019).

**Figura 17**

*Gradiente del viento y cizalladura*



Nota: Adaptada de Wind Power Technology (p. 42), por J. Earnest y S. Rachel, 2019, PHI Learning Private Limited.

#### 2.2.14. Escala Beaufort

La escala de Beaufort es un sistema de medición que permite estimar la velocidad del viento basándose en sus efectos observables tanto en la superficie terrestre como en el mar. Desarrollada por Lord Francis Beaufort, un almirante inglés de principios del siglo XIX, la escala fue adoptada oficialmente por el almirantazgo británico en 1848 y sigue siendo utilizada hoy en día (Villarrubia, 2012).

**Tabla 4**

*Escala Beaufort de intensidades de viento*

Grados Beaufort	v (km/h)	v (m/s)	Descripción	Presión sobre superficie plana (N / m <sup>2</sup> )
0	1	0 - 0,4	Calma	----
1	1 - 5	0,5 - 1,5	Brisa muy ligera	1,3    1 m/s
2	6 - 11	1,3 - 3,4	Brisa ligera	8       2,5 m/s
3	12 - 19	3,5 - 5,5	Pequeña brisa	32      5 m/s
4	20 - 28	5,5 - 8	Moderado	64      7 m/s



<b>Grados Beaufort</b>	<b>v (km/h)</b>	<b>v (m/s)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Presión sobre superficie plana (N / m<sup>2</sup>)</b>	
5	29 - 38	8,1 - 10,9	Fresco	130	10 m/s
6	39 - 49	11,4 - 13,9	Fuerte (Bonancible)	220	13 m/s
7	50 - 61	14,1 - 16,9	Fuerte (Muy fresco)	330	16 m/s
8	62 - 74	17,4 - 20,4	Duro (Golpe de viento)	520	20 m/s
9	75 - 88	20,5 - 23,9	Muy duro	690	23 m/s
10	89 - 102	24,4 - 28	Tempestad (Temporal)	950	27 m/s
11	103 - 117	28,4 - 32,5	Fuerte tempestad	1.170	30 m/s
12	118 - 133	32,6 - 35,9	Huracán	1.600	35 m/s
13	134 - 149	36,9 - 40,4	Huracán	2.080	40 m/s
14	150 - 166	40,1 - 45,4	Huracán	2.650	45 m/s
15	167 - 183	45,1 - 50	Huracán	3.250	50 m/s
16	184 - 201	50,1 - 54	Huracán	3.650	54 m/s
17	202 - 220	54,1 - 60	Ciclón	4.700	60 m/s

Nota: Adaptado de Ingeniería de la Energía Eólica (Cap. 2), por M. Villarrubia López, 2012, Marcombo, S.A.

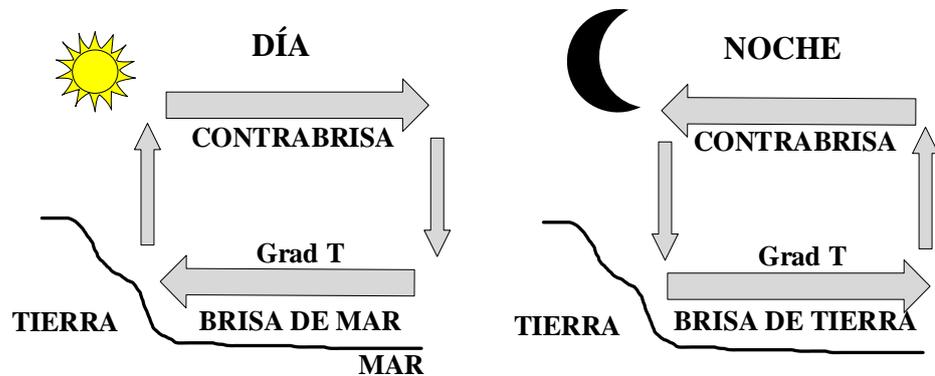
## 2.2.15. Vientos locales

### 2.2.15.1. Brisas de mar y brisas de tierra

Durante el día, la tierra se calienta más rápido que el mar, lo que provoca que el aire ascienda sobre la superficie terrestre y genere una zona de baja presión que atrae el aire fresco del mar hacia la costa, formando la brisa marina. Por la noche, ocurre lo contrario: el aire se mueve de la tierra hacia el mar, dando lugar a la brisa terrestre. Estas brisas son comunes en áreas costeras, llegando a extenderse hasta 20 kilómetros tierra adentro, y en ocasiones hasta 50 kilómetros. La velocidad del viento suele ser de menos de 20 km/h, siendo la brisa terrestre generalmente más suave que la brisa marina. Estas brisas son comunes en áreas costeras, llegando a extenderse hasta 20 kilómetros tierra adentro, y en ocasiones hasta 50 kilómetros. La velocidad del viento suele ser de menos de 20 km/h, siendo la brisa terrestre generalmente más suave que la brisa marina (Villarrubia, 2012).

**Figura 18**

*Formación de brisas de mar y de tierra*



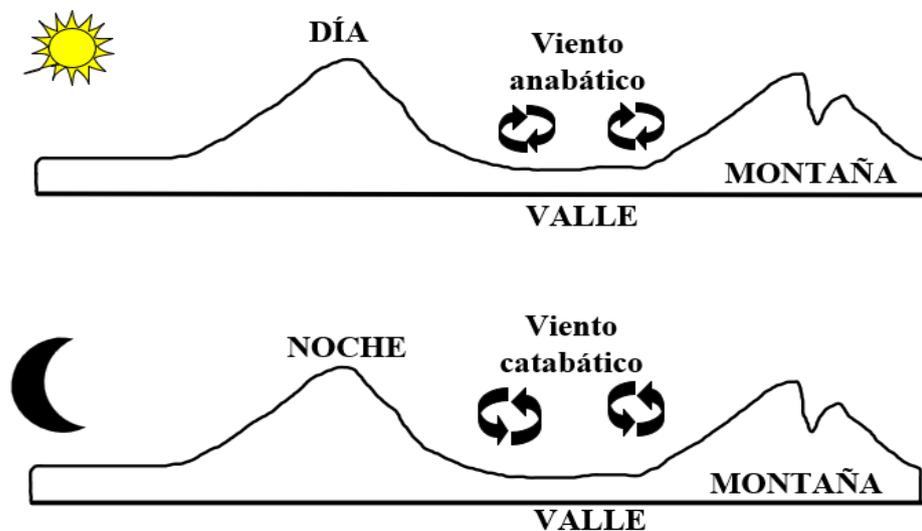
Nota: Adaptada de *Ingeniería de la Energía Eólica* (Cap. 2), por M. Villarrubia López, 2012, Marcombo, S.A. Copyright 2012 por Marcombo, S.A.

### 2.2.15.2. Brisas de valle y de montaña (vientos anabáticos y catabáticos)

Al anochecer, en las montañas, el aire en contacto con las zonas más altas se enfría rápidamente y desciende por la ladera hacia el valle, creando lo que se llama viento catabático, que generalmente es suave.

**Figura 19**

*Formación de brisas de valle y montaña*



Nota: Adaptada de *Ingeniería de la Energía Eólica* (Cap. 2), por M. Villarrubia López, 2012, Marcombo, S.A. Copyright 2012 por Marcombo, S.A.



Durante el día, la radiación solar invierte este proceso: el aire en las zonas bajas se calienta y asciende por la ladera, formando el viento anabático. Estos flujos de aire son también conocidos como vientos de cañón o brisas de montaña (Villarrubia, 2012).

## **2.2.16. Parámetros del viento**

### **2.2.16.1. Velocidad**

La velocidad del viento es una medida que incluye tanto dirección como magnitud. Aunque técnicamente tiene tres componentes (incluyendo una vertical en el eje z), en energía eólica solo se toman en cuenta las componentes horizontales, orientadas hacia el Este y el Norte, en los ejes x y y. Los instrumentos de medición registran principalmente la velocidad o intensidad del viento (es decir, la magnitud de la componente horizontal) y la dirección desde la que sopla, ya que la componente vertical es generalmente insignificante para este tipo de aplicaciones (Villarrubia, 2012).

### **2.2.16.2. Variaciones de la velocidad del viento**

- Variaciones estacionales
  - Los vientos globales cambian con las estaciones, influenciados por la radiación solar, así como por la ubicación de áreas de alta y baja presión (anticiclones y borrascas), entre otros factores. Estos cambios cíclicos pueden ser más o menos intensos dependiendo de la época del año.



- Variaciones diarias
  - Las variaciones diarias del viento están influenciadas por el calentamiento y enfriamiento entre el día y la noche, la cercanía del mar y las características del terreno. Esto se manifiesta en fenómenos como las brisas que se generan en áreas costeras o en zonas montañosas.
- Variaciones en periodos muy cortos
  - El viento puede mostrar grandes cambios en su velocidad y dirección en periodos muy breves. Una ráfaga se define como la diferencia entre la velocidad instantánea del viento y su velocidad media (calculada en un intervalo de 10 minutos), además de su duración. Si la velocidad instantánea supera la media en 5 a 8 m/s, se clasifica como ráfaga; entre 8 y 15 m/s, como fuerte ráfaga; y si excede los 15 m/s, se denomina ráfaga violenta.

### **2.2.16.3. Dirección**

La dirección del viento se mide en grados dentro de un círculo de 360°, tomando como referencia el Norte. Este ángulo, denominado  $\theta$ , puede dividirse en 8, 10, 12 o 16 secciones. A cada punto cardinal se le asigna un valor específico: el Este corresponde a 90°, el Sur a 180°, el Oeste a 270°, y el Norte a 0° o 360° (Villarrubia, 2012).

**Tabla 5***Dirección del viento en grados*

Dirección de donde procede	Ángulo ( $\theta$ )
N	360° - (0°)
NE	45°
E	90°
SE	135°
S	180°
SO	225°
O	270°
NO	315°

Nota: Adaptada de *Ingeniería de la Energía Eólica* (Cap. 2), por M. Villarrubia López, 2012, Marcombo, S.A.

#### 2.2.16.4. Temperatura

La temperatura del viento se refiere a la temperatura del aire que transporta, que es la misma que la del aire en reposo. El viento en sí no tiene una temperatura propia; simplemente desplaza el aire, cuya temperatura varía según factores ambientales como la radiación solar, la cercanía a cuerpos de agua, la altitud y otras condiciones locales.

#### 2.2.16.5. Humedad

La humedad relativa del viento muestra el porcentaje de vapor de agua en el aire en comparación con la cantidad máxima que podría contener a una temperatura específica. Este concepto es clave en meteorología, ya que el aire cálido puede retener más vapor que el frío. Una humedad relativa del 50% indica que el aire contiene la mitad del vapor necesario para llegar a su punto de saturación. Aunque el viento no cambia directamente la humedad relativa, influye en nuestra percepción al mover el aire, lo que facilita la evaporación o añade vapor, especialmente en temperaturas cálidas.



#### **2.2.16.6. Presión**

La presión del aire, o presión atmosférica, es la fuerza que ejerce el aire sobre la superficie terrestre debido al peso de la columna de aire que tiene encima. Se mide utilizando un barómetro.

#### **2.2.17. Monitoreo de las magnitudes del viento**

La velocidad del viento se mide con un anemómetro y su dirección con una veleta, colocados en áreas despejadas, a 10 metros de altura estándar. Para evaluar el potencial eólico, se recomienda medir a varias alturas (25, 50 y 75 metros), o a la altura del buje en aerogeneradores. Para evaluar el potencial eólico, se recomienda que la frecuencia de muestreo sea lo más alta posible, con un periodo de medición que no exceda los 5 a 10 segundos. En estudios de viabilidad para la instalación de parques eólicos, se debe utilizar una frecuencia de muestreo de una medición por segundo para garantizar mayor precisión en los resultados. Además, se utilizan termómetros y barómetros para registrar temperatura y presión atmosférica (Villarrubia, 2012).

Factores a considerar para seleccionar el equipo de medición adecuado. La precisión, sensibilidad, calibraciones apropiadas para garantizar la fiabilidad, Robustez, capacidad para soportar condiciones adversas y facilidad de acceso al emplazamiento.



## 2.2.18. Instrumentos de la medición del viento

### 2.2.18.1. Medición de la velocidad horizontal del viento

#### (Anemómetro)

- Anemómetro de copa
  - El anemómetro de copa tiene tres o cuatro copas conectadas a un eje vertical que giran cuando el viento las mueve. Un transductor en el anemómetro convierte este giro en una señal eléctrica, transmitida al registrador de datos por un cable. El registrador mide la frecuencia de la señal y la ajusta usando un factor de conversión para determinar la velocidad del viento (Brower et al., 2012).
- Anemómetro de hélice o de paleta de hélice
  - El anemómetro de hélice, también llamado anemómetro de paleta, tiene una hélice en un eje horizontal que se orienta hacia el viento con una veleta de cola. Al igual que el anemómetro de copa, genera una señal eléctrica proporcional a la velocidad del viento. Sin embargo, en condiciones de turbulencia, este tipo de anemómetro puede registrar velocidades ligeramente más bajas, ya que la veleta puede oscilar o retrasarse ante cambios bruscos en la dirección del viento, impidiendo que la hélice se alinee correctamente (Brower et al., 2012).
- Anemómetro sónico
  - El anemómetro sónico mide la velocidad y dirección del viento sin necesidad de partes móviles, detectando cambios

en la velocidad de los ultrasonidos entre puntos fijos. Puede medir en dos o tres dimensiones y responde rápidamente a las variaciones en velocidad y dirección del viento, ya que no tiene inercia rotacional. Sin embargo, este tipo de anemómetro es más costoso y consume más energía que los modelos de copa o hélice (Brower et al., 2012).

### **Figura 20**

#### *Anemómetro de 3 copas*



Nota: Adaptado de Wind Resource Assessment: A Practical Guide to Developing a Wind Project (p. 39), por M. C. Brower, 2012, John Wiley & Sons.

#### **2.2.18.2. Medición de la dirección del viento (Veleta)**

La dirección del viento se mide con una veleta que, gracias a su cola horizontal conectada a un eje vertical, puede girar y alinearse con el viento. Para obtener mediciones precisas, se recomienda instalar veletas a distintas alturas y mantenerlas separadas de los anemómetros para evitar interferencias. En las veletas con potenciómetro, la dirección se determina mediante la medición de voltajes en el brazo limpiador; sin embargo, estas



presentan una “zona muerta” que limita su alcance total de 360 grados. Se sugiere una resolución de 1 grado o superior para asegurar la precisión (Brower et al., 2012).

### **2.2.18.3. Medición de la temperatura del aire**

La temperatura del aire es crucial en los parques eólicos, ya que se mide a una altura de 2-3 metros sobre el suelo o cerca del buje de las turbinas para estimar la densidad del aire, lo cual afecta la producción de energía. La diferencia de temperatura entre ambos niveles suele ser menor a 1°C. Además, esta medición permite detectar la formación de hielo en las turbinas. Un sensor de temperatura ambiental incluye un transductor, una interfaz y un protector contra la radiación solar. El transductor, fabricado con materiales como níquel o platino, mide la resistencia para calcular la temperatura, mientras que el protector evita que el calor solar afecte las mediciones (Brower et al., 2012).

### **2.2.18.4. Medición de la humedad relativa del aire**

La cantidad de vapor de agua en el aire influye en su densidad, por lo que un sensor de humedad relativa puede mejorar la precisión de estas estimaciones. Sin embargo, debido a que la humedad tiene un impacto mínimo en estos cálculos, rara vez se mide con este fin. En climas fríos, un sensor de humedad relativa puede ser útil para analizar la formación de hielo (Brower et al., 2012).



### **2.2.18.5. Medición de la presión atmosférica**

La presión barométrica, junto con la temperatura del aire, ayuda a mejorar la precisión en la estimación de la densidad del aire, ya que cambios normales en la presión a igual temperatura pueden modificar la densidad en aproximadamente un 1%. Sin embargo, medir la presión barométrica en entornos con viento es desafiante, ya que el viento genera presiones dinámicas alrededor del sensor, lo que hace que los equipos precisos sean costosos. Por esta razón, la mayoría de los programas de evaluación de recursos evitan medir la presión directamente y, en su lugar, usan la temperatura, la elevación o datos de estaciones meteorológicas cercanas, métodos que suelen ser precisos. En altitudes superiores a los 2000 metros sin estaciones cercanas a la misma altura, se recomienda utilizar sensores de alta precisión. Los barómetros comerciales suelen emplear transductores piezoeléctricos que envían un voltaje continuo a un registrador de datos y pueden necesitar alimentación externa. Es fundamental que el transductor esté expuesto a la presión externa y no en carcasas herméticas ni en posiciones donde el viento pueda alterar la presión (Brower et al., 2012).

### **2.2.19. Estudio del potencial energético del viento**

#### **2.2.19.1. Intervalo de Clase**

Para analizar con precisión los datos de velocidad del viento, es importante organizarlos en categorías con intervalos de no más de 0.5 m/s, lo cual garantiza la exactitud necesaria para estudios detallados en proyectos eólicos. Esto implica definir los límites de cada categoría según



el rango total de los datos y el tamaño del intervalo elegido. Luego, cada valor se clasifica en su categoría correspondiente y se cuenta la frecuencia en cada intervalo. Esta metodología estructurada permite un análisis riguroso y adecuado para aplicaciones que requieren alta precisión en el estudio del comportamiento del viento (Villarrubia, 2012).

#### **2.2.19.2. Centro de clase**

El centro de clase, o marca de clase, es el punto medio de un intervalo en una serie de datos agrupados. En el análisis de la velocidad del viento, se calcula sumando los límites inferior y superior de un intervalo de velocidad y dividiendo el resultado entre dos. Este valor representa de manera aproximada la velocidad del viento en ese intervalo y es útil para realizar cálculos estadísticos y crear gráficos precisos que reflejen la distribución de las velocidades del viento.

#### **2.2.19.3. Frecuencia de clase ( $f_i$ )**

La frecuencia de clase es la cantidad de observaciones que se encuentran dentro de un intervalo específico en una serie de datos agrupados. Este valor es fundamental para comprender cómo se distribuyen los datos en distintos rangos y se utiliza ampliamente en la creación de histogramas y gráficos, lo que facilita el análisis estadístico. También se le conoce como frecuencia simple (Lind et al., 2015).

#### **2.2.19.4. Frecuencia de clase relativa ( $F_i$ )**

La frecuencia relativa de clase es una medida que representa la proporción del número total de observaciones que caen dentro de una clase



específica en una distribución de datos agrupados. Se calcula dividiendo la frecuencia de clase entre el número total de observaciones (Lind et al., 2015).

$$F_i = \frac{f_i}{N}$$

Donde:

- $F_i$  Frecuencia de clase relativa.
- $f_i$  Frecuencia de clase.
- $N$  Numero total de datos.

#### **2.2.19.5. Frecuencia acumulada simple ( $f_a$ )**

La frecuencia acumulada simple se define como la suma de todas las frecuencias simples de las clases anteriores y la correspondiente a la clase que se está analizando (Salazar Guerrero, 2018).

#### **2.2.19.6. Frecuencia acumulada relativa ( $F_a$ )**

Se obtiene dividiendo la frecuencia acumulada simple entre la suma total de las frecuencias simples. Este valor se puede expresar como un porcentaje si se multiplica por 100. En ambos casos, la suma de todas las frecuencias absolutas debe resultar en uno.

#### **2.2.19.7. Frecuencia complementaria simple ( $f_c$ )**

Para la primera clase, se calcula restando del total de las frecuencias simples la frecuencia simple de la primera clase. Las frecuencias complementarias de las clases subsecuentes se obtienen

restando la frecuencia simple de cada clase de la frecuencia complementaria de la clase anterior. Para la última clase, la frecuencia complementaria es cero.

#### **2.2.19.8. Frecuencia complementaria relativa ( $F_r$ )**

Se obtiene dividiendo la frecuencia complementaria simple ( $F_c$ ), entre la frecuencia simple ( $F_i$ ), también se obtiene restando la unidad menos la frecuencia acumulada relativa ( $F_a$ ) (Salazar Guerrero et al., 2020).

#### **2.2.20. Distribución de Weibull - PDF**

La distribución de Weibull es una herramienta matemática utilizada para representar la frecuencia con la que se registran diferentes velocidades del viento en un determinado lugar. Esto es importante porque conocer cómo varía la velocidad del viento permite estimar cuánta energía puede generar un aerogenerador. En esencia, esta distribución nos dice cuántas veces, durante un periodo de tiempo, la velocidad del viento se encuentra dentro de ciertos intervalos específicos. Estos intervalos suelen tener un ancho de 0,5 o 1 metro por segundo (m/s) y cubren un rango amplio de velocidades, generalmente desde 0 hasta 25 m/s o más. La información recolectada se suele presentar en forma de un histograma o en tablas que pueden ser utilizadas en software de diseño para plantas eólicas (Brower et al., 2012).

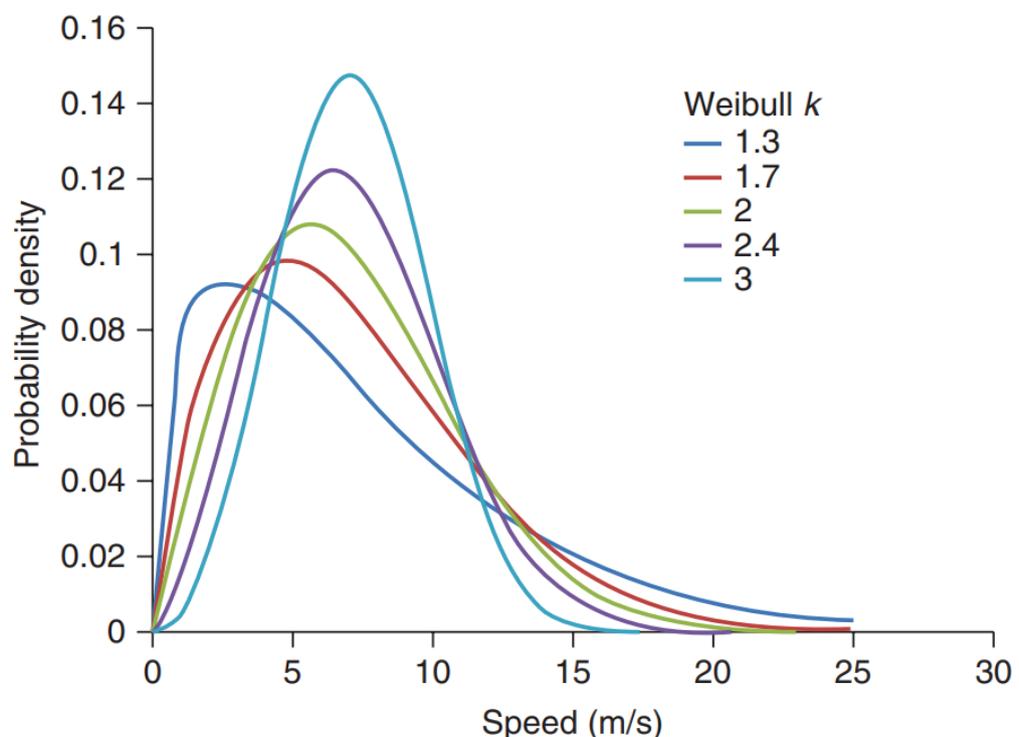
$$p(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Donde:

- $v$ : Velocidad del viento en m/s.
- $p(v)$ : Función densidad de probabilidad de Weibull.
- $c$ : Factor de escala (m/s), valor próximo a la velocidad media anual. También se acostumbra a designar por  $A$ .
- $k$ : factor de forma que caracteriza la asimetría o sesgo de la función  $p(v)$ .

**Figura 21**

*Densidad de probabilidad de Weibull*



Nota: Curvas de densidad de probabilidad de Weibull para un rango de valores de  $k$ . Todas las curvas tienen el mismo factor de escala  $c$ . Adaptado de de Wind Resource Assessment: A Practical Guide to Developing a Wind Project (p. 139), por M. C. Brower, 2012, John Wiley & Sons.

En la figura 21 muestra las curvas de densidad de probabilidad de la distribución de Weibull para diferentes valores del parámetro de forma  $k$  (que varían entre 1.3 y 3), representando la relación entre la probabilidad de ocurrencia y la velocidad del viento. A medida que  $k$  aumenta, la distribución se vuelve más

estrecha y desplazada hacia velocidades más altas, lo que indica que el viento es más constante y las variaciones en la velocidad son menores. En cambio, para valores de  $k$  más bajos, como 1.3, la distribución es más amplia, reflejando una mayor variabilidad en la velocidad del viento.

#### **2.2.20.1. Parámetro de forma y escala de Weibull**

- $c$ : el parámetro de escala, que está relacionado con la velocidad promedio del viento en la zona, también denominado con la letra **A**.
- $k$ : el parámetro de forma, que no tiene unidades y determina la amplitud de la distribución de velocidades.

La función de Weibull utiliza dos parámetros principales:  $c$ , conocido como el parámetro de escala, que está relacionado con la velocidad promedio del viento, y  $k$ , el parámetro de forma, que determina la amplitud de la distribución. Cuando el valor de  $k$  es mayor (entre 1 y 3.5), la distribución se vuelve más estrecha, lo que indica que el viento es más constante. Generalmente, el valor de  $k$  varía entre 1.6 y 2.4, y en este rango, la velocidad promedio del viento representa aproximadamente el 89% del valor de escala  $c$  (Brower et al., 2012).

#### **2.2.20.2. Distribución acumulada de Weibull ( $F_v$ ) - CDF**

También conocida como función de distribución acumulada, Cumulative Distribution Function (CDF), por sus siglas en inglés, mide la probabilidad de que la velocidad del viento sea menor o igual a un valor dado (Villarrubia, 2012).



$$p(v) = \frac{dF}{dv};$$

$$F(v \leq V) = \int_0^v p(v)dv = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

$$F(v) = F(v \leq V)$$

Donde:

- $v$ : Velocidad del viento en m/s.
- $p(v)$ : Función densidad de probabilidad de Weibull.
- $c$ : Factor de escala (m/s), valor próximo a la velocidad media anual. También se acostumbra a designar por  $A$ .
- $k$ : Factor de forma que caracteriza la asimetría o sesgo de la función  $p(v)$ .

### 2.2.20.3. Distribución acumulada complementaria de Weibull $\bar{F}'(v)$ - CCDF

También conocida como la función de supervivencia o la función de distribución acumulada complementaria, Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF), Mide la probabilidad de que la velocidad del viento sea mayor que un valor dado (Villarrubia, 2012).

$$F(v \geq V) = 1 - F(v \leq V) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

$$\bar{F}'(v) = F(v \geq V)$$

Donde:

- $v$ : Velocidad del viento en m/s.



- $c$ : Factor de escala (m/s), valor próximo a la velocidad media anual. También se acostumbra a designar por  $A$ .
- $k$ : Factor de forma que caracteriza la asimetría o sesgo de la función  $p(v)$ .

#### 2.2.20.4. La probabilidad de intervalo utilizando la CDF

La probabilidad de intervalo nos permite determinar la probabilidad de que la velocidad del viento esté entre dos valores específicos (Villarrubia, 2012).

$$p(v_1 \leq v \leq v_2) = \int_{v_1}^{v_2} p(v)dv = F(v_2) - F(v_1) = \bar{F}'(v_2) - \bar{F}'(v_1)$$

$$p(v_1 \leq v \leq v_2) = e^{-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k}$$

#### 2.2.20.5. Ley de Rayleigh

La distribución de Rayleigh es una versión específica de la distribución de Weibull cuando el parámetro de forma  $k$  es igual a 2. En esta situación, la función de densidad de probabilidad  $p(v)$  se expresa de la siguiente manera:

$$p(v) = \frac{\pi}{2} \left( \frac{v}{\langle v \rangle^2} \right) e^{-\frac{\pi}{4} \left( \frac{v}{\langle v \rangle} \right)^2}$$

Donde:

- $v$ : Velocidad del viento.
- $\langle v \rangle$ : Velocidad media del viento.



- La función de distribución acumulada de la velocidad  $F(v)$  se determina a partir de la relación  $p(v)=dF/dv$  teniendo en cuenta

$$\text{que: } \frac{\langle v \rangle}{c} = \gamma_{1.5} = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

- $F(v) = 1 - e^{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{v}{c}\right)^2}$

## 2.2.21. Determinación de los parámetros de Weibull

### 2.2.21.1. Método de los mínimos cuadrados

Si se dispone de las velocidades medias del viento registradas cada 10 minutos (medias diezminutales), cada 30 minutos (medias semihorarias) o cada 60 minutos (medias horarias), los parámetros  $c$  y  $k$  pueden determinarse mediante un ajuste por mínimos cuadrados utilizando la función de distribución acumulada  $F(v)$ . Las medias diezminutales proporcionan una alta resolución temporal y son útiles para capturar variaciones rápidas en la velocidad del viento. Las medias semihorarias ofrecen un equilibrio entre detalle y manejabilidad, mientras que las medias horarias proporcionan una visión general de las tendencias del viento a largo plazo. Con cualquiera de estos tipos de datos, es posible ajustar una línea recta a los datos transformados en un gráfico de probabilidad de Weibull para estimar los parámetros que mejor representan la distribución de las velocidades del viento (Villarrubia, 2012).

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Al multiplicar dos veces el logaritmo neperiano a la anterior expresión se tiene:



$$\ln(1 - F(v)) = -\left(\frac{v}{c}\right)^k$$

$$\ln[-\ln(1 - F(v))] = k \ln v - k \ln c$$

Se realiza el ajuste mediante mínimos cuadrados a la línea recta.

$$Y = kx + B$$

$$y = \ln[-\ln(1 - F(v))]$$

$$x = \ln v$$

$$B = -k \ln c$$

Nota: el valor de  $y$  en función de  $\bar{F}'(v)$ , viene dado por la siguiente ecuación,  $y = \ln(-\ln \bar{F}'(v))$ .

Una vez determinada la recta por mínimos cuadrados, su pendiente proporciona el valor de  $k$  y el valor de  $c$  se obtiene a partir de la siguiente expresión.

$$c = e^{-\left(\frac{B}{k}\right)}$$

- Consideraciones a tener en cuenta:
  - Esta frecuencia acumulada relativa (Fa), es la función de distribución acumulada  $F(v)$ , para Weibull.

$$Fa = F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

- Frecuencia complementaria relativa (Fr), es la distribución acumulada complementaria  $\bar{F}'(v)$ , para Weibull.

$$Fr = \bar{F}'(v) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

### 2.2.21.2. Método de máxima verosimilitud (MLE)

La técnica de máxima verosimilitud es un método estadístico que se utiliza para estimar los valores clave de un modelo basándose en la información que hemos observado. En términos sencillos, este método busca los valores de estos parámetros que hagan más probable haber obtenido los datos que tenemos. Es una forma de ajustar el modelo lo mejor posible a la realidad, utilizando los datos disponibles (Zanakis & Kyparisis, 1986).

Función de Verosimilitud para Weibull

$$L(k, c) = \prod_{i=1}^N f(x_i; k; c) = \prod_{i=1}^N \frac{k}{c} \left(\frac{x_i}{c}\right)^{k-1} e^{-(x_i/c)^k}$$

Donde:

- $N$ : Número total de observaciones.
- $k$  y  $c$ : Parámetro de forma y escala.
- $x$ : Variable aleatoria representa los valores observados de la muestra.

Función de Log-Verosimilitud para Weibull

$$\ln L(k, c) = N \ln \frac{k}{c} + (k - 1) \sum_{i=1}^N \ln(x_i) - \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i}{c}\right)^k$$

Para encontrar los valores óptimos de  $k$  y  $c$  debemos maximizar la log-verosimilitud derivando respecto a  $k$  y  $c$  y resolviendo las ecuaciones resultantes.



Derivando respecto  $k$ :

$$\frac{\partial \ln L}{\partial k} = 0$$

Derivando respecto  $c$ :

$$\frac{\partial \ln L}{\partial c} = 0$$

Para resolver estas derivadas, que no tienen una solución exacta, es necesario utilizar métodos numéricos que se aproximan a la solución de forma iterativa. Entre estos métodos destacan el algoritmo de Newton-Raphson y la optimización por gradiente. Ambos trabajan calculando repetidamente la función y sus derivadas, lo que permite encontrar los valores de  $k$  y  $c$  que maximizan la probabilidad de que los datos observados sean correctos. Estos cálculos continúan hasta que se alcanza el valor óptimo, ofreciendo una solución precisa (Zanakis & Kyparisis, 1986).

En esta investigación no se realizará el cálculo manual para determinar los valores óptimos de los parámetros de forma y escala mediante la log-verosimilitud de Weibull y la resolución de ecuaciones parciales. En su lugar, se utilizará la librería de Python *scipy.optimize*, que permite realizar estos cálculos de manera automática.

### **2.2.22. Densidad de potencia eólica media anual**

El cálculo de la densidad de potencia eólica media anual por unidad de área viene determinado por la siguiente ecuación (Villarrubia, 2012).

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 p(v) dv$$

- $\rho$ : Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>).
- $v$ : Velocidad del viento en (m/s).
- $p(v)$ : Es la función de distribución de probabilidad de la velocidad del viento.

La ecuación se simplifica usando la distribución de Weibull, que describe cómo varían las velocidades del viento en una región, permitiendo estimar la energía eólica disponible en un lugar específico (Villarrubia, 2012).

$$\frac{\langle P_d \rangle}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \gamma \left( 1 + \frac{3}{k} \right)$$

- $\rho$ : Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>).
- $c$ : Es el parámetro de escala de la distribución de Weibull.
- $k$ : Es el parámetro de forma de la distribución de Weibull.
- $\gamma$ : La función gamma.

### 2.2.23. Densidad de potencia eólica disponible ( $P_d$ )

También se denomina potencia disponible por unidad de área de rotor, otros autores la denominan densidad de potencia del sitio. La densidad de potencia eólica disponible representa la cantidad máxima de energía que se podría obtener del viento en caso de poder capturar toda su energía cinética (Letcher, 2017; Villarrubia, 2012).

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3; w/m^2$$



Donde:

- $P_d$  : Densidad de potencia eólica disponible.
- $A$  : Área del rotor en metros cuadrados.
- $\rho$  : Densidad del aire kilogramos sobre metro cubico.
- $v$  : Velocidad del viento metros sobre segundo.

#### 2.2.24. Densidad de potencia eólica aprovechable ( $P_a$ )

La densidad de potencia eólica aprovechable es la cantidad teórica de energía por unidad de área que una turbina eólica puede capturar del viento.

$$\frac{P_a}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \cdot C_p; w/m^2$$

Donde:

- $P_a$  : Densidad de potencia eólica aprovechable.
- $A$  : Área del rotor en metros cuadrados.
- $\rho$  : Densidad del aire kilogramos sobre metro cubico.
- $v$  : Velocidad del viento metros sobre segundo.
- $C_p$  : Coeficiente de potencia del rotor es igual 0.59
  - El valor máximo teórico o límite de Betz del  $C_p$  es 0.59, pero el límite práctico es 0.5. Alcanzar un  $C_p$  por encima de 0.4 se considera bueno (Letcher, 2017).

##### 2.2.24.1. La densidad del aire en función de la humedad

La densidad del aire disminuye con el aumento de la altitud y con el aumento de la temperatura. En lugares más fríos o a menor altura sobre



el nivel del mar, la densidad del aire es mayor, lo que resulta en una mayor producción de energía para turbinas eólicas.

$$\rho = \frac{p_d}{R_d T} + \frac{p_v}{R_v T}$$

$$\rho = \left( \frac{p}{R_v T} \right) \left( 1 - \frac{0.378 p_v}{p} \right)$$

Donde:

- $\rho$ : Densidad del aire  $kg/m^3$ .
- $p$ : Presión atmosférica total en pascales.
- $p_d$ : Presión parcial del aire seco.
- $p_v$ : Presión parcial del vapor de agua.
- $R_d$ : Es la constante de gas para el aire seco, es igual a 287.05
- $R_v$ : Es la constante de gas para vapor de agua, es igual a 461.95
- La presión atmosférica total, viene dado por la siguiente ecuación.

$$p = p_d + p_v$$

- Mediante la siguiente ecuación se puede aproximar el valor de ( $p_v$ ).

$$p_v = RH * 610.78 * 10^{\frac{7.5T_c}{237.3+T_c}}$$

- $RH$ : Humedad relativa.
- $T_c$ : Temperatura en grados Celsius.

#### **2.2.24.2. Impacto en la energía eólica debido a la altura sobre el nivel del mar**

La densidad del aire se reduce con el aumento de la altitud sobre el nivel del mar. Por consiguiente, en las montañas del Himalaya, la densidad del aire es menor que a nivel del mar. Comparando con un sitio ventoso a nivel del mar con una temperatura media de 15°C (1.225 kg/m<sup>3</sup>), la densidad del aire será un 5% mayor a 0°C y un 5% menor a 30°C. Manteniendo constante la temperatura y variando la altitud, la densidad del aire será un 5% menor a 500 metros sobre el nivel del mar y un 10% menor a 1000 metros sobre el nivel del mar. Dado que la temperatura suele disminuir con la altitud, estos dos efectos tienden a compensarse mutuamente en cierta medida (Earnest & Rachel, 2019).

#### **2.2.25. Densidad de potencia eólica real ( $P_r$ )**

Representa la energía total obtenida del flujo de viento. En términos de generación de energía eléctrica, solo se puede convertir una cierta proporción de la energía cinética del viento (Letcher, 2017).

$$\frac{P_r}{A} = P_a \cdot C_p \cdot n_g; \quad w/m^2$$

- $P_a$ : Densidad de potencia eólica aprovechable.
- $n_g$ : Eficiencia global de un aerogenerador.

#### **2.2.25.1. Eficiencia global de un aerogenerador ( $n_g$ )**

La eficiencia global de un aerogenerador depende del diseño del rotor y de los diversos componentes del sistema. Esto incluye las palas del



rotor, el generador, y los sistemas de transmisión y control. La eficiencia global del aerogenerador es el resultado combinado de la eficiencia mecánica de sus componentes y la eficiencia eléctrica de la conversión de energía (Creus Solé, 2008).

$$n_g = n_m \cdot n_e$$

- Eficiencia mecánica

$$n_m = n_h \cdot n_{mu}$$

- $n_m$ : Eficiencia mecánica.
- $n_h$ : Eficiencia de la hélice, puede tomar un valor referencial de 0.85
- $n_{mu}$ : Eficiencia del multiplicador, puede tomar un valor referencial de 0.98

- Eficiencia eléctrica

$$n_e = n_a \cdot n_t$$

- $n_e$ : Eficiencia eléctrica.
- $n_a$ : Eficiencia del alternador, puede tomar un valor referencial de 0.95
- $n_t$ : Eficiencia del transformador, puede tomar un valor referencial de 0.98

## CAPÍTULO III

### MÉTODOS Y MATERIALES

#### 3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

El presente proyecto de investigación tiene como área de estudio y aplicación la ciudad de Puno, a orillas del lago Titicaca.

**Tabla 6**

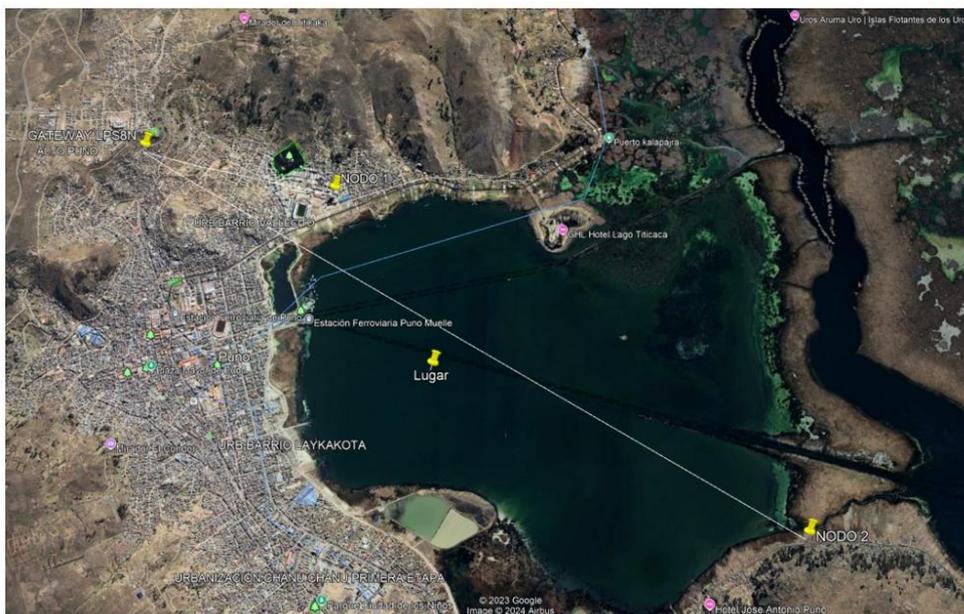
*Ubicación de los componentes del sistema de monitoreo IoT LoRaWAN*

	Este	Sur
Lugar	392517.00	8248475.00
Gateway	389691.25	8250495.73
Nodo 1	391503.00	8250158.00
Nodo 2	395889.00	8247055.00

Nota: Las coordenadas UTM listadas corresponden a las ubicaciones exactas del gateway y los nodos del sistema LoRaWAN diseñado para el monitoreo eólico en Puno, ubicadas en la zona 19L del sistema UTM, alrededor del lago Titicaca.

**Figura 22**

*Ubicación geográfica del Gateway LPS8N y nodos de la red LoRaWAN*



Nota: El Gateway y los nodos fueron ubicados estratégicamente para optimizar la cobertura, para la recopilación de datos en tiempo real.

### 3.1.1. Simulación del radio de cobertura del sistema de monitoreo IoT

#### LoRaWAN utilizando Radio Mobile

Para la simulación del radio de cobertura del sistema de monitoreo IoT LoRaWAN, es fundamental contar con datos precisos del Gateway y los nodos, como su ubicación geográfica (coordenadas UTM), potencia de transmisión, sensibilidad de recepción y características de las antenas. Utilizando la herramienta Radio Mobile, se evaluará la propagación de la señal y se determinará el radio efectivo de comunicación, optimizando así el rendimiento del sistema en la zona de estudio, localizada en Puno.

**Tabla 7**

*Parámetros técnicos del Gateway y nodos del sistema IoT LoRaWAN*

	<b>Gateway LPS8N DRAGINO</b>	<b>Nodo 1 (ESP32 + RAK3272S)</b>	<b>Nodo 2 (ESP32 + RAK3272S)</b>
Potencia de transmisión	27 dBm	20 dBm	20 dBm
Sensibilidad	-140 dBm	-140 dBm	-140 dBm
Ganancia de antena	3 dBi	2.0 dBi	2.0 dBi
Pérdidas (cable + conector)	1.0 dB	2.0 dB	2.0 dB
Altura	10	50	10

Nota: Los parámetros técnicos se obtuvieron de las especificaciones técnicas del fabricante.

#### 3.1.1.1. Perfil de elevación del Gateway a los nodos

Los perfiles de elevación son esencial para el diseño y la optimización de redes LoRaWAN, especialmente en áreas con variaciones topográficas significativas como Puno. Estos perfiles, obtenidos mediante Google Earth, proporcionan una visión crítica de las elevaciones entre el Gateway y los nodos, facilitando la identificación de las mejores rutas y ubicaciones para la instalación de infraestructura. Esta información es

crucial para asegurar una cobertura y comunicación eficiente dentro del sistema LoRaWAN, maximizando así la recepción y transmisión de datos entre los dispositivos conectados.

### Figura 23

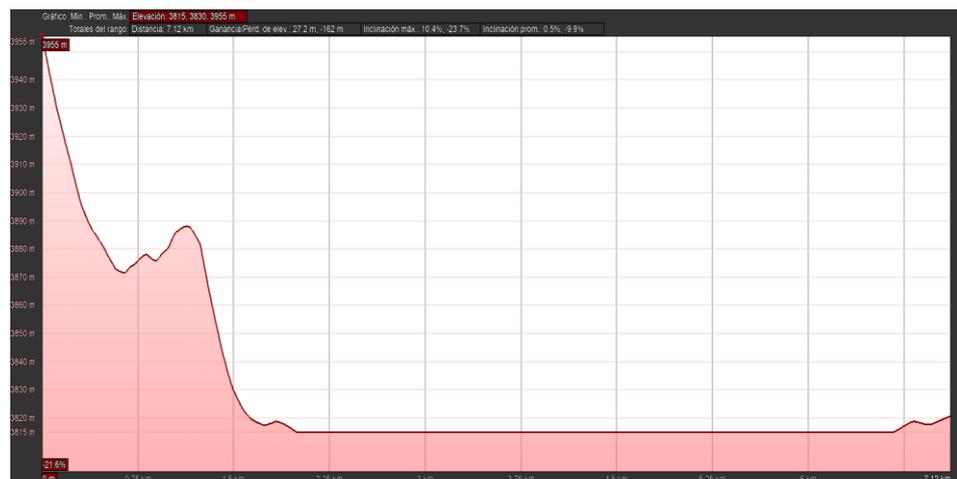
#### *Perfil de elevación del Gateway a Nodo 1 (Ruta 1)*



Nota: Tiene una distancia de 1.86 km, el Gateway está ubicado a una altura de 3955 msnm y el Nodo 1 a 3825 msnm, resultando en una variación de 130 metros entre ambos puntos.

### Figura 24

#### *Perfil de elevación del Gateway a Nodo 2 (Ruta 2)*



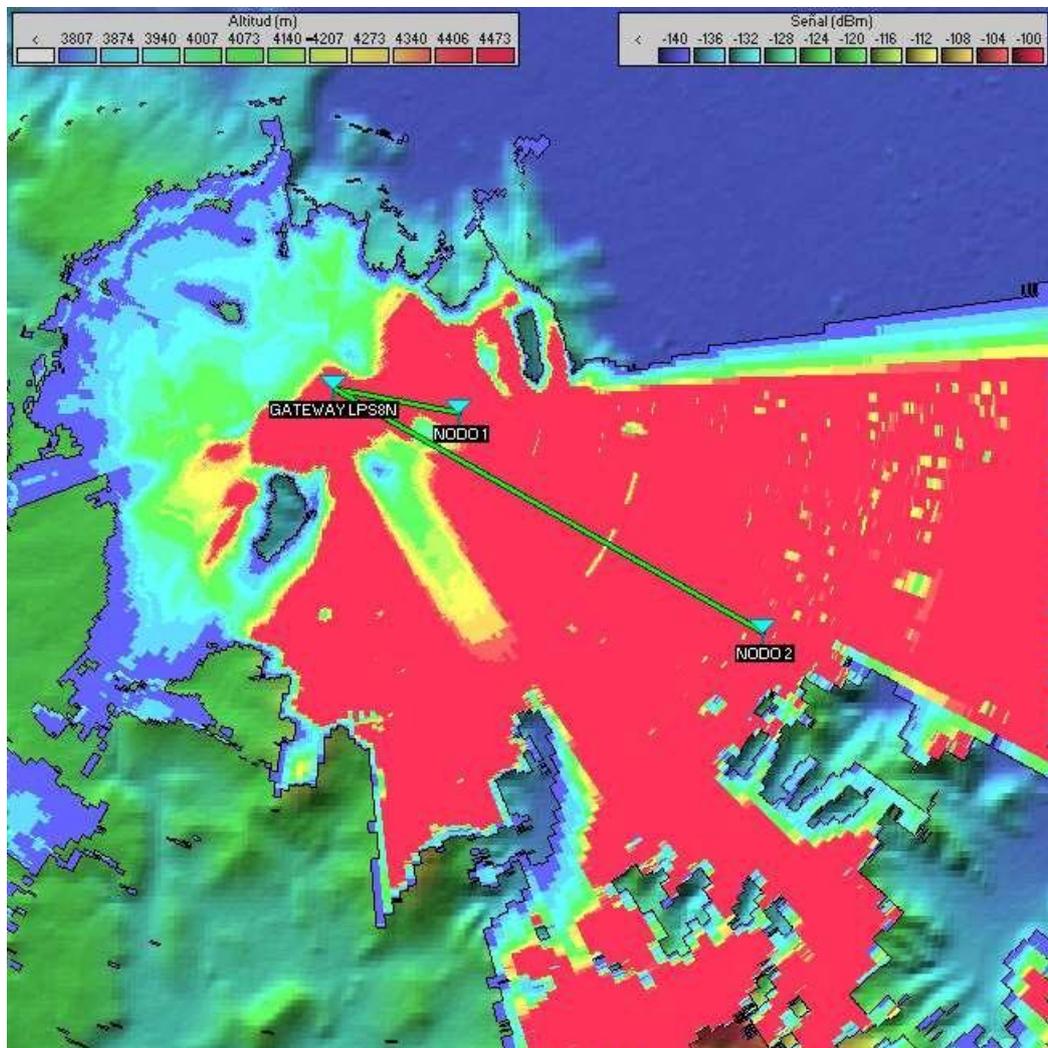
Nota: Tiene una distancia de 7.12 km, el Gateway está ubicado a una altura de 3955 msnm y el Nodo 1 a 3815 msnm, resultando en una variación de 140 metros entre ambos puntos.

### 3.1.2. Simulación de cobertura en Radio Mobile

Con los parámetros técnicos y el perfil de elevación entre el gateway y los nodos, se realiza una simulación para determinar el radio efectivo de comunicación inalámbrica utilizando el software Radio Mobile. Este software es una herramienta útil para la planificación y optimización de redes LoRaWAN.

**Figura 25**

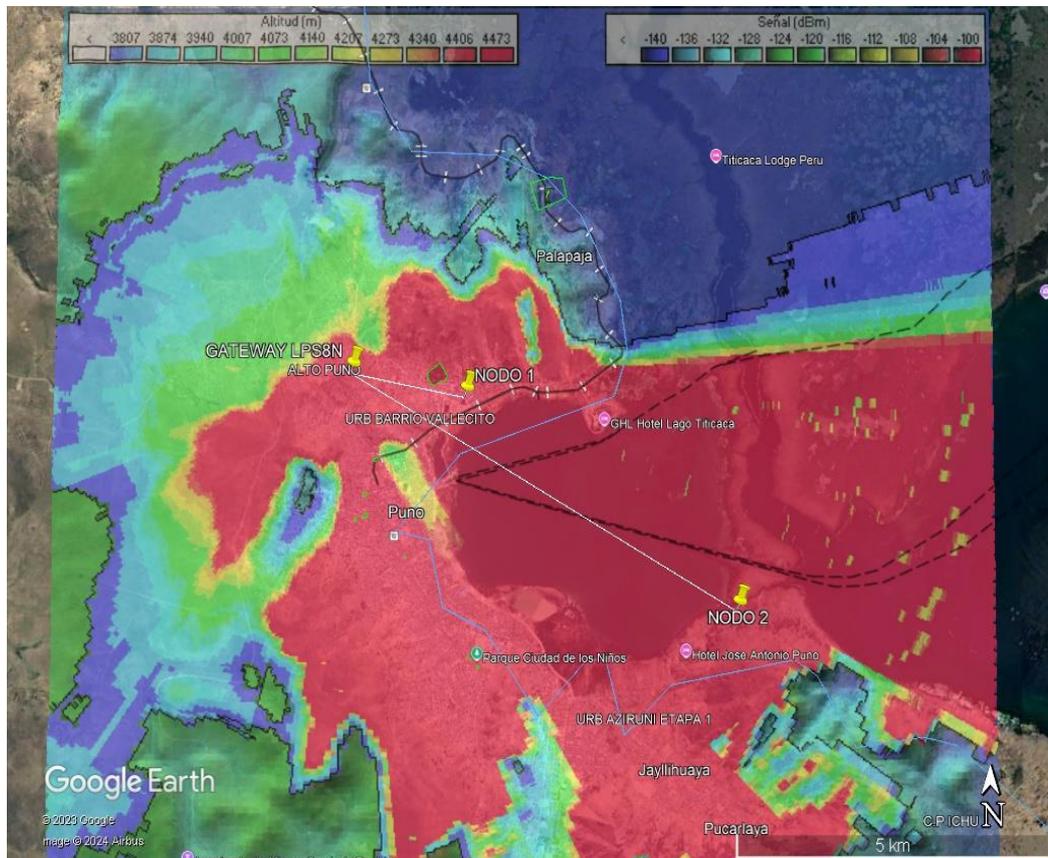
*Simulación de cobertura LoRaWAN en Radio Mobile*



Nota: Mapa de simulación de cobertura que muestra la distribución de la señal LoRaWAN desde el Gateway hasta los Nodos 1 y 2. Los colores en el mapa indican la intensidad de la señal: las áreas en rojo representan zonas de alta intensidad de señal, ideales para la ubicación de nodos adicionales.

**Figura 26**

*Integración de cobertura LoRaWAN en Google Earth*



Nota: Esta imagen presenta una integración de la simulación de cobertura de Radio Mobile con Google Earth, mostrando la distribución de la señal LoRaWAN desde el punto del Gateway en la ciudad de Puno. Las zonas en rojo indican una alta intensidad de señal, sugiriendo ubicaciones óptimas para instalar nodos adicionales. Este mapa facilita la visualización de la cobertura efectiva y las áreas clave para la expansión de la red LoRaWAN.

### 3.2. PERIODO DE DURACIÓN DEL ESTUDIO

El proyecto de investigación titulada, “Sistema de monitoreo en tiempo real de los parámetros del viento con IoT LoRaWAN en Puno para estimar el recurso eólico disponible”, tuvo un periodo de duración desde el 1 de septiembre hasta el 27 de octubre del 2024.



### 3.3. HARDWARE Y SOFTWARE

#### 3.3.1. Softwares

##### 3.3.1.1. The Things Network (TTN)

The Things Network (TTN) fue creado por Wienke Giezeman y Johan Stokking. Es una red global de Internet de las Cosas (IoT) de código abierto que utiliza la tecnología *LoRaWAN*. Permite la comunicación de dispositivos a largas distancias con bajo consumo de energía. TTN proporciona la infraestructura necesaria para conectar dispositivos IoT, Gateways y aplicaciones, fomentando un ecosistema colaborativo. Sus posibilidades incluyen aplicaciones en ciudades inteligentes, agricultura, monitoreo ambiental y más, permitiendo a los usuarios desplegar y gestionar sus propias redes LoRaWAN. La versión utilizada de TTN en este proyecto de investigación es la versión gratuita, The Things Stack Community Edition (V3) (*The Things Network*, s. f.).

##### 3.3.1.2. Ide Arduino

El IDE de Arduino es un entorno de desarrollo integrado creado por Massimo Banzi y David Cuartielles. Este entorno facilita la programación de placas Arduino, proporcionando una interfaz sencilla para escribir, compilar y cargar código. El IDE soporta el lenguaje de programación C/C++ y ofrece bibliotecas específicas para Arduino, ayudando a los desarrolladores a crear proyectos de manera eficiente. En este proyecto de investigación se usó la versión 2.3.2 del IDE de Arduino (Arduino, s.f.).

### 3.3.1.3. Thigspeak

ThingSpeak fue creado por MathWorks, una empresa conocida por desarrollar software de análisis y simulación como MATLAB y Simulink. MathWorks diseñó ThingSpeak para facilitar la recolección, visualización y análisis de datos IoT en tiempo real, utilizando herramientas y el lenguaje de programación MATLAB (The MathWorks, Inc., s.f.).

**Tabla 8**

*Planes que ofrece Thigspeak*

Plan	Mensajes Anuales	Canales	Características
Free	3 millones	4	Uso básico, ideal para pequeños proyectos y pruebas.
Standard	33 millones	10	Más almacenamiento y capacidad de procesamiento.
Academic	Similar al Standard	10	Descuentos para instituciones educativas.
Commercial	300 millones	Más canales	Características avanzadas y soporte técnico.

Nota: En este proyecto de investigación se usó el plan gratuito de Thingspeak, la cantidad máxima de datos almacenados por día serán a menor 8000 datos, en nuestro sistema de monitoreo.

### 3.3.1.4. Google Colab

Google Colab fue creado por Google Research. Es un entorno de desarrollo interactivo que permite a los usuarios escribir y ejecutar código Python en el navegador. Es especialmente útil para tareas de análisis de datos, aprendizaje automático y educación. Google Colab ofrece acceso gratuito a GPUs y TPUs, facilitando la ejecución de cálculos intensivos, y



permite la colaboración en tiempo real y la integración con Google Drive (Google, s.f.).

### **3.3.1.5. Gogle Earth**

Google Earth es una aplicación de cartografía y visualización geoespacial desarrollada por Google, originalmente creada por Keyhole, Inc., una empresa adquirida por Google en 2004. Permite a los usuarios explorar imágenes de satélite, mapas, terrenos y edificios en 3D de cualquier lugar del mundo. Ofrece funcionalidades avanzadas como la medición de distancias y áreas, recorridos guiados, y la integración de datos geoespaciales personalizados (Google, s.f.-b).

### **3.3.1.6. Radio Mobile**

Radio Mobile es un software de simulación y planificación de redes inalámbricas desarrollado por Roger Coudé. Este programa permite modelar la cobertura de radio y calcular enlaces de comunicación utilizando mapas digitales de elevación. Radio Mobile facilita el análisis de la propagación de señales y la optimización del rendimiento de redes de radio, Wi-Fi y enlaces de microondas, proporcionando una herramienta esencial para la planificación y desarrollo de sistemas de comunicación inalámbrica (Coudé, s.f.).

## **3.3.2. Hardwares**

### **3.3.2.1. Gateway Dragino LPS8N**

El LPS8N es un gateway LoRaWAN para interiores, de código abierto, que facilita la conexión de una red inalámbrica LoRa a una red IP



mediante WiFi, Ethernet o redes celulares 3G y 4G. La tecnología LoRa permite enviar datos a distancias muy largas, aunque a bajas tasas de transmisión. El LPS8N emplea el reenvío de paquetes de Semtech y una conexión de estación LoRaWAN, siendo completamente compatible con el protocolo LoRaWAN. Incorpora un concentrador LoRaWAN SX1302, que ofrece 10 rutas de demodulación programables en paralelo. Viene con bandas de frecuencia LoRaWAN estándar preconfiguradas para distintos países, aunque el usuario puede personalizarlas para su propia red LoRa. Además, el LPS8N puede comunicarse directamente con un nodo final ABP LoRaWAN sin la necesidad de un servidor LoRaWAN. Esto permite a los integradores de sistemas integrarlo en su servicio IoT sin configurar un servidor LoRaWAN propio o depender de servicios de terceros (Dragino Wiki, s.f.).

#### Especificaciones:

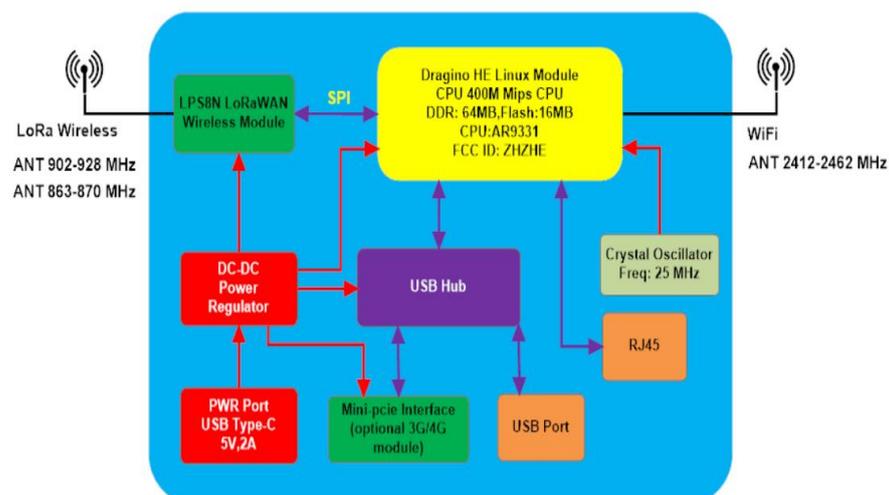
- Interfaz
  - Puertos RJ45 de 10 M/100 M x 1
  - Wi-Fi: 802.11 b/g/n
  - LoRaWAN inalámbrico
  - Entrada de energía: 5 V CC, 2 A, tipo C
  - Conector de host USB 2.0 x 1
  - Conector mini-PCI E x 1
  - SX1302 + 2xSX1250
- Especificaciones de LoRa
  - Sensibilidad de hasta -140 dBm

- Rechazo de interferencias CW de 70 dB con una desviación de 1 MHz
- Capaz de operar con SNR negativo, CCR hasta 9dB
- 8 detectores de paquetes LoRa de 8 canales, 8 demoduladores LoRa SF5-SF12, 8 demoduladores LoRa SF5-SF10, demodulador LoRa de 125/250/500 kHz y 1 demodulador (G)FSK
- Interfaces frontales de radio TX y RX digitales duales
- 10 rutas de demodulación paralelas programables
- Adaptación de velocidad de datos dinámica (ADR)
- Diversidad de antena real o funcionamiento simultáneo de doble banda

**Figura 27**

*Estructura del sistema de hardware del Gateway LPS8N*

LPS8N System Overview:



Nota. Adaptado de LPS8N - LoRaWAN Gateway User Manual, por Dragino Wiki, s.f., <https://wiki.dragino.com/xwiki/bin/view/Main/User%20Manual%20for%20All%20Gateway%20models/LPS8N%20-20LoRaWAN%20Gateway%20User%20Manual/#H5.4A0MQTTSettings>.

## Figura 28

### *Gateway LPS8N Dragino*



Nota. Adaptado de LPS8N - LoRaWAN Gateway User Manual, por Dragino Wiki, s.f., <https://wiki.dragino.com/xwiki/bin/view/Main/User%20Manual%20for%20All%20Gateway%20models/LPS8N%20-20LoRaWAN%20Gateway%20User%20Manual/#H5.4A0MQTTSettings>.

### 3.3.2.2. Esp32

El El ESP32, desarrollado por Espressif Systems, es un microcontrolador de alto rendimiento que combina Wi-Fi y Bluetooth en un solo chip, ideal para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), dispositivos móviles y electrónicos portátiles. Equipado con una CPU de 32 bits de doble núcleo, ofrece múltiples interfaces como UART, SPI, I2C y GPIO, y cuenta con avanzadas características de ahorro de energía. Además, es altamente resistente, operando en temperaturas desde  $-40^{\circ}\text{C}$  hasta  $125^{\circ}\text{C}$ , y su diseño incluye antenas integradas y amplificadores, optimizando el espacio en la placa de circuito impreso (PCB) (Espressif Systems, s.f.).

**Tabla 9**

*Especificaciones técnicas del Esp 32 Dev Module de 30 pines*

<b>Categorías</b>	<b>Elementos</b>	<b>Especificaciones</b>
Certificación	Certificación RF	Ver certificados para ESP32-WROOM-32D y ESP32-WROOM-32U
	Certificación Wi-Fi Certificación Bluetooth Certificación ecológica	Wi-Fi Alliance BQB REACH/RoHS
Pruebas	Confiabilidad	HTOL, HAST, TC, HTSL, UHAST, ESD
Wi-Fi	Protocolos	802.11 b/g/n (802.11n hasta 150 Mbps), A-MPDU y A-MSDU con agregación y soporte de intervalo de guarda de 0.4 $\mu$ s
	Rango de frecuencia central	2412 ~ 2484 MHz
Bluetooth	Protocolos	Bluetooth v4.2 BR/EDR y especificación Bluetooth LE
	Radio	Receptor NZIF con sensibilidad de -97 dBm, transmisor de clase 1, clase 2 y clase 3
	Audio	CVSD y SBC
Hardware	Interfaces de módulos	Tarjeta SD, UART, SPI, SDIO, I2C, LED, PWM de motor, PWM, I2S, IR, contador de pulsos, GPIO, sensor capacitivo de contacto, ADC, DAC, interfaz automotriz de dos cables (TWAI™), etc.
	Cristal integrado	Cristal de 40 MHz
	Flash SPI integrado	4 MB
	Voltaje/Alimentación	3.0 V ~ 3.6 V
	Corriente de operación	Promedio: 80 mA
	Corriente mínima	500 mA suministrados por la fuente de alimentación
	Temperatura de operación	-40 °C ~ +85 °C
Nivel de sensibilidad a la humedad (MSL)	Nivel 3	

Nota. Datos adaptados de *ESP32 Overview*, por Espressif Systems, s.f.,

<https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>.

### 3.3.2.3. Rak 3172

La placa de expansión RAK3272-SiP es una herramienta de evaluación diseñada para el módulo LPWAN RAK3172-SiP. Esta placa facilita el acceso a todos los pines del módulo SiP a través de seis filas de conectores de pines con un paso estándar de 2,54 mm, permitiendo evaluar las capacidades del módulo. El RAK3172-SiP, basado en el chip STM32WLE5, es un sistema transceptor de largo alcance y bajo consumo en un paquete compacto. Este módulo cumple con las especificaciones de clase A, B y C de LoRaWAN 1.0.3 y es compatible con diversas plataformas de servidores LoRaWAN como TheThingsNetwork (TTN), Chirpstack y Actility. Además, admite comunicación LoRa punto a punto (P2P), lo que permite la implementación rápida de redes LoRa personalizadas.

#### Figura 29

*Rak 3172*



Nota. Adaptado de *RAK3272-SiP Breakout Board Datasheet*, por RAKwireless, s.f., <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisDuo/RAK3272-SiP-Breakout-Board/Datasheet/#hardware>.

La configuración del módulo y su funcionamiento se pueden realizar mediante comandos AT a través de una interfaz UART. El



RAK3172-SiP también ofrece funciones de bajo consumo, adecuadas para aplicaciones alimentadas por batería, y es compatible con RUI3, permitiendo la creación de firmware personalizado utilizando las API de RUI3 (RAKwireless, s.f.).

- MCU Arm® Cortex®-M4 de 32 bits y 48 MHz y radio Semtech SX126x de sub-GHz
- Chipset STM32WLE5JC (de un solo núcleo)
- Dos variantes disponibles
  - RAK3272-SiP (usa RFO\_HP)
  - RAK3272LP-SiP (usa RFO\_LP)
- Puertos de E/S: UART/I2C/GPIO/SPI
- TXCO de 32 MHz y xtal de 32 kHz
- Compatible con API RUI3
- Firmware personalizado que utiliza Arduino a través de la API RUI3
- Conjunto de comandos AT fácil de usar a través de la interfaz UART
- Interfaz de depuración de cable serie (SWD)
- Compatible con la especificación LoRaWAN 1.0.3
- Bandas compatibles: IN865, EU868, AU915, US915, KR920, RU864 y AS923
- Tensión de alimentación: 1,8 V ~ 3,6 V
- Rango de temperatura: -40 °C ~ 85 °C
- Tamaño: 25,4 mm x 41,8 mm

#### 3.3.2.4. Anemómetro WH2081

Un anemómetro mide la velocidad del viento. Cuando el viento mueve las copas del anemómetro, se produce la rotación de un imán dentro del dispositivo, lo que activa un interruptor de láminas en cada rotación. Este proceso puede medirse en los pines 2 y 3 del conector RJ-11, usando un contador digital o pines de interrupción en un microcontrolador. Para convertir las mediciones en velocidad del viento, se utiliza la relación de 1,492 mph por cada cierre del interruptor por segundo, equivalente a 2,4 km/h en el sistema métrico (SparkFun Electronics, s.f.).

#### 3.3.2.5. Veleta de viento WH2081

La veleta de viento indica la dirección de donde proviene el viento. Aunque pueda parecer sencillo, su representación electrónica es compleja debido a que contiene dieciséis interruptores, cada uno con una resistencia única. Un imán interno activa estos interruptores y puede cerrar dos a la vez por su proximidad. Utilizando una resistencia externa de 10k ohms, se puede crear un divisor de tensión. Midiendo la salida de voltaje con un convertidor analógico a digital en un microcontrolador, se determina la dirección de la veleta.

**Tabla 10**

*Relación entre Dirección y Resistencia de la veleta WH2081*

Dirección (Grados)	Resistencia (ohm)
0°	33k
22.5°	6.57k
45°	8.2k
67.5°	891
90°	1k

Dirección (Grados)	Resistencia (ohm)
112.5°	688
135°	2.2k
157.5°	1.41k
180°	3.9k
202.5°	3.14k
225°	16k
247.5°	14.12k
270°	120k
292.5°	42.12k
315°	64.9k
337.5°	21.88k

Nota. Tabla adaptada de *SparkFun Weather Meter Kit Arduino Library*, por SparkFun, s.f., [https://github.com/sparkfun/SparkFun\\_Weather\\_Meter\\_Kit\\_Arduino\\_Library](https://github.com/sparkfun/SparkFun_Weather_Meter_Kit_Arduino_Library).

El voltaje de salida varía según el valor de la resistencia externa, por lo que no hay una función de conversión estándar. Se recomienda que el valor en 0 grados represente el norte para facilitar su uso. La veleta tiene indicadores de dirección en los cuatro lados, que deben estar correctamente orientados al instalar el dispositivo. La veleta "apunta" en la dirección desde donde sopla el viento (SparkFun Electronics, s.f.).

### 3.3.2.6. BME280

El BME280 es un sensor que mide la humedad relativa, la presión barométrica y la temperatura ambiente, ideal para aplicaciones móviles donde el tamaño y el bajo consumo de energía son cruciales.

#### Tabla 11

*Especificaciones técnicas del sensor BME 280*

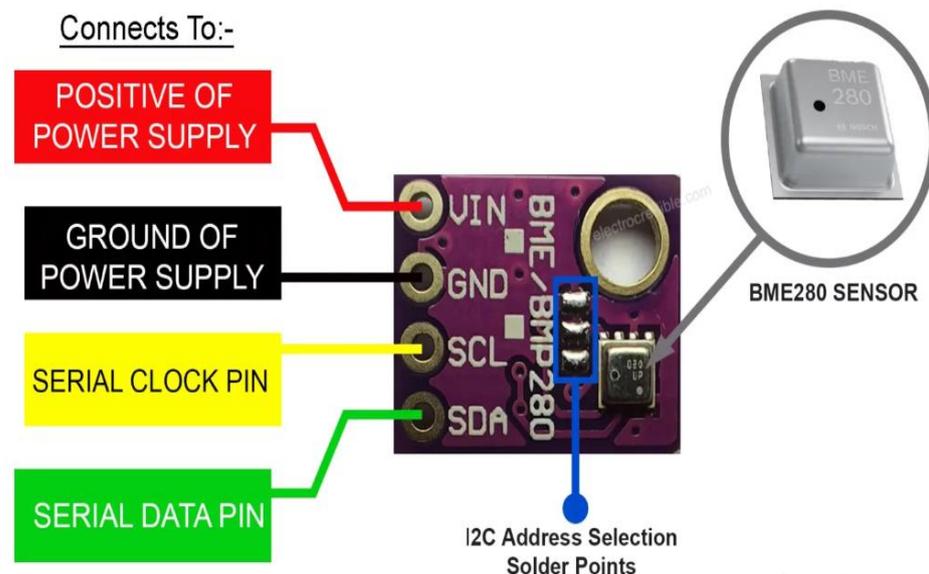
Parámetro	Datos técnicos
Rango de operación	Presión: 300 a 1100 hPa Temperatura: -4 a 85°C
Tensión de alimentación VDDIO	1,2 a 3,6 V
Tensión de alimentación VDD	1,71 a 3,6 V
Interfaz	I2C y SPI

Parámetro	Datos técnicos
Consumo de corriente promedio (típico) (frecuencia de actualización de datos de 1 Hz)	1,8 pA a 1 Hz (H, T) 2,8 mA a 1 Hz (P, T) 3,6 pA a 1 Hz (H, P, T) T = temperatura
Consumo medio de corriente en modo de suspensión	0,1 pA
Sensor de humedad	1 s
Tiempo de respuesta (t63%)	
Tolerancia de precisión	+3% humedad relativa
Histéresis	<2% humedad relativa
Error de sensibilidad al ruido RMS del sensor de presión	0,2 Pa (equivalente a 1,7 cm) ±0,25 % (equivalente a 1 m con un cambio de altura de 400 m)
Desplazamiento del coeficiente de temperatura	±1,5 Pa/K (equivalente a ±12,6 cm con un cambio de temperatura de 1 °C)
	Compatible con RoHS, libre de halógenos, MSL1
Dimensiones del paquete	LGA de 8 pines con metal 2,5 x 2,5 x 0,93 mm <sup>3</sup>

Nota. Datos adaptados de *Humidity Sensors BME280*, por Bosch Sensortec, s.f., <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/>.

**Figura 30**

*Conexiones y Configuración del Sensor BME280*



Nota. Adaptado de *Humidity Sensors BME280*, por Bosch Sensortec, s.f., <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/>.

Este sensor combina alta linealidad y precisión, y es adecuado para un consumo de corriente reducido, estabilidad a largo plazo y alta robustez EMC. Ofrece un tiempo de respuesta muy rápido, lo que lo hace ideal para aplicaciones emergentes que requieren conocimiento del contexto y alta precisión en un amplio rango de temperaturas (Bosch Sensortec, s.f.).

### 3.3.2.7. Power bank Xiaomi de 20000 mAh

- Capacidad de batería: 20000 mAh
- Accesorios: 2 puertos USB reversibles, entrada de carga Micro USB, 1 puerto de carga Quick Charge
- Dimensiones: Ancho de 69.6 mm y altura de 149.5 mm
- Conexiones: Micro USB (puerto de carga reversible) y 2 puertos USB reversibles
- Conexiones admitidas: Entrada de 5V 2A / 9V 2A; Salida de 5.1V 2.4A / 9V 2A / 12V 1.5A

### Figura 31

*Power bank Xiaomi de 20000 mAh*



Nota. Imagen adaptada de *Xiaomi Mi Redmi Power Bank 20000mAh Negro*, por Xiaomi Perú, s.f., <https://xiaomiperu.com/xiaomi-mi-redmi-power-bank-20000mah-negro>.

### 3.3.2.8. Controlador de carga

Este controlador de carga solar multifuncional permite cargar dos baterías de litio simultáneamente. Es compatible con baterías de 3,7 a 4,2 V (Aliexpress, s.f.).

- Carga con energía solar.
- Función de banco de energía.
- Protección contra sobrecarga y sobre corriente.
- Protección contra la carga inversa.
- Detención automática al completar la carga.

Es compatible con varias especificaciones de baterías de litio y está diseñado para asegurar la protección y eficiencia en la carga.

### Figura 32

#### *Controlador de carga*



Nota. Imagen adaptada de *Cargador de batería 18650 Solar Multifuncional*, por Aliexpress, s.f., <https://es.aliexpress.com/item/1005006577756362.html>.

### 3.3.2.9. Panel Solar Bossney BS3509 18W

El panel solar Bossney BS3509 de 18W ofrece alta eficiencia y fiabilidad gracias a sus celdas monocristalinas de silicio, proporcionando

una salida estable de voltaje y corriente. Fabricado con material plástico ABS y nivel de protección IP65, es resistente a la lluvia y humedad, ideal para exteriores. Su versatilidad permite cargar dispositivos como teléfonos, altavoces Bluetooth y baterías de 12 V. Es nuestro proyecto de investigación se encargará de cargar el Power Bank Xiaomi de 20000 mAh (BigShop Perú, s.f.).

### Figura 33

*Panel sola Bossney BS3509 de 18W*



Nota. Imagen adaptada de *Panel Solar Carga Directa Bossney 18W*, por BigShop Perú, s.f., <https://bigshop.pe/producto/panel-solar-carga-directa-bossney-18w/>.

## 3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO

### 3.4.1. Población

La población de estudio en este proyecto de investigación son todos los puntos geográficos de Puno donde se podría implementar un sistema de monitoreo

del viento utilizando tecnología IoT con LoRaWAN. Esto incluye cualquier zona de Puno que presente potencial eólico.

### **3.4.2. Muestra**

La muestra de estudio en este proyecto son los puntos específicos en donde se han instalado los nodos de monitoreo, para realizar las pruebas piloto. En este caso los dos nodos instalados en diferentes puntos de Puno constituyen la muestra representativa. Aunque la muestra es pequeña, cumple con el objetivo de validar la funcionalidad del sistema en condiciones reales, como la recolección de datos y la transmisión de información mediante la red LoRaWAN. Esta muestra permite evaluar la viabilidad del sistema antes de expandirlo a toda la población objetivo.

## **3.5. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN**

El enfoque cuantitativo de la investigación se define como un proceso sistemático y secuencial que se basa en la recolección de datos numéricos y el análisis estadístico para probar hipótesis y establecer patrones o relaciones entre variables (Hernández & Mendoza, 2014).

El enfoque la presente investigación es cuantitativa, ya que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos a través de la implementación de sensores y tecnología IoT (LoRaWAN) para medir las variables del viento en tiempo real. Este enfoque permite evaluar el recurso eólico de manera precisa, proporcionando información objetiva y fiable para estimar el potencial eólico en diferentes puntos de interés.



### **3.6. TIPO INVESTIGACIÓN**

La investigación aplicada se define como aquella que busca resolver problemas específicos de la realidad utilizando conocimientos teóricos y tecnológicos para desarrollar soluciones prácticas que mejoren una situación concreta (OCDE, 2018).

En este contexto, el tipo de investigación de este proyecto es aplicada, ya que se implementará un sistema de monitoreo eólico empleando tecnología IoT con LoRaWAN, con el objetivo de recopilar y analizar datos en tiempo real para evaluar el potencial eólico en puntos de interés específicos, mejorando así la precisión de las estimaciones y apoyando la toma de decisiones para el desarrollo de energías renovables en la región.

### **3.7. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

Un diseño cuasiexperimental se define como un plan de investigación en el cual se manipula al menos una variable independiente para observar su efecto en variables dependientes, pero sin la asignación aleatoria de los sujetos a los grupos (Hernández & Mendoza, 2014).

En este contexto, el diseño cuasiexperimental de este proyecto se debe a que los puntos de monitoreo eólico ya están predefinidos según características geográficas y climáticas que no pueden ser alteradas, y los grupos no se asignan de manera aleatoria. La implementación del sistema IoT con LoRaWAN se realiza en lugares específicos para observar el impacto en la recolección de datos en tiempo real.

### **3.8. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN**

Los estudios exploratorios se realizan para investigar fenómenos nuevos o poco estudiados sobre los que se tiene poca información, con el objetivo de obtener un



panorama general y descubrir aspectos claves que no se han abordado antes (Hernández & Mendoza, 2014).

Los estudios descriptivos buscan detallar las características, propiedades y perfiles de personas, grupos, o fenómenos mediante la recolección y presentación de datos específicos. Se enfocan en medir y describir variables para representar el fenómeno estudiado de manera precisa y sistemática (Hernández & Mendoza, 2014)

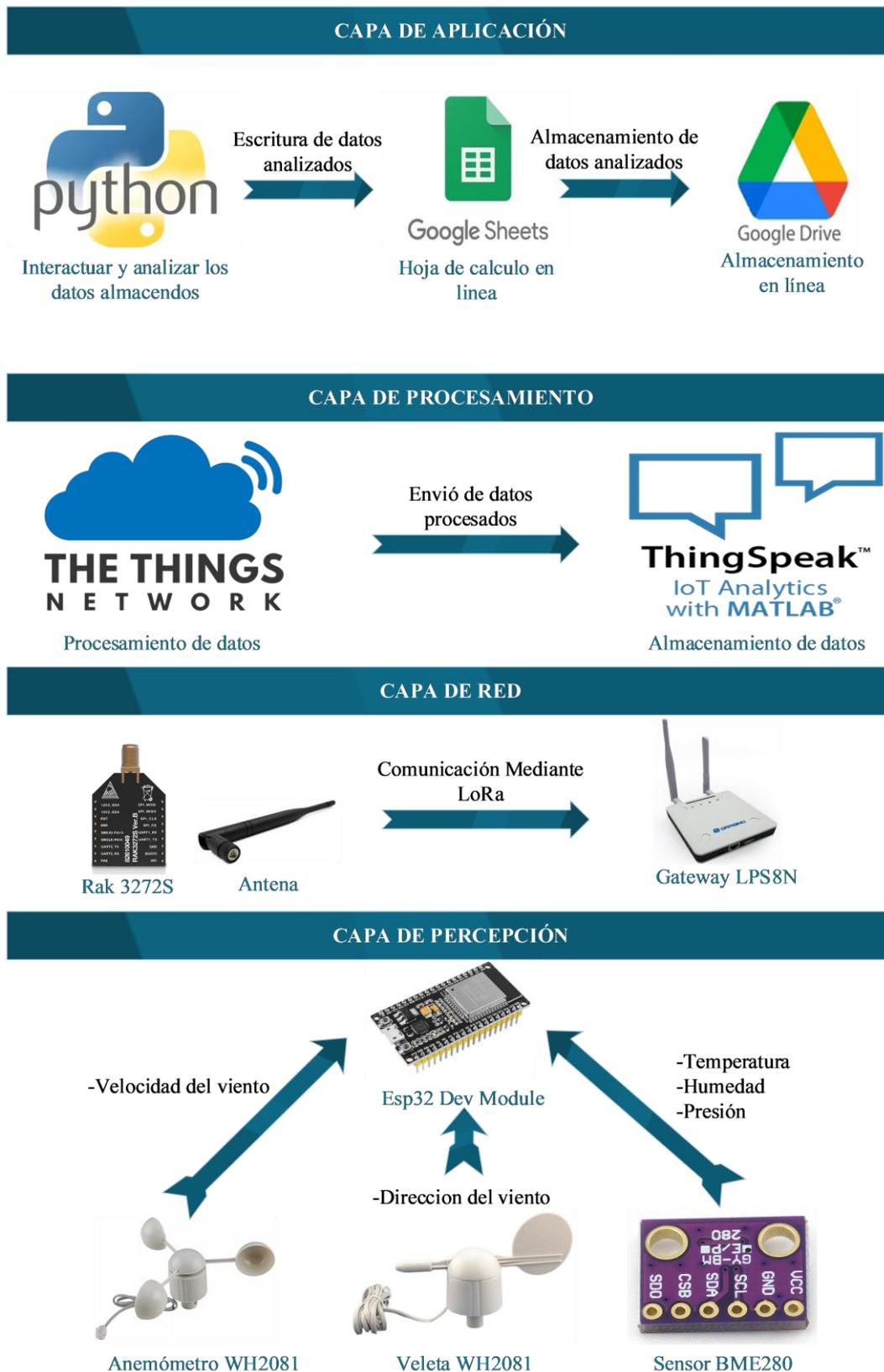
En el presente proyecto, el nivel de la investigación es exploratoria porque busca examinar un fenómeno poco estudiado en la región de Puno, como la evaluación del recurso eólico en puntos específicos utilizando tecnología IoT con LoRaWAN. Se exploran nuevas posibilidades y características del viento en zonas con posible potencial eólico, de las cuales se tiene poca información previa. Al mismo tiempo, es descriptiva porque pretende medir y especificar las características de las variables meteorológicas como son la velocidad, dirección, temperatura, humedad y presión atmosférica del viento. A través de la recolección y análisis de estos datos, se busca describir y caracterizar el recurso eólico en los puntos de interés, proporcionando un perfil detallado de cada zona monitoreada.

### **3.9. PROCEDIMIENTO**

En este sistema de monitoreo de IoT con LoRaWAN se organiza en una arquitectura de cuatro capas: percepción, red, procesamiento y aplicación, cada una con una función específica en el monitoreo eólico. A continuación, se detallará el procedimiento implementado en cada capa, abarcando desde la adquisición y transmisión de datos hasta su procesamiento y análisis para estimar el potencial eólico en Puno.

**Figura 34**

*Arquitectura IoT del sistema de monitoreo eólico*



Nota: En esta arquitectura se considera cuatro capas que describen el sistema de monitoreo eólico.



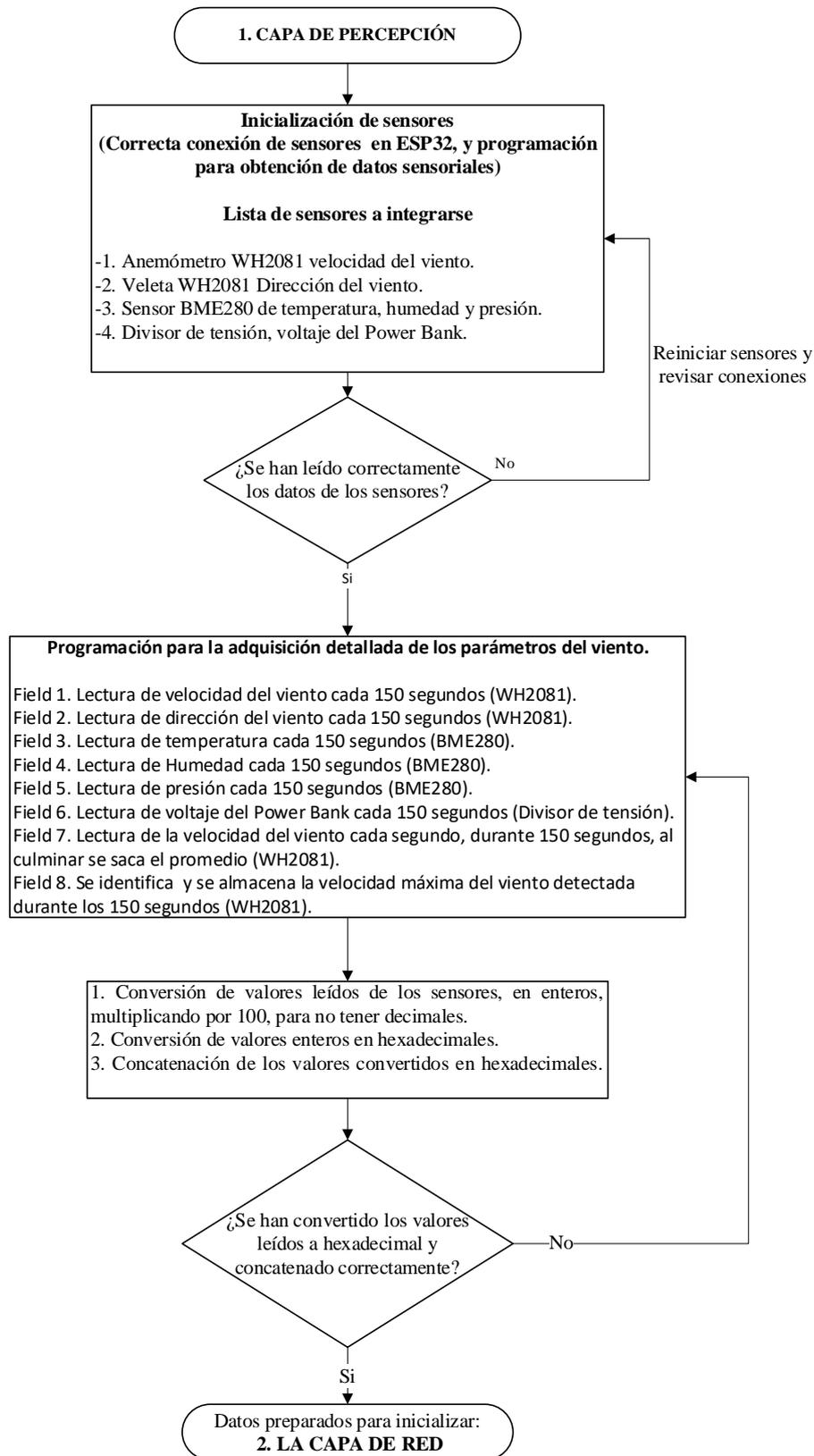
La Capa de Percepción se encarga de la recopilación de datos del entorno a través de diversos sensores, que capturan información relevante para el sistema. La Capa de Red facilita la transmisión de estos datos utilizando tecnologías de comunicación inalámbrica, permitiendo que la información viaje desde el dispositivo hasta una infraestructura central. En la Capa de Procesamiento, los datos son recibidos, almacenados y organizados en plataformas que permiten su análisis y visualización. Finalmente, la Capa de Aplicación brinda una interfaz para que los usuarios puedan acceder a los datos procesados, realizar análisis avanzados y visualizar los resultados de forma clara y accesible.

### **3.9.1. Capa de percepción**

En la capa de percepción se capta los datos del entorno de monitoreo a través de sensores que miden variables meteorológicas clave, como velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad y presión atmosférica. Todos los sensores están integrados en el microcontrolador ESP32, que centraliza los datos recopilados para su posterior transmisión.

**Figura 35**

*Diagrama de flujo de la capa de percepción*



Nota: Este diagrama de flujo detalla cómo se programa la capa de percepción del sistema de monitoreo, ver el código de programación en el ANEXO 1.



Este diagrama de flujo describe detalladamente el proceso de inicialización y adquisición de datos en la capa de percepción para el sistema de monitoreo del viento. Muestra cómo los sensores son configurados, los datos son leídos y procesados, incluyendo la conversión a formatos adecuados para la transmisión. El diagrama de flujo enfatiza los pasos críticos en la recolección y preparación de datos antes de ser enviados a la capa de red.

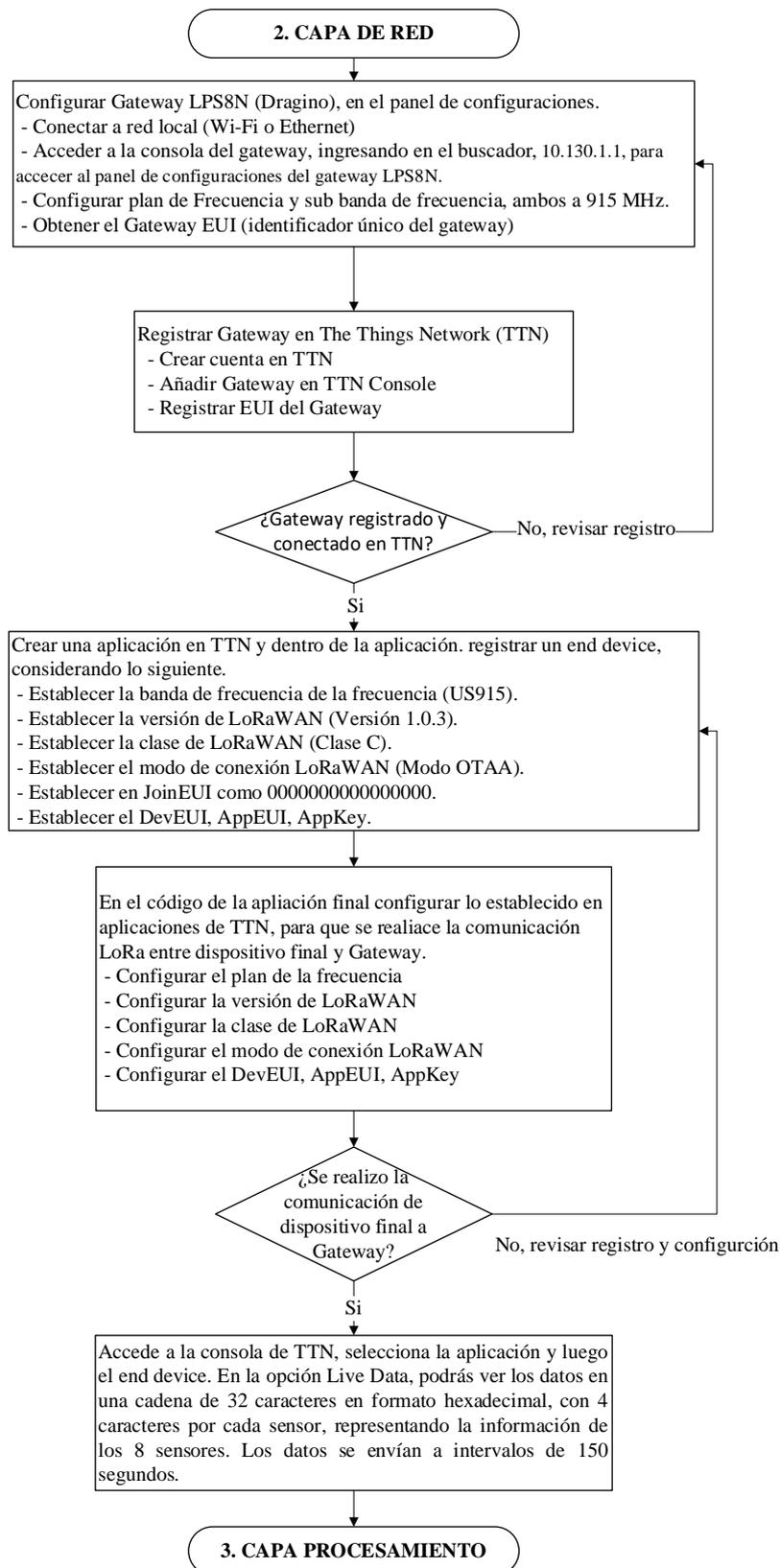
### **3.9.1.1. Componentes y esquema de conexión de la capa de percepción**

- Sensores:
  - Anemómetro WH2081: Mide la velocidad del viento.
  - Veleta WH2081: Mide la dirección del viento.
  - Sensor BME280: Mide temperatura, humedad y presión atmosférica mediante I2C.
  - Divisor de Tensión: Monitorea el voltaje de la batería.
- Microcontrolador ESP32: Recoge y organiza los datos de los sensores para su transmisión.
- Fuente de energía: El Power Bank es recargado por el panel solar, garantiza el funcionamiento continuo del sistema.



**Figura 37**

*Diagrama de flujo de la capa de percepción*



Nota: Este diagrama de flujo detalla cómo se programa la capa de red del sistema de monitoreo.

### 3.9.2.1. Componentes y esquema de conexión de la capa de red

- Componentes de la capa de red
  - ESP32: Actúa como intermediario entre los sensores y el módulo LoRa. Recibe los datos de la Capa de Percepción y los transmite al RAK3172 mediante comunicación serial.
  - Módulo LoRa RAK3172: Es el encargado de transmitir los datos recopilados por los sensores en la capa de percepción al Gateway LPS8N, utilizando la modulación LoRa.
  - Gateway LoRa (Dragino LPS8N): Recibe las señales LoRa del RAK3172 y las retransmite a la red mediante Ethernet o WiFi, conectando los datos a la The Things Network (TTN) para su análisis.

#### Figura 38

*Esquema de conexión para la transmisión de datos entre el módulo RAK3172 y el Gateway Dragino LPS8N*



Nota: La imagen muestra el módulo RAK3172 y el gateway Dragino LPS8N, utilizados para la transmisión de datos de manera inalámbrica mediante LoRa, sin necesidad de interconexión física.



### 3.9.2.2. Configuración del Gateway

Para la integración del Gateway LPS8N en una red LoRaWAN se requiere una configuración previa.

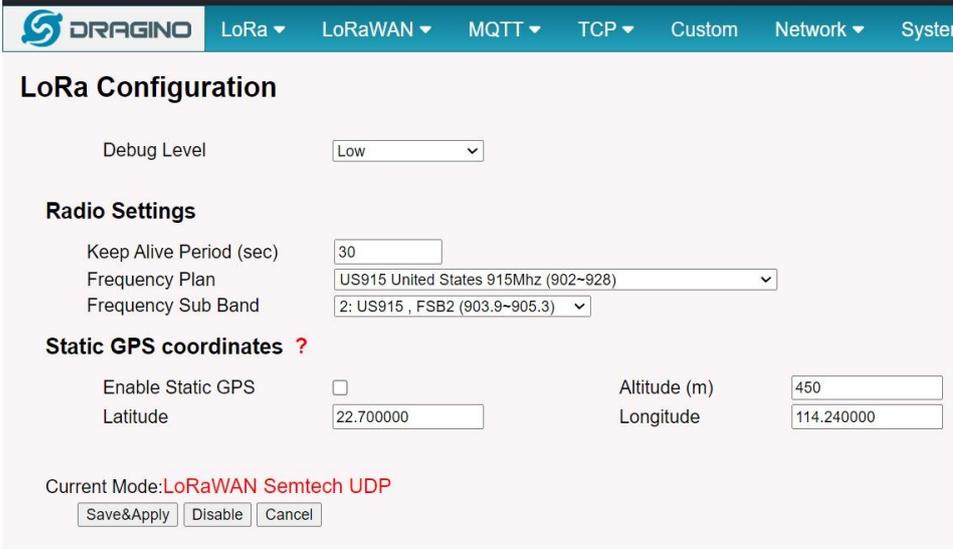
El Gateway LPS8N viene con el WiFi activado por defecto, con el nombre dragino-250854 y la contraseña predeterminada es: dragino+dragino. Para configurarlo, primero conecta ordenador a esta red WiFi. Luego, abre un navegador y escribe la dirección 10.130.1.1 en la barra de búsqueda para acceder al panel de configuración. Una vez dentro del panel, se realiza las configuraciones:

- Configuración LoRa
  - Configurar Frequency Plan: Selecciona, US915 United States 915 MHz (902-928 MHz).
  - Configurar Frequency Sub Band: Selecciona, 2: US915, FSB2 (903.9-905.3 MHz).
  - Configurar la ubicación del Gateway: Inserta las coordenadas UTM de la ubicación del gateway (opcional). Esta configuración no afecta el funcionamiento del dispositivo.
  - Configura el Keep Alive Period en 30 segundos para que el gateway envíe una señal de confirmación a la red cada 30 segundos, indicando que está activo y funcionando correctamente. Este monitoreo constante asegura una conexión estable sin generar tráfico innecesario.

- Luego de realizar esas configuraciones de debe de seleccionar **Save&Apply** , para que se guarde las configuraciones realizadas.

**Figura 39**

*Configuración de LoRa en el Gateway LPS8N*



**DRAGINO** LoRa ▾ LoRaWAN ▾ MQTT ▾ TCP ▾ Custom Network ▾ System

### LoRa Configuration

Debug Level:

**Radio Settings**

Keep Alive Period (sec):

Frequency Plan:

Frequency Sub Band:

**Static GPS coordinates ?**

Enable Static GPS:

Latitude:

Longitude:

Altitude (m):

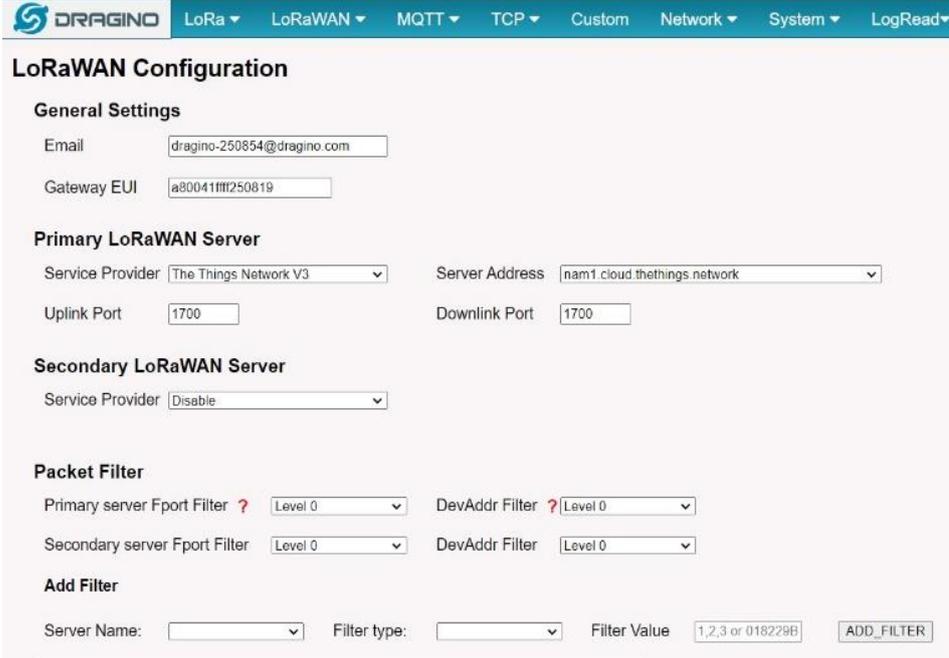
Current Mode: **LoRaWAN Semtech UDP**

Nota: En esta imagen se muestra como debe quedar el panel de configuraciones de LoRa en el Gateway LPS8N.

- Configuración LoRaWAN,
  - Configurar Service Provider: Seleccione, The Things Network V3, se selecciona esa opción porque se va trabajar con The Things Network.
  - Configurar Server Address: Seleccione, `nam1.cloud.thethings.network`, se selecciona de acuerdo a la región de operación.

**Figura 40**

*Configuración de LoRaWAN en el Gateway LPS8N*



Nota: La imagen se muestra como debe quedar configurado LoRaWAN en el panel de las configuraciones del Gateway LPS8N.

### 3.9.2.3. Registro del Gateway en The Things Network

- Crea una cuenta en TTN usando el correo de Gmail.
- En la Consola de TTN, selecciona Europa como región de operación.
- En The Things Network busca la opción "Añadir Gateway", para el registro primero se debe copiar el Gateway EUI del panel de configuración de LoRaWAN del Gateway LPS8N y pégalo en el campo de Gateway EUI en el campo de registro de gateway.
- En Gateway ID y Gateway Name, ingresa un nombre único en este proyecto de investigación se consideró el nombre de gatewaylps8n.

- En Frequency Plan, selecciona United States 902-928 MHz, FSB 2 (used by TTN).
- Finalmente, selecciona "Registrar Gateway".
- Si se ah realizado correctamente el registro en STATUS del Gateway en The Things Network, debe aparecer como Connected.

## Figura 41

### Registro del Gateway en The Things Network

THE THINGS STACK  
SANDBOX

Home Applications Gateways

Search Ctrl K

Top gateways +  
gateway/ps8n

Gateways > Register gateway

Gateway EUI  Reset

Gateway ID

Gateway name

Frequency plan

Note: most gateways use a single frequency plan. Some 16 and 64 channel gateways however allow setting multiple within the same band.

Require authenticated connection  
Choose this option eg. if your gateway is powered by [LoRa Basic Station](#)

Share gateway information  
Select which information can be seen by other network participants, including [Packet Broker](#)

Share status within network

Share location within network

Resources eu1 • v3.32.1.1a4g4b2ab4

Nota: Esta imagen se visualiza como debe de quedar los campos a llenar en el registro de Gateway, se debe tener cuidado con el Gateway EUI y plan de frecuencia ya que son cruciales para el correcto registro y funcionamiento del Gateway en The Things Network.

**Figura 42**

*Descripción general del estado del Gateway y sus componentes*



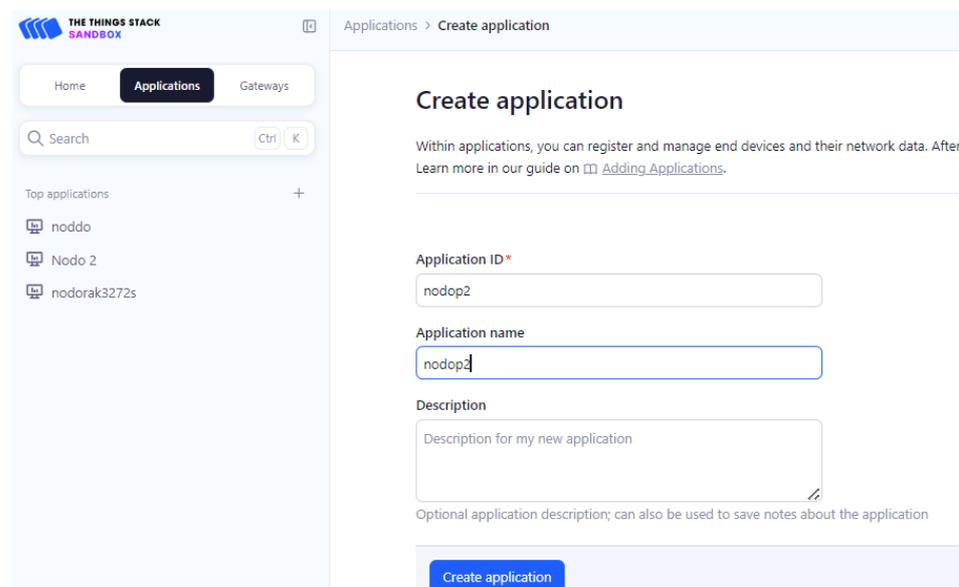
Nota: Esta imagen muestra el estado de WiFi, LoRaWAN y LoRa. Un check verde indica que están funcionando correctamente, mientras que un check rojo lo contrario.

### 3.9.2.4. Creación de una aplicación en The Things Network

En los campos Application ID y Application Name, es recomendable usar el mismo nombre para simplificar.

**Figura 43**

*Creación de una aplicación en The Things Network*





Nota: Esta imagen muestra un ejemplo de como se debe de llenar los campos para la creación de una aplicación en The Things Network.

Para nuestro proyecto, asignamos nodd0 para el primer nodo y Nodo 2 para el segundo, con el fin de evitar posibles confusiones.

### **3.9.2.5. Registro de End Device en la aplicación de The Things**

#### **Network**

Luego de crear la aplicación en The Things Network, se debe registrar dentro de esta aplicación un End Device o dispositivo final. Para el registro del End Device se debe tener en cuenta lo siguiente.

- Selecciona "Enter end devices specifics manually" para registrar manualmente el end device.
- En Frequency Plan, elige United States 902-928 MHz, FSB 2 (used by TTN).
- En LoRaWAN Version, selecciona LoRaWAN Specification 1.0.3.
- En Regional Parameters Version, selecciona RP001 Regional Parameters 1.0.3 revision A. Eso va depender de la compatibilidad del nodo a registrar.
- Para el Modo de Activación, elige OTAA, que es el utilizado en este proyecto. Activa esta opción seleccionando "Show Advanced Activation, LoRaWAN Class and Cluster Setting".
- En LoRaWAN Class for Multicast Downlinks, selecciona Class C (Continuous), ya que permite la escucha constante y la



comunicación bidireccional, siendo compatible con nodos de clase A, B y C.

- En JoinEUI, ingresa 0000000000000000, ya que no se está utilizando un servidor de unión. JoinEUI y AppEUI son términos equivalentes y se pueden usar de manera intercambiable, dependiendo de la capa en la que se apliquen, dado que ambos representan el mismo concepto.
- En DevEUI, selecciona Generate para que se genere automáticamente. Si ya tienes una clave asignada al nodo, cópiala y pégala en este campo. Ten en cuenta que esta clave solo se puede usar una vez; si intentas registrarla nuevamente, aparecerá como existente y no podrás hacerlo.
- En AppKey, selecciona Generate para generar la clave automáticamente. Esta clave permitirá que el nodo se conecte a la aplicación y luego al dispositivo en The Things Network.
- En End Device ID, ingresa el nombre que prefieras, y luego selecciona Register End Device para completar el registro del dispositivo.

**Figura 44**

*Registro de end device en la aplicación creada en The Things Network*

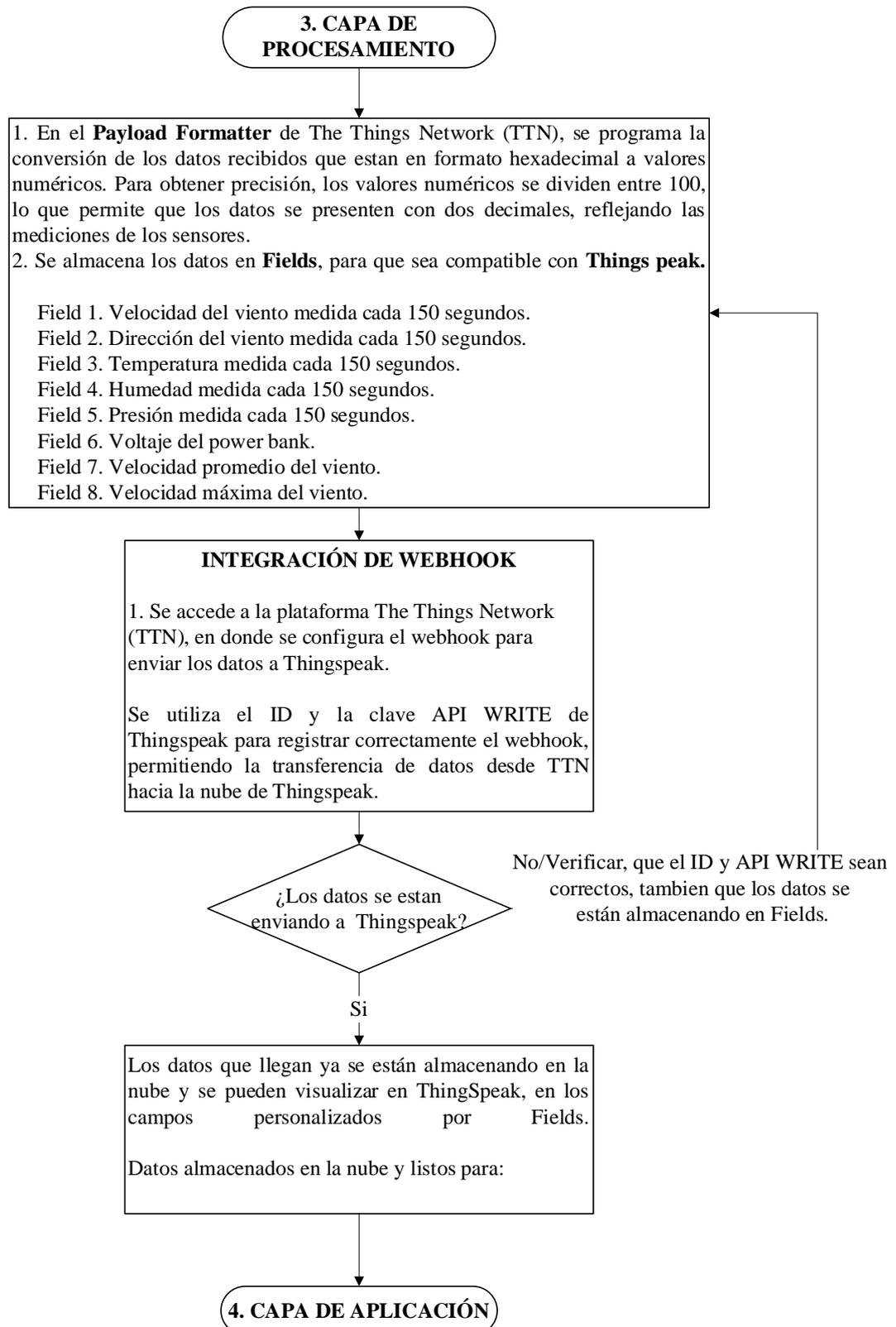
Nota: Esta imagen muestra un ejemplo de cómo se debe de llenar los campos para el registro de end device en la aplicación creada de The Things Network.

### 3.9.3. Capa de procesamiento

El nodo envía los datos leídos de los sensores al gateway, que los recibe. En la Capa de Procesamiento, estos datos se reciben en formato hexadecimal y son convertidos a valores decimales mediante el Payload Formatters, donde también se separan por sensor. Luego, los datos se asignan a los campos correspondientes: field1 para la velocidad instantánea del viento, field2 para la dirección instantánea del viento, field3 para la temperatura, field4 para la humedad, field5 para la presión, field6 para el voltaje del Power Bank, field7 para la velocidad promedio del viento, y field8 para la velocidad máxima detectada.

**Figura 45**

*Diagrama de flujo de la capa de procesamiento*



Nota: Este diagrama de flujo detalla cómo se programa la capa de procesamiento del sistema de monitoreo.



Finalmente, estos datos son enviados a ThingSpeak para su visualización y análisis en tiempo real.

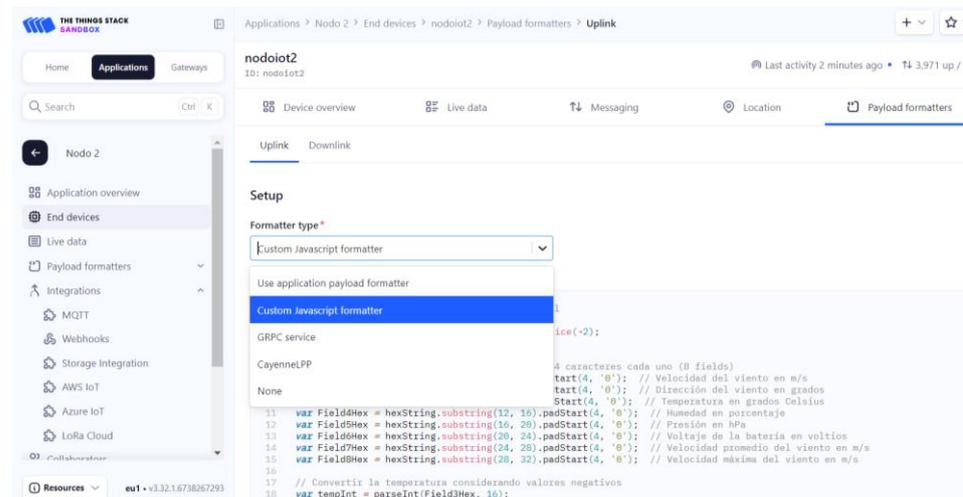
### 3.9.3.1. Payload Formatters

Al ingresar al end device en The Things Network, hay una opción llamada Payload Formatters, donde es necesario configurar y programar la decodificación de los datos que llegan desde el nodo al gateway. Esta decodificación convierte los datos recibidos en formato hexadecimal a valores numéricos que representan los datos leídos por los sensores, facilitando su interpretación y posterior uso.

- En la sección Uplink, en Formatter Type, selecciona Custom Javascript Formatter. Esto abrirá un apartado donde se programa el Payload Formatter para decodificar los datos recibidos del nodo. En este apartado se escribió el código en JavaScript para transformar los datos en formato hexadecimal a valores numéricos que correspondan a los sensores.
- Después de programar el Payload Formatter en formato JavaScript, se debe seleccionar la opción Test decoder para validar funcionamiento. Si la validación es exitosa, se deben guardar los cambios.

**Figura 46**

*Configuración y programación del Payload Formatters*

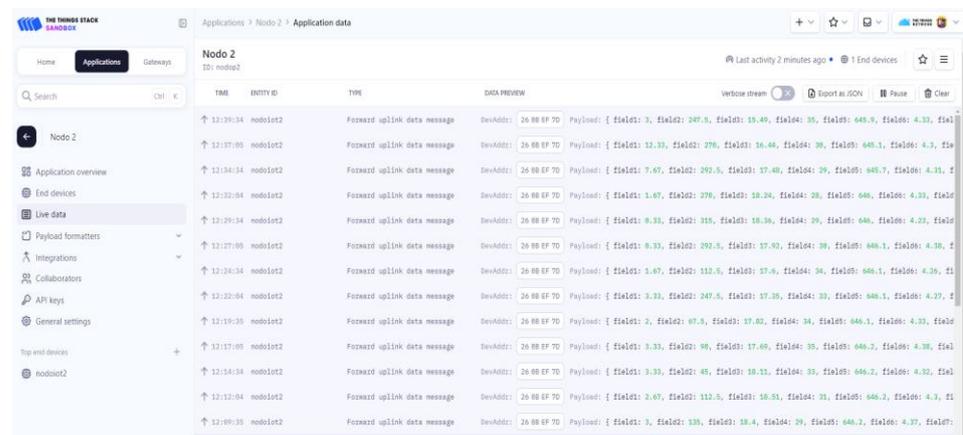


Nota: Esta imagen muestra la configuración del Payload Formatter. El código de programación encargado de la decodificación de los valores de los sensores está disponible en el ANEXO 2.

Si se han realizado correctamente los pasos anteriores, en la sección Live Data se mostrarán los datos de la siguiente forma, donde aparecerán los valores decodificados y separados por los fields correspondientes, representando los valores leídos por los sensores.

**Figura 47**

*Visualización Correcta de Datos Decodificados en Live Data de The Things Network*



Nota: La imagen muestra los datos decodificados en Live Data de The Things Network, con los valores de los sensores organizados por cada campo correspondiente.

### 3.9.3.2. Integración de ThingSpeak con The Things Network mediante Webhooks para el almacenamiento de datos

La integración entre ThingSpeak y The Things Network se realiza mediante webhooks que utilizan el protocolo HTTP, lo que permite transferir automáticamente datos entre ambas plataformas. Para ello, se requieren algunos pasos previos:

Se debe crear una cuenta en ThingSpeak utilizando un correo de Gmail. Una vez dentro del entorno de ThingSpeak, seleccionar la opción "New Channel" para asignar un nombre al canal y personalizarlo. Luego, habilite los 8 campos (fields) que representarán los valores obtenidos de los sensores en la capa de percepción, los cuales serán enviados desde The Things Network. Finalmente, guarde la configuración del canal.

#### Figura 48

#### *Creación y personalización del Channels en ThingSpeak*

Channel Settings

Percentage Complete 30%

Channel ID 2659635

Name NODO2

Description

Field 1 VELOCIDAD DE VIENTO E

Field 2 DIRECCIÓN EN TIEMPO I

Field 3 TEMPERATURA EN TIEM

Field 4 HUMEDAD EN TIEMPO R

Field 5 PRESIÓN EN TIEMPO RE

Field 6 BATERÍA

Field 7 VELOCIDAD PROMEDIO I

Field 8 VELOCIDAD MÁXIMA EN

Help

Channels store all the data that a ThingSpeak application collects. Each channel includes eight fields that can hold any type of data, plus three fields for location data and one for status data. Once you collect data in a channel, you can use ThingSpeak apps to analyze and visualize it.

Channel Settings

- **Percentage complete:** Calculated based on data entered into the various fields of a channel. Enter the name, description, location, URL, video, and tags to complete your channel.
- **Channel Name:** Enter a unique name for the ThingSpeak channel.
- **Description:** Enter a description of the ThingSpeak channel.
- **Field:** Check the box to enable the field, and enter a field name. Each ThingSpeak channel can have up to 8 fields.
- **Metadata:** Enter information about channel data, including JSON, XML, or CSV data.
- **Tags:** Enter keywords that identify the channel. Separate tags with commas.
- **Link to External Site:** If you have a website that contains information about your ThingSpeak channel, specify the URL.
- **Show Channel Location:**
  - **Latitude:** Specify the latitude position in decimal degrees. For example, the latitude of the city of London is 51.5072.
  - **Longitude:** Specify the longitude position in decimal degrees. For example, the longitude of the city of London is -0.1275.
  - **Elevation:** Specify the elevation position meters. For example, the elevation of the city of London is 35.052.

Nota: La figura muestra la creación del canal y la personalización de los fields en ThingSpeak.

Con el canal ya creado en ThingSpeak, se debe obtener el *Channel ID*, que identifica el canal de forma única, y el *Write API Key*, que autoriza la recepción de datos desde The Things Network mediante webhooks, usando el protocolo HTTP para la comunicación entre ambos servidores.

## Figura 49

### Obtención del Channel ID y Write API Key en ThingSpeak

The screenshot displays the ThingSpeak user interface for managing API keys. At the top, the navigation bar includes 'Channels', 'Apps', 'Devices', and 'Support'. The main content area is divided into several sections: 'Write API Key' with a key input field and a 'Generate New Write API Key' button; 'Read API Keys' with a key input field, a 'Note' text area, and 'Save Note' and 'Delete API Key' buttons; and a 'Help' section on the right containing 'API Keys Settings' and 'API Requests' with example HTTP GET requests.

Nota: La imagen muestra el Channel ID, Write y Read API Key en ThingSpeak.

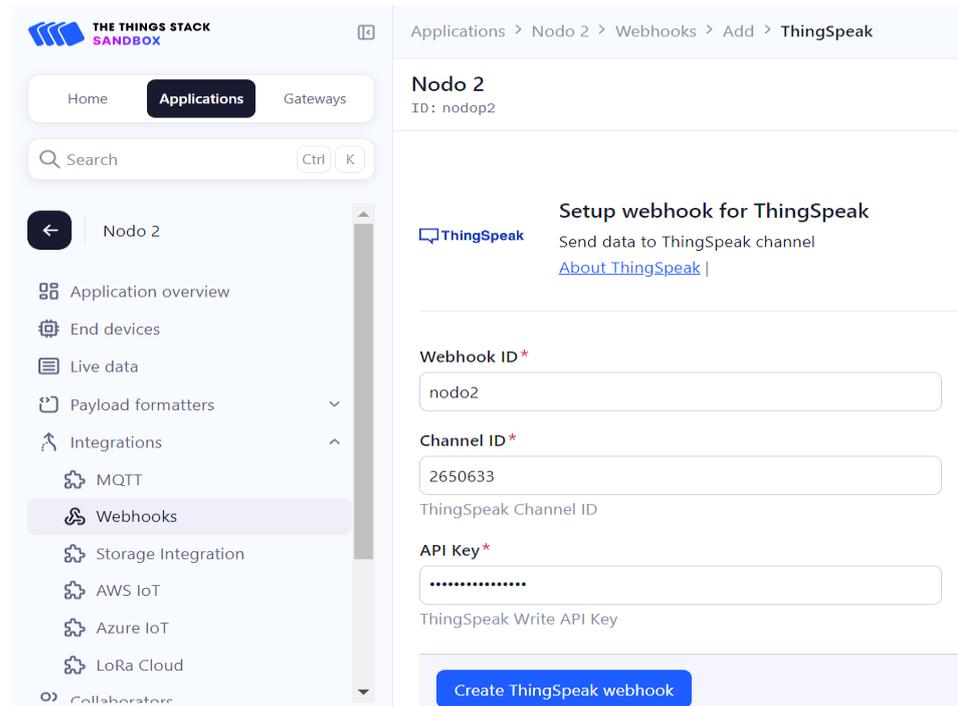
Después de obtener el Channel ID y el Write API Key de ThingSpeak, procedemos con la integración del webhook en The Things Network:

- En The Things Network, accedemos a la sección de aplicaciones e ingresamos y expandimos la opción "Integrations" e ingresamos a "Webhooks" que se encuentran en el lado izquierdo.
- Dentro de "Webhooks", seleccionamos "Add Webhooks" y buscamos el servidor ThingSpeak para integrarlo. Al añadirlo, se nos solicitará el *Channel ID*, el *Write API Key* obtenido anteriormente de ThingSpeak, y el *Webhook ID*, que sirve para

identificar el webhook. Finalmente, seleccionamos "Create ThingSpeak Webhook" para completar la integración entre ambos servidores.

**Figura 50**

*Integración de Thingspeak en el Webhooks de The Things Network*

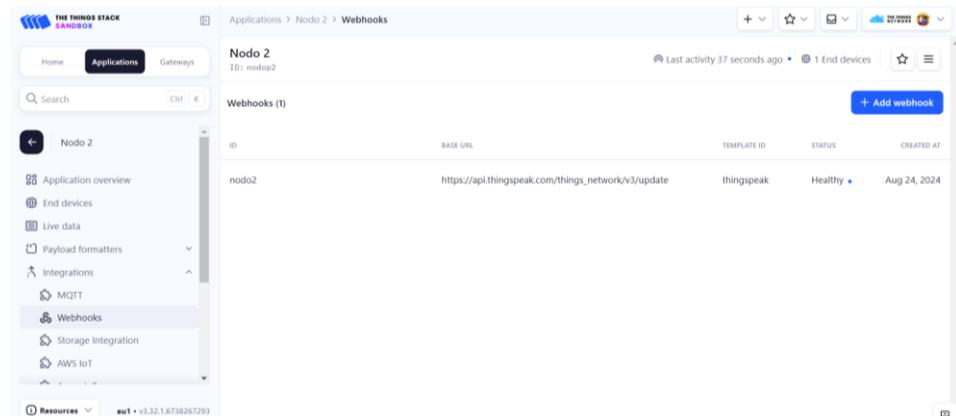


Nota: La imagen muestra cómo integrar el Channel ID y el Write API Key de ThingSpeak en la configuración de webhooks dentro de The Things Network.

Si la integración entre The Things Network y ThingSpeak se ha realizado correctamente. En esta sección Webhooks, el estado "Healthy" indicará que la comunicación entre ambos servidores se estableció de forma exitosa.

**Figura 51**

*Estado de integración de Webhook en The Things Network*

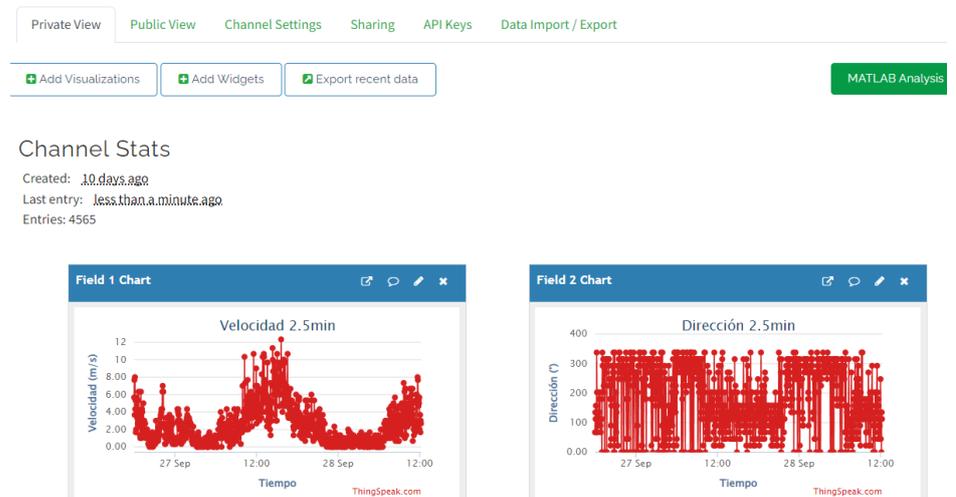


Nota: La imagen muestra que el servidor ThingSpeak está integrado correctamente mediante webhook en The Things Network.

Además, verificar que los datos estén ingresando en ThingSpeak.

**Figura 52**

*Almacenamiento de datos en Thingspeak*



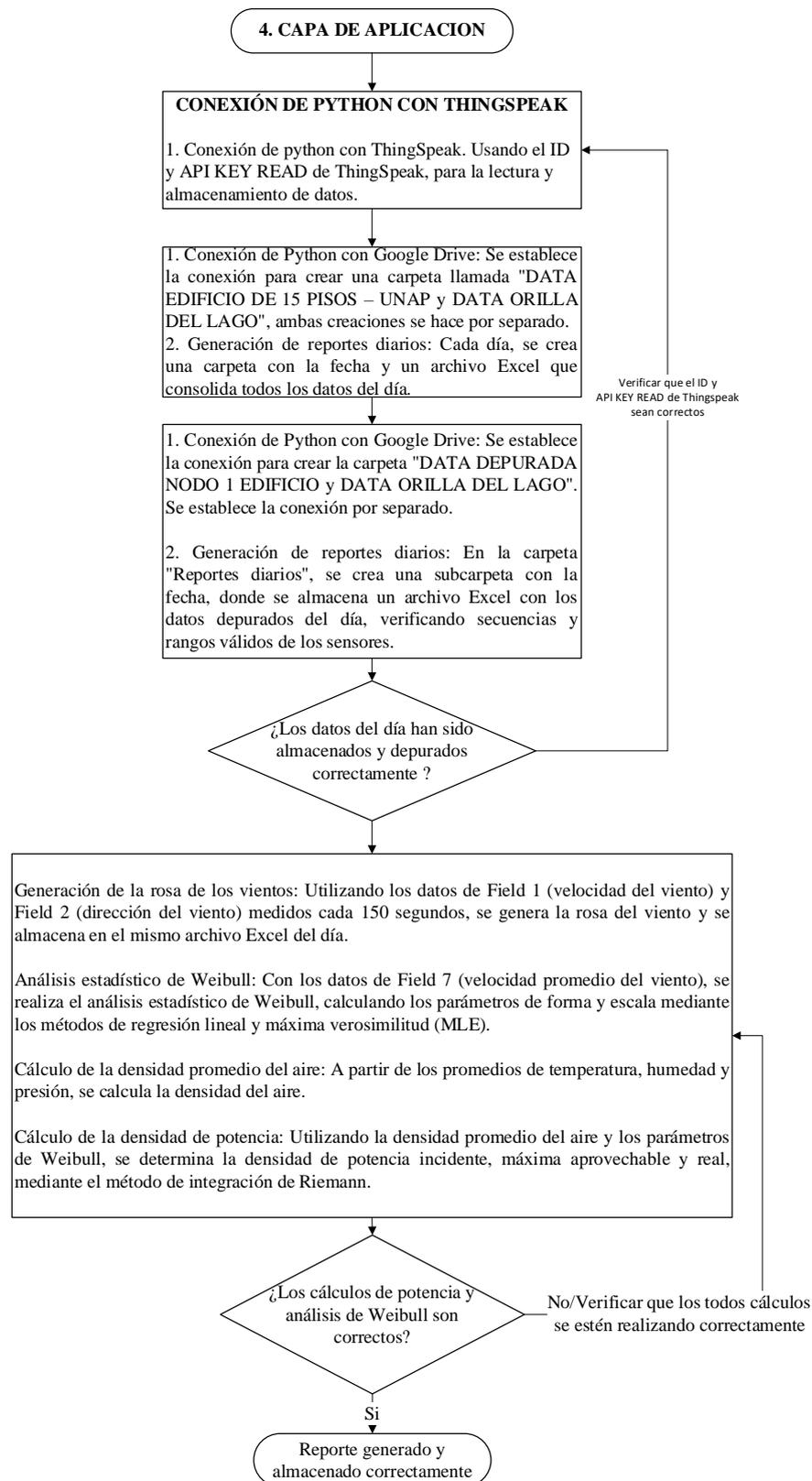
Nota: La imagen muestra el ingreso de datos desde The Things Network a ThingSpeak, donde se ve la hora de la última recepción y el número total de entradas recibidas.

### 3.9.4. Capa de aplicación

En la capa de aplicación, se gestionan tanto la visualización como el análisis de los datos de los sensores.

**Figura 53**

*Diagrama de flujo de la capa de aplicación*



Nota: Este diagrama de flujo detalla los pasos que se siguió en la capa de aplicación del sistema de monitoreo.



La visualización comparativa de estos datos se realiza a través de los Plugins de ThingSpeak, permitiendo personalizar gráficos y comparar las series de datos en tiempo real. Para el análisis más avanzado, se utilizará Google Colab, donde se aplicará el cálculo estadístico de Weibull a los datos recopilados, lo que permitirá obtener un análisis detallado de las variables medidas por los sensores.

En ThingSpeak, en la opción API Keys obtenemos el Read API Key y también el Channel ID. Con ellos, vamos a Colab y, en la programación del código, agregamos el Read API Key y el Channel ID para poder acceder y leer los datos que están siendo almacenados en ThingSpeak. Después de hacer la depuración de datos, los escribimos en un archivo Excel, almacenándolos en la carpeta Data Depurada 1 para el Nodo 1 y en Data Depurada 2 para el Nodo 2 para su posterior análisis.

#### **3.9.4.1. Integración de ThingSpeak en Google Colab para la Automatización de Reportes**

Se obtiene el Channel ID y el Read API Key de ThingSpeak para colocarlos en Colab y así poder leer los datos almacenados. Luego, se sigue el procedimiento para guardarlos en Google Drive.

- Se automatiza la descarga de datos del canal de ThingSpeak, realizando la limpieza y validación de los datos de la velocidad (0 a 30 m/s), dirección de viento (0 a 360°), temperatura (-15 a 100 °C), humedad (0 a 100 %), presión (300 a 1100 hPa) y el voltaje de batería (2 a 5 V) asegurando que cumplan con los rangos esperados.

**Figura 54**

*Read API Key en ThingSpeak y Google Colab*

ThingSpeak™ Channels Apps Devices Support

Private View Public View Channel Settings Sharing API Keys Data Import

### Write API Key

Key: GUSHPP0WOITSTXNA

Generate New Write API Key

### Read API Keys

Key: 8HCNK5TTPXDD8014

Note:

Save Note Delete API Key

Add New Read API Key

```
1 import os
2 import requests
3 import pandas as pd
4 from datetime import datetime, timedelta
5 import pytz
6 import ipywidgets as widgets
7 from IPython.display import display
8 from google.colab import drive
9
10 # Montar Google Drive
11 drive.mount('/content/drive')
12
13 # Configura tus credenciales de ThingSpeak
14 CHANNEL_ID = '2659635' #ID de canal de ThingSpeak
15 API_KEY = '8HCNK5TTPXDD8014' #READ API key de ThingSpeak
16
17 # Ruta base para guardar los datos
18 base_path = '/content/drive/My Drive/DATA DEPURADA NODO 2'
```

Nota: La imagen muestra cómo obtener el Read API Key en ThingSpeak y su integración en Google Colab para acceder a los datos almacenados y guardarlos en Google Drive.

- Se detectan intervalos de tiempo faltantes y se generan registros vacíos para completarlos.



- Posteriormente, los datos se organizan en carpetas en Google Drive y se generan reportes diarios, semanales y mensuales en formato Excel.

#### **3.9.4.2. Automatización del análisis estadístico de la distribución de Weibull**

- Automatización de la distribución de Weibull a partir de datos de velocidad promedio del viento, obtenidos desde archivos Excel en Google Drive.
- Cálculo de frecuencias absolutas, relativas, acumuladas y complementarias de los datos filtrados.
- Ajuste de la distribución de Weibull mediante regresión lineal para obtener los parámetros  $k$  (forma) y  $c$  (escala).
- Estimación de los parámetros de Weibull mediante el método de máxima verosimilitud (MLE) para mayor precisión.

#### **3.9.4.3. Automatización del cálculo de las densidades de potencia y estimación del recurso eólico**

- Se automatiza el cálculo de la densidad de potencia y la estimación del recurso eólico a partir de los datos de velocidad promedio del viento.
- Se cargan los archivos Excel desde Google Drive y se extraen los parámetros Weibull obtenidos por regresión lineal y máxima verosimilitud (MLE).
- Se calculan las constantes y se utiliza la densidad del aire para obtener la potencia total, la potencia máxima aprovechable y la



potencia real, considerando límite de Betz, eficiencias mecánica y eléctrica.

- Se calcula la energía incidente y la energía máxima aprovechable para cada conjunto de parámetros Weibull.
- Se genera una hoja Excel con los cálculos de potencia y energía, y se añaden los resultados correspondientes.
- Generación de gráficos de densidad de potencia en función de la velocidad del viento, que se integran en el archivo Excel junto a los cálculos, para facilitar la visualización del recurso eólico disponible.

#### **3.9.4.4. Automatización del reporte de la rosa de vientos**

Para la automatización de la Rosa de los Vientos, se procesan datos de velocidad y dirección del viento medidos cada 150 segundos, generando una visualización que muestra cómo varía el viento en distintas direcciones. Esta Rosa de los Vientos se inserta automáticamente en la hoja de Excel (Rosa de Vientos). Además, se crea un archivo KMZ para Google Earth, que contiene la Rosa de los Vientos georreferenciada en coordenadas específicas, permitiendo su visualización correcta en el mapa.

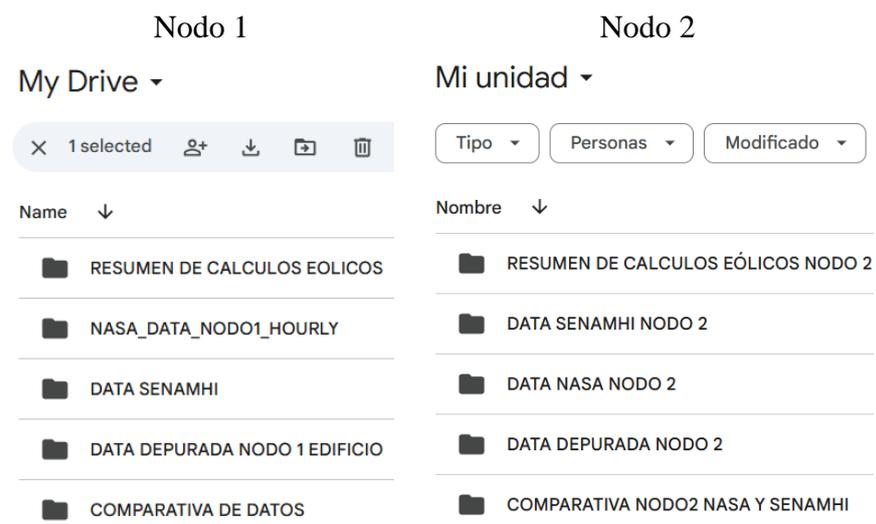
#### **3.9.4.5. Automatización de la comparativa de datos de los Nodos, SENAMHI y NASA**

Para la automatización de la comparativa de datos de los dos Nodos, SENAMHI y NASA, para el caso de los nodos se promedió cada hora los datos del promedio de cada 150 segundos, los datos del SENAMHI se obtuvieron de la estación meteorológica automática del

SENAMHI en Puno, ubicada en el departamento, provincia y distrito de Puno, se encuentra a una latitud de  $15^{\circ}49'34.5''$  S, una longitud de  $70^{\circ}0'43.5''$  W y a una altitud de 3812 msnm (<https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=puno&p=estaciones>) obteniendo las variables como la velocidad del viento, dirección del viento, temperatura y humedad. Los datos de la NASA se obtuvieron de su plataforma (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>) a través de su API, e incluyen también variables meteorológicas como la velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad y presión para cada Nodo en particular a su ubicación y altura de medición para el Nodo 1 de 50m y nodo 2 de 10m. Finalmente se realizó la comparativa de las velocidades con los datos de cada hora para su posterior análisis.

### Figura 55

*Datos y Cálculos Guardados en Carpetas a través de Google Colab para el Nodo 1 y Nodo 2*



Nota: En la imagen se observa el reporte de datos en Google Drive, conteniendo dentro de las carpetas de la automatización de los resultados diario, semanal y mensual.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN

Se implementó con éxito un sistema de monitoreo en tiempo real de los parámetros del viento utilizando tecnología IoT LoRaWAN en Puno, con el objetivo de estimar el recurso eólico disponible en zonas de interés. El sistema permitió medir parámetros como la velocidad y dirección del viento, así como la temperatura, humedad y presión atmosférica, almacenar los datos en la nube mediante la plataforma ThingSpeak y analizarlos automáticamente a través de Google Colab.

##### 4.1.1. Resultados para el objetivo específico 1

Objetivo específico 1: Implementar un sistema de monitoreo con IoT LoRaWAN para la medición en tiempo real de la velocidad, dirección, temperatura, humedad y presión del viento en Puno.

Se logró implementar el sistema de monitoreo IoT LoRaWAN, el cual permite medir en tiempo real la velocidad, la dirección, la temperatura, la humedad y la presión atmosférica del viento en dos puntos de interés en Puno. Esto ha sido posible gracias a la integración de las dos primeras capas de la arquitectura IoT desarrollada en este proyecto, como se muestra en la Figura 33.

La primera capa, llamada capa de percepción, recopila datos mediante sensores instalados en los nodos 1 y 2 ver Figura 55. La segunda, conocida como capa de red, transmite esta información a través del dispositivo Rak3172S. Una vez que el Gateway recibe los datos, estos se envían a Internet, permitiendo la

medición y visualización en tiempo real. En la Tabla 13 se presenta una muestra de los datos recolectados por un nodo como muestra.

### Figura 56

*Nodo 1 y Nodo 2 del sistema de monitoreo*



Nota: La imagen muestra los nodos 1 y 2, cada uno equipado con periféricos como anemómetro, veleta, panel solar, Rak3172, ESP32 y BME280.

#### 4.1.1.1. Muestra de datos sin procesar del sistema de monitoreo

Durante el monitoreo, los dos nodos LoRaWAN transmitieron datos cada 150 segundos (2.5 minutos), generando 576 registros diarios por nodo, con 8 valores por registro. Aunque el sistema operó de forma estable, breves interrupciones en el internet del Gateway causaron la pérdida de hasta 5 datos en el día más inestable.

A continuación, se presenta una tabla con una muestra de los datos sin procesar recolectados por uno de los nodos LoRaWAN. Ambos nodos emplean el mismo formato, con variaciones únicamente en los valores registrados según la ubicación de su instalación.

**Tabla 12***Muestra de la data recolectada del Nodo 1*

<b>created_at</b>	<b>Field1</b>	<b>Field2</b>	<b>Field3</b>	<b>Field4</b>	<b>Field5</b>	<b>Field6</b>	<b>Field7</b>	<b>Field8</b>
2024-09-27 00:01:29	7.33	315	6.5	83.9	642.43	4	4.9	7.33
2024-09-27 00:03:59	5.67	270	6.5	83.6	642.58	4	6.04	7.67
2024-09-27 00:06:29	2.33	292.5	6.5	83.2	642.73	4.04	4.44	6
2024-09-27 00:08:59	4.33	292.5	6.5	83.6	642.64	4.01	3	4.33
2024-09-27 00:11:29	4.67	315	6.4	84	642.67	4.01	4.1	6.67
2024-09-27 00:13:59	3.33	315	6.3	84.5	642.62	4.02	4.32	6
2024-09-27 00:16:29	4.67	292.5	6.2	84.5	642.71	4.03	4.65	6.67
2024-09-27 00:18:59	4.67	270	6.2	84.2	642.69	4.01	4.41	6
2024-09-27 00:21:29	4	270	6.1	85.2	642.68	4.02	5.01	7

Nota: Field1 velocidad medida (m/s), Field2 Dirección del viento (°), Field3 Temperatura (°C), Field4 Humedad (%), Field5 Presión atmosférica (hPa), Field6 Voltaje en Power Bank (V), Field7 Velocidad promedio (m/s) y Field8 Velocidad máxima detectada (m/s).

#### 4.1.1.2. Discusión

En nuestro sistema de monitoreo basado en IoT LoRaWAN, se alcanzó una distancia de comunicación de 7.12 kilómetros entre el nodo 2 y el Gateway como se observa en la figura 18, utilizando LoRa con un SF7, un ancho de banda de 125 kHz (BW125), un SNR que varía entre 7 y 11 dB, y un RSSI en el rango de -92 a -102 dBm. Estos parámetros presentan variaciones a lo largo del día y son sensibles a las condiciones climáticas. En la simulación de cobertura, se estimó un RSSI de -100 dBm en la ubicación del nodo 2 como se observa en la Figura 25, lo cual es cercano a los valores obtenidos en la práctica. Este comportamiento nos



permitió desarrollar un sistema de monitoreo IoT LoRaWAN confiable, con una baja tasa de pérdida de datos. De los 576 paquetes transmitidos diariamente, se pierden un máximo de 5 en el peor de los casos, lo que representa una tasa de pérdida del 0.87%. Nuestro sistema opera con autonomía continua, gracias a un panel solar de 18W que alimenta una batería portátil de 20,000 mAh. En un día despejado, el tiempo de carga es de aproximadamente 3.3 horas, mientras que en un día nublado es de 5 horas.

En el sistema de monitoreo IoT LoRaWAN implementado, se logró una distancia de comunicación de 7.12 kilómetros utilizando un SF7, un ancho de banda de 125 kHz y un RSSI entre -92 y -102 dBm, con una tasa de pérdida de datos de solo 0.87%. Estos resultados superan los obtenidos por Sagua (2020), quien alcanzó una distancia máxima de 2.46 kilómetros con una configuración LoRa punto a punto, y se aproximan a los de Quispe (2021), que logró 6 kilómetros en un entorno geográfico favorable. La diferencia en los alcances se puede atribuir tanto a las condiciones geográficas como a la configuración LoRaWAN empleada, que ofrece un mayor rendimiento. Además, las simulaciones realizadas sugieren que el uso de un SF10 podría aumentar el alcance a 15 kilómetros, mejorando aún más el desempeño del sistema.

#### **4.1.2. Resultado para el objetivo específico 2**

Objetivo específico 2 Integrar una plataforma de almacenamiento de datos y visualización en tiempo real utilizando ThingSpeak para analizar gráficamente los parámetros del viento.

Se integro una plataforma de almacenamiento y visualización en tiempo real con ThingSpeak para analizar los parámetros del viento. Esta etapa corresponde a la capa de procesamiento dentro de la arquitectura IoT de este proyecto, como se observa en la Figura 34. La capa de procesamiento se encarga de recibir los datos que llegan desde el Gateway a través de The Things Network y, mediante Webhooks, enlazarlos con ThingSpeak para su almacenamiento. Además, en ThingSpeak se logró comparar los parámetros y visualizar los datos en tiempo real.

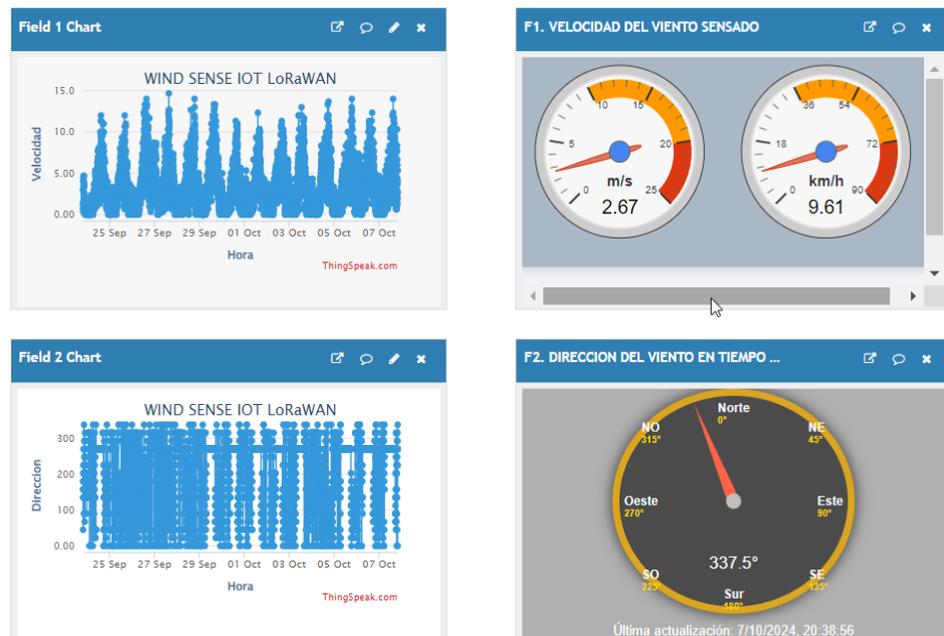
En los siguientes gráficos se presenta el histórico de los datos recolectados por el sistema IoT LoRaWAN del Nodo 1 y el Nodo 2, mostrando la variación de cada parámetro en tiempo real durante el periodo de medición. Además, los indicadores tipo gauge muestran el último valor registrado para cada parámetro medido.

#### **4.1.2.1. Gráficos del Nodo 1**

Las siguientes figuras presentan los datos históricos y en tiempo real de los parámetros del viento sensados, junto con gráficos comparativos que muestran la velocidad y dirección del viento, la temperatura, la humedad y la presión atmosférica. Además, se incluye un gráfico que registra el voltaje del Power Bank.

**Figura 57**

*Velocidad y dirección del viento sensados por el Nodo 1*

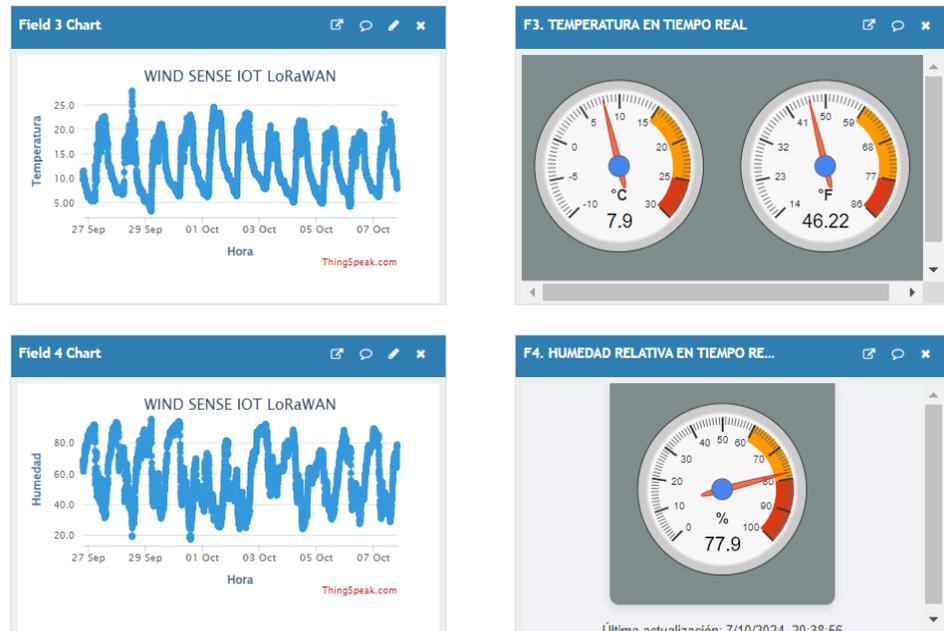


Nota: Se muestran los valores históricos del valor de la velocidad (m/s y km/h) y la dirección del viento (°) medidos cada 2.5 minutos.

En la Figura 57 se presentan los datos de la velocidad y dirección del viento registrados. En el gráfico del "Field 1" se muestra el histórico de los valores de la velocidad del viento, mientras que en el gráfico denominado "F1. Velocidad del viento sentido" se presenta el valor de la velocidad del viento en tiempo real. En el "Field 2" se muestra el histórico de los valores de la dirección del viento, mientras que en el gráfico "F2. Dirección del viento" se muestra el valor de la dirección del viento en tiempo real.

## Figura 58

### *Temperatura y humedad del viento censados por el Nodo 1*

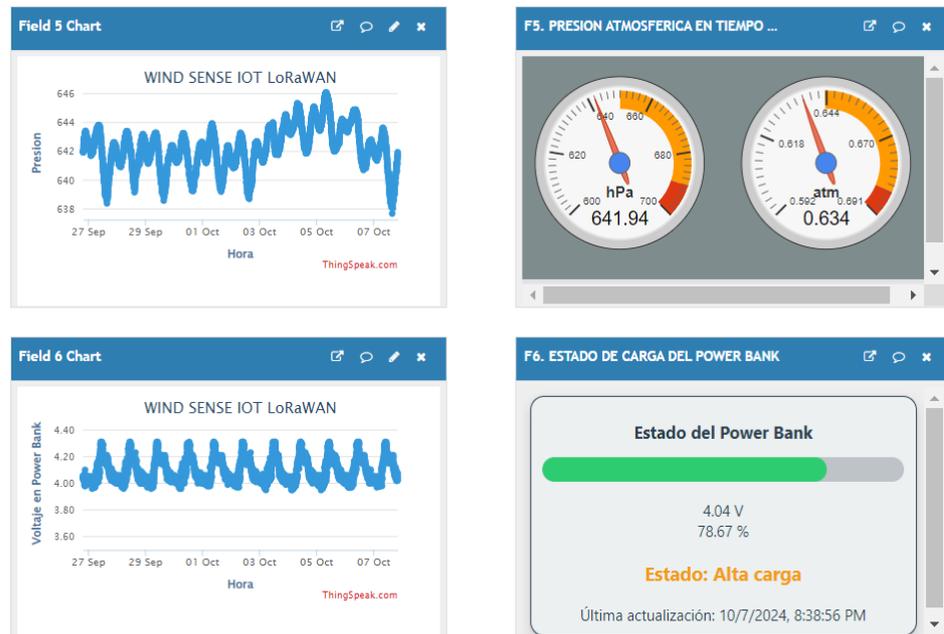


Nota: Se muestran los valores históricos de la Temperatura (°C) y la humedad (%).

En la Figura 58 se presentan los valores registrados de temperatura y humedad del viento. El gráfico del "Field 3" muestra el historial de la temperatura, mientras que el gráfico titulado "F3. Temperatura en tiempo real" exhibe el valor actual de la temperatura tanto en grados Celsius como en grados Fahrenheit. Por su parte, en el "Field 4" se presenta el historial de los valores registrados de la humedad, y el gráfico denominado "F3. Humedad en tiempo real" muestra el valor más reciente de la humedad relativa, expresado en porcentaje.

## Figura 59

### Presión y voltaje censado por el Nodo 1

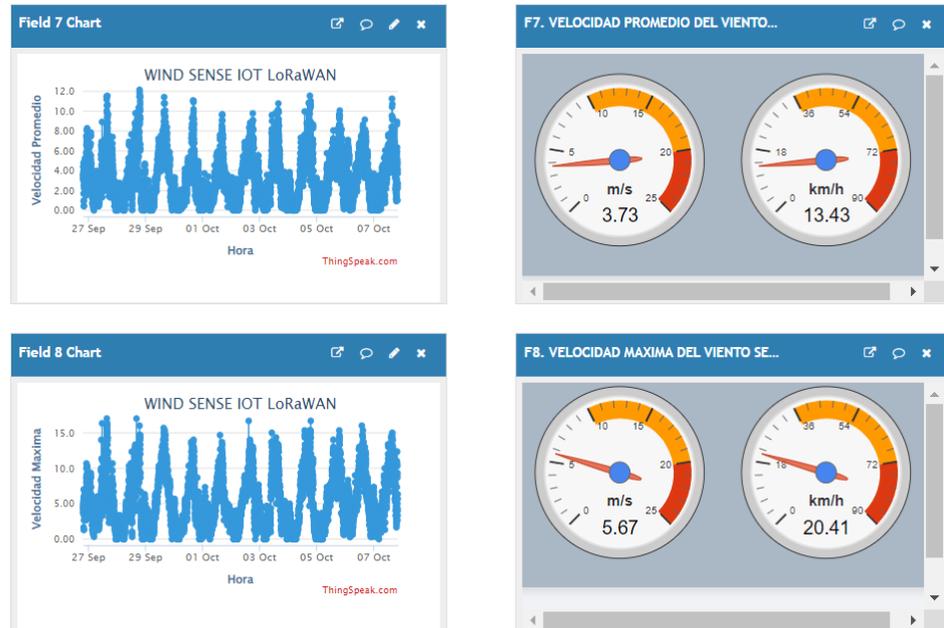


Nota: Se muestran los valores históricos de la presión (hPa) y voltaje en el Powe Bank (V).

En la Figura 59 se presentan los valores registrados de la presión atmosférica y el voltaje del power bank. El gráfico del "Field 5" muestra el historial de los valores de presión atmosférica, y el gráfico titulado "F5. Presión atmosférica" destaca el valor más reciente registrado, expresado en hectopascales (hPa) y atmósferas (atm). Por otro lado, en el "Field 6" se muestra el historial del voltaje del power bank, mientras que el gráfico denominado "F6. Estado de carga del power bank" presenta el valor actual del voltaje en voltios.

## Figura 60

*Velocidad promedio y velocidad máxima del viento registrado por el  
Nodo 1*

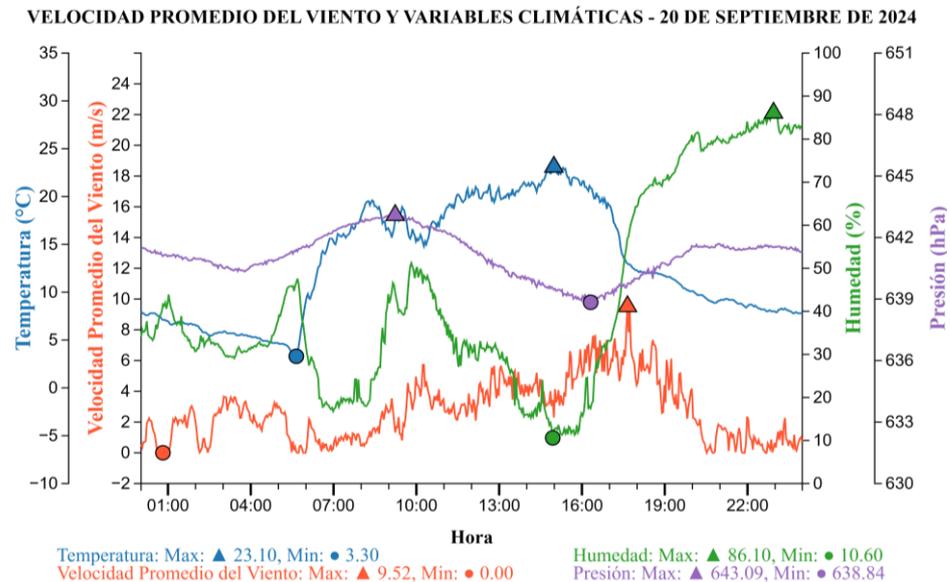


Nota: Se muestran los valores históricos de la velocidad promedio y la velocidad máxima del viento en (m/s).

En la Figura 60 se presentan los datos registrados por el Nodo 1 sobre la velocidad promedio y la velocidad máxima del viento. El gráfico del "Field 7" muestra el historial de los valores de la velocidad promedio en metros por segundo (m/s), mientras que el gráfico titulado "F7. Velocidad promedio del viento" exhibe el último valor registrado, expresado tanto en metros por segundo como en kilómetros por hora (km/h). Por su parte, el "Field 8" presenta el historial de los valores de la velocidad máxima detectada, y el gráfico denominado "F8. Velocidad máxima del viento" muestra el valor más reciente registrado, también en m/s y km/h.

**Figura 61**

*Comparativa de la velocidad promedio del viento con las variables climáticas*



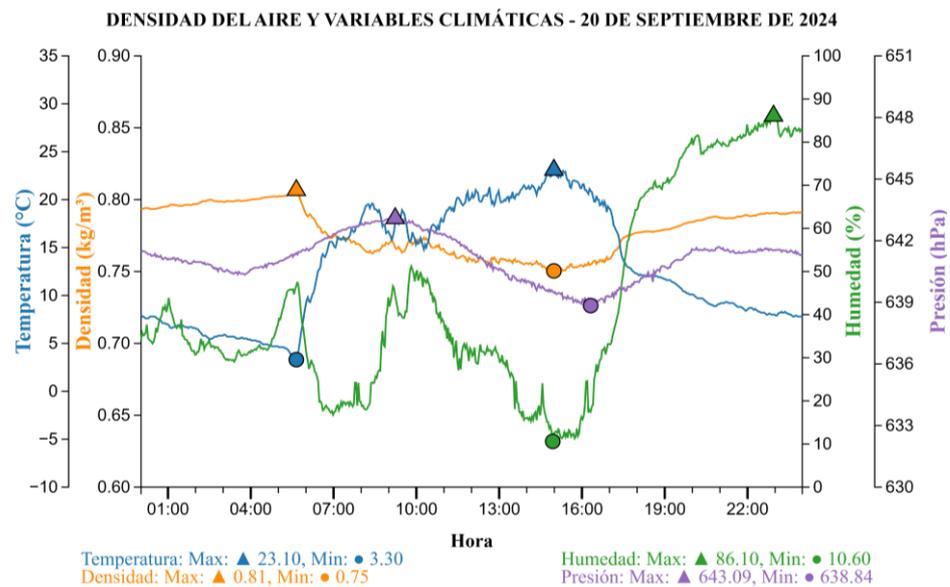
Nota: En este gráfico se compara la velocidad promedio del viento, temperatura, humedad y presión.

En la Figura 61 se muestra el comportamiento de la temperatura, humedad, presión y la velocidad promedio del viento, en donde se observa que el viento comienza a intensificarse cuando la presión atmosférica empieza a disminuir. La velocidad promedio del viento aumenta progresivamente, alcanzando su valor máximo cuando la presión registra sus niveles más bajos, entre las 14 y 18 horas. La disminución de la presión ocurre a medida que la temperatura aumenta debido a la radiación solar, acercándose a su punto máximo alrededor de las 15 horas. Por otro lado, la humedad presenta un comportamiento inverso al de la temperatura, registrando su valor mínimo también alrededor de las 15 horas. Finalmente, se evidencia que los vientos más fuertes del día se producen cuando la presión y la humedad alcanzan sus niveles más bajos, mientras que la temperatura llega a sus valores más altos.

El comportamiento del viento en la zona del Lago Titicaca se debe al calentamiento desigual entre el agua del lago y el terreno circundante. Durante el día, el terreno se calienta más rápidamente, lo que provoca una disminución de la presión en esa área. En contraste, el lago se calienta de manera más lenta, lo que genera una diferencia de presión entre ambas zonas. Como resultado, el aire fluye desde la zona de mayor presión (el lago) hacia la zona de menor presión (el terreno), originando el viento. Por la tarde, cuando la radiación solar disminuye, la tierra se enfría más rápidamente que el lago, y el fenómeno se invierte: el aire fluye desde el terreno hacia el lago. Sin embargo, este viento suele ser menos intenso en comparación con el generado durante el día.

## Figura 62

*Densidad del aire calculada en función de la temperatura, humedad y presión*



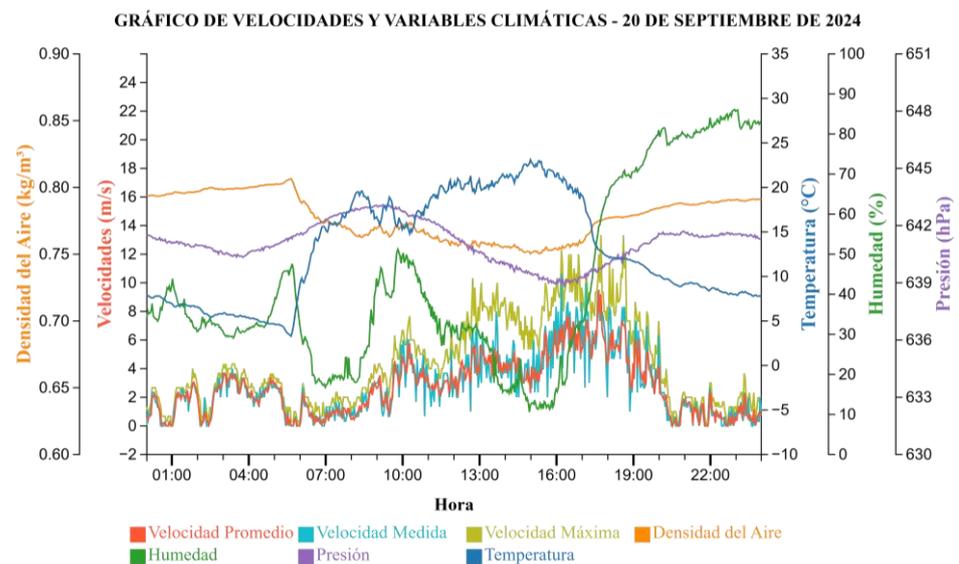
Nota: Se muestra la evolución de la temperatura, presión, humedad y densidad del aire.

En la Figura 62 se muestra el comportamiento de la densidad del aire, en función de la temperatura, humedad y presión. La densidad del aire

disminuye progresivamente a medida que la temperatura aumenta y la humedad disminuye, alcanzando su valor mínimo cuando la humedad y la presión se encuentran en sus niveles más bajos, mientras que la temperatura registra sus valores más altos.

### Figura 63

*La Velocidad del Viento, Promedio, Medida y Máxima con Variables Climáticas*

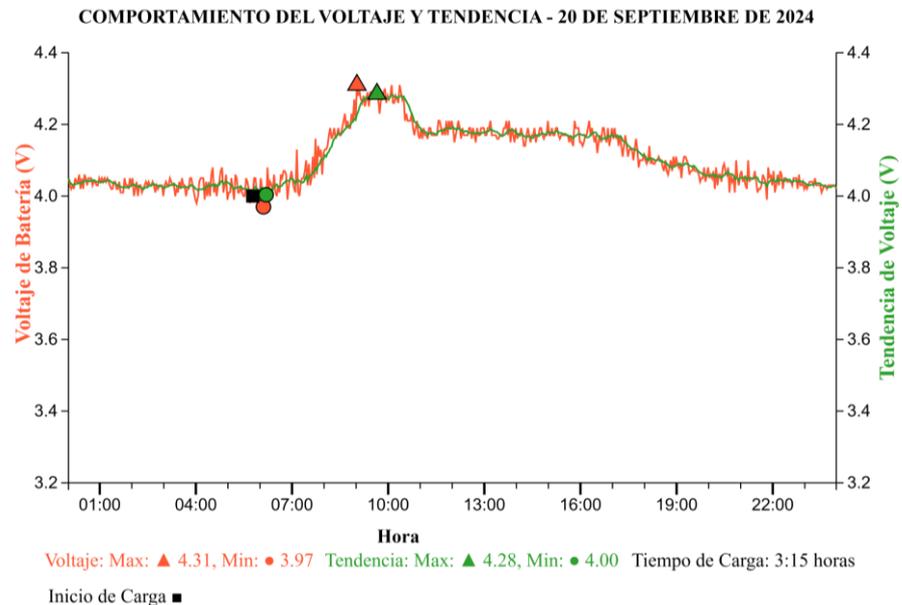


Nota: El gráfico muestra la velocidad del viento, promedio, medida, máxima comparando su comportamiento con la densidad, temperatura, humedad y presión a lo largo de un día.

En la Figura 63 se observa que la variabilidad de la velocidad del viento es más pronunciada en la velocidad medida cada 2.5 minutos, así como en la velocidad máxima registrada dentro de ese mismo intervalo. En contraste, la velocidad promedio, calculada cada segundo durante 150 segundos, muestra una mayor estabilidad. A pesar de estas diferencias, las tres velocidades siguen un comportamiento similar, con variaciones en sus valores, pero manteniendo una tendencia general común.

**Figura 64**

*Comportamiento del voltaje del Power Bank durante un día*



Nota: La imagen muestra una línea de tendencia y el voltaje leído del Power Bank a lo largo de un día.

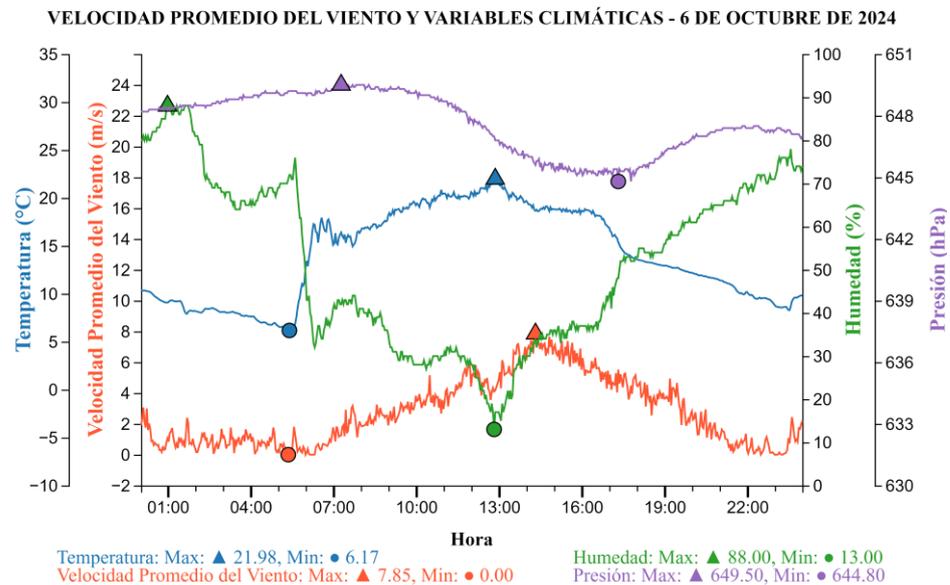
En la Figura 64 se muestra el comportamiento del voltaje del Power Bank, que alcanza su valor mínimo a las 06:00 horas y su valor máximo a las 09:15 horas. Se observa que el panel solar carga el Power Bank en un periodo de 3.15 horas, comenzando aproximadamente a las 06:00 horas, cuando los primeros rayos del sol alcanzan el panel. La carga continúa hasta alrededor de las 09:15 horas, momento en el cual el controlador limita la carga, alcanzando un voltaje de 4.31 voltios. Posteriormente, el controlador estabiliza este valor y lo mantiene limitado a 4.2 voltios de manera constante desde las 11:00 horas hasta las 17:00 horas, cuando comienza el proceso de descarga del Power Bank. Cabe resaltar que cuando el voltaje alcanza los 4.2 voltios, el Power Bank se considera cargado al 100%, mientras que un voltaje de 3.3 voltios indica que el Power Bank ha llegado al 0% de carga.

#### 4.1.2.2. Gráficos del Nodo 2

Las siguientes figuras muestran gráficos comparativos de la velocidad del viento y la densidad del aire en función de variables climáticas como la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica. Además, se incluye una rosa de vientos, que ilustra la distribución de las direcciones predominantes del viento. También presenta un gráfico que registra el voltaje de carga y descarga del Power Bank.

#### Figura 65

*Comparativa de la velocidad promedio del viento con las variables climáticas*



Nota: En este gráfico se compara la velocidad promedio del viento, temperatura, humedad y presión.

En la Figura 65 se muestra el comportamiento de la temperatura, humedad, presión y la velocidad promedio del viento, en donde se observa que el viento comienza a intensificarse cuando la presión atmosférica

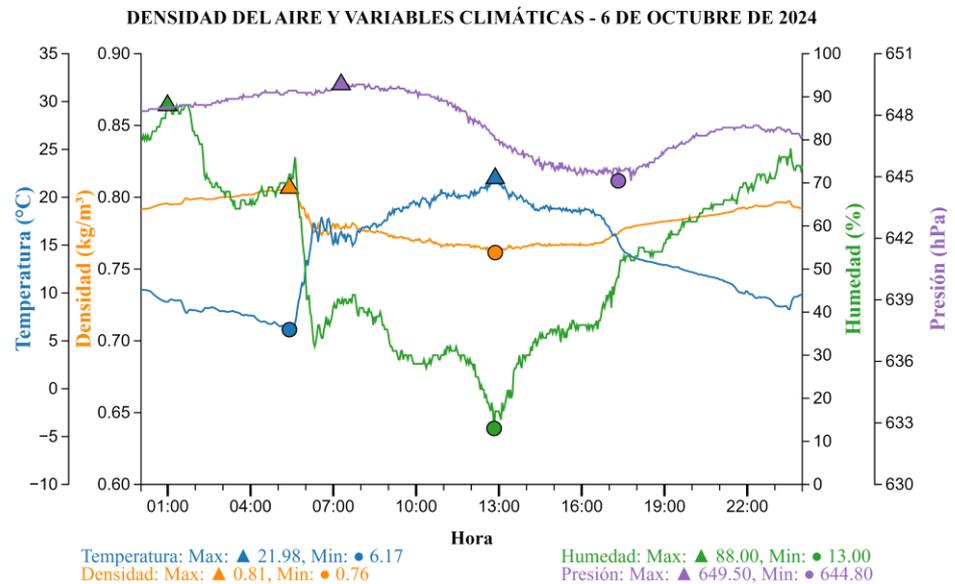


empieza a disminuir. La velocidad promedio del viento aumenta progresivamente, alcanzando su valor máximo cuando la presión registra sus niveles más bajos, entre las 14 y 18 horas. La disminución de la presión ocurre a medida que la temperatura aumenta debido a la radiación solar, acercándose a su punto máximo alrededor de las 13 horas. Por otro lado, la humedad presenta un comportamiento inverso al de la temperatura, registrando su valor mínimo también alrededor de las 13 horas. Finalmente, se evidencia que los vientos más fuertes del día se producen cuando la presión y la humedad alcanzan sus niveles más bajos, mientras que la temperatura llega a sus valores más altos.

El comportamiento del viento en la zona del Lago Titicaca se debe al calentamiento desigual entre el agua del lago y el terreno circundante. Durante el día, el terreno se calienta más rápidamente, lo que provoca una disminución de la presión en esa área. En contraste, el lago se calienta de manera más lenta, lo que genera una diferencia de presión entre ambas zonas. Como resultado, el aire fluye desde la zona de mayor presión (el lago) hacia la zona de menor presión (el terreno), originando el viento. Por la tarde, cuando la radiación solar disminuye, la tierra se enfría más rápidamente que el lago, y el fenómeno se invierte: el aire fluye desde el terreno hacia el lago. Sin embargo, este viento suele ser menos intenso en comparación con el generado durante el día.

**Figura 66**

*Densidad del aire calculada en función de la temperatura, humedad y presión*

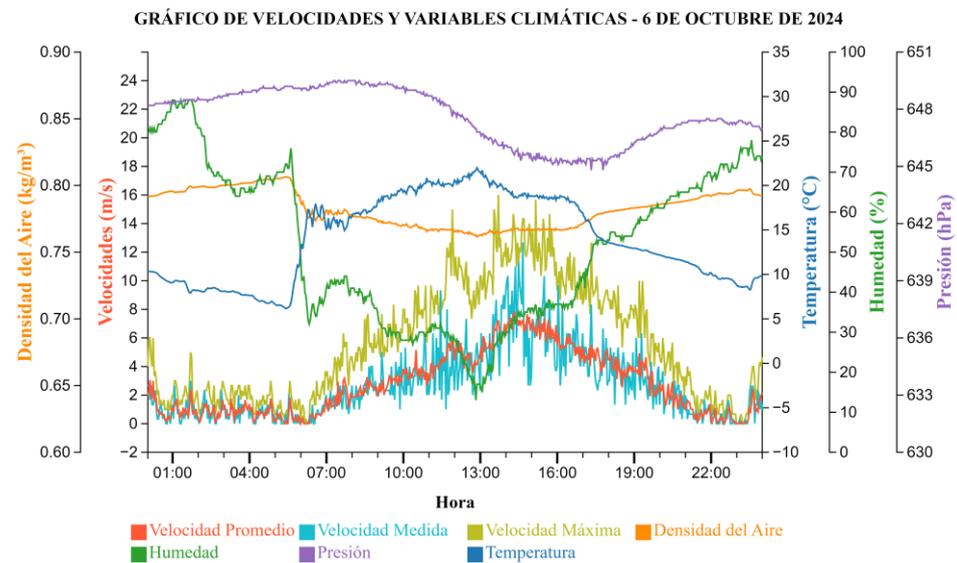


Nota: Se muestra la evolución de la temperatura, presión, humedad y densidad del aire.

En la Figura 66 se muestra el comportamiento de la densidad del aire, en función de la temperatura, humedad y presión. La densidad del aire disminuye progresivamente a medida que la temperatura aumenta y la humedad disminuye, alcanzando su valor mínimo cuando la humedad y la presión se encuentran en sus niveles más bajos, mientras que la temperatura registra sus valores más altos.

## Figura 67

*La Velocidad del Viento, Promedio, Medida y Máxima con Variables Climáticas*

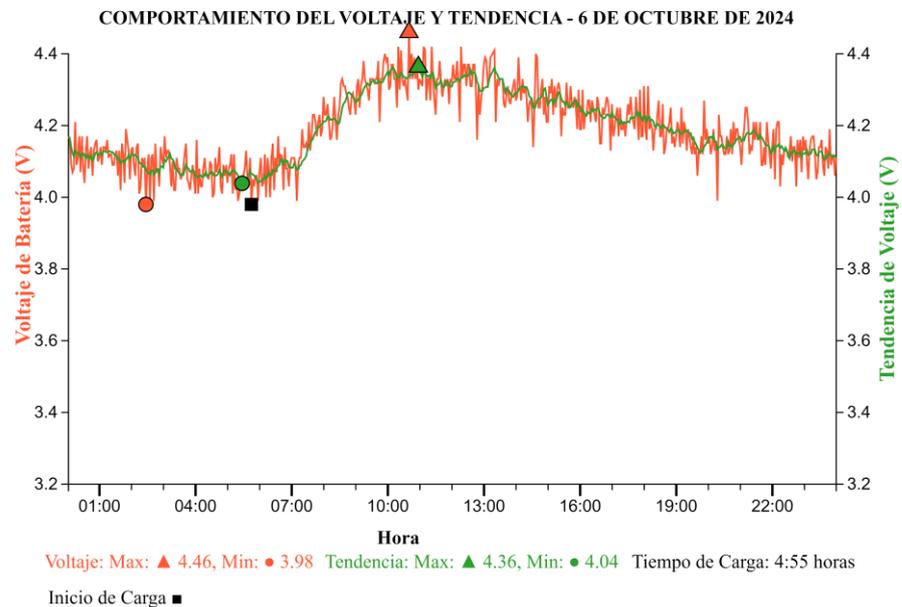


Nota: El grafico muestra la velocidad del viento, promedio, medida, máxima comparando su comportamiento con la densidad, temperatura, humedad y presión a lo largo de un día.

En la Figura 67 se observa que la variabilidad de la velocidad del viento es más pronunciada en la velocidad medida cada 2.5 minutos, así como en la velocidad máxima registrada dentro de ese mismo intervalo. En contraste, la velocidad promedio, calculada cada segundo durante 150 segundos, muestra una mayor estabilidad. A pesar de estas diferencias, las tres velocidades siguen un comportamiento similar, con variaciones en sus valores, pero manteniendo una tendencia general común.

**Figura 68**

*Comportamiento del voltaje del Power Bank durante un día*



Nota: La imagen muestra una línea de tendencia y el voltaje leído del Power Bank a lo largo de un día.

En la Figura 68 se muestra el comportamiento del voltaje del Power Bank, que alcanza su valor mínimo a las 06:00 horas y su valor máximo a las 11:00 horas. Se observa que el panel solar carga el Power Bank en un periodo de 4.55 horas, comenzando aproximadamente cerca a las 06:00 horas, cuando los primeros rayos del sol alcanzan el panel. La carga continúa hasta alrededor de las 11:00 horas, momento en el cual el controlador limita la carga, alcanzando un voltaje de 4.46 voltios. Posteriormente, el controlador estabiliza este valor y lo mantiene limitado a 4.3 voltios de manera constante desde las 12:00 horas hasta las 15:00 horas, cuando comienza el proceso de descarga del Power Bank. Cabe resaltar que cuando el voltaje alcanza los 4.3 voltios, el Power Bank se considera cargado al 100%, mientras que un voltaje de 3.3 voltios indica que el Power Bank ha llegado al 0% de carga.

#### 4.1.2.3. Discusión

En este proyecto se integró la plataforma ThingSpeak para el almacenamiento y visualización de datos en tiempo real haciendo el uso de API Key Read y Chanel ID, mediante el protocolo de comunicación HTTP. Además, se desarrollaron en la misma plataforma Widgets y Plugins en HTML, CSS y JS para la comparación y análisis de diversos parámetros del viento, como se muestra en los gráficos desde la Figura 57 hasta la Figura 68 de los datos obtenidos de los Nodos 1 y 2.

En el estudio realizado por Romero (2020), se destaca la integración de la plataforma ThingSpeak para el monitoreo y almacenamiento de datos en tiempo real utilizando redes LPWAN, donde se emplea el protocolo MQTT para la transmisión eficiente de información desde el Gateway hacia el servidor. En comparación, en este proyecto se implementó ThingSpeak con el protocolo HTTP a través de The Things Network, lo que ha permitido una mayor flexibilidad y escalabilidad en el sistema de monitoreo. Ambos enfoques comparten la capacidad de ThingSpeak para almacenar grandes volúmenes de datos, con la ventaja adicional del plan gratuito que permite el manejo de hasta 3 millones de registros anuales, adecuado para aplicaciones de monitoreo ambiental. Además, las herramientas gráficas de ThingSpeak han demostrado ser útiles en la comparación y análisis de parámetros, como se reflejó en los gráficos obtenidos de los Nodos 1 y 2. En conjunto, estos resultados muestran cómo la adaptabilidad de la plataforma ThingSpeak, combinada con la elección del protocolo adecuado, puede optimizar el rendimiento de sistemas IoT para la gestión de datos en tiempo real.

### 4.1.3. Resultados para el objetivo específico 3

Objetivo específico 3 Automatizar el análisis estadístico de Weibull de los parámetros del viento utilizando Google Colab y Google Sheets para estimar el recurso eólico disponible.

El análisis estadístico de Weibull para los parámetros del viento fue automatizado exitosamente utilizando Google Colab y Google Sheets, permitiendo estimar de manera eficiente el recurso eólico disponible y mejorando la precisión y confiabilidad del proceso.

#### Figura 69

*Resultados Diarios del Análisis Estadístico y Cálculo de Potencia Eólica en Google Sheets Generados con Google Colab*

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	created_at	dir	velocidad del viento	temperatura	humedad	presión	potencia promedio	potencia máxima del viento						
2	2024-09-01	1.33	0	5.4	57	642.95	4.05	1.86	3.67					
3	2024-09-01	1	22.5	5.3	57	642.89	4.05	1.47	2					
4	2024-09-01	1.33	135	5.2	56	642.87	4.1	1.77	2.67					
5	2024-09-01	1.67	90	5.2	56	642.89	4.05	1.69	3					
6	2024-09-01	1.33	22.5	5.3	55	642.84	4.05	1.81	3					
7	2024-09-01	0.67	247.5	5.3	54	642.88	4.03	1.34	3					
8	2024-09-01	1.33	45	5.2	54	642.88	4.06	1.35	2.33					
9	2024-09-01	2	45	5.2	53	642.88	4.08	2.15	4					
10	2024-09-01	1.33	22.5	5.2	52	642.88	4.07	1.28	2.67					
11	2024-09-01	2	90	5.1	52	642.81	4.05	1.39	3.33					
12	2024-09-01	2	67.5	5.1	51	642.86	4.07	1.55	4.33					
13	2024-09-01	1.33	0	5	51	642.81	4.04	1.53	2.67					
14	2024-09-01	1.33	45	5	51	642.92	4.05	1.58	3.67					
15	2024-09-01	1.33	0	5	52	642.9	4.05	1.48	2.67					
16	2024-09-01	1.67	22.5	4.9	52	642.89	4.05	1.22	2.33					
17	2024-09-01	1.33	0	5	52	642.81	4.06	1.61	4.67					
18	2024-09-01	2	337.5	5.1	54	642.81	4.06	2.39	5					
19	2024-09-01	2.33	292.5	5.2	57	642.78	4.07	2.05	5.33					
20	2024-09-01	2	292.5	5.2	57	642.82	4.05	2.02	4.67					
21	2024-09-01	1.33	22.5	5.1	57	642.88	4.05	2.09	3.67					
22	2024-09-01	1.67	315	5	57	642.86	4.05	1.69	4					
23	2024-09-01	2	315	5	57	642.81	4.09	2.3	4.67					
24	2024-09-01	2	270	5.1	59	642.8	4.07	2.62	5.67					
25	2024-09-01	2.67	90	5.1	62	642.84	4.07	2.58	4.33					
26	2024-09-01	2	0	5.1	61	642.7	4.05	2.05	2.33					

Nota: En esta figura se observa una muestra de los resultados obtenidos mediante la automatización de los cálculos con Google Colab, que generó un Google Sheet de forma automática.

En la Figura 69 se ilustra cómo se almacenan los datos obtenidos en una hoja de Excel en Google Sheets. Antes de ser almacenados, los datos pasan por un proceso de depuración, que incluye un filtro para asegurar que solo se registren aquellos datos válidos y dentro de los rangos establecidos. Este procedimiento garantiza que los datos almacenados sean precisos y adecuados para el análisis estadístico, el cálculo de las potencias y la generación de la rosa de vientos.

Esta automatización forma parte de la capa de aplicación en la arquitectura IoT del proyecto, donde se procesan y analizan los datos recolectados diariamente. Los cálculos se realizan automáticamente en Google Colab y los resultados se envían a Google Sheets, donde se generan gráficos como la rosa de vientos y las curvas de potencia eólica. Esta integración garantiza una visualización clara y accesible, facilitando la toma de decisiones informadas y proporcionando un sistema escalable y eficiente para el monitoreo continuo del recurso eólico.

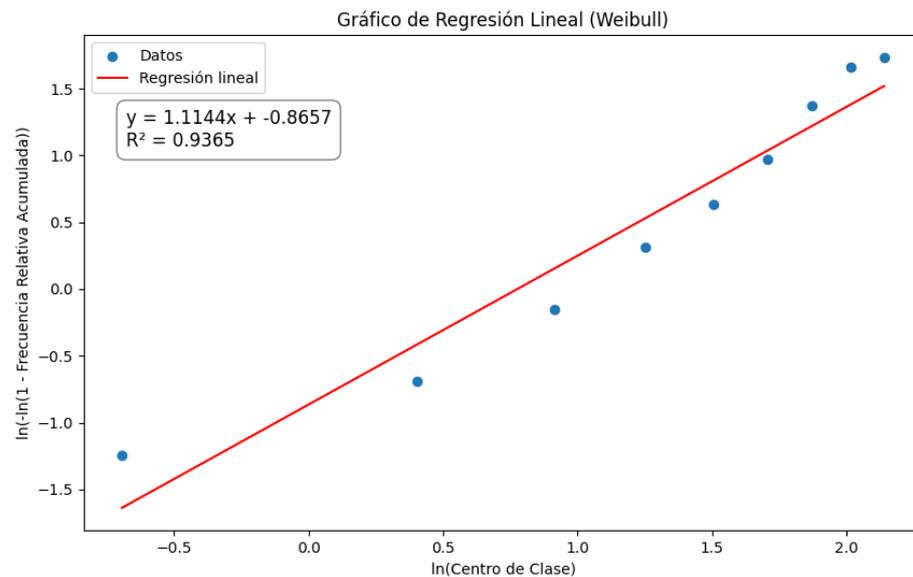
#### **4.1.3.1. Análisis estadístico, cálculo de potencias eólicas y rosa de vientos de los datos recolectados del nodo 1**

Los siguientes gráficos presentan el análisis estadístico, incluyendo la comparación entre el histograma de frecuencia y la curva de Weibull, la frecuencia relativa complementaria con la distribución de Weibull, las curvas de densidad de potencia eólica y la rosa de vientos.

La Figura 70 presenta la regresión lineal de los datos de la velocidad promedio del viento sensada, con una alta correlación  $R^2=0.9365$  lo que indica un buen ajuste del modelo a los datos obtenidos.

### Figura 70

Gráfico de la regresión lineal para el día 20 septiembre del 2024



Nota: Grafico de la regresión lineal para la determinación del parámetro de forma  $k$  y escala  $c$  de Weibull.

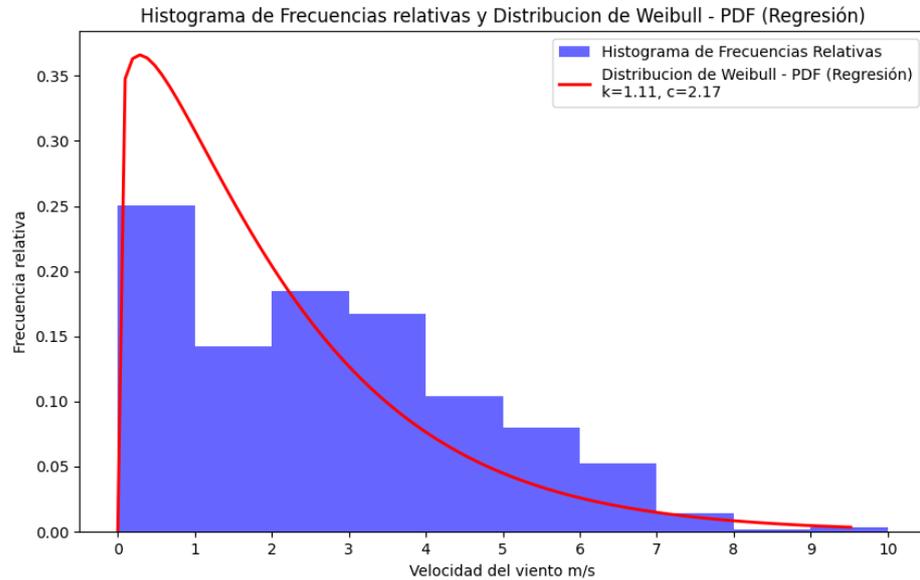
La ecuación de la regresión,  $y=1.1144x-0.8657$  fue obtenida utilizando el método de mínimos cuadrados. A partir de esta ecuación, se calculó los parámetros de forma y escala de la distribución de Weibull.

En la figura 71 se muestra un histograma de las frecuencias relativas de la velocidad promedio del viento junto con la distribución de Weibull – PDF (Regresión). El histograma (en azul) ilustra la frecuencia relativa de las velocidades del viento registradas, mientras que la curva roja representa el ajuste de la distribución de Weibull - PDF, obtenida mediante el método de regresión. Los parámetros de forma ( $k = 1.11$ ) y de escala ( $c = 2.17$ ) de la distribución Weibull. En donde el parámetro forma  $k$ , está dentro del rango de valores que representan vientos constantes y el parámetro de escala  $c$  está relacionado con la velocidad media diaria.

### Figura 71

*Histograma de frecuencias relativas y distribución de Weibull – PDF*

*(Regresión) para el día 20 de septiembre del 2024*

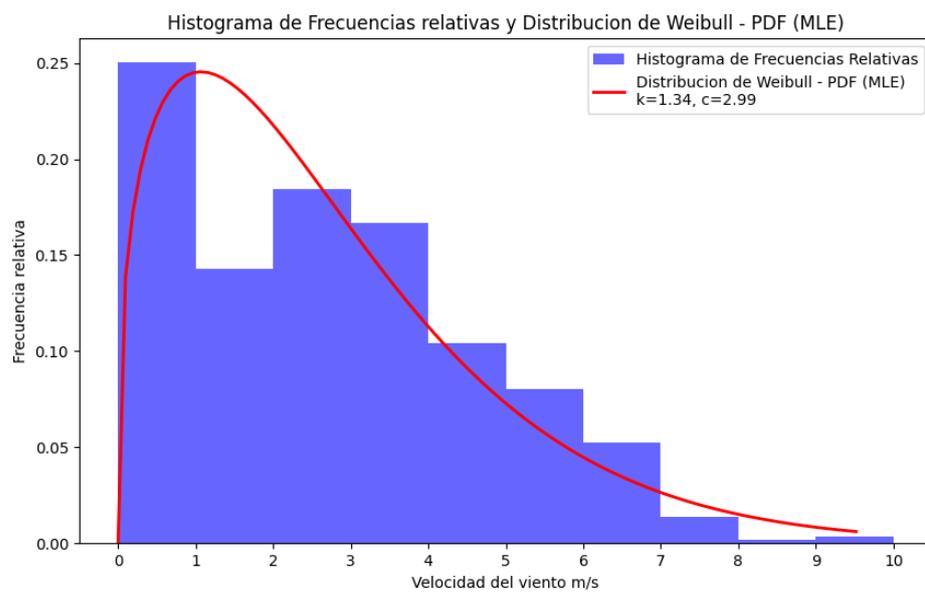


Nota: El gráfico muestra el histograma de frecuencia relativa de la velocidad promedio del viento y la distribución de Weibull – PDF ajustada ( $k = 1.11$ ,  $c = 2.17$ ) obtenida mediante regresión.

### Figura 72

*Histograma de frecuencias relativas y la distribución de Weibull – PDF*

*(MLE) para el día 20 de septiembre del 2024*

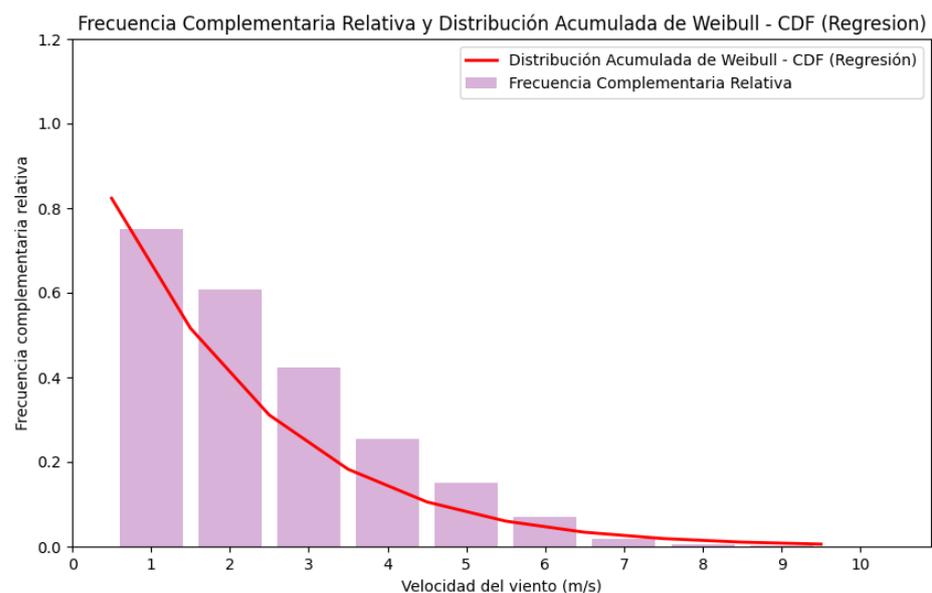


Nota: El gráfico muestra el histograma de frecuencias relativas de la velocidad promedio del viento y la distribución de Weibull – PDF ajustada ( $k = 1.34$ ,  $c = 2.99$ ) obtenida mediante el método de MLE.

En la Figura 72 se presenta un histograma de frecuencias relativas de la velocidad promedio del viento, acompañado de la distribución de Weibull – PDF (MLE). El histograma de frecuencias relativas, representado en azul, muestra la distribución de las velocidades del viento registradas, mientras que la curva roja ilustra el ajuste de la distribución Weibull - PDF, obtenido mediante el método de máxima verosimilitud (MLE). Se observa que los parámetros de forma  $k$  y escala  $c$  obtenidos a través de este método presentan un ajuste significativamente mejor en comparación con los parámetros obtenidos mediante regresión lineal.

### Figura 73

*Frecuencia complementaria relativa y distribución acumulada de Weibull – CDF (Regresión) para el día 20 de septiembre del 2024*

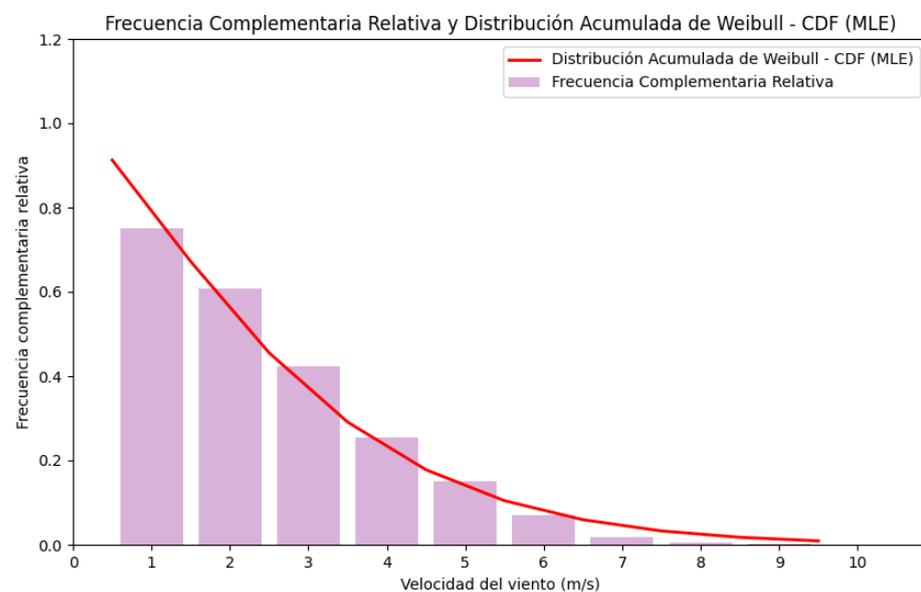


Nota: El gráfico muestra la frecuencia complementaria relativa y distribución acumulada de Weibull – CDF ajustada por regresión.

En la Figura 73 se muestra cómo la distribución acumulada de Weibull ajustada (línea roja) obtenido por el método de la regresión, se adapta a los datos de la frecuencia complementaria relativa de la velocidad del viento. El modelo de Weibull se ajusta bien a la tendencia general de los datos, especialmente en las velocidades más bajas, lo que sugiere que es un buen modelo para describir la distribución del viento en esta área. Sin embargo, se observa que, a velocidades más altas, el ajuste no es tan preciso, indicando que podría haber una ligera discrepancia entre el modelo y los datos en esas regiones.

### Figura 74

*Frecuencia complementaria relativa y distribución acumulada de Weibull – CDF (MLE) para el día 20 de septiembre del 2024*



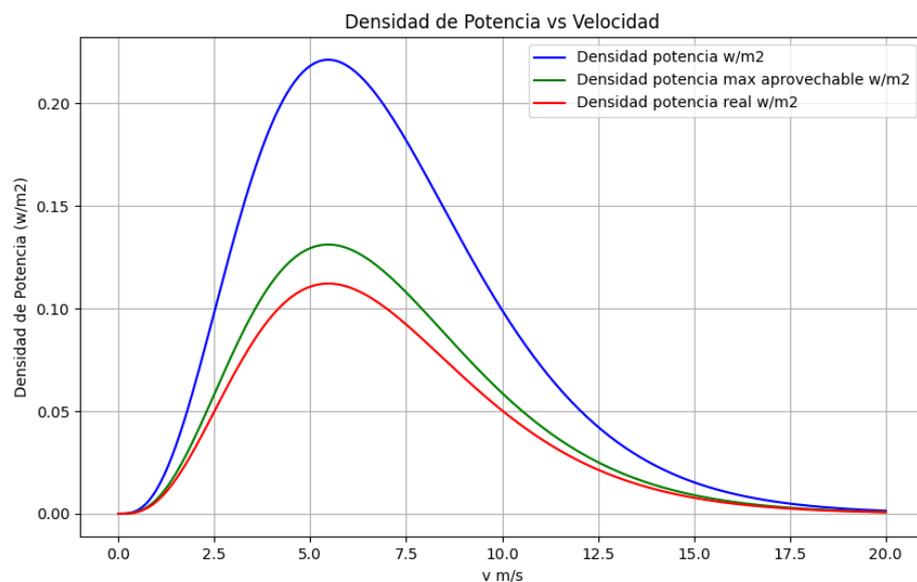
Nota: El gráfico muestra la frecuencia complementaria relativa y distribución acumulada de Weibull – CDF ajustada por MLE.

En la Figura 74 se observó que la distribución acumulada de Weibull – CDF ajustada (línea roja) obtenido por el método de MLE, sigue de manera general la tendencia de los datos representados por las barras,

que muestran la frecuencia complementaria relativa acumulada. El ajuste parece ser bastante preciso en las velocidades bajas y moderadas (entre 0 y 5 m/s), pero en las velocidades más altas (por encima de 5 m/s), se observa una leve discrepancia, ya que el modelo Weibull tiende a subestimar ligeramente la frecuencia relativa acumulada en esa región. Esto sugiere que, aunque el modelo Weibull captura bien la tendencia general, podría no representar con total precisión los extremos superiores de la distribución de velocidad del viento.

### Figura 75

*Las densidades de potencia eólica para el día 20 de septiembre del 2024*

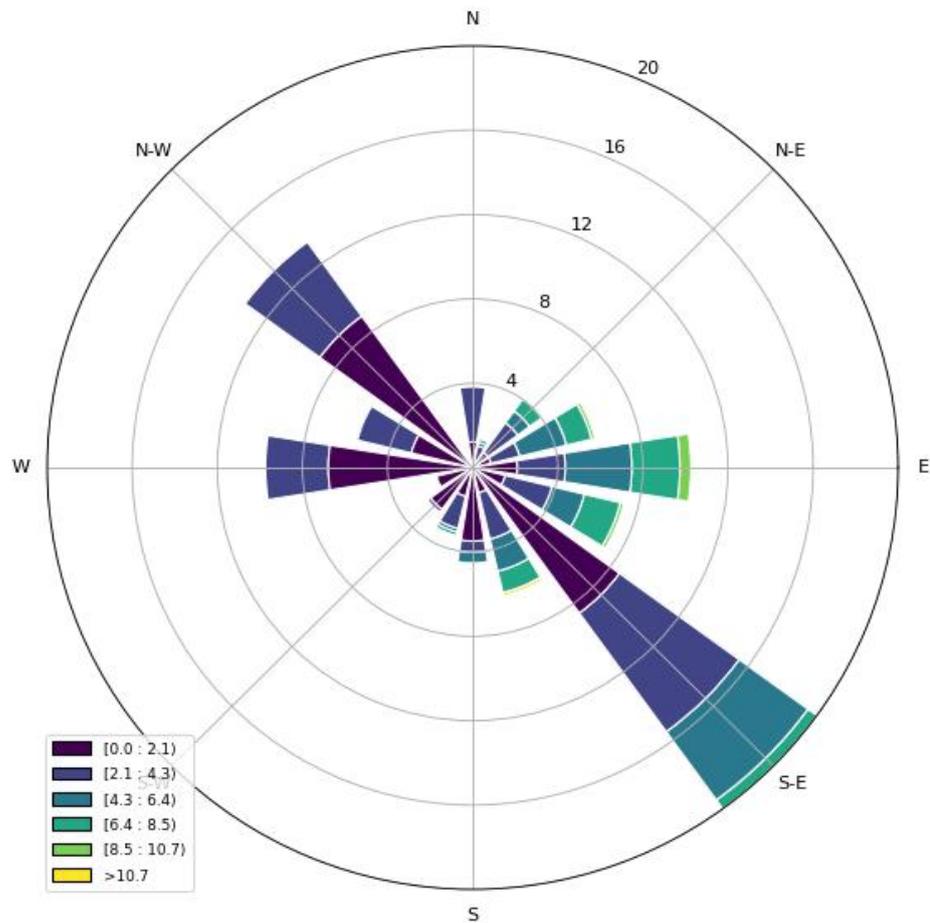


Nota: El gráfico muestra la densidad de potencia teórica, máxima aprovechable y real en función de la velocidad del viento.

La Figura 75 se muestra la densidad de potencia del viento  $w/m^2$  en función de la velocidad del viento en  $m/s$  para tres escenarios: teórica (azul), máxima aprovechable según el límite de Betz (verde) y real considerando pérdidas (roja).

**Figura 76**

*La rosa del viento para el día 20 septiembre del 2024*



Nota: El gráfico muestra la distribución de la velocidad del viento según su dirección, representada en una rosa de vientos.

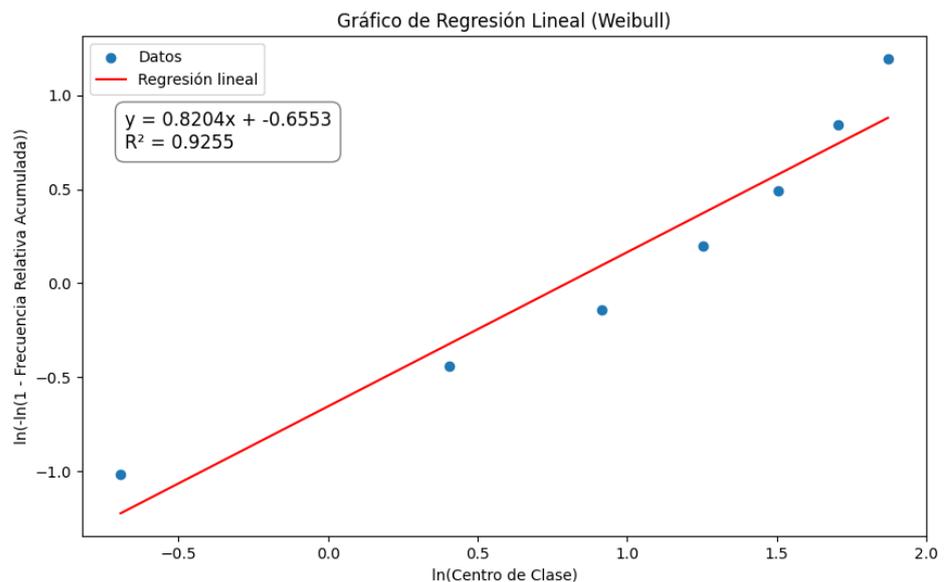
Figura 76 se muestra la rosa de vientos generada a partir de los datos registrados por el Nodo 1, ubicado en el edificio de 15 pisos de la UNAP, se observa que los vientos predominantes provienen del sureste (SE) y del noroeste (NW). En menor medida, también se registran vientos con desplazamiento de este a oeste (E-W).

#### 4.1.3.2. Análisis estadístico, cálculo de potencias eólicas y rosa de vientos de los datos recolectados del nodo 2

Los siguientes gráficos presentan el análisis estadístico, incluyendo la comparación entre el histograma de frecuencia y la curva de Weibull, la frecuencia relativa complementaria con la distribución de Weibull, las curvas de densidad de potencia eólica y la rosa de vientos.

#### Figura 77

Gráfico de la regresión lineal para el día 6 de octubre del 2024



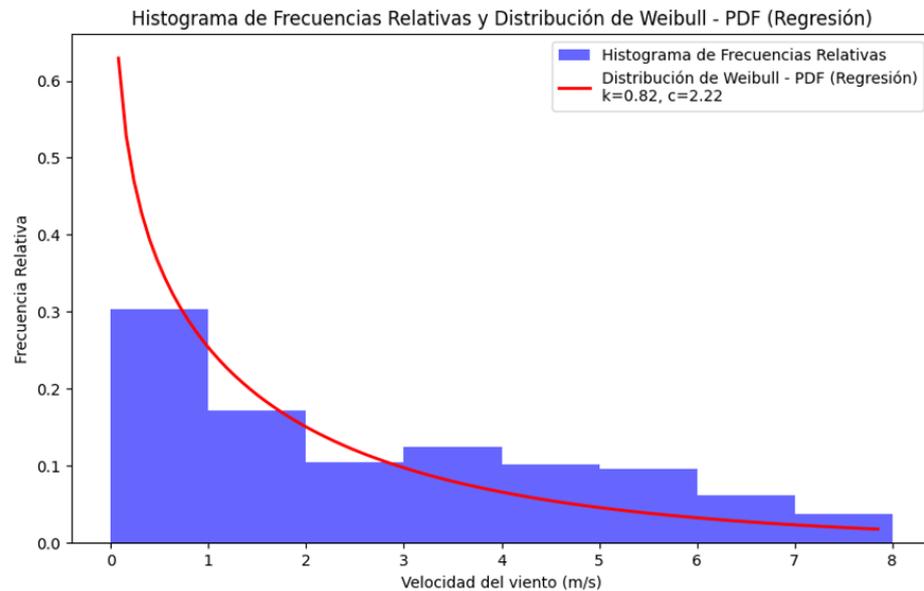
Nota: Gráfico de la regresión lineal para la determinación del parámetro de forma  $k$  y escala  $c$  de Weibull.

La Figura 77 se presenta la regresión lineal de los datos de la velocidad promedio del viento sensada, con una alta correlación  $R^2=0.9255$  lo que indica un buen ajuste del modelo a los datos obtenidos. La ecuación de la regresión,  $y=0.8204x-0.6553$  fue obtenida utilizando el método de mínimos cuadrados. A partir de esta ecuación, se calculó los parámetros de forma y escala de la distribución de Weibull.

### Figura 78

*Histograma de frecuencias relativas y distribución de Weibull – PDF*

*(Regresión) para el día 6 de octubre del 2024*

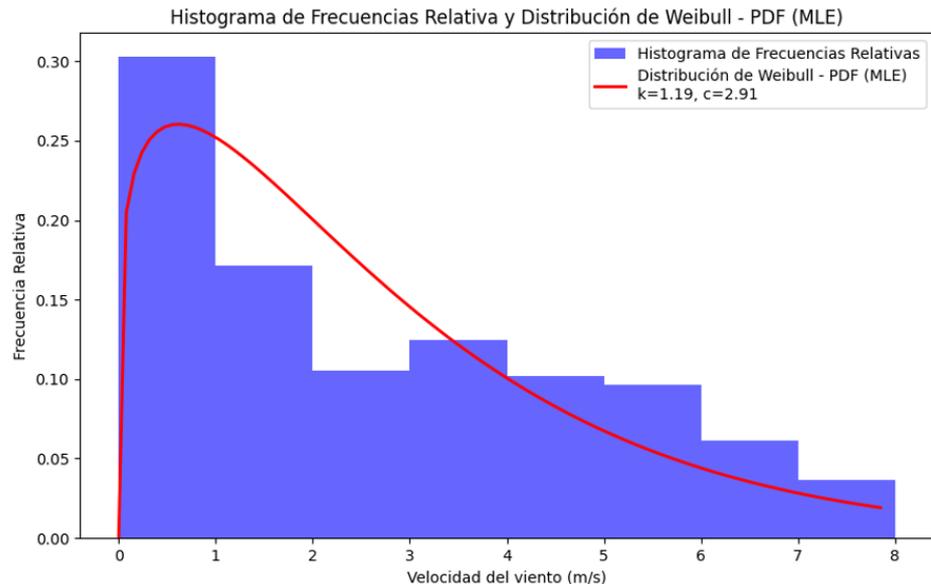


Nota: El gráfico muestra el histograma de frecuencia relativa de la velocidad promedio del viento y la distribución de Weibull – PDF ajustada ( $k = 0.82$ ,  $c = 2.22$ ) obtenida mediante regresión.

En la figura 78 se muestra un histograma de las frecuencias relativas de la velocidad promedio del viento junto con la distribución de Weibull – PDF (Regresión). El histograma (en azul) ilustra la frecuencia relativa de las velocidades del viento registradas, mientras que la curva roja representa el ajuste de la distribución de Weibull - PDF, obtenida mediante el método de regresión. Los parámetros de forma ( $k = 0.82$ ) y de escala ( $c = 2.22$ ) de la distribución Weibull. En donde el parámetro forma  $k$ , está dentro del rango de valores que representan vientos constantes y el parámetro de escala  $c$  está relacionado con la velocidad media diaria.

### Figura 79

*Histograma de frecuencias relativas y la distribución de Weibull – PDF (MLE) para el día 6 de octubre del 2024*



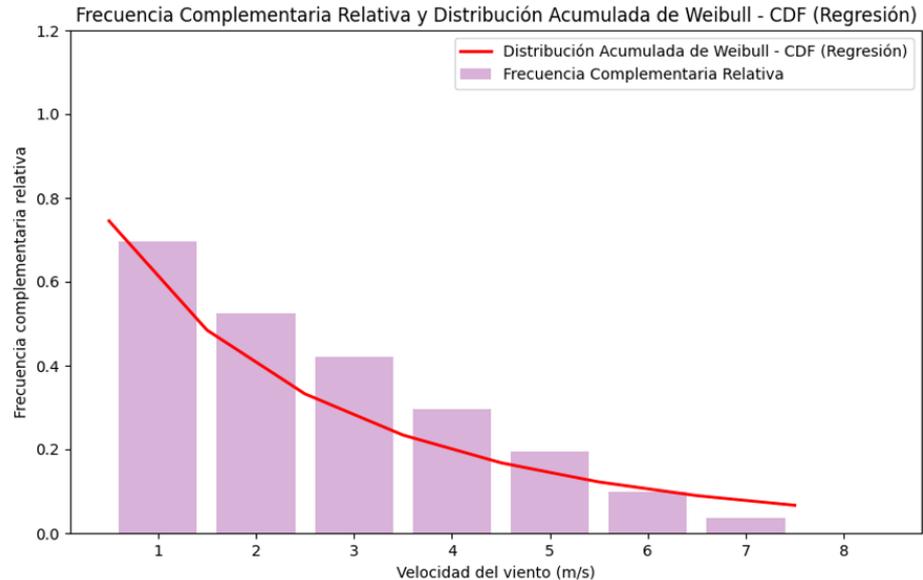
Nota: El gráfico muestra el histograma de frecuencias relativas de la velocidad promedio del viento y la distribución de Weibull – PDF ajustada ( $k = 1.19$ ,  $c = 2.91$ ) obtenida mediante MLE.

En la Figura 79 se presenta un histograma de frecuencias relativas de la velocidad promedio del viento, acompañado de la distribución de Weibull – PDF (MLE). El histograma de frecuencias relativas, representado en azul, muestra la distribución de las velocidades del viento registradas, mientras que la curva roja ilustra el ajuste de la distribución Weibull - PDF, obtenido mediante el método de máxima verosimilitud (MLE). Se observa que los parámetros de forma  $k$  y escala  $c$  obtenidos a través de este método presentan un ajuste significativamente mejor en comparación con los parámetros obtenidos mediante regresión lineal.

## Figura 80

*Frecuencia complementaria relativa y distribución acumulada de*

*Weibull – CDF (Regresión) para el día 6 de octubre del 2024*



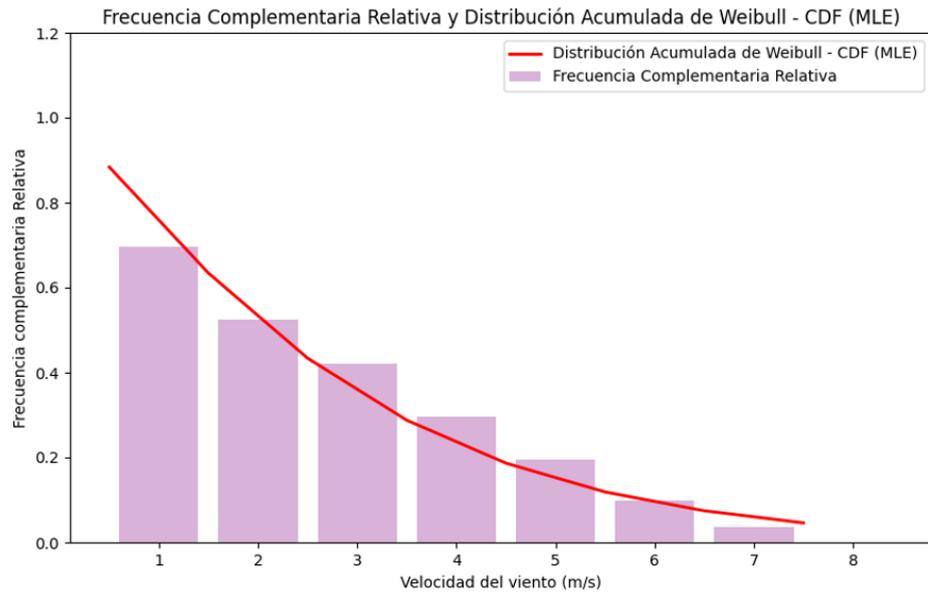
Nota: El gráfico muestra la frecuencia complementaria relativa y distribución acumulada de Weibull – CDF ajustada por regresión.

En la Figura 80 se muestra cómo la distribución acumulada de Weibull ajustada (línea roja) obtenido por el método de la regresión, se adapta a los datos de la frecuencia complementaria relativa de la velocidad del viento. El modelo de Weibull se ajusta bien a la tendencia general de los datos, especialmente en las velocidades más bajas, lo que sugiere que es un buen modelo para describir la distribución del viento en esta área. Sin embargo, se observa que, a velocidades más altas, el ajuste no es tan preciso, indicando que podría haber una ligera discrepancia entre el modelo y los datos en esas regiones.

### Figura 81

*Frecuencia complementaria relativa y distribución acumulada de Weibull*

*– CDF (MLE) para el día 6 de octubre del 2024*

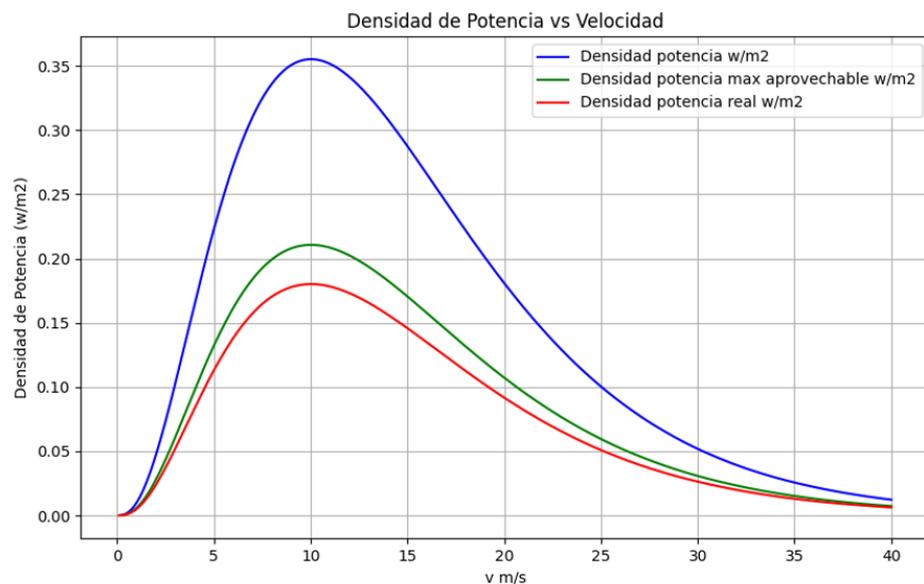


Nota: El gráfico muestra la frecuencia complementaria relativa y distribución acumulada de Weibull – CDF ajustada por MLE.

En la Figura 81 se observó que la distribución acumulada de Weibull – CDF ajustada (línea roja) obtenido por el método de MLE, sigue de manera general la tendencia de los datos representados por las barras, que muestran la frecuencia complementaria relativa acumulada. El ajuste parece ser bastante preciso en las velocidades bajas y moderadas (entre 0 y 6 m/s), pero en las velocidades más altas (por encima de 6 m/s), se observa una leve discrepancia, ya que el modelo Weibull tiende a subestimar ligeramente la frecuencia relativa acumulada en esa región. Esto sugiere que, aunque el modelo Weibull captura bien la tendencia general, podría no representar con total precisión los extremos superiores de la distribución de velocidad del viento.

## Figura 82

*Las densidades de potencia eólica para el día 6 de octubre del 2024*



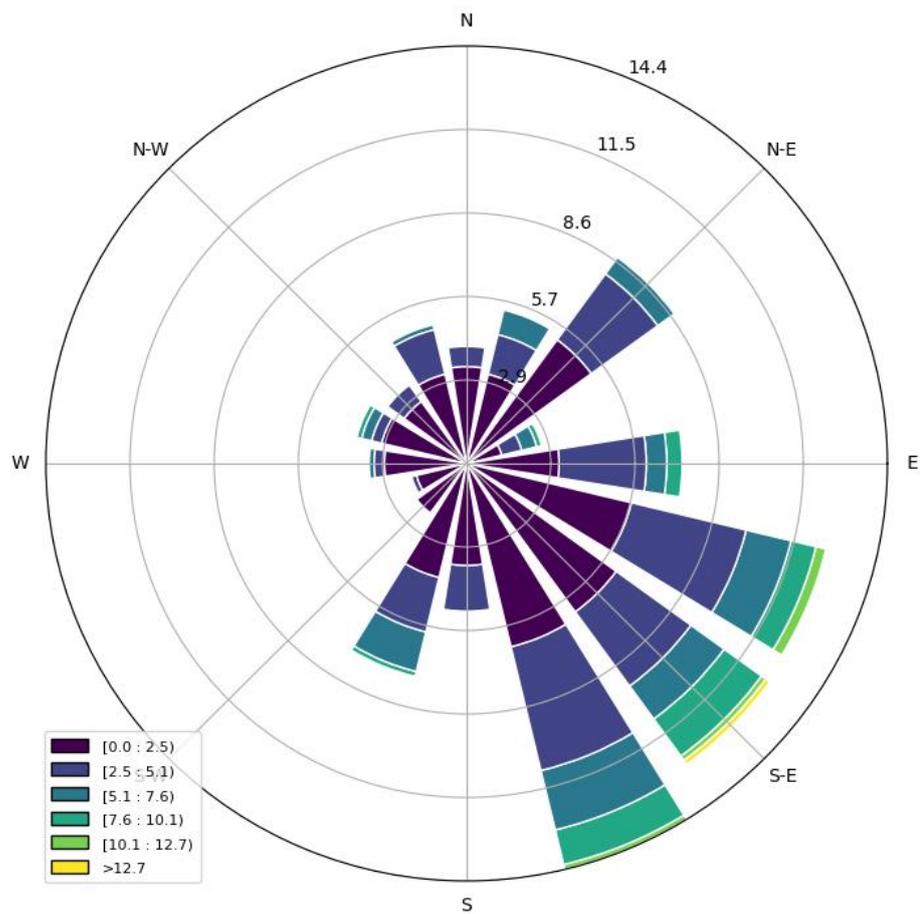
Nota: El gráfico muestra la densidad de potencia teórica, máxima aprovechable y real en función de la velocidad del viento.

La Figura 82 se muestra la densidad de potencia del viento  $w/m^2$  en función de la velocidad del viento en  $m/s$  para tres escenarios: teórica (azul), máxima aprovechable según el límite de Betz (verde) y real considerando pérdidas (roja).

Figura 83 se muestra la rosa de vientos generada a partir de los datos registrados por el Nodo 2, ubicado a las afueras de la ciudad de Puno, aproximadamente en el kilómetro 8 de la Panamericana Sur, rumbo a la ciudad de Ilave, se observa que los vientos predominantes provienen del sureste (SE), este-sureste (ESE) y sur-sureste (SSE). En menor porcentaje, también se registran vientos provenientes del noreste (NE).

**Figura 83**

*La rosa del viento para el día 6 de octubre del 2024*



Nota: El gráfico muestra la distribución de la velocidad del viento según su dirección, representada en una rosa de vientos.

#### 4.1.3.3. Resumen de resultados para el Nodo 1 y el Nodo 2

Resumen de resultados del Nodo 1, donde el parámetro de forma  $k$  y escala  $c$  se determinaron mediante el método de regresión lineal y máxima verosimilitud (MLE), además la densidad del aire se calculó a partir del promedio de la temperatura, humedad y presión atmosférica, y con estos parámetros se estimaron las tres densidades de potencia correspondientes para el día evaluado.

**Tabla 13**

*Resumen de resultados del Nodo 1*

	01_10_24	02_10_24	03_10_24	04_10_24	05_10_24
c (Regresión)	2.295	2.533	2.208	2.644	2.73
k (Regresión)	1.029	1.2	0.891	0.952	1.099
Potencia Total (Regresión)	25.131	21.151	40.728	52.489	34.400
Potencia Máxima Aprovechable (Regresión)	14.903	12.543	24.152	31.126	20.399
Potencia Real (Regresión)	12.742	10.724	20.650	26.613	17.441
Energía Incidente (Regresión kWh)	0.603	0.508	0.977	1.260	0.826
Energía Máxima Aprovechable (Regresión kWh)	0.358	0.301	0.580	0.747	0.490
Energía Real (Regresión kWh)	0.306	0.257	0.496	0.639	0.419
c (MLE)	3.040	3.247	3.041	3.433	3.644
k (MLE)	1.317	1.617	1.148	1.070	1.328
Potencia Total (MLE)	28.428	23.541	41.485	74.450	48.715
Potencia Máxima Aprovechable (MLE)	16.858	13.960	24.601	44.149	28.888
Potencia Real (MLE)	14.414	11.936	21.034	37.747	24.699
Energía Incidente (MLE kWh)	0.682	0.565	0.996	1.787	1.169
Energía Máxima Aprovechable (MLE kWh)	0.405	0.335	0.590	1.060	0.693
Energía Real (MLE kWh)	0.346	0.286	0.505	0.906	0.593
Promedio Temperatura	15.528	11.146	11.771	12.444	12.001
Promedio Humedad	42.902	77.817	70.090	56.583	57.678
Promedio Presión (Pa)	64166.299	64225.067	64279.880	64374.275	64392.113
Densidad del Aire	0.771	0.782	0.781	0.781	0.783

Nota: Esta tabla resume todos los resultados obtenidos en el nodo 1 desde el primero al cinco de octubre.

Resumen de resultados del Nodo 2, donde el parámetro de forma  $k$  y escala  $c$  se determinaron mediante el método de regresión lineal y máxima verosimilitud (MLE), además la densidad del aire se calculó a partir del promedio de la temperatura, humedad y presión atmosférica, y

con estos parámetros se estimaron las tres densidades de potencia correspondientes para el día evaluado.

**Tabla 14**

*Resumen de resultados del Nodo 2*

	01_10_24	02_10_24	03_10_24	04_10_24	05_10_24
c (Regresión)	1.942	2.349	1.621	2.404	2.465
k (Regresión)	0.876	0.951	0.792	0.984	1.323
Potencia Total (Regresión)	29.878	36.772	29.342	34.776	15.215
Potencia Máxima Aprovechable (Regresión)	17.718	21.806	17.400	20.622	9.023
Potencia Real (Regresión)	15.149	18.644	14.877	17.632	7.714
Energía Incidente (Regresión kWh)	0.717	0.883	0.704	0.835	0.365
Energía Máxima Aprovechable (Regresión kWh)	0.425	0.523	0.418	0.495	0.217
Energía Real (Regresión kWh)	0.364	0.447	0.357	0.423	0.185
c (MLE)	2.678	3.100	2.375	3.244	3.398
k (MLE)	1.103	1.294	1.011	1.100	1.624
Potencia Total (MLE)	31.854	31.595	30.229	57.686	26.807
Potencia Máxima Aprovechable (MLE)	18.889	18.736	17.926	34.208	15.897
Potencia Real (MLE)	16.150	16.019	15.326	29.248	13.592
Energía Incidente (MLE kWh)	0.764	0.758	0.725	1.384	0.643
Energía Máxima Aprovechable (MLE kWh)	0.453	0.450	0.430	0.821	0.382
Energía Real (MLE kWh)	0.388	0.384	0.368	0.702	0.326
Promedio Temperatura	15.271	15.415	12.891	13.355	13.969
Promedio Humedad	43.623	50.060	65.586	54.268	48.832
Promedio Presión (Pa)	64,605.722	64,576.165	64,748.187	64,838.151	64,852.552
Densidad del Aire	0.777	0.776	0.784	0.785	0.783

Nota: Esta tabla resume todos los resultados obtenidos en el nodo 2 desde el primero al cinco de octubre.



#### 4.1.3.4. Discusión

En el presente proyecto, se ha implementado una solución integral para la automatización del análisis estadístico de la distribución de Weibull, la estimación del recurso eólico y la rosa de los vientos, utilizando herramientas gratuitas de Google como Google Colab, Google Sheets y Google Drive. Esta integración permite un flujo de trabajo eficiente, ya que Google Colab tiene acceso directo a Google Drive y Google Sheets, lo que facilita la automatización de cálculos sin necesidad de cargar archivos manualmente. Gracias a Google Colab, que emplea el lenguaje de programación Python y sus poderosas librerías, se pueden procesar grandes volúmenes de datos rápidamente, generando gráficos y reportes en la nube. Este sistema no solo agiliza los cálculos necesarios para determinar la energía eólica disponible, sino que también permite generar informes detallados sobre el comportamiento del viento en los puntos de monitoreo. En este contexto, el estudio de Mejía (2020), “Desarrollo de soluciones de monitoreo remoto para recursos eólicos utilizando la técnica SODAR”, subraya la relevancia de la disponibilidad remota de datos, alineándose con el concepto del Internet de las Cosas (IoT). En su trabajo, Mejía destaca el uso de Google Sheets y Python para el monitoreo en tiempo real, permitiendo el acceso remoto desde cualquier ubicación. Nuestro proyecto, al integrar estas herramientas, no solo optimiza la automatización de cálculos repetitivos, sino que también facilita la generación de gráficos avanzados y reportes, con la ventaja adicional de un acceso remoto completo desde cualquier dispositivo con conexión a



internet, lo que asegura un monitoreo continuo y detallado de los parámetros eólicos.

#### **4.1.4. Comparativa de datos medidos por el nodo 1 y 2, NASA y SENAMHI**

Los datos registrados por el Nodo 1 incluyen mediciones de la velocidad del viento tomadas cada segundo durante 150 segundos. Al finalizar cada intervalo, se calculaba el promedio, que se enviaba junto con otros parámetros del viento al sistema LoRaWAN para su almacenamiento. Posteriormente, se calculó el promedio por hora para compararlo con los datos proporcionados por la NASA y el SENAMHI, ya que ambas fuentes publican información horaria en sus páginas web.

Para los datos de la NASA, se utilizó la velocidad del viento a 50 metros de altura, considerando la ubicación del Nodo 1 en coordenadas UTM, las cuales se convirtieron a latitud y longitud para hacerlas compatibles con el sistema de la NASA. Estos datos se extrajeron automáticamente mediante la API de la NASA en Google Colab y se almacenaron diariamente en Google Drive como archivos de Google Sheets.

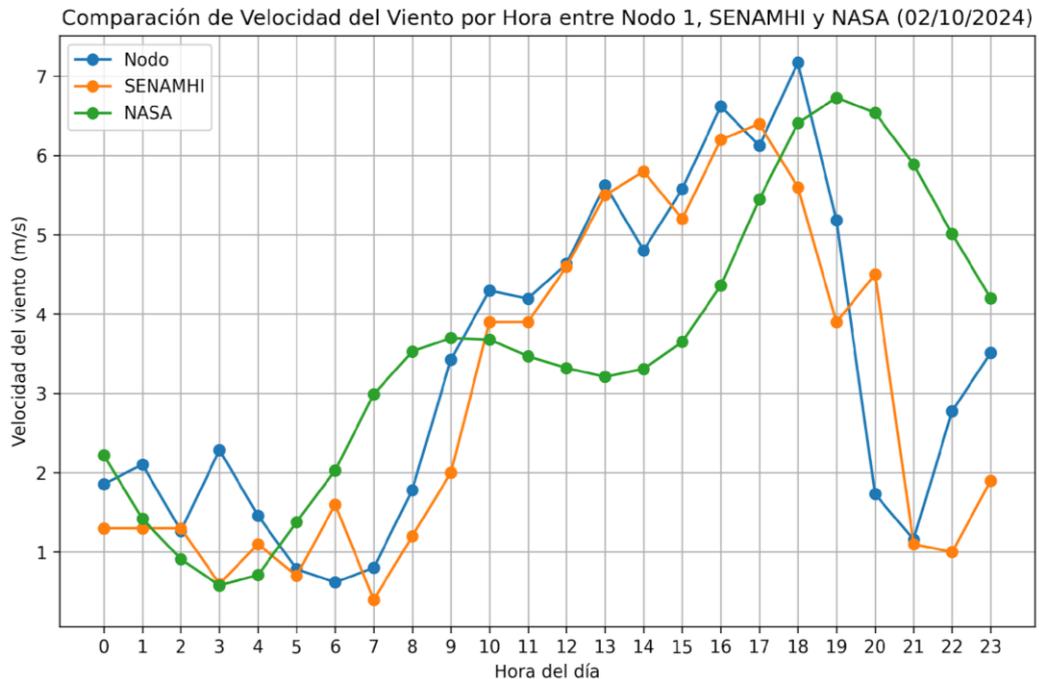
En el caso del SENAMHI, se consideró la estación más cercana al edificio de 15 pisos de la UNAP, ubicada en Puno, con las siguientes coordenadas: Latitud: 15°49'34.5" S, Longitud: 70°0'43.5" W, Código: 472DD33A. Aproximadamente el anemómetro del SENAMHI está ubicado a 15 metros del nivel del suelo.

En el siguiente grafico se hace una comparativa para un día de los datos medidos por el Nodo 1, NASA y SENAMHI.

## Figura 84

*Comparativa de la velocidad del viento por Hora entre Nodo 1, SENAMHI Y*

*NASA*



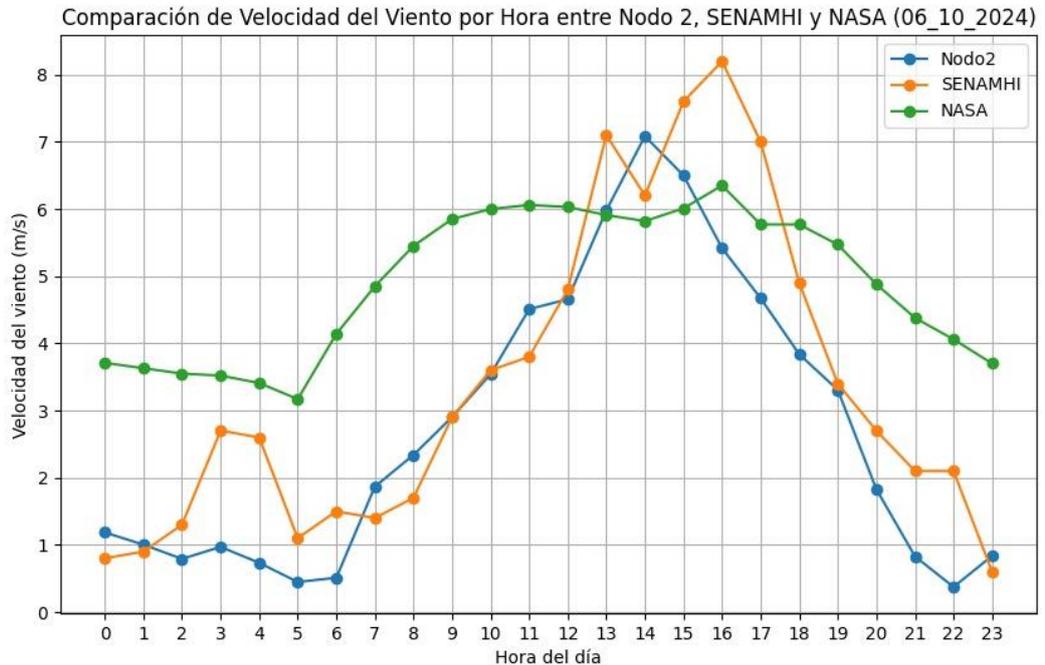
Nota: La velocidad medida por el Nodo 1 y promediada por hora sigue un patrón similar al de los datos registrados por el SENAMHI. Sin embargo, los datos de la NASA muestran mayor variación en comparación con los obtenidos por el Nodo 1. A pesar de estas diferencias, los tres conjuntos de datos siguen un mismo patrón general, como se muestra en la figura.

En la Figura 83 se presenta una comparación de los datos de velocidad del viento obtenidos de tres fuentes: NASA, SENAMHI y el Nodo 1. Los datos proporcionados por NASA y SENAMHI corresponden a velocidades horarias del viento en m/s, mientras que en nuestro sistema (Nodo 1) la velocidad del viento se registró cada segundo. Para facilitar la comparación, los datos del Nodo 1 se promediaron para obtener velocidades horarias, resultando en 24 valores por día para cada fuente. De esta comparación se observa que los datos del SENAMHI son los que más se aproximan a las mediciones del Nodo 1, mientras que los valores reportados por NASA muestran una mayor discrepancia en relación con los datos del Nodo 1.

## Figura 85

Comparativa de la velocidad del viento por Hora entre Nodo 2, SENAMHI Y

NASA



Nota: La velocidad medida por el Nodo 2 y promediada por hora sigue un patrón similar al de los datos registrados por el SENAMHI. Sin embargo, los datos de la NASA muestran mayor variación en comparación con los obtenidos por el Nodo 2. A pesar de estas diferencias, los tres conjuntos de datos siguen un mismo patrón general, como se muestra en la figura.

### 4.1.4.1. Discusión

El estudio de Hinojosa et al. (2024) destaca que los datos proporcionados por la NASA son más confiables que los del SENAMHI para caracterizar el recurso eólico. En la Figura 84 se presenta una comparación de la velocidad del viento en un día, considerando el Nodo 1, el SENAMHI y la NASA. Se observa que tanto el Nodo 1 como el SENAMHI exhiben un comportamiento similar en la velocidad del viento, mientras que los datos del Nodo 1 y la NASA muestran una mayor variabilidad. Es importante señalar que, aunque tanto la NASA como el SENAMHI proporcionan datos horarios sobre la velocidad del viento,



Villarrubia (2012) señala que este nivel de resolución no es suficiente para evaluar con precisión el potencial eólico. Según este autor, se recomienda que el periodo de medición no exceda los 5 a 10 segundos para la evaluación del potencial eólico, y que, en estudios de viabilidad para la instalación de parques eólicos, las mediciones se realicen cada segundo para garantizar una mayor precisión en los resultados. En este contexto, el sistema de monitoreo IoT basado en LoRaWAN, implementado en este proyecto, supera dichas limitaciones al registrar datos en tiempo real con una frecuencia de un segundo. Esto permite estimar con alta precisión el recurso eólico disponible.



## V. CONCLUSIONES

**PRIMERA:** La implementación del sistema de monitoreo con IoT LoRaWAN en Puno fue exitosa, permitiendo registrar en tiempo real la velocidad y dirección del viento, así como la temperatura, humedad y presión atmosférica en los dos puntos donde se instalaron los Nodos 1 y 2. El Nodo 1, ubicado a 1.86 km del Gateway, y el Nodo 2, a 7.12 km, mantuvieron una comunicación estable. Esto se logró utilizando modulación LoRa SF7, con un ancho de banda de 125 kHz (BW125), un SNR de 7 a 11 dB y un RSSI entre -92 y -102 dBm, logrando una tasa mínima de pérdida de datos del 0.87%. Además de la potencia de transmisión y la sensibilidad del receptor en los nodos y el Gateway, es fundamental ubicar el Gateway en la posición más elevada posible y garantizar una línea de visión directa hacia los nodos, sin interferencias, para asegurar una comunicación confiable. El sistema de monitoreo con IoT LoRaWAN es confiable y robusto, lo que lo convierte en una solución ideal para el entorno geográfico de Puno, permitiendo un monitoreo eficiente de todos los parámetros del viento en zonas de interés.

**SEGUNDA:** La integración de la plataforma ThingSpeak para el almacenamiento y visualización en tiempo real de los parámetros del viento demostró ser una solución efectiva y eficiente dentro del sistema de monitoreo IoT LoRaWAN implementado en este proyecto. El uso de Webhooks para enlazar los datos recolectados desde The Things Network con ThingSpeak permitió un monitoreo constante y detallado, brindando la capacidad de visualizar y analizar en tiempo real la información proveniente de los nodos de medición.



- TERCERA:** La automatización del análisis estadístico de la distribución de Weibull utilizando Google Colab, Google Drive y Google Sheets permitió agilizar y simplificar el procesamiento de datos del viento, generando informes y gráficos de manera automática y eficiente. Esta integración permitió cálculos rápidos, acceso en tiempo real y una estimación más eficiente del recurso eólico, convirtiéndose en una herramienta práctica para el monitoreo continuo y detallado de los parámetros del viento.
- CUARTA:** La potencia eólica estimada del 1 al 5 de octubre con los datos del Nodo 1 fue de 0.306, 0.257, 0.496, 0.639 y 0.419 kWh, respectivamente. Para los datos registrados por el Nodo 2, la potencia eólica estimada fue de 0.364, 0.447, 0.357, 0.423 y 0.185 kWh. Con la información analizada, no es posible determinar con certeza si existe un potencial eólico significativo en esos dos puntos de monitoreo, ya que se requiere un registro continuo de al menos un año para obtener una evaluación confiable.
- QUINTA:** A partir de los datos analizados de los parámetros del viento y la densidad del aire, se concluye que la velocidad del viento aumenta a medida que la presión atmosférica y la humedad disminuyen, mientras la temperatura sube. Los vientos más intensos se producen cuando la presión y la humedad alcanzan sus niveles más bajos, y la temperatura alcanza sus niveles más altos. De manera similar, la densidad del aire disminuye progresivamente cuando la temperatura aumenta y la humedad disminuye, alcanzando su valor mínimo cuando tanto la humedad como la presión se encuentran en sus niveles más bajos, y la temperatura está en sus niveles más altos.



**SEXTA:** Los datos proporcionados por la NASA y el SENAMHI ofrecen mediciones horarias de la velocidad del viento; sin embargo, este nivel de resolución no es suficiente para evaluar con precisión el potencial eólico. En este sentido, el sistema de monitoreo IoT LoRaWAN, implementado en el proyecto, mejora significativamente esta situación al registrar datos en tiempo real con una frecuencia de un segundo. Permitiendo obtener estimaciones más precisas del recurso eólico disponible.



## VI. RECOMENDACIONES

- PRIMERA:** Se plantea la expansión del sistema de monitoreo IoT LoRaWAN en diversas zonas de interés en Puno, con el objetivo de obtener datos más detallados sobre el comportamiento del viento. Esta iniciativa permitiría una evaluación más precisa del recurso eólico y facilitaría la identificación de ubicaciones óptimas para el desarrollo de proyectos de energías eólico.
- SEGUNDA:** Se recomienda la automatización avanzada del análisis del viento mediante la implementación de modelos predictivos basados en datos históricos. Estos modelos permitirán estimar el comportamiento futuro del viento, facilitando así una toma de decisiones más informada y eficiente para el desarrollo de proyectos energéticos.
- TERCERA:** Se recomienda implementar sistemas adicionales de monitoreo IoT LoRaWAN para medir variables como la radiación solar, el caudal de los ríos, la temperatura de la superficie terrestre, entre otras. Esta integración permitiría no solo obtener datos precisos y en tiempo real, sino también optimizar el análisis y la estimación del potencial energético de las fuentes renovables, aprovechando la conectividad y la capacidad de análisis remoto que ofrece IoT para una toma de decisiones más eficiente y basada en datos.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abosata, N., Al-Rubaye, S., Inalhan, G., & Emmanouilidis, C. (2021). Internet of Things for System Integrity: A Comprehensive Survey on Security, Attacks and Countermeasures for Industrial Applications. *Sensors*, 21(11), 3654. <https://doi.org/10.3390/s21113654>
- Aguilar, S. (2020). Diseño de una solución basada en el Internet de las Cosas (IoT) empleando LoRaWAN para el monitoreo de cultivos agrícolas en Perú [Tesis para optar el título de ingeniero, Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones]. <https://hdl.handle.net/20.500.12867/2946>
- Arduino. (s.f.). *Arduino*. Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://www.arduino.cc>
- BigShop Perú. (s.f.). *Panel Solar Carga Directa Bossney 18W*. Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://bigshop.pe/producto/panel-solar-carga-directa-bossney-18w/>
- Bor, M., & Roedig, U. (2017). LoRa Transmission Parameter Selection. *2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*. 2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Lancaster, UK. <https://doi.org/10.1109/DCOSS.2017.10>
- Bosch Sensortec. (s.f.). *Humidity Sensor BME280*. Bosch Sensortec. Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/>
- Brower, M., Bailey, B., Beaucage, P., Bernadett, D., Doane, J., Eberhard, M., Elsholz, K., Filippelli, M., Hale, E., Markus, M., Ryan, D., Taylor, M., & Tensen, J. (Eds.). (2012). *Wind resource assessment a practical guide to developing a wind project*. John Wiley & Sons, Inc.
- Chaudhari, B. S., & Zennaro, M. (2020). *LPWAN technologies for IoT and M2M applications*. Elsevier Science & Technology.
- Coudé, R. (s.f.). *Radio Mobile WEB Site*. Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://www.ve2dbe.com/>



- Creus Solé, A. (2008). *Aerogeneradores* (1a ed.). Cano Pina S.L.
- Dávila, J., Aguilar, R., Ruiz, J., Parra-Michel, J., & Martínez-Peláez, R. (2018). Gaszen: Plataforma para monitorizar el nivel de gas L.P. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 6(35).
- Dragino Wiki. (s.f.). *LPS8N - LoRaWAN Gateway User Manual*. Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://wiki.dragino.com/xwiki/bin/view/Main/User%20Manual%20for%20All%20Gateway%20models/LPS8N%20-%20LoRaWAN%20Gateway%20User%20Manual/#H5.4A0MQTTSettings>
- Earnest, J., & Rachel, S. (2019). *Wind Power Technology* (3a ed.). PHI Learning Private Limited.
- Espressif Systems. (s.f.). *ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SoC*. Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
- Google. (s.f.). *Google Colab*. Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://colab.google/>
- Google. (s.f.-b). *Google Earth*. <https://earth.google.com/>
- Guzmán, G. (2021). Sistema basado en internet de las cosas para el monitoreo del ganado vacuno usando una red LoRaWAN [Tesis para optar el título de ingeniero, Pontificia Universidad Javeriana].
- Hernández, R., & Mendoza, C. P. (2014). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (6a ed.). McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Hinojosa, J., Mamani, J., Apaza, W., Pacheco, O., Pacheco, L., & Ramos, J. (2024). Desarrollo socioambiental en Puno: Análisis del potencial eólico en la región altiplánica del Perú. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(9), 1-20. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n9-199>
- IoT Analytics. (2024). *Global IoT market forecast (in billions of connected IoT devices)*. IoT Analytics. <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>



- Jimenes, R. (2018). Estudio de viabilidad técnica de un mini parque eólico de 9 kW conectado a la red eléctrica Puno, en el sector de Ventilla Alto Puno— Departamento de Puno [Tesis para optar el título de ingeniero, Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Electrónica y Sistemas]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/9216>
- Jouhari, M., Amhoud, E. M., Saeed, N., & Alouini, M.-S. (2022). A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*. <https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3274934>
- Khan, J., & Yuce, M. (2019). *Internet of Things (IoT): Systems and Applications*. Jenny Stanford Publishing Pte. Ltd.
- Kühnel, C. (2022). Develop and Operate Your LoRaWAN IoT Nodes: Ready-to-use devices and self-built Arduino nodes in The Things Network. Elektor International Media B.V.
- Ledesma, O., Lamo, P., & Fraire, J. A. (2024). Trends in LPWAN Technologies for LEO Satellite Constellations in the NewSpace Context. *Electronics*, 13(579). <https://doi.org/10.3390/electronics13030579>
- Letcher, T. M. (2017). Wind energy engineering: A handbook for onshore and offshore wind turbines (Primera edición). Elsevier/Academic press.
- Lind, D. A., Marchal, W. G., & Wathen, S. A. (2015). *Estadística aplicada a los negocios y la economía* (O. Vizcaino Díaz, P. Silva Velázquez, S. Colón Parrilla, & A. Carrasquillo Sánchez, Trads.; 17<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- LoRa® Alliance Technical Marketing Workgroup. (2015). *Technical Overview of LoRa and LoRaWAN*. Semtech Corporation.
- Manwell, J., McGowan, J., & Rogers, A. (2009). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* (2a ed.). John Wiley & Sons.
- Masache, C. (2022). Diseño y simulación de una red LoRaWAN para el monitoreo de luminarias inteligentes en el campus central de la Universidad Nacional de Loja. Universidad Nacional de Loja.



- Mejía, C. E. (2020). *Development of remote monitoring solutions for wind resources using the SODAR technique* [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey].
- Montagny, S. (2022). *LoRa—LoRaWAN and Internet of Things for Beginners: A Low Power, Long Range, Wireless Technology*. Savoie Mont Blanc University.
- OCDE. (2018). *Manual de Frascati 2015: Guía para la recopilación y presentación de información sobre la investigación y el desarrollo experimental*. OCDE Publishing (traducción en español por la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, FECYT). <https://doi.org/10.1787/9789264310681-es>
- Quispe, K. (2021). *Diseño e implementación de un sistema de comunicación LoRaWAN para la localización de vicuñas en la comunidad Primer Chimpa Jilahuata – Azángaro—Puno* [Tesis para optar el título de ingeniero, Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Electrónica y Sistemas]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/15508>
- RAKwireless. (s.f.). *RAK3272-SiP Breakout Board Datasheet*. Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisDuo/RAK3272-SiP-Breakout-Board/Datasheet/>
- Román, A., Herrera, J., Sandoval, S., Andrade, M., & Ramos, E. (2023). *Internet de las cosas: Teoría y práctica*. Universidad de Colima.
- Romero, L. (2020). *Monitoreo de indicadores durante el transporte de un tanque de leche en comunidades altoandinas aplicando redes LPWAN*. [Tesis para optar el título de ingeniero, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica].
- Sagua, E. (2020). *Diseño e implementación del prototipo de una comunicación LoRa para el monitoreo meteorológico en la bahía del lago Titicaca en la ciudad de Puno* [Tesis para optar el título de ingeniero, Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Electrónica y Sistemas]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/15953>
- Salazar Guerrero, L. J. (2018). *Probabilidad y estadística para bachilleratos tecnológicos* (2<sup>a</sup> ed.). Grupo Editorial Patria.



- Salazar Guerrero, L. J., Bahena Román, H., & Martínez Sánchez, R. (2020). *Probabilidad y Estadística* (Primera edición). Grupo Editorial Patria.
- Seneviratne, P. (2019). *Beginning LoRa Radio Networks with Arduino: Build Long Range, Low Power Wireless IoT Networks* (1a ed.). Apress. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4357-2>
- Soni, V. (2022). *IoT for Beginners: Explore IoT architecture, working principles, IoT devices, and various real IoT projects* (1a ed.). BPB Publications.
- SparkFun Electronics. (s.f.). *SparkFun Weather Meter Kit Arduino Library*. Recuperado 30 de septiembre de 2024, de [https://github.com/sparkfun/SparkFun\\_Weather\\_Meter\\_Kit\\_Arduino\\_Library](https://github.com/sparkfun/SparkFun_Weather_Meter_Kit_Arduino_Library)
- The MathWorks, Inc. (s.f.). *ThingSpeak*. Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://thingspeak.com/>
- The Things Network. (s.f.). *LoRaWAN®. The Things Network*. Recuperado el 30 de septiembre de 2024, de <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>
- Tong, W. (Ed.). (2010). *Wind power generation and wind turbine design*. WIT Press.
- Villa, E., & Morales, I. (2023). *Ciberseguridad IoT y su aplicación en ciudades inteligentes* (1a ed.). Ra-Ma Editorial.
- Villarrubia, M. (2012). *Ingeniería de la energía eólica* (1a ed.). Marcombo S.A.
- Xiaomi Perú. (s.f.). *Xiaomi Mi Redmi Power Bank 20000mAh Negro*. Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://xiaomiperu.com/xiaomi-mi-redmi-power-bank-20000mah-negro>
- Zanakis, S. H., & Kyparisis, J. (1986). A review of maximum likelihood estimation methods for the three-parameter Weibull distribution. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 25(1-2), 53-73. <https://doi.org/10.1080/00949658608810924>



## ANEXOS

### ANEXO 1: Código de programación del Nodo 1 y Nodo 2

```
//Nodo punto 2

// Inclusión de librerías

#include "rak_3172.h" // Librería para el módulo LoRa RAK3172

#include "SparkFun_Weather_Meter_Kit_Arduino_Library.h" // Librería para el anemómetro y veleta

#include <Adafruit_BME280.h> // Librería para el sensor BME280

#include <Wire.h> // Librería para comunicación I2C

// Pines

#define RAK3172_SERIAL_RX 16 // Pin RX del módulo LoRa

#define RAK3172_SERIAL_TX 17 // Pin TX del módulo LoRa

#define SDA_PIN 22 // Pin SDA para la comunicación I2C BME280

#define SCL_PIN 23 // Pin SCL para la comunicación I2C BME280

#define windDirectionPin 35 // Pin para la dirección del viento

#define windSpeedPin 21 // Pin para la velocidad del viento

#define batteryPin 34 // Pin para la lectura del voltaje de la batería

#define LED_PIN 2 // Pin para el LED indicador

#define rainfallPin 26 // Pin para la lluvia

// Configuración LoRaWAN

#define RAK3172_BAUDRATE 115200 // Velocidad de baudios para el módulo LoRa

#define MODO_CONEXION OTAA_CONNECTION // Modo de conexión LoRaWAN

#define CLASE CLASE_A // Clase LoRaWAN

#define BANDA US915 // Banda de frecuencia LoRaWAN

#define DATA_RATE DR0 // Data rate

#define TX_POWER TX0 // Potencia de transmisión

#define DevEui "70B3D57ED0069DA6" // DevEui para la autenticación LoRaWAN

#define AppKey "963554D0D7E84789D35AA3CD424FA83E" // AppKey para la autenticación LoRaWAN

// Variables globales

int data_receive_gateway; // Variable para datos recibidos desde el gateway

char textDebug[128]; // Variable para mensajes de depuración
```



```
char textAux[50]; // Variable auxiliar

//Variables para acumular y contar para el promedio de velocidad
float windSpeedSum = 0.0;
int windSpeedCount = 0;
float windSpeedMax = 0.0;
unsigned long previousMillis = 0;
const long interval = 150000; // Intervalo de 2.5 min

// Inicialización del sensor BME280
Adafruit_BME280 bme;

// Instancia del kit de medición del clima
SFEWeatherMeterKit weatherMeterKit(windDirectionPin, windSpeedPin, rainfallPin);

// Creaciones de funciones auxiliares
// Función para convertir a hexadecimal
void RAK3172_ConvertToTextHexadecimal(char *text, uint8_t *n, uint8_t sizeN);

// Funciones de redondeo
float roundToNearestInteger(float value);
float roundToFirstDecimal(float value);
float roundToSecondDecimal(float value);

//Funciones de lectura de voltaje de batería, acumular, velocidad promedio y máxima velocidad de viento
float readBatteryVoltage();
void acumularDatosViento(float windSpeed);
float calcularPromedioViento();
void actualizarMaxViento(float windSpeed);

// Funciones desarrolladas de funciones auxiliares
// Función para convertir a hexadecimal
void RAK3172_ConvertToTextHexadecimal(char *text, uint8_t *n, uint8_t sizeN) {
    char str_n[32];
    char hexByte[16];
    n += (sizeN - 1);
    memset(str_n, 0, sizeof(str_n));
    memset(hexByte, 0, sizeof(hexByte));
    for (int i = 0; i < sizeN; i++) {
        sprintf(hexByte, "%X", *n);
```



```
if (strlen(hexByte) == 1) {
    sprintf(hexByte, "0%X", *n);
}
strcat(str_n, hexByte);
n--;
}
strcat(str_n, "\0");
strcpy(text, str_n);
}

// Función para redondear al entero más cercano
float roundToNearestInteger(float value) {
    return roundf(value); // Redondea el valor al entero más cercano
}

// Función para redondear al primer decimal
float roundToFirstDecimal(float value) {
    return roundf(value * 10) / 10; // Multiplica el valor por 10, redondea y luego divide por 10 para obtener un decimal
}

// Función para redondear al segundo decimal
float roundToSecondDecimal(float value) {
    return roundf(value * 100) / 100; // Multiplica el valor por 100, redondea y luego divide por 100 para obtener dos decimales
}

// Función para leer el voltaje de la batería
float readBatteryVoltage() {
    int sensorValue = analogRead(batteryPin); // Lee el valor analógico del pin de la batería
    float voltage = sensorValue * (3.3 / 4095.0) * 2.12; // Convierte el valor leído a voltaje
    return voltage; // Devuelve el voltaje de la batería
}

//Función para Acumular Datos
void acumularDatosViento(float windSpeed) {
    windSpeedSum += windSpeed;
    windSpeedCount++;
}
```



```
}  
  
//Función para Calcular Promedio y Reiniciar Variables  
float calcularPromedioViento() {  
    float windSpeedAverage = windSpeedSum / windSpeedCount;  
    windSpeedAverage = roundToSecondDecimal(windSpeedAverage);  
    windSpeedSum = 0.0;  
    windSpeedCount = 0;  
    return windSpeedAverage;  
}  
  
//Función para actualizar la máxima velocidad  
void actualizarMaxViento(float windSpeed) {  
    if (windSpeed > windSpeedMax) {  
        windSpeedMax = windSpeed;  
    }  
}  
  
// Configuración inicial  
void setup() {  
    // Configuración de comunicación serial  
    Serial.begin(115200); // Iniciar comunicación serial con velocidad de 115200 baudios  
    Serial2.begin(RAK3172_BAUDRATE, SERIAL_8N1, RAK3172_SERIAL_RX,  
    RAK3172_SERIAL_TX); // Iniciar comunicación serial con el módulo LoRa  
    // Configuración del pin del LED  
    pinMode(LED_PIN, OUTPUT); // Configurar el pin del LED como salida  
    digitalWrite(LED_PIN, LOW); // Apagar el LED  
    // Inicialización del sensor BME280  
    Wire.begin(SDA_PIN, SCL_PIN); // Iniciar comunicación I2C  
    if (!bme.begin(0x76)) { // Verificar la conexión con el sensor BME280  
        Serial.println("¡No se pudo encontrar un sensor BME280 válido, revisa la conexión!");  
        while (1);  
    }  
    Serial.println("¡Sensor BME280 inicializado correctamente!");  
    // Inicialización del kit anemómetro y veleta  
    weatherMeterKit.begin();
```



```
delay(3000);

Serial.println("Iniciando sistema");

while (!RAK3172_Init()) {

  Serial.println("RAK3172 Inicializado...\r\n");

  delay(1000);

}

Serial.println("RAK3172 rebooted !\r\n");

// Inicio de la conexion con el gateway

// Configuracion del DEVUI, APPKEY y otros parametros para la comunicaci3n LoRaWAN

while (!RAK3172_LoraWanSet(DevEui, AppKey, CLASE_A, OTAA_CONECTION, BANDA,
DATA_RATE, TX_POWER)) {

  Serial.println("RAK3172 seteando...\r\n");

  delay(1000);

}

Serial.println("RAK3172 seteado para LoRa WAN !\r\n");

while (true) {

  Serial.println("RAK3172 conectado...\r\n");

  delay(1000);

  // RAK3172_LoraWanJoin(intervalo de reintentos para unirse al gateway(segundos), numero de
intentos)

  if (RAK3172_LoraWanJoin(15, 3)) {

    Serial.println("RAK3172 conectado al Gateway !\r\n");

    break;

  }

}

digitalWrite(LED_PIN, HIGH);

delay(250);

digitalWrite(LED_PIN, LOW);

delay(250);

}

void loop() {

  //Control de tiempos

  static unsigned long nextSendTime = millis() + interval; // 2.5 minutos desde el inicio
```



```
static unsigned long lastMillis = millis();

// Adquiriendo datos de los sensores

float windSpeed = weatherMeterKit.getWindSpeed() / 3.6; // Convertir km/h a m/s

float windDirection = weatherMeterKit.getWindDirection();

float temp = bme.readTemperature();

float humi = bme.readHumidity();

float press = bme.readPressure() / 100; // Convertir a hPa

float batteryVoltage = readBatteryVoltage();

//Actualizadores de acumulador y maxima velocidad

acumularDatosViento(windSpeed);

actualizarMaxViento(windSpeed);

// Acumular datos de viento en variables

//windSpeedSum += windSpeed;

//windSpeedCount++; // Variables para gestionar el tiempo de espera usando millis()

unsigned long currentMillis = millis();

if (currentMillis >= nextSendTime) {

    float windSpeedAverage = calcularPromedioViento();

    // Redondear datos de los sensores

    windSpeed = roundToSecondDecimal(windSpeed);

    windDirection = roundToSecondDecimal(windDirection);

    temp = roundToSecondDecimal(temp);

    humi = roundToNearestInteger(humi);

    press = roundToFirstDecimal(press);

    batteryVoltage = roundToSecondDecimal(batteryVoltage);

    windSpeedAverage = roundToSecondDecimal(windSpeedAverage);

    windSpeedMax = roundToSecondDecimal(windSpeedMax);

    // Conversión de valores a enteros

    uint16_t windSpeed2 = windSpeed * 100;

    uint16_t windDirection2 = windDirection * 100;

    int16_t temp2 = (int16_t)(temp * 100); // Cambiado a int16_t para manejar valores negativos

    uint16_t humi2 = humi * 100;

    uint16_t press2 = press * 10;

    uint16_t batteryVoltage2 = batteryVoltage * 100;
```



```
uint16_t windSpeedAverage2 = windSpeedAverage * 100;

uint16_t windSpeedMax2 = windSpeedMax * 100;

Serial.println();

Serial.println("===== start print =====");

Serial.print("wind speed (unit mps):   "); Serial.println(windSpeed);

Serial.print("wind direction (unit degrees): "); Serial.println(windDirection);

Serial.print("temperature (unit Celsius): "); Serial.println(temp);

Serial.print("humidity (unit percent):   "); Serial.println(humi);

Serial.print("pressure (unit hpa):         "); Serial.println(press);

Serial.print("battery voltage (unit V): "); Serial.println(batteryVoltage);

Serial.print("wind speedAverage (unit mps): "); Serial.println(windSpeedAverage);

Serial.print("wind speedMax (unit mps): "); Serial.println(windSpeedMax);

Serial.println("===== end print =====");

Serial.println(); */// Inicializar el array textDebug antes de concatenar
memset(textDebug, 0, sizeof(textDebug));

// Construir la cadena hexadecimal para enviar
RAK3172_ConvertToTextHexadecimal(textAux, (uint8_t*)&windSpeed2, sizeof(uint16_t));
strcat(textDebug, textAux);

RAK3172_ConvertToTextHexadecimal(textAux, (uint8_t*)&windDirection2, sizeof(uint16_t));
strcat(textDebug, textAux);

RAK3172_ConvertToTextHexadecimal(textAux, (uint8_t*)&temp2, sizeof(int16_t)); // Cambiado a
int16_t
strcat(textDebug, textAux);

RAK3172_ConvertToTextHexadecimal(textAux, (uint8_t*)&humi2, sizeof(uint16_t));
strcat(textDebug, textAux);

RAK3172_ConvertToTextHexadecimal(textAux, (uint8_t*)&press2, sizeof(uint16_t));
strcat(textDebug, textAux);

RAK3172_ConvertToTextHexadecimal(textAux, (uint8_t*)&batteryVoltage2, sizeof(uint16_t));
strcat(textDebug, textAux);

RAK3172_ConvertToTextHexadecimal(textAux, (uint8_t*)&windSpeedAverage2, sizeof(uint16_t));
strcat(textDebug, textAux);

RAK3172_ConvertToTextHexadecimal(textAux, (uint8_t*)&windSpeedMax2, sizeof(uint16_t));
strcat(textDebug, textAux);
```



```
    sprintf(textDebug, "%04X%04X%04X%04X%04X%04X%04X%04X", windSpeed2, windDirection2,  
(uint16_t)temp2, humi2, press2, batteryVoltage2, windSpeedAverage2, windSpeedMax2);
```

```
    // RAK3172_LoraWanSend(puerto, payload, intentos, tiempo(milisegundos))  
    if (RAK3172_LoraWanSend(2, textDebug, 3, 2000)) {  
        //delay(50);  
        //Serial.println("Enviado al Gateway !\r\n");  
        digitalWrite(LED_PIN, HIGH);  
        delay(250);  
        digitalWrite(LED_PIN, LOW);  
        delay(250);  
        //Serial.println("Fin de la transmisión");  
        //delay(50); }  
        windSpeedSum = 0.0;  
        windSpeedCount = 0;  
        windSpeedMax = 0.0;  
        // Actualizar el tiempo del próximo envío  
        nextSendTime = currentMillis + interval;  
        //Serial.println("Entrando al modo reposo 2.5 min"); }  
        //Serial.println();  
        //Serial.print("Velocidad del segundo: ");  
        //Serial.print(windSpeed);  
        //Serial.print(" m/s, Contador del segundo: ");  
        //Serial.print(windSpeedCount);  
        //Serial.print(", Acumulado del segundo: ");  
        //Serial.print(windSpeedSum);  
        //Serial.print("Velocidad mas alto actual: ");  
        //Serial.print(windSpeedMax);  
        //Serial.println();  
        if (currentMillis - lastMillis >= 1000) {  
            lastMillis = currentMillis; // Código a ejecutar cada segundo  
        }  
    }  
}
```



## ANEXO 2: Código de programación del Payload Formatters

```
function Decoder(bytes, port) {  
  
    // Convertir los bytes a una cadena hexadecimal  
  
    var hexString = bytes.map(function(byte) {  
  
        return ('0' + (byte & 0xFF).toString(16)).slice(-2);  
  
    }).join("");  
  
    // Separar la cadena hexadecimal en grupos de 4 caracteres cada uno (8 fields)  
  
    var Field1Hex = hexString.substring(0, 4).padStart(4, '0'); // Velocidad del viento en m/s  
  
    var Field2Hex = hexString.substring(4, 8).padStart(4, '0'); // Dirección del viento en grados  
  
    var Field3Hex = hexString.substring(8, 12).padStart(4, '0'); // Temperatura en grados Celsius  
  
    var Field4Hex = hexString.substring(12, 16).padStart(4, '0'); // Humedad en porcentaje  
  
    var Field5Hex = hexString.substring(16, 20).padStart(4, '0'); // Presión en hPa  
  
    var Field6Hex = hexString.substring(20, 24).padStart(4, '0'); // Voltaje de la batería en voltios  
  
    var Field7Hex = hexString.substring(24, 28).padStart(4, '0'); // Velocidad promedio del viento en m/s  
  
    var Field8Hex = hexString.substring(28, 32).padStart(4, '0'); // Velocidad máxima del viento en m/s  
  
    // Convertir la temperatura considerando valores negativos  
  
    var tempInt = parseInt(Field3Hex, 16);  
  
    if (tempInt & 0x8000) { // Si el número es negativo  
  
        tempInt = tempInt - 0x10000; // Convertir a negativo usando complemento a 2  
  
    }  
  
    // Convertir cada grupo de hexadecimal a decimal  
  
    var field1 = parseInt(Field1Hex, 16) / 100.0; // Velocidad del viento en m/s  
  
    var field2 = parseInt(Field2Hex, 16) / 100.0; // Dirección del viento en grados  
  
    var field3 = tempInt / 100.0; // Temperatura en grados Celsius  
  
    var field4 = parseInt(Field4Hex, 16) / 100.0; // Humedad en porcentaje
```



```
var field5 = parseInt(Field5Hex, 16) / 10.0; // Presión en hPa

var field6 = parseInt(Field6Hex, 16) / 100.0; // Voltaje de la batería en voltios

var field7 = parseInt(Field7Hex, 16) / 100.0; // Velocidad promedio del viento en m/s

var field8 = parseInt(Field8Hex, 16) / 100.0; // Velocidad máxima del viento en m/s

// Devolver los valores decodificados

return {

  field1: field1, // Velocidad del viento en m/s

  field2: field2, // Dirección del viento en grados

  field3: field3, // Temperatura en °C

  field4: field4, // Humedad en %

  field5: field5, // Presión en hPa

  field6: field6, // Voltaje de la batería en V

  field7: field7, // Velocidad promedio del viento en m/s

  field8: field8 // Velocidad máxima del viento en m/s

};

}
```

### ANEXO 3: Conexión de componentes del Nodo 1 y Nodo 2



## ANEXO 4: Matriz de consistencia del presente proyecto de investigación

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES
<b>Problema general</b>	<b>Objetivo general</b>	<b>Hipótesis general</b>	<b>V. Independiente</b>
¿Como implementar un sistema de monitoreo en tiempo real en Puno para estimar el recurso eólico en zonas de interés?	Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real de los parámetros del viento con IoT LoRaWAN en Puno para estimar el recurso eólico disponible en zonas de interés.	La implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real basado en IoT LoRaWAN permite la medición continua de los parámetros del viento, facilitando la estimación precisa del recurso eólico disponible en las zonas de interés de Puno	-Ubicación de los nodos LoRaWAN -Plataforma Thigspeak. -Automatización del análisis estadístico con Google Colab y Google Sheets.
<b>Problemas Específicos</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Hipótesis Especifica</b>	<b>V. Dependiente</b>
1. ¿Qué tecnologías pueden implementarse para la medición de los parámetros del viento de manera continua y en tiempo real en Puno?	1. Implementar un sistema de monitoreo con IoT LoRaWAN para la medición en tiempo real de la velocidad, dirección, temperatura, humedad y presión del viento en Puno.	1. La implementación de un sistema de monitoreo con IoT LoRaWAN permite la medición en tiempo real de los parámetros del viento.	-Datos recolectados. -visualización de gráficos. -Recurso eólico.
2. ¿Cómo integrar una plataforma para el almacenamiento de datos y la visualización en tiempo real que facilite el análisis gráfico de los parámetros del viento?	2. Integrar una plataforma de almacenamiento de datos y visualización en tiempo real utilizando ThingSpeak para analizar gráficamente los parámetros del viento.	2. La integración de la plataforma ThingSpeak permite almacenar datos, visualizar en tiempo real y analizar gráficamente los parámetros del viento.	
3. ¿Cómo se puede automatizar el análisis estadístico de Weibull para estimar el recurso eólico disponible?	3. Automatizar el análisis estadístico de Weibull de los parámetros del viento utilizando Google Colab y Google Sheets para estimar el recurso eólico disponible.	3. La automatización del análisis estadístico de Weibull de los parámetros del viento utilizando Google Colab y Google Sheets permite estimar con precisión el recurso eólico disponible.	



## ANEXO 5: Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Jhosep Brayam Huarachi Mamani,  
identificado con DNI 70141119 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
Ingeniería Mecánica Eléctrica

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL DE LOS PARÁMETROS  
DEL VIENTO CON IOT LoRaWAN EN PUNO PARA ESTIMAR  
EL RECURSO EÓLICO DISPONIBLE ”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 03 de Diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Ever Martin Calcina Quispe,  
identificado con DNI 72005211 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
Ingeniería Mecánica Eléctrica

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL DE LOS PARÁMETROS  
DEL VIENTO CON IOT LoRaWAN EN PUNO PARA ESTIMAR  
EL RECURSO EÓLICO DISPONIBLE ”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 03 de Diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



## ANEXO 6: Autorización para el depósito de tesis en el repositorio institucional



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Jhosep Brayam Huarachi Mamani,  
identificado con DNI 70141119 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Mecánica Eléctrica,

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL DE LOS PARÁMETROS DEL VIENTO CON IOT LoRaWAN EN PUNO PARA ESTIMAR EL RECURSO EÓLICO DISPONIBLE ”

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 03 de Diciembre del 2024

Jhosep Huarachi Mamani

FIRMA (obligatoria)



Huella



## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Ever Martin Calcina Quispe,  
identificado con DNI 72005211 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Mecánica Eléctrica

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ SISTEMA DE MONITOREO EN TIEMPO REAL DE LOS PARÁMETROS DEL VIENTO CON IOT LoRaWAN EN PUNO PARA ESTIMAR EL RECURSO EÓLICO DISPONIBLE ”

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 03 de Diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella