

# **Redes de sensores inalámbricos enfoque a tecnologías y aplicaciones**

Luis Orlando Philco Asqui

# **Redes de sensores inalámbricos enfoque a tecnologías y aplicaciones**



Luis Orlando Philco Asqui

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica del mismo.

© Publicaciones Editorial Grupo Compás  
Guayaquil - Ecuador  
compasacademico@icloud.com  
<https://repositorio.grupocompas.com>

Diseño de la portada es de: Ariadna Tirado Pereira



Philco, L. (2024) Redes de sensores inalámbrico enfoque a tecnologías y aplicaciones. Editorial Grupo Compás

©Luis Orlando Philco Asqui

**ISBN: 978-9942-33-855-6**

El copyright estimula la creatividad, defiende la diversidad en el ámbito de las ideas y el conocimiento, promueve la libre expresión y favorece una cultura viva. Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.

# ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>4</b>
<b>PRÓLOGO</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO 1:</b>	<b>7</b>
<b>ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS Y EQUIPAMIENTO DE ÚLTIMA GENERACIÓN</b>	<b>7</b>
<b>NATURALEZA DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS</b>	<b>9</b>
TEORÍA DE LA DUALIDAD	10
<b>PROPIEDADES DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS</b>	<b>12</b>
ONDAS DE RADIO	14
PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	18
APLICACIONES	21
<b>CASO DE USO: LOS RADARES</b>	<b>22</b>
FUNDAMENTOS DEL RADAR CONVENCIONAL	22
<b>CLASIFICACIÓN DE LOS RADARES</b>	<b>24</b>
SEGÚN EL OBJETIVO O BLANCO	24
SEGÚN LA FORMA DE ONDA	26
SEGÚN SU FINALIDAD	26
TÉCNICA DOPPLER	27
<b>APLICACIONES DE LOS RADARES</b>	<b>29</b>
RADARES DE VIGILANCIA	29
RADARES DE SEGUIMIENTO	30
RADARES METEOROLÓGICOS	30
APLICACIONES EN DISPERSOMETRÍA	32
APLICACIONES PARA ESTUDIO DE NUBES	32
RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE	34
OTRAS APLICACIONES	35
<b>ACTUALIDAD EN RADARES</b>	<b>37</b>
RADAR CUÁNTICO	37
FUNCIONAMIENTO	38
<b>TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA</b>	<b>39</b>
HISTORIA DE TORRE DE TESLA	39
<b>MENRISTORES</b>	<b>44</b>
<b>MEMCAPACITORES</b>	<b>46</b>
USOS	47
<b>CAPÍTULO 2:</b>	<b>49</b>
<b>REDES DE SENSORES Y ACTUADORES</b>	<b>49</b>
<b>FUNCIONAMIENTO DE UNA WSN</b>	<b>47</b>
<b>SENSORES PARA TARJETAS ELECTRÓNICAS</b>	<b>50</b>
<b>CONSUMO DE ENERGÍA EN NODOS</b>	<b>52</b>
<b>CAUSAS DE DESGASTE DE ENERGÍA</b>	<b>54</b>
CLASIFICACIÓN DE WSN	57
INFRAESTRUCTURA DE RED WSN	58
TOPOLOGÍA DE WSN	59



REQUISITOS PARA DESEMPEÑO CONVENIENTE EN WSN	62
<b>ENFOQUE AL ENRUTAMIENTO EN WSN</b>	<b>63</b>
<b>PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO PARA WSN</b>	<b>64</b>
<b>PROTOCOLOS BASADOS EN LA ORGANIZACIÓN DE RED</b>	<b>65</b>
<b>ARQUITECTURA WSN SEGÚN EL IOT</b>	<b>70</b>
<b>REDES DE SENSORES Y ACTUADORES</b>	<b>72</b>
ENFOQUE DE WSAN	72
<b><i>CAPÍTULO 3:</i></b>	<b>75</b>
<b><i>SIMULACIÓN DE APLICACIÓN IOT DE ALUMBRADO PÚBLICO</i></b>	<b>75</b>
<b>ALUMBRADO PÚBLICO PARA CIUDADES INTELIGENTES</b>	<b>73</b>
EL MODELADO	73
LA SIMULACIÓN	73
<b>CUPCARBON</b>	<b>75</b>
<b>SIMULACIÓN DE ALUMBRADO INTELIGENTE</b>	<b>76</b>
DESCRIPCIÓN DE NODOS EN CUPCARBON	78
CONSUMO DE ENERGÍA	81
<b>SISTEMA REAL DE ALUMBRADO PÚBLICO INTELIGENTE</b>	<b>85</b>
<b>OPERACIÓN PARA SISTEMA REAL CON ESP 32</b>	<b>86</b>
<b>CONEXIONES DE ESP32 PARA ALUMBRADO INTELIGENTE</b>	<b>87</b>
<b>PLATAFORMA UBIDOTS IOT</b>	<b>89</b>
<b>INTERFAZ GRÁFICA CON LABVIEW</b>	<b>90</b>
<b><i>CAPÍTULO 4: APLICACIÓN IOT CON ESP 32</i></b>	<b>73</b>
<b>ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS</b>	<b>91</b>
INTERFAZ DE CARGA Y DESCARGA DE BATERÍA DE LITIO	91
<b>SENSOR DE TEMPERATURA DHT-11</b>	<b>94</b>
<b>SENSOR DE RUIDO LM393</b>	<b>95</b>
ARDUINO	96
LABVIEW	97
CONEXIONES FÍSICAS DEL EMISOR	97
CÓDIGOS DEL EMISOR	98
CÓDIGOS DEL RECEPTOR	100
<b>CAPTURAS DE DATOS POR UBIDOTS</b>	<b>102</b>
<b>REFLEXIONES FINALES:</b>	<b>104</b>
<b><i>REFERENCIAS</i></b>	<b>106</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Conformación de una onda electromagnética.....	9
Figura 2. Experimento de doble rejilla de Young .....	11
Figura 3. Longitud de una onda.....	12
Figura 4. Espectro electromagnético .....	13
Figura 5. Clasificación según rangos de frecuencia.....	13
Figura 6. Señales de comunicación variando la amplitud de la onda (AM), su frecuencia (FM) .....	14
Figura 7. Distribución de cargas en moléculas de agua.....	15
Figura 8. Luz Visible .....	16
Figura 9. Reflexión de una onda de luz.....	18
Figura 10. Refracción de ondas de luz .....	19
Figura 11 Ejemplo de refracción de onda electromagnética.....	20
Figura 12. Magnetrones (a) M5114B de radar ASR-910. (b) VMX1090 de radar PAR-80 .....	22
Figura 13, Radar .....	23
Figura 14. Funcionamiento del radar .....	23
Figura 15. Operación del Radar Primario (PSR) y Secundario (SSR).....	24
Figura 16. Medición de la velocidad de destino.....	27
Figura 17. Imágenes de radares meteorológicos.....	30
Figura 18. Operación de radar meteorológico .....	31
Figura 19.. Comparación de imágenes del radar AMSR-E (satélite CloudSat).....	32
Figura 20. Conjunto de satélites polares .....	33
Figura 21. Radar de penetración terrestre (GPR).....	34
Figura 22. Radar Tridimensional RPA-200 .....	35
Figura 23. Sistema de radar cuántico. ....	38
Figura 24. Torre Wardencllyffe.....	39
Figura 25. Patente N° 1.119.732 de la torre Wardencllyffe .....	40
Figura 26. Carga inalámbrica a batería de autos eléctricos .....	41
Figura 27, Transferencia de energía eléctrica.....	42
Figura 28. Memristor .....	45
Figura 29. Memcapacitores en chip.....	47
Figura 30. Nodo/mota sensor.....	47
Figura 31. Esquema general de funcionamiento de una WSN. ....	48
Figura 32. Sensores para tarjetas de Arduino .....	50
Figura 33. Nodo o Mota TelosB modelo CM5000.....	53
Figura 34. Sensores localizados en diferentes zonas geográficas. ....	55
Figura 35. Escenarios de detección y monitoreo con WSN.....	56
Figura 36. Topologías en WSN .....	60
Figura 37. Topologías de red jerárquica (a) y de red plana (b).....	61
Figura 38. Modelos de enrutamiento (a) salto único/estrella (b) múltiples saltos.....	61
Figura 39. Clasificación de los protocolos de enrutamiento. ....	64
Figura 40. Arquitectura WSN para IoT .....	71

Figura 41. Lazo de control para conformar una WSAN .....	73
Figura 42. Ejemplo de una WSAN .....	74
Figura 43. Escenario virtual de alumbrado público inteligente.....	76
Figura 44. Diagrama de flujo para el alumbrado inteligente .....	77
Figura 45 Escenario con sensores meteorológicos .....	79
Figura 46. Objetivo móvil en rango de detección.....	81
Figura 47. Generación de variación de temperatura en CupCarbon.....	82
Figura 48. Código para nodos sensores o lámparas inteligentes .....	82
Figura 49. Detalle de nodos con cprint de CupCarbon .....	83
Figura 50. Comando printfile de CupCarbon .....	84
Figura 51. Visualización de porcentaje de luminosidad .....	84
Figura 52. Ubicación de sensores para atenuación de alumbrado.....	85
Figura 53. Diseño de alumbrado público inteligente con ESP32.....	86
Figura 54. Conexiones de tarjeta de control y sensores .....	87
Figura 55. Conexión para prueba.....	87
Figura 56. Sensor de movimiento de lámpara 1 y 2 con estado de apagado.....	89
Figura 57. Sensor de movimiento de lámparas 1 y 2 con estado encendido. ....	89
Figura 58. Programación en LabVIEW para interfaz gráfica.....	90
Figura 59. Panel frontal realizado en LabVIEW .....	91
Figura 60. Sensor de movimiento apagado de lámpara 1 en LabVIEW. ....	91
Figura 61. Sensor de movimiento encendido de lámpara 1 en LabVIEW.....	92
Figura 62, Vista de tarjeta.....	93
Figura 63. DHT11 .....	94
Figura 64. Sensor LM393.....	95
Figura 65. Conexiones de nodo transmisor .....	98
Figura 66. Conexiones del nodo receptor .....	98
Figura 67. Códigos para nodo emisor .....	98
Figura 68, Código de nodo receptor .....	100
Figura 69. Datos obtenidos .....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Consumo energético de sensores TelosB. ....	52
Tabla 2. Descripción de nodos de la red (alumbrado inteligente) .....	78

## PRÓLOGO

Es un honor presentar el libro "Redes de Sensores Inalámbricos: Enfoque a Tecnologías y Aplicaciones". En este compendio, el autor aborda las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés), estudiando sus fundamentos teóricos, sus diversas aplicaciones prácticas. Este tipo de redes han emergido como una de las tecnologías más prometedoras del siglo XXI, revolucionando numerosos campos industriales, comerciales y de investigación. Estas redes, compuestas por nodos pequeños y autónomos están diseñadas para recopilar datos ambientales de manera distribuida y transmitirlos de manera inalámbrica a una estación base para su procesamiento y análisis. Este enfoque ofrece una capacidad para monitorear y controlar el entorno físico en tiempo real, lo que lo convierte en un componente clave en el desarrollo de ciudades inteligentes, sistemas de salud, agricultura de precisión, y mucho más.

En este libro, se cuenta con cuatro capítulos temáticos, cada uno de ellos aborda aspectos específicos que son fundamentales para comprender y aprovechar todo el potencial de estas redes inalámbricas. De tal forma en el primer capítulo, titulado "Ondas Electromagnéticas y Equipamiento de Última Generación", se establece los cimientos teóricos necesarios para comprender cómo las ondas electromagnéticas se utilizan para la comunicación inalámbrica en las redes de sensores. En el segundo capítulo, titulado "Redes de sensores y actuadores", se detalla las características, arquitecturas y protocolos de comunicación de una WSN así como el desempeño de una WSN. El tercer capítulo, titulado "Simulación de aplicación IoT de alumbrado público", sumergirá al lector en el mundo de la simulación con la herramienta CupCarbon para diseñar, simular y optimizar sistemas de alumbrado público inteligente basados en una WSN.

Finalmente, en el cuarto capítulo, titulado "Aplicación con ESP32", se pone en práctica habilidades técnicas para desarrollar una aplicación utilizando el ESP32 LoRa y la plataforma en la nube Ubidots. Paso a paso, se guía al lector a través del proceso de configuración, programación y despliegue de una WSN para monitorear y controlar variables ambientales en tiempo real.

## INTRODUCCIÓN

A lo largo de estas páginas, se espera inspirar y capacitar a los lectores para que exploren nuevas fronteras en el campo de la tecnología inalámbrica. La Red de Sensores Inalámbricos es una plataforma tecnológica clave del Internet de las Cosas (IoT). Esto se refiere a la interconexión de dispositivos físicos y sistemas a través de Internet, permitiendo la recopilación, el intercambio y el análisis de datos en tiempo real. Estos dispositivos, también conocidos como "cosas", pueden variar desde sensores y actuadores hasta electrodomésticos inteligentes y vehículos conectados.

En este aspecto se aborda de forma breve la naturaleza de las ondas electromagnéticas, sus usos en la operación de los radares y perspectivas de innovación tecnológica con la transmisión de energía eléctrica de manera inalámbrica. El avance de tecnologías que convergen con el IoT. Así también la comunicación entre sí o con sistemas de computación o procesamiento remotos, desde la perspectiva tecnologías de recepción y transmisión, enfocando un aspecto a dispositivos electrónicos en desarrollo como menristores, men-capacitores que sin duda promueven el futuro del mundo conectado.

Se fundamenta las operaciones de los sensores en redes inalámbricas para monitoreo de variables de interés. Desde la perspectiva de la simulación e inclusive describiéndolo para una red práctica con detección de variables como temperatura, humedad y ruido. Se exteriorizan escenarios de simulación e implementación práctica que ayudarán a estudiantes como a profesionales que desean explorar las posibilidades emocionantes de las WSN y de las redes de sensores y actuadores inalámbricos (WSAN). Estas aplicaciones IoT abren nuevas fronteras en la automatización, las ciudades inteligentes y los procesos industriales, ofreciendo oportunidades sin precedentes para la optimización y la innovación en una amplia variedad de contextos.

De esta forma el objetivo del presente libro es inspirar y capacitar a los lectores para que trasciendan los límites tecnológicos y exploren nuevas oportunidades en este apasionante campo.



# CAPITULO 1

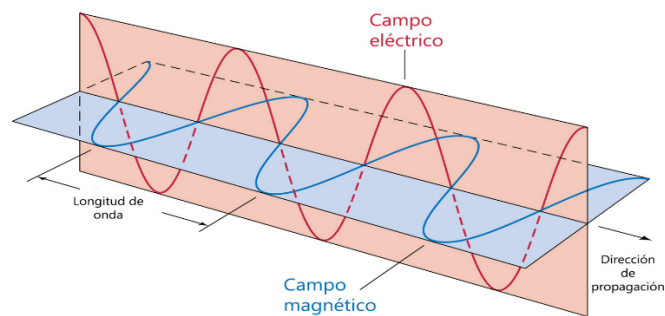
ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS Y EQUIPAMIENTO DE ÚLTIMA GENERACIÓN

Para comprender los conceptos básicos de las ondas electromagnéticas, es fundamental tener una comprensión clara de su naturaleza, propiedades y comportamiento.

## NATURALEZA DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Las ondas electromagnéticas son un tipo de radiación electromagnética que se propaga a través del espacio en forma de oscilaciones de campos eléctricos y magnéticos. Estas ondas se generan cuando una carga eléctrica acelerada, como un electrón en movimiento, experimenta cambios en su velocidad o dirección. Este proceso produce un campo eléctrico variable que, a su vez, induce un campo magnético, y viceversa. Juntos, estos campos oscilantes viajan en el espacio como ondas electromagnéticas.

*Figura 1. Conformación de una onda electromagnética*



Fuente: (Khan Academy, 2020)

Al respecto, la radiación electromagnética representa una de las múltiples formas en las que la energía se transmite a través del espacio. Desde el calor emitido por una fogata, hasta la luz proveniente del sol, los rayos X empleados por los profesionales médicos, e incluso la energía utilizada por un horno microondas para calentar alimentos, todas estas son diversas manifestaciones de la radiación electromagnética. A pesar de que estas formas de energía pueden presentarse de manera muy distinta entre sí, comparten la característica común de exhibir propiedades propias de las ondas.

Sobre la radiación electromagnética, la mayoría de los investigadores químicos muestran menos interés en la física subyacente de esta forma de energía y se centran más en entender cómo estas ondas interactúan con la materia (Khan Academy, 2020). Específicamente, los químicos se dedican al estudio de cómo las distintas formas de radiación electromagnética interactúan con los átomos y las moléculas. A partir de estas interacciones, los químicos pueden obtener información relevante sobre la estructura molecular y los tipos de enlaces

presentes en ella. Sin embargo, antes de adentrarse en este tema, es importante abordar algunas de las propiedades físicas de las ondas de luz.

A finales del siglo XVII, el físico holandés Christiaan Huygens fue el primero en explicar la naturaleza ondulatoria de la luz. Sin embargo, aproximadamente años después de los descubrimientos de Huygens, los físicos consideraban que las ondas luminosas y la materia eran entidades completamente diferentes entre sí. Según la física clásica de esa época, la materia estaba constituida por partículas con masa cuya posición en el espacio podía determinarse, mientras que las ondas luminosas se percibían como entidades sin masa y cuya posición en el espacio no podía ser precisamente definida. Dado que se creía que pertenecían a categorías separadas, los científicos carecían de una comprensión sólida sobre la interacción entre la luz y la materia. Sin embargo, este paradigma cambió con los estudios del físico Max Planck sobre cuerpos negros, que son objetos que, al calentarse, emiten radiación electromagnética.

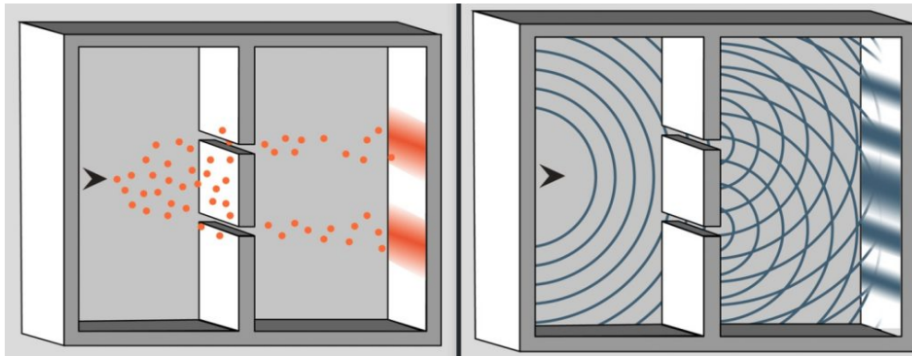
### **TEORIA DE LA DUALIDAD**

La dualidad onda-partícula es un concepto fundamental en la física que describe el comportamiento aparentemente contradictorio de las partículas subatómicas, como los fotones, que exhiben propiedades tanto de partícula como de onda. En el caso de la radiación electromagnética, como la luz, esta dualidad se manifiesta de manera notable.

Según la teoría cuántica, los fotones, que son las partículas elementales que componen la radiación electromagnética, pueden comportarse tanto como partículas puntuales como ondas propagándose a través del espacio. Esta dualidad se ilustra en varios experimentos, como el famoso experimento de la doble rendija.

Cuando se observa el comportamiento de la luz en experimentos de interferencia, como el mencionado experimento de la doble rejilla o rendija de Young. Aquí la luz muestra un comportamiento ondulatorio. Es decir, la luz pasa a través de dos rendijas y estas se interfieren entre sí, creando franjas de luz brillante y oscura en una pantalla detrás de las rejillas. Sin embargo, cuando se observa el efecto fotoeléctrico, donde la luz causa la emisión de electrones de una superficie metálica, la luz se comporta más como una partícula que como una onda. Esto se debe a que el efecto fotoeléctrico se puede explicar mejor si se piensa en la luz como una corriente de partículas (fotones) que impactan y transfieren su energía a los electrones en lugar de como una onda. El experimento de la doble rejilla proporciona una evidencia clara de la naturaleza ondulatoria de la luz, ya que el patrón de interferencia observado solo puede ser explicado adecuadamente mediante la teoría de las ondas. Este experimento es fundamental en la comprensión de los conceptos fundamentales de la óptica y la naturaleza dual de la luz.

Figura 2. Experimento de doble rejilla de Young



Fuente: (Álvarez, 2019)

En la figura 2 se muestra una pantalla opaca con dos rendijas estrechas y paralelas y una fuente de luz, como un láser o una lámpara. Cuando la luz incide sobre las dos rendijas, cada rendija actúa como una nueva fuente de ondas. Por lo tanto, en lugar de una sola onda luminosa, se generan dos nuevas ondas que se propagan desde cada rendija hacia una segunda pantalla colocada detrás de las rendijas. Las dos ondas generadas en las rendijas interactúan entre sí cuando alcanzan la segunda pantalla. Dependiendo de si las crestas de las ondas coinciden (interferencia constructiva) o se cancelan (interferencia destructiva), se producen bandas de luz brillante y oscura en la segunda pantalla.

En la pantalla de observación, se observa un patrón de franjas brillantes y oscuras, conocido como patrón de interferencia. Las franjas brillantes corresponden a las áreas donde la interferencia constructiva ha aumentado la intensidad luminosa, mientras que las franjas oscuras son el resultado de la interferencia destructiva, donde la luz se cancela. Este patrón de interferencia solo puede explicarse correctamente si se considera que la luz se comporta como una onda. La superposición de las ondas provenientes de las dos rendijas da lugar a la formación de crestas y valles en la segunda pantalla, creando el patrón de interferencia característico.

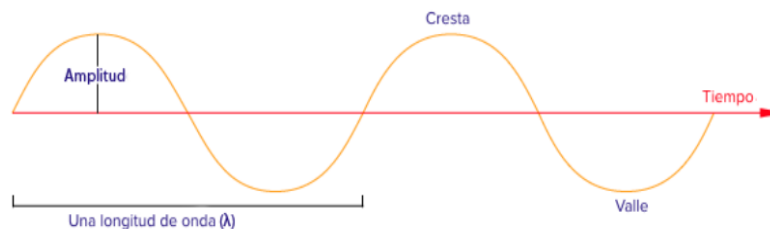
En síntesis, la radiación electromagnética, como la luz, exhibe una dualidad onda-partícula, este término de dualidad significa que puede exhibir características tanto de una onda como de una partícula, dependiendo del contexto experimental. dependiendo del experimento y las condiciones de observación. Esta dualidad es uno de los conceptos más sorprendentes y fundamentales en la física cuántica y ha sido confirmada repetidamente por experimentos científicos a lo largo de los años.

## PROPIEDADES DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

**Longitud de Onda ( $\lambda$ ):** La longitud de onda es la distancia entre dos puntos consecutivos en una onda electromagnética que están en fase (es decir, en el mismo punto de su ciclo). Se representa por la letra griega lambda ( $\lambda$ ) y se mide en metros. Las ondas electromagnéticas pueden tener longitudes de onda muy cortas, como los rayos X y los rayos gamma, o muy largas, como las ondas de radio.

**Frecuencia (f):** La frecuencia es el número de ciclos completos de una onda electromagnética que pasan por un punto en un segundo. Se mide en Hertz (Hz) y está inversamente relacionada con la longitud de onda según la ecuación:  $f = \lambda/c$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío (aproximadamente  $3 \times 10^8$  metros por segundo). Las ondas electromagnéticas con frecuencias más altas tienen una energía y una capacidad de penetración mayores.

*Figura 3. Longitud de una onda*



Fuente: (Khan Academy, 2020)

**Velocidad de Propagación:** Todas las ondas electromagnéticas viajan a la misma velocidad en el vacío, aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s. Sin embargo, la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas puede verse afectada por el medio a través del cual viajan. Por ejemplo, las ondas electromagnéticas se propagan más lentamente en materiales como el vidrio o el agua que en el vacío.

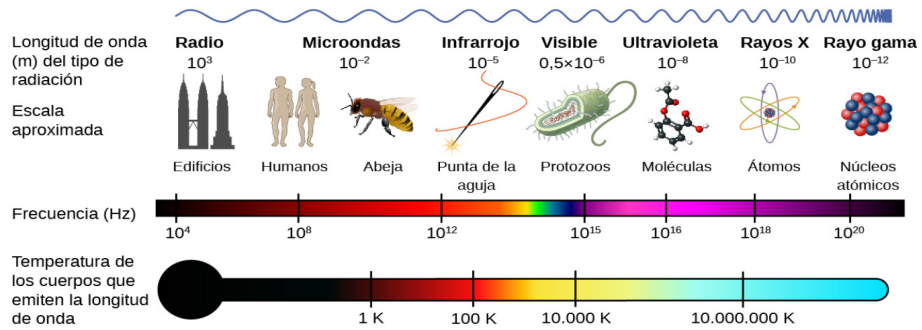
**Polarización:** La polarización se refiere a la orientación del campo eléctrico de una onda electromagnética en relación con la dirección de propagación de la onda. Las ondas pueden estar polarizadas en diferentes planos, como horizontal, vertical o circular, lo que afecta cómo interactúan con el entorno y otros materiales.

Se puede organizar y categorizar las ondas electromagnéticas según sus distintas longitudes de onda y frecuencias, a esto se conoce como "espectro electromagnético", y abarca todas las formas de radiación electromagnética. Véase figuras 4 y 5.



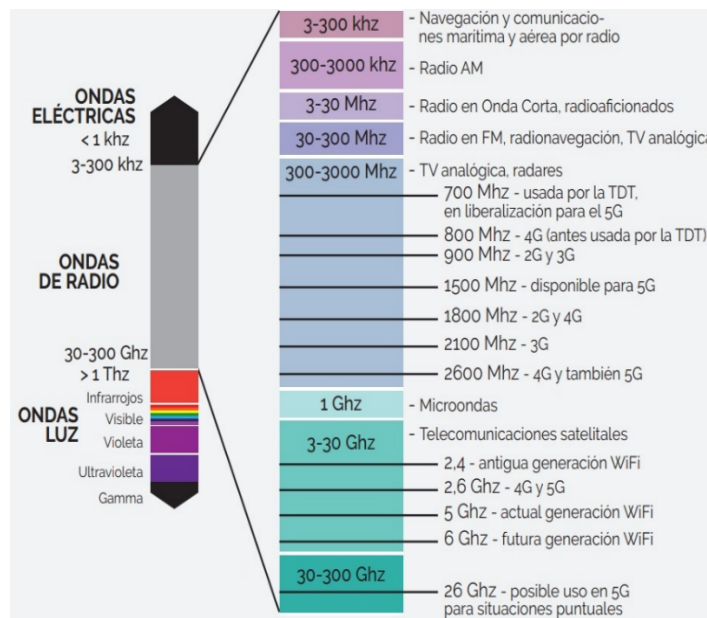
# REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

Figura 4. Espectro electromagnético



Fuente: (OpenStack, 2021)

Figura 5. Clasificación según rangos de frecuencia



Fuente: (Iglesias, 2020)

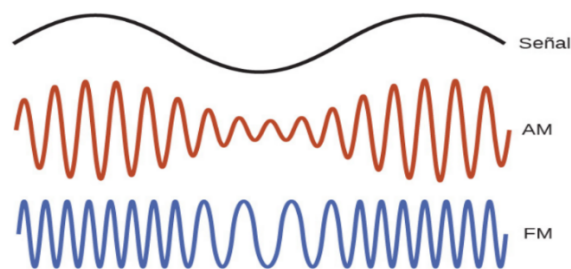
## ONDAS DE RADIO

Las ondas de radio se refieren a la radiación electromagnética con longitudes de onda superiores a aproximadamente 0.1 metros. Aunque estas ondas son comúnmente utilizadas en comunicaciones de audio, como en las radios, el término abarca todas las ondas electromagnéticas de esta gama, independientemente de su aplicación específica. Por lo general, las ondas de radio son generadas por corrientes alternas en los cables de una antena de radiodifusión. Su espectro abarca una amplia gama de longitudes de onda y se divide en varios subgrupos, incluyendo microondas, ondas utilizadas en la radio AM y FM, teléfonos móviles y señales de televisión.

No existe una frecuencia más baja establecida para las ondas de radio, pero las ondas ELF (Frecuencia Extremadamente Baja), que van desde 3 Hz hasta 3 kHz, se encuentran entre las frecuencias más bajas comúnmente utilizadas. Estas ondas se generan por la corriente alterna en las líneas eléctricas y son capaces de penetrar en el agua del mar, lo que las hace útiles para las comunicaciones submarinas.

Para transmitir información a través de ondas electromagnéticas, se modulan la amplitud, frecuencia o fase de la onda, o se varían de manera controlada para codificar la información deseada. Por ejemplo, en la transmisión de radio AM, la amplitud de la onda se modula para reflejar las vibraciones del sonido. En la transmisión de radio FM, la frecuencia de la onda se modula para transportar la información.

*Figura 6. Señales de comunicación variando la amplitud de la onda (AM), su frecuencia (FM)*



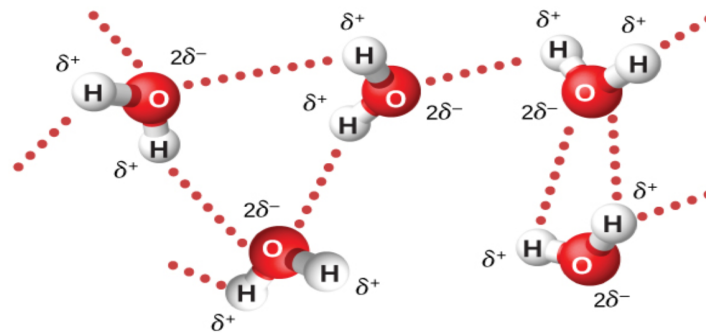
Fuente: (Berserkerus/Wikimedia Commons, 2019)

Las microondas, por otro lado, representan las ondas electromagnéticas de mayor frecuencia (orden de giga hertz). Estas ondas tienen frecuencias que oscilan entre  $10^9$  Hz y casi  $10^{12}$  Hz. Las microondas se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo la transmisión de información por satélite y en sistemas de radar. También se emplean en hornos de microondas para calentar alimentos, donde el campo eléctrico oscilante de las microondas provoca el calentamiento de las moléculas de agua en los alimentos.

En el caso, de horno de microondas, sus ondas se reflejan dentro del mismo, Estas microondas son absorbidas principalmente por las moléculas de agua, grasas y azúcares presentes en los alimentos. A nivel molecular, las microondas hacen que las moléculas de agua en los alimentos vibren rápidamente a medida que intentan alinearse con el campo electromagnético de las microondas. Esta vibración produce calor a través de la fricción entre las moléculas, lo que finalmente conduce al calentamiento del alimento.

Las moléculas de agua, al ser dipolares (tienen un polo positivo y un polo negativo), son especialmente susceptibles a la absorción de energía de las microondas. A medida que las moléculas de agua vibran, aumenta su energía cinética, lo que provoca un aumento en la temperatura del alimento.

*Figura 7. Distribución de cargas en moléculas de agua*



Fuente: (OpenStack, 2021)

Nota: El campo eléctrico que oscila provoca un giro en las moléculas de agua debido a su momento dipolar, cambiando su dirección aproximadamente  $4.90 \times 10^9$  veces por segundo. Estas interacciones entre las moléculas distribuyen la energía que se les transfiere. Las  $\delta^+$  y  $\delta^-$  denotan la distribución de la carga en las moléculas.

Los teléfonos móviles están equipados con un receptor de radio y un transmisor de radio de baja potencia que pueden sintonizar rápidamente cientos de frecuencias de microondas específicamente asignadas. La baja intensidad de la señal transmitida limita su alcance intencionalmente. Un sistema terrestre (torre celular) se conecta al teléfono solo a través de la torre de transmisión asignada a una pequeña área específica, llamada célula, y puede cambiar fácilmente a la siguiente célula con una mejor recepción de señal. Esto permite el uso continuo del teléfono mientras se cambia de ubicación.

Las microondas también posibilitan la conexión Wi-Fi, y otras tecnologías inalámbricas como Bluetooth, para la comunicación entre dispositivos cercanos. ambas permiten la comunicación por radio en el rango de 2.4 GHz entre dispositivos como auriculares y teléfonos móviles. Además, las microondas se utilizan en la tecnología de identificación por

radiofrecuencia (RFID), como las etiquetas adheridas a productos en tiendas, transpondedores para el uso de peajes en carreteras, o incluso chips incrustados en la piel de mascotas. Estos dispositivos responden a una señal de microondas emitiendo su propia señal codificada, permitiendo a las tiendas escanear rápidamente los productos, a los conductores pagar peajes sin detenerse, y a las mascotas perdidas ser identificadas y reunidas con sus dueños. La comunicación de campo cercano (NFC) funciona de manera similar, pero con un alcance más limitado, utilizando un campo magnético inducido por microondas entre dos bobinas. Los teléfonos móviles con capacidad de NFC pueden realizar compras mediante el teléfono en lugar de una tarjeta de crédito real.

## RADIACIÓN INFRARROJA

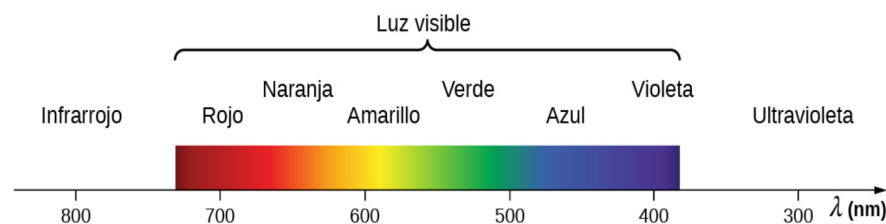
En cuanto a la radiación infrarroja, esta se produce generalmente por el movimiento térmico, vibración y rotación de átomos y moléculas, así como por transiciones electrónicas. Las frecuencias infrarrojas se extienden hasta el límite inferior de la luz visible, y las moléculas de agua son especialmente sensibles a estas frecuencias. La radiación infrarroja se utiliza en aplicaciones como controles remotos de televisores y calefactores de cuarzo.

## LA LUZ VISIBLE

Es el segmento del espectro electromagnético perceptible por el ojo humano, con longitudes de onda entre 400 nm y 750 nm, y se produce por vibraciones y rotaciones de átomos y moléculas, así como por transiciones electrónicas. La luz roja tiene las frecuencias más bajas y las longitudes de onda más largas, mientras que la violeta tiene las frecuencias más altas y las longitudes de onda más cortas. La radiación de cuerpo negro del sol alcanza su punto máximo en la parte visible del espectro, pero es más intensa en el rojo que en el violeta, lo que hace que el sol tenga un aspecto amarillento. (OpenStack, 2021).

Los seres vivos, tanto plantas como animales, han evolucionado para aprovechar y responder a distintas partes del espectro electromagnético en las que están inmersos.

*Figura 8. Luz Visible*



Fuente: (OpenStack, 2021)

Mientras se disfruta de la belleza natural a través de la luz visible, las plantas son más específicas en su aprovechamiento. La fotosíntesis, por ejemplo, utiliza ciertas partes del espectro visible para la producción de azúcares.

### **RADIACIÓN ULTRAVIOLETA**

El término "ultravioleta" indica una frecuencia más alta que el violeta, la luz visible de mayor frecuencia. Esta radiación abarca desde los 400 nm hasta aproximadamente los 10 nm en sus frecuencias más altas. Su origen está en los movimientos atómicos y moleculares, así como en las transiciones electrónicas.

La radiación ultravioleta del Sol se clasifica en UV-A (320-400 nm), UV-B (290-320 nm) y UV-C (220-290 nm). Mientras que gran parte de los rayos UV-B y todos los UV-C son absorbidos por la capa de ozono en la atmósfera superior, el 99% de la radiación UV solar que llega a la Tierra es UV-A. Las quemaduras solares y los riesgos de cáncer de piel son consecuencia de la exposición a los rayos UV-B y UV-C. Sin embargo, la respuesta al bronceado es un mecanismo de defensa natural, donde el cuerpo produce pigmentos para reducir la exposición de las células vivas.

### **RAYOS X**

Los rayos X tienen longitudes de onda aún más cortas, entre aproximadamente  $10^{-8}$  m y  $10^{-12}$  m, lo que les confiere una energía mayor que la radiación ultravioleta. Esta característica también implica efectos adversos similares a los de la radiación UV, pero con mayor capacidad de penetración. Su principal aplicación reside en la obtención de imágenes de objetos opacos a la luz visible, como el cuerpo humano o las partes mecánicas. Aunque pueden causar daños celulares, su uso en medicina es cuidadosamente regulado para balancear los riesgos con los beneficios diagnósticos.

### **RAYOS GAMMA**

Estos rayos, descubiertos poco después de la detección de la radiactividad nuclear, son una forma extrema de onda electromagnética de alta frecuencia. Su rango se superpone con el de los rayos X, pero son aún más penetrantes y dañinos para los tejidos vivos. Los rayos gamma, similares a los rayos X en su utilización, se emplean principalmente en terapias contra el cáncer y en medicina nuclear. Su origen está en núcleos radiactivos, a diferencia de los rayos X, que se producen con electrones energéticos en tubos de rayos X.



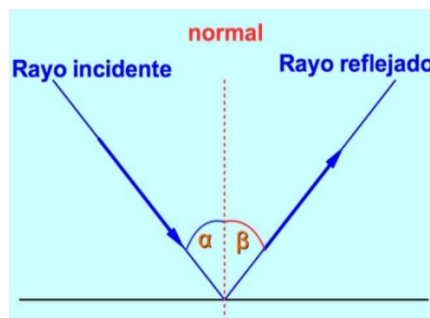
## PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Se detalla como las ondas electromagnéticas se transmiten a través del espacio, ya sea en el vacío, el aire, o a través de otros medios como el vidrio o el agua. Esto tiene que ver con ciertas propiedades concernientes con la propagación, y es fundamental para la investigación científica en campos como la física, la química, la astronomía y la biología. Ya que ayuda a comprender la naturaleza del universo, desde las propiedades de las partículas subatómicas hasta la estructura del cosmos.

Se describen algunas propiedades de la onda como luz.

- **Reflexión:** Cuando una onda electromagnética encuentra un cambio en el medio a través del cual se propaga, parte de la energía de la onda puede ser reflejada hacia atrás. Esto da lugar a fenómenos como la reflexión de la luz en un espejo o la reflexión de las ondas de radio en una superficie metálica.

Figura 9. Reflexión de una onda de luz



Fuente: (Diferenciador, 2019)

Tanto un ángulo  $\alpha$  es igual al ángulo  $\beta$ .

Se deducen las dos leyes de la reflexión:

- Primera ley de la reflexión: el rayo incidente, la normal y el rayo reflejado se encuentran en el mismo plano.
- Segunda ley de la reflexión: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.
- **Refracción:** La refracción ocurre cuando una onda electromagnética pasa de un medio a otro con una densidad o índice de refracción diferente. Esto puede hacer que la dirección de la onda se desvíe, como cuando la luz pasa del aire al agua y cambia de dirección. Se la conoce a la refracción como ley de Snell.

Su ecuación es:  $n_1 \text{ sen } \alpha_1 = n_2 \text{ sen } \alpha_2$ .

Donde:

$n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del primer y segundo medio respectivamente.

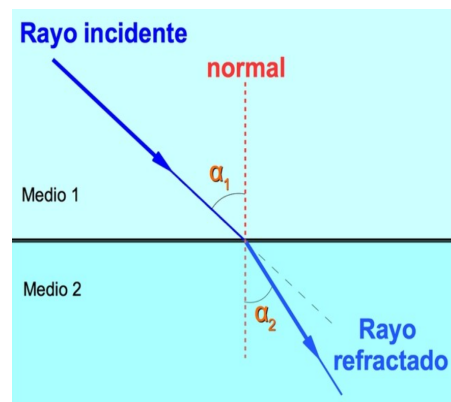
$\alpha_1$  es el ángulo de incidencia de la luz en el primer medio, medida respecto a la normal (línea perpendicular) a la superficie de separación entre los dos medios.

$\alpha_2$  es el ángulo de refracción de la luz en el segundo medio, también medida respecto a la normal a la superficie de separación.

Se define el índice de refracción del medio,  $n$ , como el cociente entre la velocidad de la luz en el aire,  $c$ , y la velocidad de la luz en el medio,  $v$ .

La fórmula del índice de refracción:  $n = c / v$

*Figura 10. Refracción de ondas de luz*



Fuente: (Diferenciador, 2019)

En la refracción se pueden distinguir dos casos:

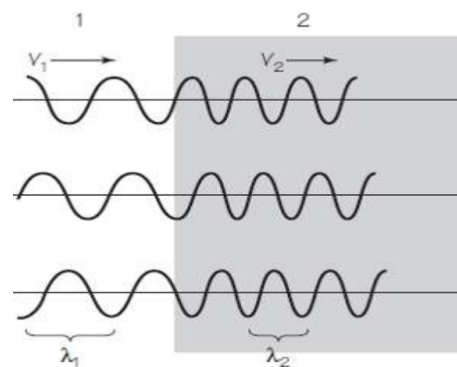
- Primera ley: el rayo incidente en la superficie de separación de dos medios, la normal a la superficie en el punto de incidencia y el rayo refractado están en el mismo plano (Diferenciador, 2019).
- Segunda ley: los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ , el ángulo de incidencia  $\alpha_1$  y el ángulo de refracción  $\alpha_2$  se relacionan por la siguiente expresión:  $n_1 \text{ sen } \alpha_1 = n_2 \text{ sen } \alpha_2$ .
- **Difracción:** La difracción es el fenómeno por el cual una onda electromagnética se dobla o se curva alrededor de un obstáculo o borde. Esto permite que las ondas se propaguen más allá de obstáculos y alcancen áreas que de otro modo estarían

fuera de su línea de visión directa. En este contexto, al igual que en la reflexión, se utiliza una línea ficticia que es perpendicular a la superficie en el punto donde ocurre la incidencia, conocida como normal.

La difracción es un resultado de la interferencia entre las ondas de luz que se propagan a través del espacio. No existe una "ley de difracción" específica como la ley de Snell, pero hay principios fundamentales que explican cómo ocurre la difracción. La teoría de la difracción se basa en los principios de Huygens-Fresnel, que establecen que cada punto de un frente de onda actúa como una fuente secundaria de ondas esféricas.

Estas ondas secundarias se suman y se interfieren para producir un patrón de difracción.

*Figura 11 Ejemplo de refracción de onda electromagnética*



Fuente: (Educapedia, 2023)

**Interferencia:** La interferencia ocurre cuando dos o más ondas electromagnéticas se superponen entre sí. Dependiendo de si las ondas están en fase (crestas coinciden con crestas y valles con valles) o fuera de fase (crestas coinciden con valles), la interferencia puede producir una amplificación (interferencia constructiva) o una cancelación (interferencia destructiva) de la amplitud de la onda resultante.

Para prevenir interferencias de señal, múltiples usuarios no pueden enviar señales de radio en las mismas frecuencias, simultáneamente y en la misma dirección. En cuanto un usuario deja de transmitir señales en cierta parte del espectro, otro puede emplearla de inmediato. Dado que el espectro es limitado, en cualquier momento y lugar determinado, usar una frecuencia impide su utilización para otros fines.

## APLICACIONES

Las ondas electromagnéticas encuentran una amplia gama de aplicaciones en nuestra vida diaria, abarcando desde la comunicación a través de teléfonos móviles y la radiodifusión hasta el funcionamiento del WiFi, la visión, las imágenes médicas etc. Por aquello, los sistemas de comunicación modernos han explotado tradicionalmente tres regiones del espectro electromagnético: ondas de radio, infrarrojas y visibles. La evolución en estos rangos siempre va acompañada de la apropiación de nuevos fenómenos electromagnéticos para construir dispositivos con mejores características.

Desde el punto de vista de las tecnologías móviles, se prevé que 5G, sea la solución que permitirá una conectividad a Internet ubicua, de alta velocidad, confiable y de alto volumen entre dispositivos conectados desde en cualquier lugar. Debido a la enorme cantidad de datos esperada y las altas velocidades de conexión en las redes 5G, el estándar 5G New Radio (NR) ha propuesto bandas de frecuencia de ondas milimétricas para usarse como parte de la solución (por ejemplo, del 24/28/ 39 GHz hasta 86 GHz). Además, el uso propuesto de la modulación de entrada múltiple/salida múltiple (MIMO), que consiste en grupos de antenas en el transmisor y el receptor, la cual proporcionaría una mejor capacidad móvil, cobertura, confiabilidad y eficiencia del espectro.

Con las longitudes de onda extremadamente cortas que ofrecen las señales de ondas milimétricas (por ejemplo, 10,7 mm a 28 GHz y 7,7 mm a 39 GHz), los productos electrónicos de consumo habrían integrado físicamente pequeños conjuntos de antenas adaptativas, ya sea en el chip o en el paquete, que ofrecen alta ganancia, bajo costo y flexibilidad. Esta es una oportunidad única para que los ingenieros de desarrollo de antenas conciban soluciones pequeñas, innovadoras, de bajo costo y totalmente integradas para dispositivos de próxima generación. Sin embargo, una alternativa interesante a las comunicaciones por fibra óptica es el uso de comunicaciones ópticas en espacio libre (FSO). lo cual ha llamado mucho la atención como sustituto de las comunicaciones inalámbricas.

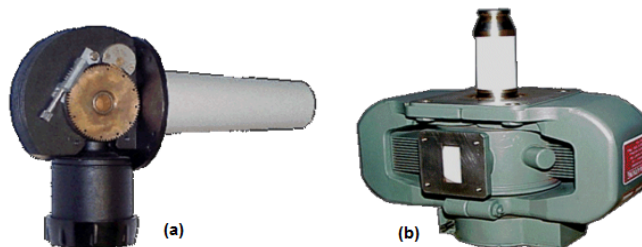
## CASO DE USO: LOS RADARES

La palabra 'rádar' es un acrónimo que resume la frase en inglés "radio detection and ranging". Los radares son sistemas que utilizan ondas electromagnéticas para detectar la presencia, ubicación, velocidad y otras características de objetos distantes, como aviones, barcos, vehículos terrestres, y hasta precipitaciones atmosféricas. Estos sistemas han evolucionado significativamente a lo largo del tiempo, desde sus primeras versiones durante la Segunda Guerra Mundial hasta las sofisticadas tecnologías actuales.

### FUNDAMENTOS DEL RADAR CONVENCIONAL

Las ondas de radio utilizadas por radar son producidas por una pieza de equipo llamado un Magnetron<sup>1</sup>. Las ondas de radio son similares a las ondas de luz, viajan a la misma velocidad, pero sus ondas son mucho más tiempo y tienen frecuencias mucho más bajas. Las ondas de luz tienen longitudes de onda de unos 500 nanómetros (500 mil millonésimas de metro, que está a unos 100 a 200 veces más delgadas que un cabello humano), mientras que las ondas de radio utilizadas por el radar suelen oscilar entre unos pocos centímetros a un metro-la longitud de un dedo a la longitud de su brazo, o aproximadamente un millón de veces más que las ondas de luz.

*Figura 12. Magnetrones (a) M5114B de radar ASR-910. (b) VMX1090 de radar PAR-80*



Fuente: (Wolff, 2013)

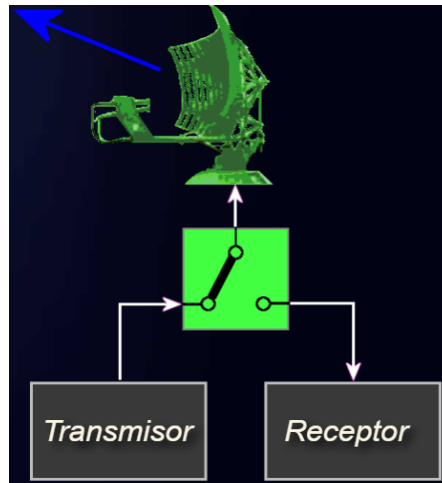
Una vez que las ondas de radio se han generado, una antena, trabajando como un transmisor, los irradia en el aire delante de él. Las antenas de radar también suelen girar para poder detectar los movimientos sobre un área grande. Las ondas de radio viajan hacia el exterior de la antena a la velocidad de la luz (186.000 millas o 300,000 kilómetros por segundo) y se propagan adelante hasta que lleguen a algo (objetivo). Entonces algunos de

<sup>1</sup> Tubo de alta potencia de vacío, que funciona como oscilador microondas auto-excitado. Los electrones cruzados y los campos magnéticos se utilizan en el magnetron para producir la salida de alta potencia requerida en equipos de radar.



esos haces rebotan hacia la antena en un haz de ondas de radio reflejadas (también viajan a la velocidad de la luz).

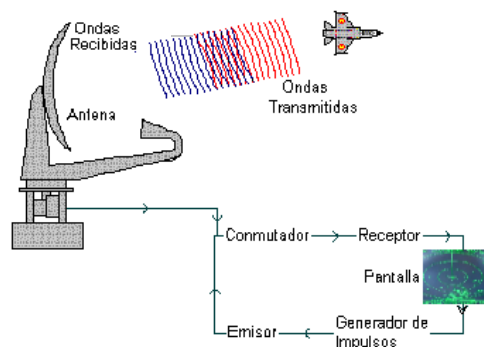
Figura 13, Radar



Fuente: (Wolf, 2020)

La antena opera como un radar receptor, así como un transmisor, de hecho, se alterna entre los dos trabajos. El equipo de recepción filtra reflexiones inútiles desde el suelo, edificios, etc., mostrando sólo reflexiones importantes sobre la propia pantalla. La gama del objeto se determina midiendo el tiempo que tarda la señal de radar para alcanzar el objeto y volver. La ubicación del objetivo con respecto a la unidad de radar se determina a partir de la dirección en la que se recibió el pulso. Cualquier reflejo de las ondas de radio, es captada por la antena y se dirigen a un equipo electrónico que procesa y los muestra en una pantalla, donde es vigilado todo el tiempo por un operador humano.

Figura 14. Funcionamiento del radar



Fuente: (El Radar, 2019)

## CLASIFICACIÓN DE LOS RADARES

La clasificación de los radares puede hacerse según su aplicación (aéreos, marítimos, terrestres, meteorológicos, etc.), su función (detección, seguimiento, navegación, etc.), su alcance (corto, medio, largo), su frecuencia de operación (radar de microondas, radar de onda milimétrica, radar de frecuencia muy alta, etc.), entre otros criterios.

### SEGÚN EL NÚMERO DE ANTENAS

- + Radar Monoestático: Emplea una única antena para las funciones de transmisión y recepción. Es considerado un radar primario. Si utiliza antenas distintas para transmisión y recepción en la misma ubicación, se le denomina radar secundario o cuasi monoestático.
- + Radar Bi-estático: Una antena emite y otra recibe, en un mismo o diferente emplazamiento. Son radares en que el transmisor y el receptor o receptores están localizados en sitios diferentes, a veces alejados. Estos sistemas pueden funcionar con transmisores dedicados específicamente diseñados para operaciones biestáticas, o bien como transmisores destinados a servicios de radiodifusión, televisión, comunicaciones móviles, etc.
- + Multiestático: Puede contener componentes tanto monoestáticos y bi-estáticos, combina la información recibida por varias antenas.

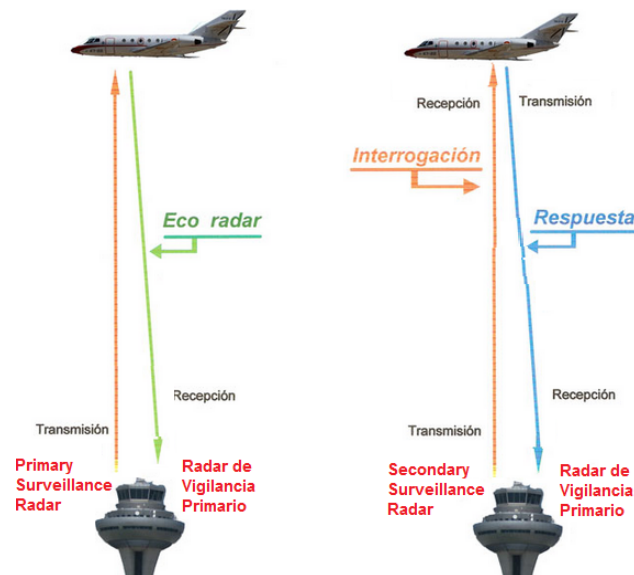
### SEGÚN EL OBJETIVO O BLANCO

- + Radar Primario: (PSR. *Primary Surveillance Radar*) Opera con ecos pasivos. Los pulsos o ecos de alta frecuencia se reflejan por el blanco y son receptados en la misma antena de radar, funciona con independencia del blanco, dependiendo solamente de la RCS<sup>2</sup> del mismo.
- + Radar Secundario: (SSR. *Secondary Surveillance Radar*) Opera con señales activas de contestación. Este radar emite una señal hacia el objetivo, que luego responde, generalmente proporcionando una serie de datos como la altitud de una aeronave, entre otros (Jain, 2012). En el caso de vehículos militares, esta respuesta puede incluir el Identificador de Amigo o Enemigo (IFF, *Identification Friend or Foe*)

*Figura 15. Operación del Radar Primario (PSR) y Secundario (SSR)*

---

<sup>2</sup> Radar Cross Section, (RCS) Sección transversal de radar es una medida de la capacidad de un objetivo para reflejar señales de radar hacia el receptor del radar.



Fuente: (Yébenes, 2013)

En el radar primario, la antena radar ilumina un objetivo (blanco) con una señal de microondas; el blanco la refleja y entonces es captada por un dispositivo receptor. La señal eléctrica que capta la antena se denomina señal eco o de retorno (Wolff, 2013). La señal radar es generada por un transmisor potente y recibida por un receptor altamente sensible, este radar determina rango y posición (azimut y elevación).

El PSR tiene la capacidad de detectar y proporcionar la posición de cualquier objeto que pueda reflejar las señales de radio emitidas por él. Estos objetos pueden incluir aviones, aves, fenómenos climáticos y características del terreno, dependiendo de cómo esté diseñado el radar. Los "objetivos" detectados no necesitan realizar ninguna acción específica, simplemente deben estar dentro del alcance del radar y ser capaces de reflejar las ondas de radio. Sin embargo, el radar solo indica la posición de los objetos detectados y no los identifica. El PSR sigue siendo utilizado en la actualidad como una medida de respaldo del radar secundario de vigilancia, a pesar de que su cobertura y la información que proporciona son más limitadas.

El SSR se apoya en un equipo instalado a bordo de la aeronave conocido como "transpondedor", el cual recibe en una frecuencia (1030 MHz) y transmite en otra (1090 MHz), respondiendo a las señales de un "interrogador" (generalmente, aunque no siempre, una estación terrestre asociada con un radar primario). El SSR es capaz de proporcionar información detallada, como la altitud de la aeronave, y facilita el intercambio directo de datos entre aeronaves para evitar colisiones.

## SEGÚN LA FORMA DE ONDA

- ✚ Radar de onda continua (*Continuous Waves*): Transmiten continuamente una señal de alta frecuencia y la energía reflejada también es recibida y procesada de forma continua. Estos radares tienen que asegurarse de que la energía transmitida no se escape en el receptor. El radar de la policía suele ser de onda continua y detecta velocidades gracias al efecto Doppler.
- ✚ Radar de onda continua con modulación: Implica la adición de modulación de fase o frecuencia a la señal transmitida, lo que facilita la determinación del momento en que se envió la señal correspondiente a un eco. Esto permite estimar distancias. En este método, una señal cambia constantemente en la frecuencia alrededor de una referencia fija (otra frecuencia), se utiliza para detectar objetos estacionarios.
- ✚ Radar de onda pulsada: Se transmite periódicamente un pulso, que puede estar modulado o no. Luego espera a que el eco de la señal transmitida por algún tiempo antes de transmitir un nuevo pulso. Si detectan ecos de pulsos anteriores al último transmitido, se considerarán como parte de este último, lo que puede dar lugar a la aparición de señales de objetivos que en realidad no existen.. La elección de la frecuencia de repetición de pulsos decide el rango y la resolución del radar (Achanta, 2013).

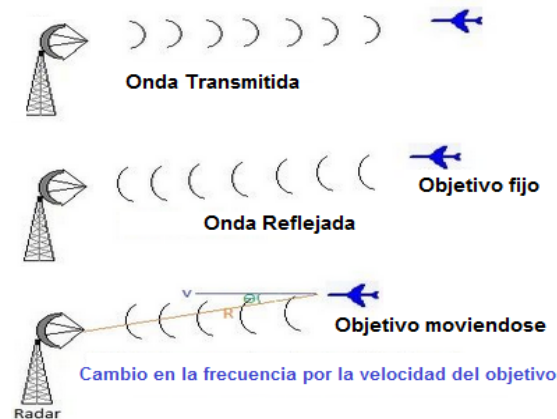
## SEGÚN SU FINALIDAD

- ✚ Radar de seguimiento: Diseñado específicamente para seguir y rastrear el movimiento de un blanco en movimiento. Por ejemplo, el radar de guía de misiles que controla la trayectoria del misil lanzado desde el suelo hacia el objetivo. O al contrario identifica la trayectoria de misiles para así tomar medidas que neutralicen cualquier amenaza potencial.
- ✚ Radar de búsqueda: Explora todo el espacio, o un sector de él, mostrando todos los blancos que aparecen. Ayuda a guiar a la aeronave durante el vuelo sobre las montañas y los terrenos sobre la ruta.

## TÉCNICA DOPPLER

Los radares con técnica Doppler son muy simples y utilizan de onda continua para la transmisión. De ahí que el radar Doppler también se conoce como el radar de ondas continuas (CW). Este radar se basa en el siguiente principio. La frecuencia de la señal de retorno, es decir, el eco del objetivo fijo permanece igual que la onda transmitida mientras que la frecuencia de la señal de regresar de blanco móvil se desplazará basada en la frecuencia Doppler. Mediante la medición de diferencia entre el radar de frecuencia recibida transmitida y reflejada extractos velocidad relativa del objetivo.

Figura 16. Medición de la velocidad de destino



Fuente: (RF Wireless World, 2012)

Como se muestra en la figura 16, si el objetivo es fijo, el número de ondas de transmisión ( $f_{Tx}$ ) son los mismos como el número de ondas reflejadas ( $f_{Rx}$ ). Si el objetivo se está moviendo a continuación el número de ondas reflejadas son más o menos basadas en el blanco que se está moviendo hacia o lejos del radar.

Si el objetivo se está moviendo hacia el radar, la distancia entre el radar y el objetivo está disminuyendo y depende de la magnitud de la velocidad del objetivo en movimiento. Estos cambios en la frecuencia de la onda reflejada corresponden al efecto Doppler, que es la variación aparente en la frecuencia de una onda electromagnética o eco emitido por una fuente en movimiento, en comparación con la frecuencia percibida por un observador estacionario. Esta diferencia es consecuencia del contraste en velocidad entre la fuente y el observador.

$$f_R = f_T \frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}$$

$f_R$  = frecuencia receptada por el observador

$f_T$  = frecuencia emitida por la fuente

$f_D$  = frecuencia Doppler

$v$  = velocidad relativa entre la fuente y el observador

$c$  = velocidad de la luz =  $3 \times 10^8$  m/s

$$f_D = f_R - f_T = \frac{2vf_T}{c-v} \cong \frac{2vf_T}{c}$$

Conocida la frecuencia del transmisor y la frecuencia Doppler, se determina la velocidad del objeto.

$$v = \frac{cf_D}{2f_T}$$

Este desplazamiento Doppler es aproximadamente sobre el orden de 1 KHz cuando onda transmitida es en GHz. Sobre la base de este cambio en la velocidad de frecuencia del objetivo se determina y su dirección de movimiento también se puede encontrar.

## APLICACIONES DE LOS RADARES

### RADARES DE VIGILANCIA

Es un dispositivo especial de radar primario de medio alcance utilizado en los aeropuertos. Se conocen como Airport Surveillance Radar, ASR o Terminal Area Radar, TAR estos radares suelen utilizar alta potencia, antena de exploración y tienen resolución moderada. Ellos se desarrollan para:

- Detección y seguimiento de aeronaves, misiles o los objetos espaciales
- Detección de blancos de superficie fijo o móvil
- Seguimiento de precisión moderada de múltiples objetivos

Algunas de las aplicaciones importantes de los radares de vigilancia son:

#### a) RADARES DE GESTIÓN DE TRÁFICO AÉREO

- Los sistemas de radar en ruta: Estos radares suelen operar en banda L, detectar y determinar la posición, rumbo y velocidad de blancos aéreos en un área de hasta 250 millas náuticas.
- Los sistemas de radar de vigilancia aérea: Estos radares suelen operar en la banda E, y se utilizan para detectar y mostrar la posición de una aeronave en el área terminal. Pueden detectar y rastrear aeronaves a altitudes inferiores a 25.000 pies y dentro de 40 a 60 millas náuticas del aeropuerto de forma fiable.
- Sistemas de radar con aproximación de precisión (*Precision Approach Radar*, PAR): Ayuda a una aeronave a aterrizar en condiciones meteorológicas adversas, la información de guía se obtiene por el operador de radar y se pasa al piloto de la aeronave en la forma de instrucciones verbales de radio, o al piloto automático (piloto automático) en forma de señales de control de impulsos.
- Radares de movimiento en superficie: El radar de movimiento en superficie (*Surface Movement Radar*, SMR) usa anchos de pulso muy estrechos y se utiliza para explorar la superficie del aeropuerto y localizar las posiciones de aviones, así como vehículos de tierra.

#### b) RADARES DE DEFENSA AÉREA

Se emplean para detectar objetivos aéreos y para determinar rango objetivo, velocidad, etc., en un área relativamente grande. Son capaces de detectar amenazas a grandes distancias y por lo tanto actuar dispositivos de alerta temprana. El rango

típico de un radar de defensa aérea es de 300 millas, y la cobertura de azimut está a 360 grados.

El rango y la información proporcionada por estos radares se utilizan para colocar inicialmente radares de seguimiento.

### **RADARES DE SEGUIMIENTO**

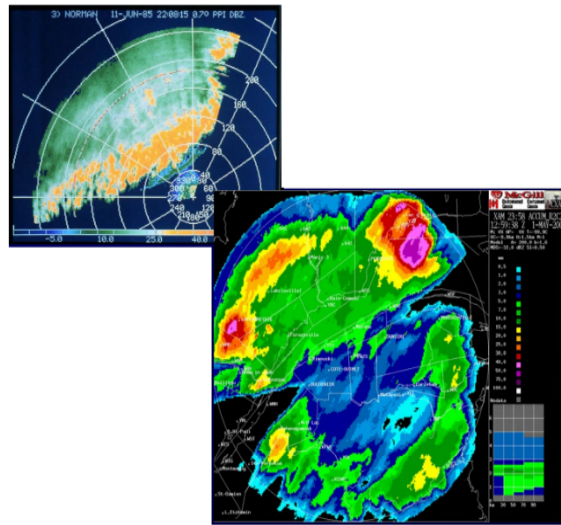
Como se ha indicado desempeñan un papel vital en la vigilancia y la defensa, permitiendo a los operadores seguir y monitorizar objetos en movimiento con precisión y eficacia. Estos sistemas de radares son esenciales para dirigir con precisión misiles hacia sus objetivos. Funcionan emitiendo pulsos de radiofrecuencia hacia el blanco y midiendo el tiempo que tarda la señal en regresar, lo que proporciona información sobre la distancia y la velocidad del objetivo. Basándose en esta información, el sistema de guía puede calcular y ajustar la trayectoria del misil para asegurar un impacto preciso

### **RADARES METEOROLÓGICOS**

Los radares meteorológicos ayudan a determinar el movimiento y la tendencia de las tormentas, la variabilidad y la concentración de la precipitación. La cantidad de energía dispersada de vuelta de un objetivo al radar ayuda a estimar la intensidad de las tormentas y la cantidad de precipitación. La velocidad de un objetivo en relación con el radar ayuda a estimar los movimientos de aire y circulaciones dentro de las nubes. Los radares meteorológicos utilizan diversas bandas de frecuencia, de alta frecuencia, las bandas de onda corta, útil para la detección de nubes y aerosoles. X, C, S y L son útiles para detectar la precipitación.

*Figura 17. Imágenes de radares meteorológicos*



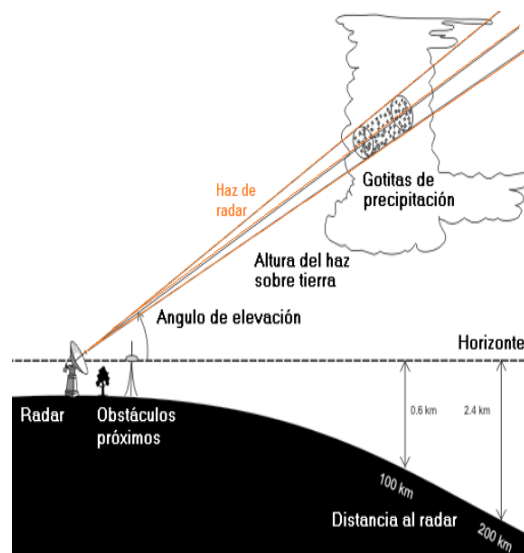


Fuente: (Pérez, 2010)

Con longitudes de onda más largas, la atenuación es menor, sino que también no puede detectar objetivos más pequeños. El radar de banda de frecuencias L detectará las fuertes lluvias y el granizo, pero no las nubes, nieve o lluvia ligera. Los radares de banda de frecuencias S son los más ampliamente utilizados debido que esta banda ofrece compromiso justo entre la sensibilidad y la atenuación.

Los radares meteorológicos escuchan la señal dispersa desde el blanco (nieve, granizo, lluvia, etc.). Véase la figura 18.

Figura 18. Operación de radar meteorológico



Fuente: (Bría, 2015)

La señal recibida se relaciona con el diámetro de las partículas. Además de la medición de la magnitud de la señal reflejada, suelen medir desplazamientos de frecuencia producidas por el movimiento de las partículas de precipitación. El desplazamiento de frecuencia se utiliza para medir la velocidad del viento. Los radares meteorológicos utilizan efecto Doppler para detectar circulaciones de tormenta (por ejemplo, tornados y huracanes), límites de flujo de aire creadas por las tormentas (por ejemplo, salidas y micro ráfagas).

### **APLICACIONES EN DISPERSOMETRÍA**

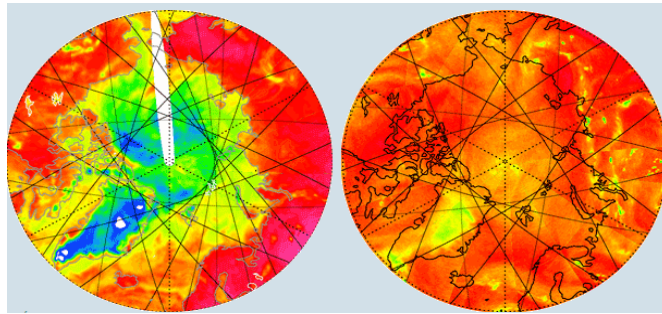
Se monitorea la dispersión de partículas o polvos en la atmósfera. Su objetivo principal es mapear el campo vector viento horizontal sobre océanos de la Tierra, la superficie secciones transversales que se miden por este instrumento tienen muchas otras aplicaciones, incluyendo la identificación y mapeo de las diferentes clases de hielo marino, que van desde mayor (edad de formación) hielo perenne, para recientes formaciones de hielo estacional, por espesor (grosso o delgado) de hielo, etc. Resultados mostraron que entre 2005 y 2007, el grado de espesor, cubierta de hielo marino del Ártico durante todo el año se redujo en aproximadamente un 23%.

En 2012 la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), envió a la órbita terrestre el GCOM-W1 (Global Change Observation Mission - Water-1) y lleva a bordo el instrumento AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2), que proporciona mediciones de humedad atmosférica y precipitación.

### **APLICACIONES PARA ESTUDIO DE NUBES**

El satélite CloudSat lanzado en 2006 es la primera plataforma para llevar un radar dedicado a la medición y el "perfil" vertical de las nubes. Además de las nubes, el radar ANSU-B5 del CloudSat también puede detectar y ayudar a estimar las nevadas y lluvia ligera. En la figura 19, se visualiza el Ártico en un día específico por canal de frecuencia de un radar AMSR-E (89 GHz) panel izquierdo, y por el canal 183-GHz de AMSU-B 5 en el mismo día, panel derecho.

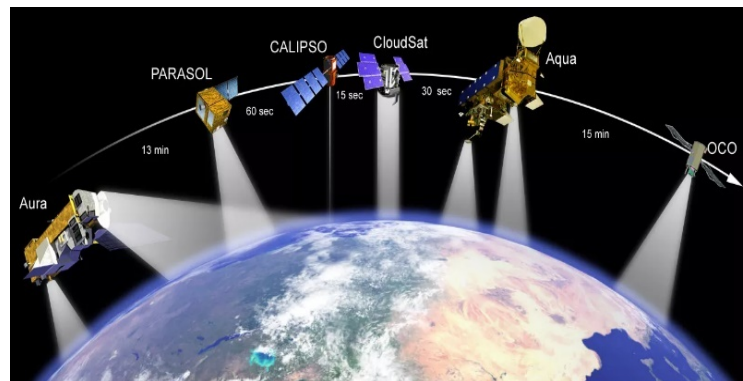
*Figura 19.. Comparación de imágenes del radar AMSR-E (satélite CloudSat)*



Fuente: (CALTECH, 2012)

Otro satélite, el CALIPSO (Cloud-Aerosol LIDAR and Infrared Pathfinder Satellite Observation), lleva a bordo un sistema LIDAR (Light Detection and Ranging), que es un instrumento óptico similar al radar pero que utiliza luz láser en lugar de ondas de radio para medir la altura y la estructura de las nubes, así como las partículas de aerosol en la atmósfera. Este LIDAR proporciona mediciones altamente detalladas y precisas de la verticalidad y la estructura de las nubes, lo que ayuda a mejorar nuestra comprensión de los procesos atmosféricos y su impacto en el clima.

*Figura 20. Conjunto de satélites polares*



Fuente: (Galileo, 2020)

El LIDAR y el radar se clasifican como sensores "activos" debido a que emiten rayos de energía hacia la Tierra (luz láser en el caso de CALIPSO y ondas de radio en el caso de CloudSat) y luego registran cómo estos rayos se reflejan en las nubes y los aerosoles presentes en la atmósfera. Por otro lado, hay otros instrumentos científicos en órbita que emplean sensores "pasivos", los cuales miden la luz solar reflejada o la radiación emitida por la Tierra o las nubes.

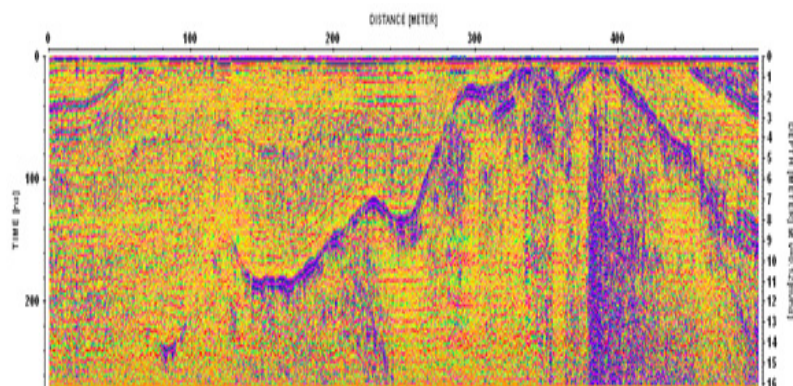
La combinación de datos provenientes de CALIPSO (misión concluida en 2023) y CloudSat ha proporcionado nuevos conocimientos acerca de las estructuras de las nubes y las capas

de aerosoles. No solo proporcionan una mejor comprensión de las nubes y su papel en el clima, sino que también son cruciales para mejorar la precisión de los modelos climáticos y las predicciones meteorológicas, lo que tiene importantes implicaciones para la sociedad en términos de pronósticos del tiempo, predicción de desastres naturales y toma de decisiones relacionadas con el clima.

### RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE

El radar de penetración terrestre (*Ground-Penetrating Radar, GPR*) puede sondear el subsuelo de unas pocas décimas de centímetros a cientos de metros en la banda de frecuencia de entre 1 y 100 MHz en función de las propiedades del suelo geo-eléctrica (permitividad compleja y conductividad) y la heterogeneidad del subsuelo. Datos de GPR en los subsuelos de terrenos volcánicos, helados y áridos son elementos clave en la comprensión de la evolución geológica del subsuelo de la Tierra.

*Figura 21. Radar de penetración terrestre (GPR)*



Fuente: (CALTECH, 2012)

## OTRAS APLICACIONES

**Radar Tridimensional:** Opera mediante la emisión de haces de radio en múltiples direcciones, tanto horizontalmente como verticalmente. Estos haces de radio se reflejan en los objetos en el espacio y son detectados por el radar cuando regresan. Utilizando la información de tiempo de vuelo y la dirección de los haces reflejados, el radar puede determinar la distancia, la dirección horizontal (azimut) y la elevación del objetivo. De esta manera, el radar 3D puede crear una representación espacial del entorno que incluye no solo la posición en el plano horizontal, sino también la altura del objetivo. Esto permite una detección y seguimiento más precisos de los objetivos en el espacio tridimensional.

*Figura 22. Radar Tridimensional RPA-200*



Fuente: (Dirección General de Fabricaciones Militares, 2014)

En la figura 22, se muestra, el Radar Primario Argentino RPA-3D de Larga Distancia (RPA), desarrollado por Fabricaciones Militares y la empresa argentina de tecnología INVAP, es un dispositivo de vigilancia tridimensional que mide distancia, acimut y elevación, provee datos precisos de situación y movimiento para el control del espacio aéreo. Es un sofisticado equipo para detección, vigilancia y control con un radio de cobertura de 250 millas (400 kilómetros).

**Radar de Apertura Sintética (SAR, Synthetic Aperture Radar).** Esta tecnología se utiliza principalmente en aplicaciones aeroespaciales y permite obtener imágenes de alta resolución de la superficie terrestre, independientemente de las condiciones climáticas o la iluminación. El SAR crea imágenes tridimensionales mediante el procesamiento de datos obtenidos a partir de la reflexión de las ondas electromagnéticas enviadas desde la aeronave o el satélite hacia la Tierra.

El funcionamiento del SAR implica el envío de pulsos de radar hacia la superficie terrestre desde una plataforma en movimiento. Estos pulsos rebotan en los objetos y características del terreno, y la señal reflejada es recogida por el sensor del radar. Al combinar la información de múltiples pulsos de radar tomados desde diferentes ubicaciones y ángulos, el sistema puede reconstruir una imagen detallada y precisa del área observada. Además, el SAR tiene la capacidad de penetrar nubes, niebla, e incluso cierta vegetación, lo que lo convierte en una herramienta invaluable para aplicaciones de observación de la Tierra, vigilancia medioambiental, cartografía, monitoreo de cambios en el terreno, y en aplicaciones militares, entre otros usos. Permite la obtención de imágenes del terreno, similares a fotografías. Funcionan combinando mediante complicados algoritmos matemáticos diferentes observaciones de un radar con una pequeña antena, creando artificialmente la sensación de que se trata de una sola muestra hecha por una antena muy grande.

Este procedimiento consiste en fusionar los datos recopilados en múltiples pasadas de la antena para generar un solo barrido virtual. Como resultado, el radar proporciona un rendimiento equivalente al que se obtendría con una antena considerablemente más grande y direccional de la que realmente dispone. Entre los ámbitos de aplicación del radar se incluyen la meteorología, el control de tráfico aéreo, terrestre y militar. En una aplicación SAR típica, se acopla una antena de radar en un lateral del fuselaje de una aeronave.



## ACTUALIDAD EN RADARES

Aunque el magnetrón ha sido una tecnología dominante en el pasado, en la actualidad se están explorando y utilizando otras tecnologías para la generación de ondas de radio en los sistemas de radar. Algunas de estas tecnologías alternativas incluyen:

- **Transistores de efecto de campo (FET):** Los transistores de efecto de campo se utilizan en algunos sistemas de radar modernos para generar ondas de radio de alta frecuencia. Ofrecen ventajas como una mayor eficiencia y una mejor capacidad de control en comparación con el magnetrón.
- **Dispositivos de estado sólido:** Además de los FET, hay otros dispositivos de estado sólido, como los diodos de barrera Schottky y los diodos Gunn, que se utilizan en algunas aplicaciones de radar.
- **Osciladores de estado sólido:** Estos dispositivos, que pueden incluir circuitos integrados de microondas (MMIC) y osciladores de cavidad, también se utilizan para generar ondas de radio en los sistemas de radar.

## RADAR CUÁNTICO

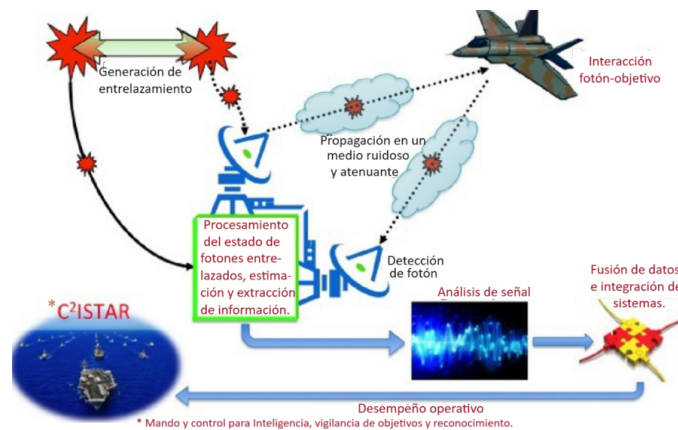
En el contexto de la física cuántica, el término "radar cuántico" se refiere a un concepto teórico que explora la posibilidad de utilizar principios cuánticos para mejorar las capacidades de detección y medición de los sistemas de radar convencionales. A diferencia de los radares clásicos, que operan en el dominio clásico de la física, los radares cuánticos aprovechan los fenómenos cuánticos para lograr mejoras en la sensibilidad, resolución y precisión de las mediciones.

Uno de los enfoques principales en el desarrollo de radares cuánticos es la utilización de sistemas basados en entrelazamiento cuántico. El entrelazamiento cuántico es un fenómeno intrínsecamente cuántico en el que dos o más partículas están correlacionadas de forma que el estado de una de las partículas está instantáneamente relacionado con el estado de las otras, independientemente de la distancia que las separe. Esta propiedad única podría ser explotada en un radar cuántico para mejorar la precisión de las mediciones y la resolución de imagen.

## FUNCIONAMIENTO

Los radares cuánticos basados en fotones entrelazados: Se produce un par entrelazado de fotones, enviando uno hacia el objetivo mientras que el otro permanece en el sistema. La correlación entre estos fotones se puede aprovechar para mejorar el rendimiento del dispositivo. La figura 23 ilustra cómo se genera un par de fotones entrelazados; uno se retiene dentro del sensor mientras que el otro se emite hacia una región del espacio.

Figura 23. Sistema de radar cuántico.



Fuente: (Mathews, 2022)

En el sistema, se crea un par de fotones entrelazados, con uno actuando como la señal y el otro como fotón inactivo (o ancilla<sup>3</sup>). Dentro del dispositivo, el fotón inactivo se mantiene mientras que el fotón de señal se dirige hacia un objetivo potencial a través de un medio. Con cierta probabilidad, el fotón de señal puede encontrar o no el objetivo. Si no lo encuentra, continuará propagándose en el espacio, y todas las mediciones realizadas por el detector serán de fotones de ruido en tal situación.

<sup>3</sup> Es un término utilizado en computación cuántica para referirse a un qubit auxiliar o de trabajo que se utiliza en ciertos algoritmos cuánticos. En este contexto, se utiliza para denotar el fotón que no está involucrado directamente en la detección del objetivo, sino que actúa como una referencia o control.



Por otro lado, si el objetivo está presente y el fotón de señal rebota hacia el detector, entonces será detectado con cierta probabilidad. En un contexto determinado, debido a las correlaciones cuánticas generadas por el entrelazamiento, el fotón señal está "etiquetado", lo que facilita su clasificación correcta como un fotón de señal en lugar de identificarlo erróneamente como un fotón de ruido. Además del entrelazamiento cuántico, otros fenómenos y principios cuánticos, como la superposición y el entrelazamiento de estados, también podrían tener aplicaciones en el diseño y funcionamiento de radares cuánticos.

### **TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Transmitir electricidad de forma inalámbrica, es posible y uno de los pioneros en este campo fue Nikola Tesla, un inventor e ingeniero eléctrico serbio-estadounidense. Tesla ideó un sistema de transmisión de energía eléctrica sin cables, conocido como el "Sistema de Transmisión de Energía de Tesla".

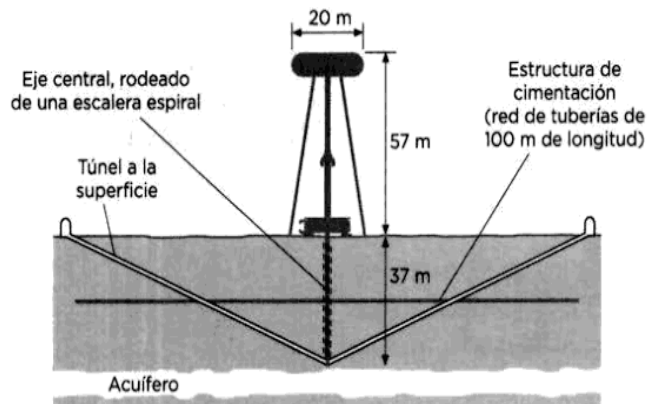
#### **HISTORIA DE TORRE DE TESLA**

Este sistema implicaba el uso de bobinas de inducción y resonancia para crear campos electromagnéticos que podrían transportar energía a largas distancias a través del aire, sin la necesidad de cables conductores. Su idea principal era utilizar la resonancia entre una bobina emisora y una receptora para transferir energía de manera eficiente.

Tesla demostró con éxito la transmisión inalámbrica de energía en su laboratorio en Colorado Springs, donde logró encender lámparas fluorescentes a varios metros de distancia sin cables conectados. Además, presentó planes para construir una torre gigante en Long Island, conocida como la Torre Wardenclyffe, con el objetivo de transmitir energía eléctrica de forma inalámbrica a través de grandes distancias. El diseño de la torre Wardenclyffe incluyó una extensa estructura subterránea que unía los diferentes edificios del complejo, construida tanto por necesidades técnicas como por motivos de seguridad.

El invento de Tesla en 1914 obtuvo la patente número 1.119.732 (figura 24) en esta detallaba el funcionamiento de la torre Wardenclyffe, el aparato tenía en la base, los componentes también estaban instalados sobre una plataforma de madera aislante (P').

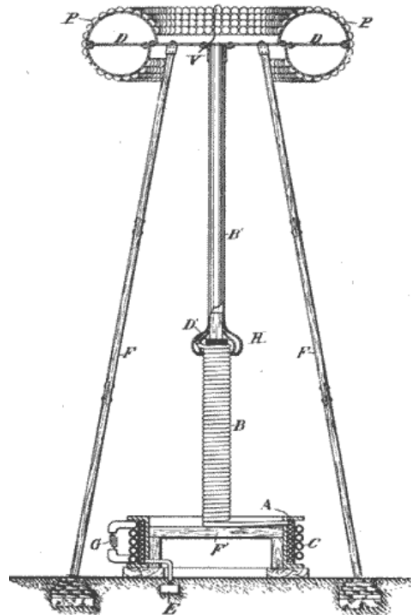
*Figura 24. Torre Wardenclyffe*



Fuente: (Jaén, 2011)

El sistema eléctrico consistía en una bobina (A) que mantenía una relación inductiva con una bobina primaria (C). En un extremo, la bobina A se conectaba a una placa a tierra (P), mientras que en el otro extremo se conectaba a otra bobina de autoinducción (P), la cual se elevaba en el centro de la torre. La bobina B estaba envuelta alrededor de un bastidor o tambor (Z) hecho de material aislante y se extendía hasta el conductor (F'), que era un cilindro metálico con una superficie pulida.

Figura 25. Patente N° 1.119.732 de la torre Wardencllyffe



Fuente: (Jaén, 2011)

Como medida de seguridad, la conexión entre la bobina B y el conductor B' estaba protegida por una campana fabricada con material aislante (H). El conductor B' conducía hacia el terminal D, ajustándose en el centro del anillo para garantizar una distribución equilibrada de la corriente, ya que, de lo contrario, las altas frecuencias y el flujo de alto volumen podrían afectar el funcionamiento del dispositivo. La bobina primaria C recibía alimentación de un generador de corriente estándar (G), aunque este debía tener una capacidad suficiente para llevar el circuito a su potencia máxima. En Long Island, Tesla utilizó un generador industrial de corriente alterna Westinghouse de 200 kW. La puesta en marcha del circuito resonante EABB' requería precaución especial, ya que podía alcanzar potencias que generaban fenómenos eléctricos de gran intensidad.

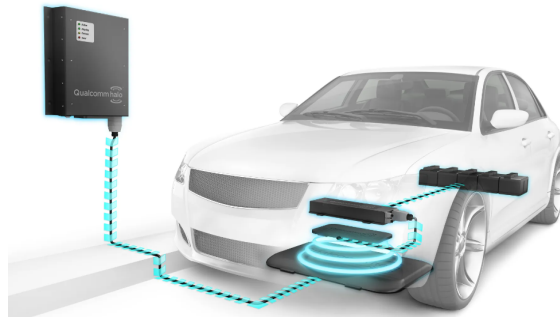
Para mantener el control del dispositivo en todo momento, se comenzaba ajustando con oscilaciones débiles y lentas, incrementándolas gradualmente luego. La placa (V), ubicada en el hueco del anillo, tenía la función de actuar como una válvula de seguridad de un depósito a alta presión. Su diseño permitía disipar en el aire las descargas de gran alcance que podrían ocurrir durante el aumento progresivo de la potencia. Sin embargo, debido a problemas financieros y disputas con inversores, el proyecto de la Torre Wardencllyffe nunca se completó pues debía también tener una torre receptora o repetidora. A pesar de esto, el trabajo de Tesla sentó las bases para investigaciones posteriores en el campo de la transmisión de energía inalámbrica, y su legado continúa siendo una inspiración para la investigación actual en este campo.

La transmisión de electricidad a través de ondas electromagnéticas se basa en los principios de inducción electromagnética y resonancia magnética.

- **Inducción electromagnética:** En este método, se utiliza una bobina de transmisión (también conocida como bobina primaria) para generar un campo magnético variable cuando se aplica una corriente alterna a través de ella. Este campo magnético variable induce una corriente eléctrica en una bobina receptora (bobina secundaria) cercana, creando así una transferencia de energía electromagnética. Este principio es utilizado en cargadores inalámbricos comunes, como los que se utilizan para cargar teléfonos móviles y otros dispositivos electrónicos. Y se desarrolla para carga de batería de vehículos eléctricos sin la necesidad de uso de cables.

La carga inalámbrica, técnicamente conocida como carga inductiva, funciona según el principio de inducción electromagnética: una corriente eléctrica que pasa a través de una bobina primaria genera un campo magnético, que a su vez induce una corriente eléctrica en una bobina secundaria cercana. Como ejemplo existen cargadores de baterías en vehículos eléctricos que a una distancia de 20 a 30 cm logran transmitir electricidad y cargan la batería.

*Figura 26. Carga inalámbrica a batería de autos eléctricos*



Fuente: (Electrek, 2018)

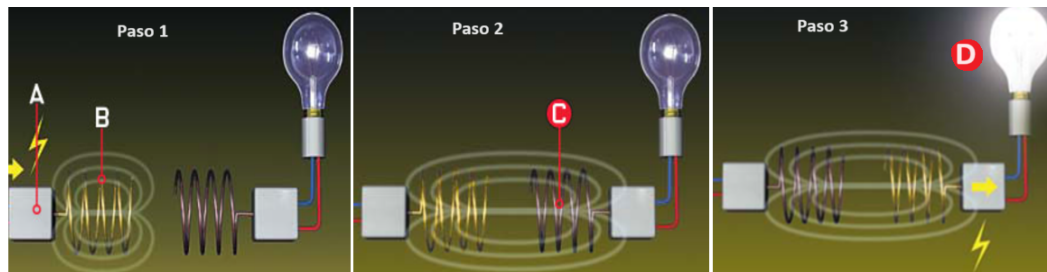
La eficiencia y el alcance de esta transferencia dependen de factores como la frecuencia del campo magnético, el diseño de la bobina y la distancia entre las bobinas. Sin embargo, en el 2024, los investigadores del Laboratorio Nacional de Oak Ridge (ORNL) cargaron de forma inalámbrica un vehículo eléctrico de pasajeros liviano a 100 kW con una eficiencia del 96% utilizando bobinas de acoplamiento electromagnético polifásico con campos magnéticos giratorios.

El sistema patentado por el ORNL transfirió energía a un vehículo Hyundai Kona, a través de un espacio de aire de cinco pulgadas utilizando campos electromagnéticos, un proceso con la densidad de potencia más alta para un sistema de carga inalámbrica en esta clase de vehículo. La tecnología alcanza densidades de energía entre 8 y 10 veces mayores que la tecnología de bobina convencional y puede aumentar el estado de carga de la batería en un 50% en menos de 20 minutos.

- **Resonancia magnética:** La resonancia magnética, también conocida como acoplamiento resonante, es un método más avanzado que permite la transferencia de energía de manera más eficiente a distancias mayores. En este enfoque, tanto la bobina de transmisión como la bobina receptora están diseñadas para resonar a la misma frecuencia natural. Cuando la bobina de transmisión se excita con una señal de frecuencia específica, crea un campo magnético que puede transferir energía a la bobina receptora, incluso a distancias mayores y con una eficiencia más alta que la inducción electromagnética convencional.

Véase en la figura 27 el acoplamiento resonante. Esto inicia con el paso 1, donde un circuito (A) conectado a un enchufe de pared convierte la frecuencia de la corriente estándar de 50/60 Hertz a 10 MHz. Así la corriente eléctrica que atraviesa la bobina transmisora genera un campo magnético.

*Figura 27, Transferencia de energía eléctrica*



Fuente: (Electricidad sin cables, 2009)

En paso 2 la bobina receptora (C), de dimensiones idénticas a la bobina emisora y resonancia a la misma frecuencia, utiliza un proceso conocido como inducción magnética para captar la energía del campo magnético generado por la primera bobina (B).

En paso 3, existe un circuito resonante que está sintonizado en la misma frecuencia, por lo tanto, la energía del campo magnético oscilante induce corriente eléctrica en la bobina receptora, lo que enciende la bombilla (D).

En lugar de irradiar el entorno con ondas electromagnéticas, un transmisor de energía llenaría el espacio a su alrededor con un campo electromagnético “no radiante”. La energía sólo la recogerían los dispositivos diseñados especialmente para “resonar” con el campo. La mayor parte de la energía no recogida por un receptor se reabsorbería por el emisor.

En síntesis, ambos métodos aprovechan la capacidad de los campos magnéticos variables para inducir corriente eléctrica en bobinas cercanas, lo que permite la transmisión de energía eléctrica de manera inalámbrica a través de ondas electromagnéticas. Es importante tener en cuenta que, si bien la transmisión de energía inalámbrica tiene muchas aplicaciones útiles, también presenta desafíos, como la eficiencia de la transferencia de energía, la seguridad y la interferencia electromagnética. Sin embargo, con los avances en la tecnología, la investigación continúa mejorando estos sistemas para hacerlos más seguros, eficientes y prácticos en una variedad de aplicaciones.

Al respecto, existe un proyecto de ley federal de Estados Unidos que impulsa el programa de carga inalámbrica de vehículos eléctricos. La carga inalámbrica de vehículos eléctricos, y en particular las tecnologías inalámbricas de carreteras eléctricas para la carga de cualquier vehículo en movimiento es un proyecto a corto plazo. Al otro lado del Atlántico, los gobiernos impulsan las carreteras eléctricas con objetivos ambiciosos. Para 2035, Francia planea construir casi 6.000 millas de carreteras electrificadas, mientras que Alemania y Suecia tienen planes para alrededor de 2.500 millas y 1.200 millas respectivamente, para 2030.

La tecnología de carreteras eléctricas, especialmente cuando se combina con fuentes de energía renovables in situ, como la solar, también puede reducir significativamente la presión sobre la red eléctrica nacional sobre extendida al distribuir la demanda de energía para el transporte en el espacio y el tiempo.

La carga inalámbrica dinámica tiene un enorme potencial para revolucionar la forma en que se cargan los vehículos eléctricos y puede permitir una adopción generalizada de los vehículos eléctricos al abordar algunos de los mayores desafíos asociados con la electrificación.

### **MENRISTORES**

Los memristores son dispositivos electrónicos fundamentales que poseen la capacidad única de cambiar su resistencia eléctrica en función de la cantidad de carga eléctrica que han pasado a través de ellos en el tiempo. Esta propiedad de memoria lo distingue de los otros tres elementos básicos de los circuitos electrónicos: resistores, condensadores e inductores. La creación y estudio de los memristores representan un área fascinante y prometedora en la investigación de la electrónica y la informática.

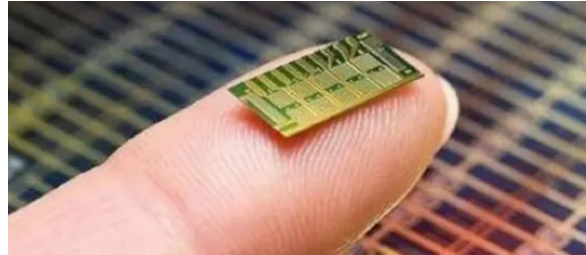
Los memristores fueron postulados teóricamente por el físico Leon Chua en 1971 como el cuarto elemento fundamental de los circuitos eléctricos, complementando a los resistores, condensadores e inductores. Chua propuso que un memristor pudiera ser un dispositivo que cambia su resistencia en función de la cantidad de carga eléctrica que ha pasado a través de él. Sin embargo, hasta hace poco, no se había identificado un material práctico que exhibiera las propiedades teóricas de un memristor.

En 2008, investigadores del Hewlett-Packard (HP) Labs anunciaron el descubrimiento y la fabricación exitosa de un memristor funcional, utilizando una fina capa de dióxido de titanio. Una de las propiedades más destacadas de los memristores es su capacidad para "recordar" la cantidad de carga eléctrica que ha pasado a través de ellos, lo que los convierte en elementos ideales para el desarrollo de dispositivos de almacenamiento de datos no volátiles.

A diferencia de las memorias RAM convencionales, que pierden su contenido cuando se desconecta la energía, los memristores retienen su estado incluso en ausencia de alimentación eléctrica. Esto los hace potencialmente útiles en aplicaciones de memoria de almacenamiento de datos de alta densidad y bajo consumo energético. No obstante, los

memristores pueden ser empleados en diversas tecnologías, como la computación en memoria en arquitecturas que difieren de la clásica de von Neumann.

*Figura 28. Memristor*



Fuente: (Última Hora, 2022)

También, muestran potencial en la generación de números aleatorios para el cifrado de datos transmitidos de forma segura. Entre los varios tipos de memristores, resaltan las memorias resistivas, cuya operación se basa en los procesos de conmutación resistiva, los cuales poseen una naturaleza aleatoria. La explicación de los mecanismos que rigen el funcionamiento de las memorias resistivas requiere el uso de la física estadística y los sistemas mesoscópicos, entre otras disciplinas.

Además de su aplicación en el almacenamiento de datos, los memristores también muestran promesas en la creación de redes neuronales artificiales y computación neuromórfica<sup>4</sup>. La capacidad de los memristores para cambiar su resistencia en función de la historia de las señales eléctricas que han pasado a través de ellos es análoga a la plasticidad sináptica observada en las neuronas biológicas. Esto los convierte en candidatos ideales para la implementación de sinapsis artificiales en redes neuronales artificiales, lo que podría llevar a avances significativos en este campo y en especial del aprendizaje automático.

Otra área de aplicación emocionante para los memristores es en la computación resistiva, donde se utilizan para realizar operaciones de lógica y cálculos directamente en el hardware. La capacidad de los memristores para almacenar y procesar información en el mismo dispositivo ofrece la posibilidad de desarrollar arquitecturas de computación completamente nuevas, que podrían superar las limitaciones de los enfoques computacionales convencionales basados en la separación entre almacenamiento y procesamiento.

---

<sup>4</sup> La computación neuromórfica busca imitar el funcionamiento del sistema nervioso animal en su conjunto, incluyendo específicamente el del cerebro. Los chips computacionales emplean la misma física computacional que nuestro sistema nervioso.



Además de su potencial en aplicaciones de almacenamiento de datos, computación neuronal y resistiva, los memristores también se están explorando en otras áreas de la electrónica y la informática. Por ejemplo, se han propuesto como componentes clave en la creación de circuitos neuromórficos que imitan el funcionamiento del cerebro humano, así como en dispositivos electrónicos de bajo consumo energético para aplicaciones en el Internet de las cosas (IoT) y la electrónica portátil. Los investigadores están explorando diversas aplicaciones potenciales de los memristores en campos como el almacenamiento de datos, la computación neuromórfica, la computación resistiva y más.

A medida que la investigación en memristores continúa avanzando, es probable que se obtenga una mayor comprensión de sus propiedades fundamentales, así como avances significativos en su fabricación y aplicación en una variedad de campos tecnológicos. Con su capacidad única para recordar y cambiar su resistencia eléctrica, los memristores prometen revolucionar la forma en que se almacena, procesa y utiliza la información en el mundo digital.

### MEMCAPACITORES

Los "memcapacitores" son dispositivos que exhiben comportamientos capacitivos que pueden ser modificados o controlados por la historia de las señales eléctricas que atraviesan el dispositivo. Al igual que los memristores, los memcapacitores son un tipo de componente electrónico que almacena información sobre la cantidad y la dirección de las señales eléctricas que han pasado por él. Esta información se almacena en la capacitancia del dispositivo, lo que lo hace útil para aplicaciones en el campo de la memoria y el procesamiento de datos. Al igual que los memristores, los memcapacitores han generado un gran interés en la comunidad científica y tecnológica debido a su potencial para una amplia gama de aplicaciones, incluidas las memorias no volátiles, los circuitos neuromórficos y los sistemas de procesamiento de información bio inspirados.

El avance de los memcapacitores se está produciendo en múltiples frentes, desde el diseño y la fabricación hasta la integración en dispositivos electrónicos y la exploración de nuevas aplicaciones en el campo de la electrónica y la computación. Estos avances tienen el potencial de abrir nuevas oportunidades en diversas áreas tecnológicas en los próximos años.

A continuación, se detallan algunos de los avances más destacados:

**Diseño y Fabricación:** Los investigadores están desarrollando nuevos materiales y técnicas de fabricación para crear memcapacitores con propiedades mejoradas, como una mayor estabilidad, una respuesta más rápida y una mayor densidad de almacenamiento de datos.



**Tamaño y Escalabilidad:** Se han logrado avances en la miniaturización de los memcapacitores, lo que los hace adecuados para su integración en dispositivos electrónicos cada vez más pequeños, como dispositivos portátiles, sensores y sistemas embebidos.

**Eficiencia Energética:** Se están investigando memcapacitores con bajo consumo de energía y alta eficiencia energética, lo que los hace adecuados para aplicaciones en sistemas alimentados por batería y dispositivos de Internet de las cosas (IoT).

**Aplicaciones en Memorias y Procesamiento de Datos:** Los memcapacitores se están explorando como elementos de almacenamiento en memorias no volátiles, como la memoria resistiva (RRAM) y la memoria capacitiva (CCRAM). Además, se están investigando para su uso en circuitos neuromórficos y sistemas de procesamiento de información bio inspirados, donde pueden simular ciertas funciones del cerebro humano.

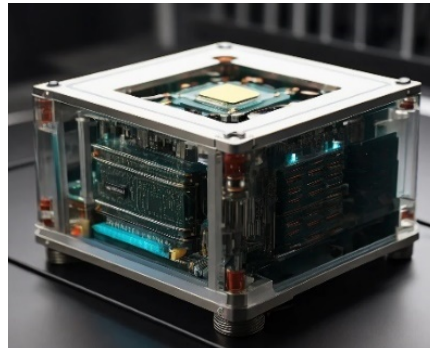
**Integración en Dispositivos Electrónicos:** Se están realizando esfuerzos para integrar memcapacitores en dispositivos electrónicos comerciales, lo que podría llevar a nuevas aplicaciones y tecnologías en áreas como la electrónica flexible, la electrónica vestible y la inteligencia artificial.

### USOS

En el contexto de los chips de computadora estos están compuestos por transistores que, a diferencia de los capacitores, no pueden almacenar energía: simplemente actúan como interruptores de "encendido y apagado", ya sea haciendo pasar la electricidad a través de ella o deteniéndola, es decir, funcionando efectivamente como un interruptor binario. En los capacitores cuando se aplica un voltaje, una de las placas se carga positivamente y la otra negativamente, creando un campo eléctrico entre ellas.

Los memcapacitores de la empresa alemana Semron fabricados con materiales semiconductores tradicionales, funcionan aprovechando el principio llamado blindaje de carga en química. Los memcapacitores controlan el campo eléctrico entre los electrodos superior e inferior a través de una capa protectora que aplica la técnica de sombreado, asociada con la manipulación de campos eléctricos controlados por la memoria del chip, lo que puede ser fundamental para el rendimiento y la eficiencia de los memcapacitores en aplicaciones de IA y otros campos donde se requiere una alta precisión y capacidad de procesamiento de datos. Cuando se explica que está controlada por la memoria del chip, se indica que puede almacenar los diversos "pesos" de un modelo de IA (los pesos son parámetros ajustables que se utilizan para modificar y ajustar el rendimiento del modelo mientras se entrena y procesan datos). El enfoque del campo eléctrico minimiza el movimiento de los electrones a nivel del chip, lo que reduce el consumo de energía y el calor.

*Figura 29. Memcapacitores en chip*



Fuente: (Omwanda, 2024)

Semron está utilizando el control del campo eléctrico para minimizar la resistencia al flujo de corriente en el chip, lo que a su vez reduce la pérdida de energía y la generación de calor asociadas con la resistencia eléctrica. Esta estrategia les permite empaquetar una cantidad considerable de memcapacitores en un espacio reducido, lo que puede mejorar significativamente la capacidad de procesamiento y la eficiencia energética de sus dispositivos. Esto permite que los chips sean más eficientes energéticamente y al mismo tiempo mantengan bajos los costos de fabricación

En resumen, el avance de los memcapacitores se está produciendo en múltiples frentes, desde el diseño y la fabricación hasta la integración en dispositivos electrónicos y la exploración de nuevas aplicaciones en el campo de la electrónica y la computación. Tienen el potencial de abrir nuevas oportunidades en diversas áreas tecnológicas en los próximos años.

Estos avances pueden facilitar la creación de dispositivos más inteligentes y conectados, capaces de recopilar, procesar y transmitir datos de manera más rápida y eficiente. Además, la miniaturización de los chips permitirá su integración en una amplia gama de dispositivos como tarjetas embebidas o de bajo costo, sin duda las aplicaciones para el IoT con tarjetas electrónicas o nodos sensores pueden formar infraestructuras de redes avanzadas.

# CAPITULO 2

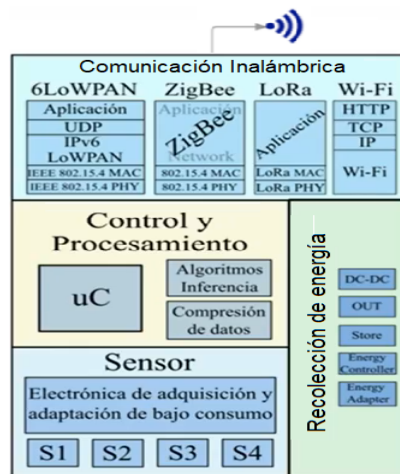
REDES DE SENSORES Y ACTUADORES

## FUNCIONAMIENTO DE UNA WSN

Las WSN son una poderosa herramienta para la monitorización y control de nuestro entorno en una amplia gama de aplicaciones, Así la principal tarea de un nodo sensor de una WSN es coleccionar datos de una región o campo de interés, procesarlos y transmitirlos a la estación base (BS, Base Station) en ciertos casos una interfaz de comunicación permitirá que esta red intercambie datos con la nube o con otros sistemas integrados.

Una red WSN típica consta de dos componentes principales, el nodo sensor o bien una mota y la BS o nodo sink. Una mota en WSN es un dispositivo que normalmente está equipado con capacidades de detección, procesamiento y comunicación, y es responsable de medir los parámetros asociados con una aplicación en particular. Una BS es responsable de capturar y proporcionar acceso a todos los datos de medición de los nodos y, a veces, puede proporcionar servicios de puerta de enlace para permitir que los datos se gestionen de forma remota. Los datos sensados<sup>5</sup> se envían a una base de datos o al cloud para su almacenamiento y posterior procesamiento de manera que permitan tomar acciones específicas basadas en los servicios requeridos.

Figura 30. Nodo/mota sensor



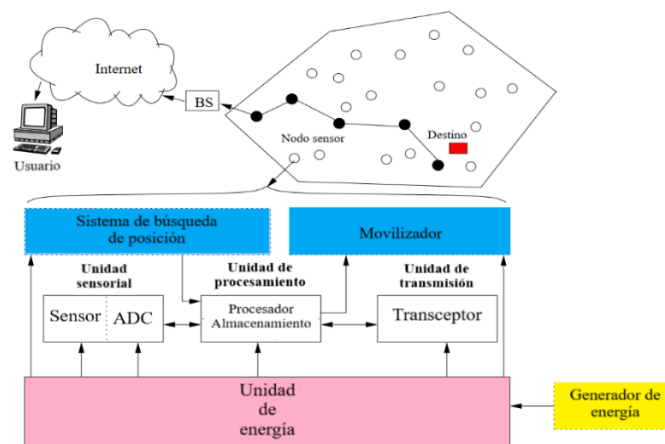
Nota: Diseño del autor

<sup>5</sup> Según la RAE, "sensado" no está reconocida en español, pero eso no impide su uso. Se utiliza "sensado" para diferenciarlo de "censado" que es sustantivo proveniente del verbo "censar". Aunque existen "sensor" y "censar" en el idioma español, Para este autor es más adecuado sensado en el contexto de redes de sensores.

La unidad de memoria se utiliza para el almacenamiento de datos relacionados con la aplicación y también contiene información de identificación del dispositivo, la unidad de detección contiene sensores para capturar datos de su entorno y el tranceptor (módulo de radio) es responsable de la transmisión y recepción de datos. El módulo de radio es el componente que consume más energía, y el consumo de energía de la radio cuando está inactiva es aproximadamente diez veces menor que cuando la radio está recibiendo datos.

En la figura 31 se ilustra el esquema general de funcionamiento de una WSN. Además, se puede observar que hay en el interior de cada nodo sensor y como se interconectan estas unidades. Básicamente, cada nodo sensor comprende la parte de energía y módulos para realizar los procesos de detección, procesamiento y transmisión. Además, contiene una unidad movilizadora y un sistema de búsqueda de posición. Algunos de los componentes mencionados anteriormente son opcionales como el caso del movilizador.

Figura 31. Esquema general de funcionamiento de una WSN.



Fuente: Traducido de (Al-Karaki & Kamal, 2004)

Los nodos sensores generalmente están dispersos en un “campo de sensores”, es decir repartidos en un área para recopilar datos de variables de interés y las envían a uno o más estaciones base, y estas transmiten los datos sensados a un centro de datos remoto. Cada uno de los nodos basa sus decisiones en su misión, la información que tiene actualmente y el conocimiento de sus recursos informáticos, de comunicación y de energía.

Cada uno de estos nodos sensores tiene la capacidad de recopilar y enrutar datos a otros sensores o de regreso a una BS externa. Una BS puede ser un nodo fijo o un nodo móvil (con capacidades mayores que un simple nodo sensor) capaz de conectar la red de sensores a una

## REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

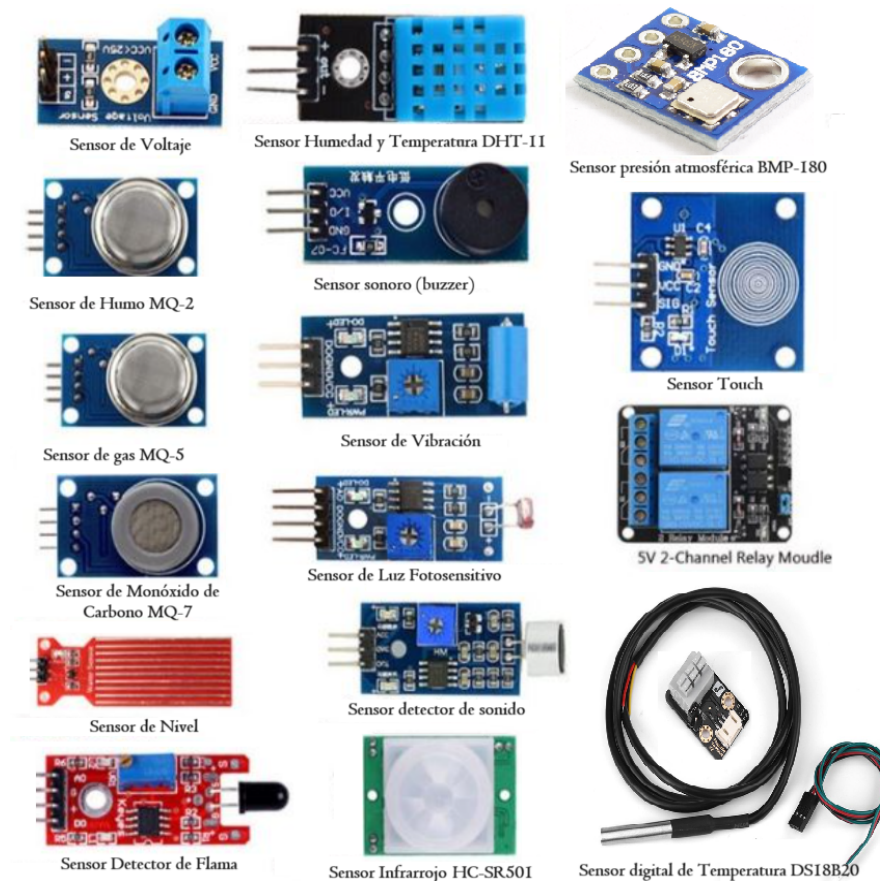
red existente, a una infraestructura de comunicaciones o a Internet, donde un usuario puede tener acceso a los datos informados.

Mientras que muchos nodos sensores se comunican directamente a los nodos sumideros (opción en vez de una BS) para un procesamiento, un número creciente de nodos sensores comunican los datos recogidos de forma inalámbrica a una estación base de procesamiento centralizada. Esto es importante ya que muchas aplicaciones de red requieren cientos o miles de nodos de sensores, a menudo implementados en áreas remotas e inaccesibles.

## SENSORES PARA TARJETAS ELECTRÓNICAS

Se pueden encontrar muchos sensores de bajo costo para tareas “domesticas” término para diferenciar de sensores industriales o científicos que pueden ser muy costosos. Estos sensores pueden acoplarse a placas o tarjetas electrónicas como Arduino, Raspberry que son comercialmente de bajo costo y populares para implementaciones o aplicaciones pequeñas de monitoreo. En el mercado existen placas con sensores de muy diversos parámetros, como sensores de presión barométrica, sonido, nivel de agua, luz, medida de radiación solar, humedad en suelo, humedad aire, temperatura, velocidad del viento etc.

Figura 32. Sensores para tarjetas de Arduino



Fuente: (Hubot, 2017)

## REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

Estos sensores son compatibles con Arduino UNO R3, Mega2560, Mega328, Nano, Raspberry Pi. De tal manera pueden construirse “nodos sensores” para monitoreo de variables de hogares inteligentes, monitoreo de gases contaminantes en un parque, barrio, escuela, etc.

En resumen, un nodo sensor tiene integrado no solo un componente de detección, sino también unidades de procesamiento, comunicación y almacenamiento. Sin embargo, la transmisión directa desde cada sensor hasta la BS puede requerir que los nodos operen a altas potencias de transmisión para superar las posibles obstrucciones en el camino de la señal, como paredes o terreno irregular. Esto resulta en un consumo de energía significativo, lo que a su vez acorta la vida útil de la batería de los sensores.



## CONSUMO DE ENERGÍA EN NODOS

Las principales fuentes de consumo de energía en los nodos sensores son las tareas de comunicación, seguidas de las operaciones de cómputo y detección. Aunque las diferentes plataformas de detección tendrán diferentes perfiles de consumo de energía, las siguientes consideraciones son aplicables de forma general (Rault, 2015):

- El subsistema de comunicación tiene un consumo de energía mucho más alto que el subsistema de computación.
- El consumo de energía en la parte de radio comunicaciones es del mismo orden de magnitud en los estados de recepción, transmisión e inactividad, mientras que el consumo de energía disminuye al menos en un orden de magnitud en el estado de sueño. Por lo tanto, la radio debe apagarse siempre que sea posible. (Suciu, 2020).
- Dependiendo de la aplicación específica, el subsistema de detección podría ser otra fuente importante de consumo de energía, por lo que su consumo de energía debe reducirse también en la medida de lo posible. (Khan, Qureshi, & Iqbal, 2016).

Se sabe que un nodo TelosB puede permanecer activo durante 95 horas si opera continuamente al 100% de su capacidad (sin entrar en modo de reposo, con la radio siempre encendida y sin comunicarse), y hasta 200 horas si su ciclo de trabajo es del 25%. En la tabla 1 se muestra el perfil de consumo de energía de una plataforma típica de sensores, como es TelosB.

Tabla 1. Consumo energético de sensores TelosB.

Módulo	Modo	Corriente medida
Radio	Recepción	22.8 mA
Radio	Transmisión (0 dB)	21.7 mA
Radio	Transmisión (- 25 dB)	12.1 mA
Radio	Inactivo (- 25 dB)	2.4 mA
Microcontrolador	CPU activa	2.33 mA
Microcontrolador	CPU inactiva	2.25 mA
Memoria flash interna	Borrado	1.35 mA

Memoria flash interna	Escritura	0.9 – 1.34 mA
Memoria flash interna	Lectura	0.68 mA
Microcontrolador	CPU inhabilitada	1.80 $\mu$ A

En la figura 33 se muestra la plataforma de código abierto TelosB (con capacidad de procesamiento) desarrollada por la Universidad de California en Berkeley Estados Unidos con el objetivo de facilitar la experimentación de la comunidad científica. El modelo mostrado en la figura mencionada es del modelo CM5000, que incluye sensores que miden la temperatura, la humedad relativa y la luminosidad. Posee interfaz USB compatible con el estándar IEEE 802.15.4, tiene una antena empotrada, usa 2 baterías AA y alcanza velocidades de transmisión de datos de 250 Kbps. (Advanticsys, 2013).

*Figura 33. Nodo o Mota TelosB modelo CM5000*



Fuente: (Advanticsys, 2013)

La integración de sistemas de detección, procesamiento de señales y funciones de comunicación de datos convierte a la WSN en una plataforma importante para procesar los datos recopilados del entorno.

## CAUSAS DE DESGASTE DE ENERGÍA

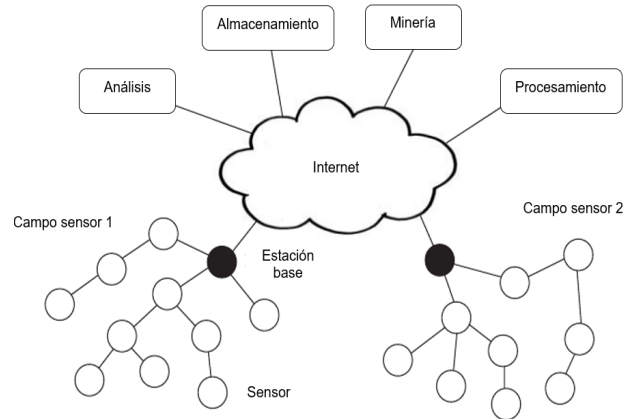
Los nodos sensores en redes desatendidas (sin monitoreo o intervención humana) pueden tener un profundo efecto en la eficacia de muchas aplicaciones, tales como la captura de imágenes de un objetivo, detección de intrusión, monitoreo del tiempo, vigilancia de seguridad y táctica, computación distribuida, detección de condiciones ambientales tales como temperatura, movimiento, sonido, luminosidad o la presencia de ciertos objetos y manejo de desastres. Cuando la energía en un nodo se drena de forma no controlada, entonces en poco tiempo se le agota su energía y ‘muere’, dentro de la red. Por lo tanto, es vital evitar los agujeros de cobertura de manera efectiva.

Cuando se produce un agujero de cobertura, el rango de detección de los nodos cercanos se maximiza para cubrir el área descubierta. Sin embargo, exige un alto costo en términos de consumo de energía y conectividad en la red. La detección de agujeros de cobertura ayuda a identificar vías de comunicación alternativas y ayuda a regular el flujo de tráfico de datos. La ausencia de algoritmos de detección de agujeros eventualmente causará problemas en el enrutamiento. (Sahoo, Chiang, & Wu, 2016) y (Zhuo, Liu, Zhou, & Tian, 2021). Cuando los paquetes se transfieren desde el origen hasta llegar a su destino, es frecuente que los nodos sensores efectúen comunicación de múltiples saltos y además pierdan energía debido a las ‘sobre-escuchas’, lo que significa que un nodo está siempre encendido recibiendo paquetes que están destinados a otros nodos.

O en caso contrario por la presencia de agujeros de cobertura se retransmitan paquetes haciendo que la batería de esos nodos se malgaste de forma no planificada. Los nodos de una red con comunicación de múltiples saltos pueden morir por agotamiento de sus baterías, desconectando así la red prematuramente (Sobin, 2020). Por lo tanto, el efecto de tener una cantidad de nodos muertos es una indicación de la gestión de energía en toda la WSN

Una WSN no estructurada es aquella que alberga una gran cantidad de nodos de sensores, los cuales pueden ser instalados de forma improvisada en el área o zona geográfica designada. Esta red no recibe una atención constante y se deja para llevar a cabo tareas de monitoreo y generación de informes de manera autónoma. Esta situación dificulta la tarea de mantener y gestionar adecuadamente la red.

Figura 34. Sensores localizados en diferentes zonas geográficas.



Fuente: Traducido de (Dargie & Poellabauer, 2010)

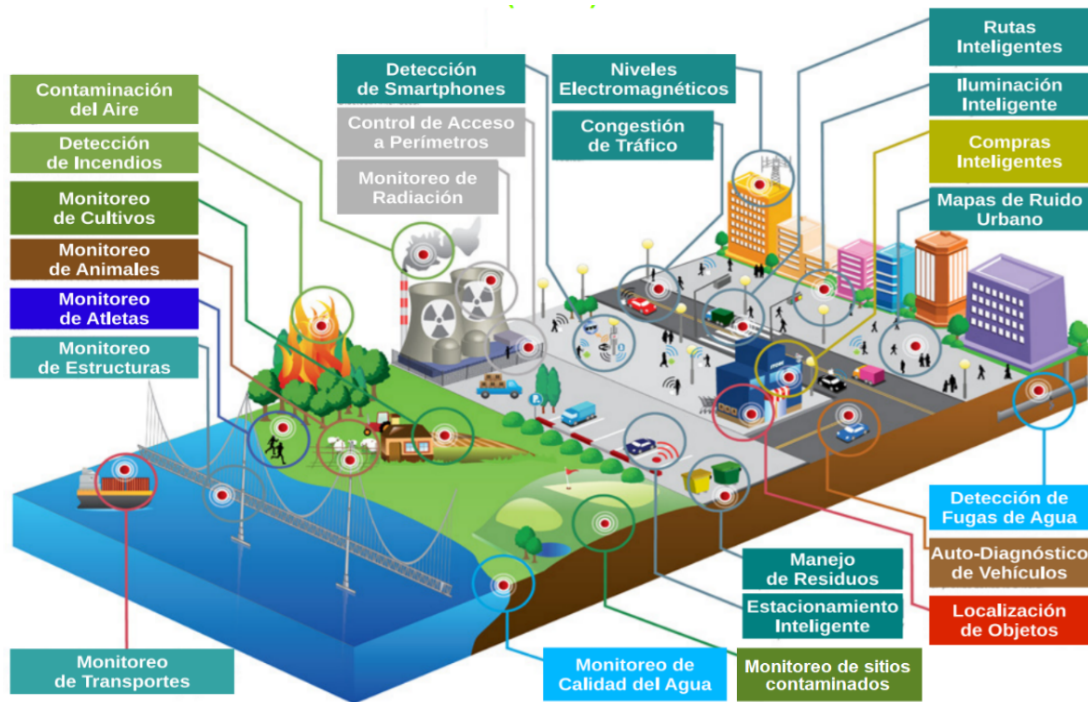
Las capacidades de los nodos en una WSN pueden variar ampliamente, es decir, los nodos simples pueden monitorear un único fenómeno físico, mientras que los dispositivos más complejos pueden combinar muchas técnicas de detección diferentes, por ejemplo, acústica, óptica, magnética. También pueden diferir en sus capacidades de comunicación, por ejemplo, usando tecnologías de ultrasonido, infrarrojo o radio frecuencia con tasas de datos y latencias variables.

Si bien los sensores simples solo pueden recopilar y transmitir información sobre el entorno observado, los sensores más potentes, es decir, los dispositivos con gran capacidad de procesamiento, energía y almacenamiento también pueden realizar funciones más complejas de procesamiento y agregación. Tales dispositivos generalmente asumen responsabilidades adicionales en una WSN, por ejemplo, pueden formar redes troncales de comunicación que pueden ser utilizadas por otros dispositivos de recursos limitados para llegar a la BS.

En la figura 35 se muestran escenarios de monitoreo, detección de variables en un campo de interés.

## REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

Figura 35. Escenarios de detección y monitoreo con WSN



Fuente: Traducido de (Libelium, 2015)

Algunos dispositivos pueden tener acceso a tecnologías de soporte adicionales, por ejemplo, receptores del sistema de posicionamiento global (GPS, Global Positioning System), lo que les permite determinar con precisión su posición, etc. Desde el diseño y ya en el despliegue o implementación, el costo de los nodos se debe mantener bajo para minimizar el costo total de la red (hardware de nodo, energía, etc.). Para equilibrar el costo, la fiabilidad y el rendimiento, se debe tomar en cuenta, que el costo de una red con sus nodos es proporcional al cuadrado del número de nodos de la red.

## CLASIFICACIÓN DE WSN

Las WSN son extremadamente específicas de la aplicación y se implementan de acuerdo con sus requisitos. Por lo tanto, las características de un WSN serán diferentes a las de otro WSN.

Independientemente de la aplicación, las redes inalámbricas de sensores en general se pueden clasificar en las siguientes categorías.

- **WSN estática y móvil:** En muchas aplicaciones, todos los nodos sensores se fijan sin movimiento y se trata de redes con nodos sensores estáticos. Cuando los sensores están dentro de un vehículo o medio no estático, se dicen que son WSN móviles.
- **WSN determinista y no determinista:** En la WSN determinista, la ubicación de cada nodo sensor se determina y se establece de antemano. Sin embargo, la planificación previa del despliegue de los nodos de sensores es factible solamente en un conjunto limitado de escenarios aplicativos. En la mayoría de los casos, resulta impracticable determinar la posición de los nodos debido a diversos factores, tales como ambientes adversos o condiciones operativas desfavorables. Dichas redes no son deterministas y requieren un sistema de control complejo.
- **BS única y BS múltiple:** En la primera, solo se emplea una BS que está ubicada en las proximidades de la región donde se encuentran los nodos sensores. Todos los nodos sensores establecen comunicación exclusivamente con esta BS. Por otro lado, en una WSN de BS múltiple, se emplean más de una BS, lo que permite que un nodo sensor pueda enviar datos a la BS que esté más cercana a él.
- **BS estática y BS móvil:** La BS estática se encuentra en una posición fija, generalmente cercana a la zona de detección de la red. En contraste, una BS móvil se desplaza alrededor de la zona de detección con el objetivo de distribuir de manera equilibrada la carga de trabajo entre los nodos sensores.
- **WSN de salto simple y salto múltiple:** En una WSN de salto simple, los nodos sensores están directamente conectados a la BS, lo que significa que la transmisión de datos se realiza sin intermediarios adicionales. Por otro lado, en una WSN de múltiples saltos, los datos son transmitidos a través de nodos intermedios, llamados nodos pares y cabezales de clúster (CH, Cluster Head). en lugar de ser transmitidos directamente a la BS. Esta estrategia se emplea con el fin de reducir el consumo de energía, ya que los nodos intermedios pueden retransmitir los datos con una potencia de transmisión menor en comparación con los nodos sensores individuales.
- **Auto configurable y no configurable:** Una WSN, donde sus nodos sensores son capaces de auto configurarse y mantener la conexión y trabajan en colaboración

con otros nodos sensores. En cambio, en una WSN no auto configurable, sus sensores no pueden configurarse de forma automática y además dependen de una unidad de control para recopilar información. (Xing, Wang, Zhang, & Lu, 2009).

- **WSN homogénea y heterogénea:** En una WSN homogénea, todos sus nodos sensores comparten características similares en términos de consumo de energía, capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos. En cambio, en la WSN heterogénea consiste en dispositivos con diferentes capacidades de hardware, por ejemplo, los nodos sensores pueden tener más recursos de hardware si sus tareas de detección requieren mayor capacidad de cómputo y almacenamiento o si son responsables de recopilar y procesar datos de otros sensores dentro de la red. Algunas aplicaciones cumplirán requisitos específicos de rendimiento y calidad, por ejemplo, bajas latencias para eventos críticos del sensor o alto rendimiento para los datos recopilados. La existencia de un conjunto heterogéneo de sensores plantea muchos problemas técnicos relacionados con el enrutamiento de datos (Chen, Wang, & Chen, 2013).

### INFRAESTRUCTURA DE RED WSN

La infraestructura que compone una WSN tiene los siguientes componentes:

- Los nodos sumideros o *sinks*: Son nodos centrales con mayor capacidad de comunicación y cómputo, hacia los cuales se transmite la información recolectada por los nodos sensores. Según el campo de aplicación, el sumidero puede pertenecer a la WSN (y actuar como otro sensor), o bien ser una entidad externa a la red o funcionar como un gateway a otra red más grande, como redes corporativas en Internet. La información recolectada por los sumideros en algunos casos es transmitida hacia otros equipos de mayor jerarquía llamados estaciones base,
- Estación Base: Son equipos externos de la red, desde donde se gestiona la misma y se procesa la información obtenida en grandes volúmenes. Sus funciones más importantes son: controlar y gestionar la WSN, recolectar información sobre los nodos (nodos en funcionamiento, nodos con fallas, etc.), e inicializar la WSN.
- Nodos router o nodos relay: Tienen la función de retransmitir datos generados por otros nodos para que alcancen el destino final. También pueden detectar variables.
- Nodos finales o End Devices: Su función es recolectar datos y transmitirlos hacia nodos routers, para que puedan alcanzar el nodo sumidero. No pueden rutear datos, solo pueden comunicarse con el nodo ruteador. Este tipo de nodo puede ser de menor costo, ya que su protocolo de ruteo es muy simple: transmitir el dato al router más cercano. También puede tener un consumo de energía mucho menor al resto de los tipos de nodos, ya que solo se enciende para transmitir su dato y recibir cualquier mensaje destinado a él, y puede permanecer apagado el resto del tiempo, independientemente de las comunicaciones entre los demás nodos.



## TOPOLOGÍA DE WSN

Las estructuras de enlace o topologías para comunicación en WSN consisten principalmente en los nodos de sensores, los nodos de sumidero (sink) que agregan los datos medidos de varios nodos de sensor y los nodos de puerta de enlace (gateway) que interconectan los nodos de sumidero con la infraestructura de red por ejemplo Internet y enrutan el tráfico a los destinos adecuados. Hay casos en los que los nodos sumideros tienen interfaces de red integradas para el reenvío de datos y, por lo tanto, coinciden con los nodos de puerta de enlace.

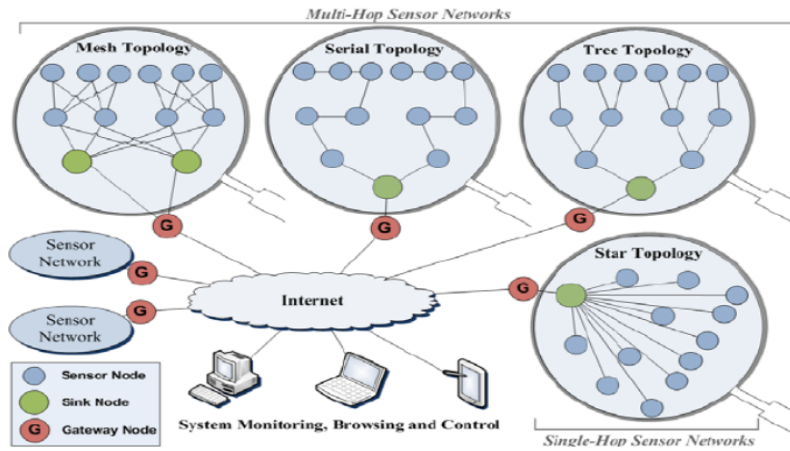
Con respecto a la topología de comunicación de la red de sensores, puede formar una red de un solo salto donde cada nodo sensor envía directamente los datos al nodo sumidero a través de una topología en estrella, o una red de múltiples saltos donde cada nodo sensor depende de sus nodos vecinos para reenviar sus datos sensados al nodo de sumidero respectivo. Las redes multisalto pueden formar una topología en malla, en serie o en árbol. El mal funcionamiento de algunos nodos debido a una falla de energía puede causar cambios significativos y podría requerir el re-encaminamiento de paquetes y la reorganización de la red (Alnawafa & Marghescu, 2018).

Cuando la topología es en árbol, se la identifica también como redes jerárquicas. Un clúster es administrado por un nodo seleccionado conocido como CH este es responsable de coordinar las actividades de los miembros y comunicarse con otros CH o la BS. Además, los cabezales de clúster pueden agrupar y gestionar eficientemente la comunicación dentro de la red, contribuyendo así a una mejor organización y optimización del rendimiento general de la WSN. Las técnicas de clúster ayudan a limitar el consumo de energía a través de diferentes medios

En la figura 36 se representan algunas topologías para WSN, aunque una topología serial es casi poco empleada en el contexto del IoT.



Figura 36. Topologías en WSN



Fuente: (Zafeiropoulos, Spanos, Arkoulis, & Konstantinou, 2011)

Las características de redes jerárquicas son.

- Reducen el rango de comunicación en el interior el clúster que requiere menos potencia de transmisión.
- Limitan el número de transmisiones gracias a la fusión realizada por el CH.
- Reducen operaciones intensivas en energía como coordinación y agregación a la cabeza del clúster.
- Permiten apagar algunos nodos dentro del clúster mientras que el CH asume las responsabilidades de reenvío.
- Equilibran el consumo de energía entre los nodos a través de la rotación del CH.

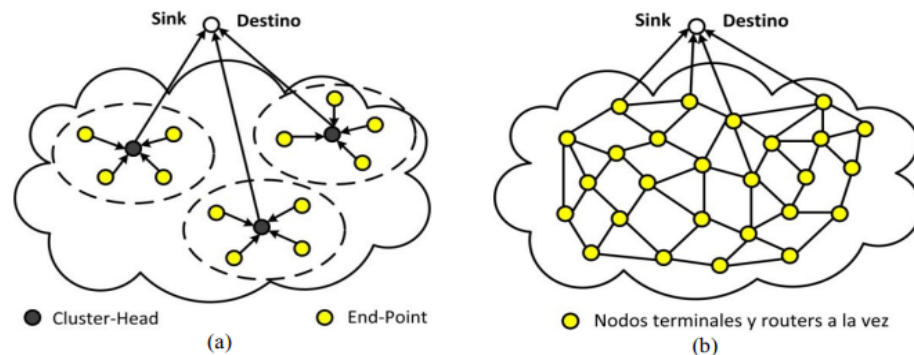
Además de la eficiencia energética, las arquitecturas de clúster también mejoran la escalabilidad de la red al mantener una jerarquía en la red. Una red jerárquica puede observarse como estrellas extendidas. En la figura 37 (a) se muestra comunicación con 3 CHs los cuales dirigen o enrutan datos recolectados por el resto de los nodos y los envía al nodo sumidero. Estos nodos enrutadores deben tener los recursos suficientes para poder:

- Realizar el muestreo de sus propios sensores.
- Recibir información de sensores inalámbricos vecinos.
- Crear mensajes con los datos locales y datos agregados recibidos de los nodos vecinos.

## REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

- Actualizar su información de enrutamiento (si hay más de una ruta),
- Transmitir los mensajes hacia el siguiente salto, en dirección hacia el destino final.

Figura 37. Topologías de red jerárquica (a) y de red plana o malla (b)

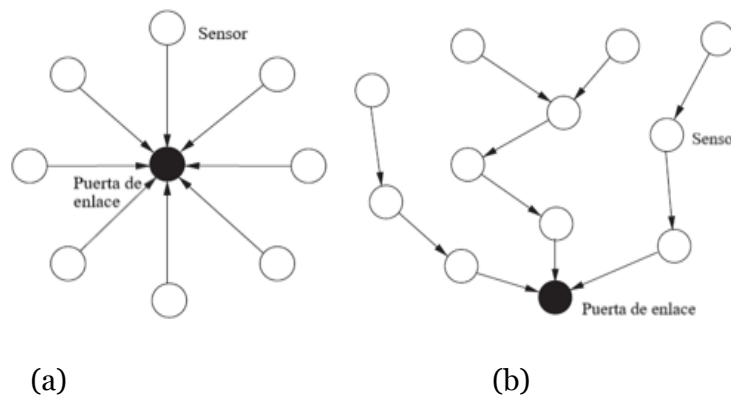


Fuente: (Ortega-Corral, Acosta del Río, & López, 2017).

En la figura 37 (b) muestra redes planas (mallas) con nodos intermediarios que son nodos terminales y routers a la vez, es decir sirven de repetidores (si sólo extienden conexiones de punto a punto) o de enrutadores (capaces de conocer una o más rutas hacia el destino).

En redes pequeñas, donde los nodos y la puerta de enlace están cerca, puede ser factible la comunicación de enrutamiento directa (un solo salto) entre ellos, como se muestra en la figura 38 (a). Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones WSN requieren un gran número de nodos que cubren áreas grandes por lo que requieren un enfoque de enrutamiento indirecto (multisalto).

Figura 38. Modelos de enrutamiento (a) salto único/estrella (b) múltiples saltos



Fuente: (Dargie & Poellabauer, 2010)

En la figura 38 (b), en este caso, la tarea crítica de la capa de red de todos los nodos sensores es identificar una ruta desde el sensor a la puerta de enlace a través de otros muchos nodos de sensores que actúan como relés (Kamgueu, Nataf, & Djotio, 2017). Es decir, los nodos no solo deben generar y transmitir su propia información, sino también servir nodos de reenvío para otros nodos

### **REQUISITOS PARA DESEMPEÑO CONVENIENTE EN WSN**

En el despliegue de una red WSN con desempeño conveniente es decir que cumpla con los requisitos específicos de la aplicación o del entorno en el que se utilizará. Puede existir varios requisitos, entre los que se destacan los siguientes.

- La fiabilidad en la red, asegurando un nivel suficiente de tolerancia a fallos para recuperarse cuando hay un fallo de nodo.
- La energía se convierte en un punto crucial porque los dispositivos sensores funcionan con baterías
- El consumo de recursos hardware es otro de los problemas asociados sobre todo cuando se trata de dispositivos destinados a ser desplegados en grandes espacios de monitorización, control y detección en entornos no accesibles, etc.
- El tipo de protocolo de enrutamiento utilizado es un aspecto importante a tener en cuenta porque en la mayoría de los casos está a cargo de redes inalámbricas multisalto en las que cada nodo debe realizar las funciones de enrutamiento de esos datos de un nodo a otro (Riva & Finochietto, 2012).
- Arquitecturas y topologías eficientes para resolver cualquier requisito de WSN.
- Aspectos de seguridad cubiertos por los requisitos de WSN, integridad, autenticación y confidencialidad.

Otro procedimiento para minimizar el consumo de energía en WSN, emplea criterios del enrutamiento a partir de diferentes enfoques de diseño.

## ENFOQUE AL ENRUTAMIENTO EN WSN

El proceso de establecer rutas desde una fuente a un receptor (por ejemplo, a una puerta de enlace) a través de uno o más nodos intermedios se denomina enrutamiento y es una responsabilidad clave de la capa de red de la pila de protocolos de comunicación. Los protocolos de enrutamiento son responsables de identificar o descubrir rutas desde una fuente o emisor hasta el receptor deseado. Es decir, debe garantizar la comunicación entre dos nodos de una WSN cuando la comunicación es de único salto. En el caso del enrutamiento multisalto implica encontrar múltiples trayectorias alternativas entre dos nodos en una red de comunicación, en lugar de depender de una única ruta. Esta estrategia se implementa para mitigar los efectos de la interrupción de la comunicación causada por la falla de uno o más nodos en la red. Este proceso de descubrimiento de ruta también se puede usar para distinguir entre diferentes tipos de protocolos de enrutamiento (Ahmad, Javaid, Khan, Qasim, & Alghamdi, 2014).

Dadas las características y complejidad de las WSN, resulta arduo encontrar un algoritmo de enrutamiento que funcione bien para la mayoría de los casos. El diseño de un protocolo de enrutamiento es desafiante debido a las características únicas de las WSN, incluida la escasez de recursos o la falta de fiabilidad del medio inalámbrico (Li, Kim, Han, & Lee, 2019). Por ejemplo, el procesamiento limitado, almacenamiento, ancho de banda y las capacidades de energía requieren soluciones de enrutamiento que sean ligeras, mientras que los frecuentes cambios dinámicos en una WSN (por ejemplo, cambios en la topología debido a fallas en los nodos) requieren soluciones de enrutamiento que sean adaptativas y flexibles. Además, a diferencia de los protocolos de enrutamiento tradicionales para redes cableadas, los protocolos para redes de sensores pueden no ser capaces de confiar en esquemas de direccionamiento globales (por ejemplo, direcciones IP en Internet).

En una red WSN, se requiere eficiencia energética para enviar información recopilada a la BS central (nodo coordinador o gateway). En la BS, los datos recibidos se procesan más, por consiguiente, se 'traza' el número máximo de rutas de eficiencia energética de tal manera que cada ruta sea un conjunto de sensores seleccionados (en lugar de todos los sensores). Debido al rango de comunicación restringido y la alta densidad de nodos de sensores, el reenvío de paquetes en las redes de sensores generalmente se realiza a través de la transmisión de datos de múltiples saltos. (Liu, y otros, 2019). Por lo tanto, el enrutamiento en redes de sensores inalámbricos se ha considerado un campo de investigación importante durante la última década.

En base la selección adecuada del protocolo de enrutamiento se puede otorgar a la WSN desempeños aceptables, pues la densidad y la distribución de los nodos de la red contribuyen a aumentar problemas como red inestable, frecuentes repeticiones de comunicaciones que

hacen que la batería se descargue, y el consumo energético puede verse afectado por escenarios de fallido enlace (Mostafaei, 2019).

Por aquello, la selección de los protocolos de enrutamiento tiene una dependencia con el tipo de aplicación para la cual se desea implementar la WSN.

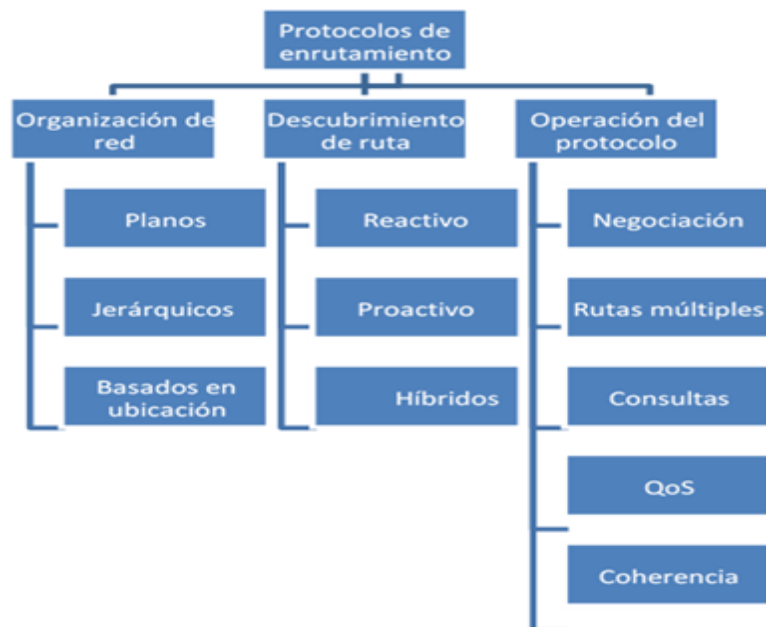
## PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO PARA WSN

Se han clasificado los protocolos de enrutamiento en WSN desde dos perspectivas diferentes: (1) estructura de la red y (2) operación del protocolo (Al-Karaki & Kamal, 2004). Sin embargo, hoy en día se ha agregado una opción adicional de tal manera se tienen tres clasificaciones diferentes;

1. Basadas en la estructura de red u organización.
2. Proceso de descubrimiento de ruta y
3. Operación de protocolo.

En la figura 39 se presentan las tres clases de protocolos de enrutamiento con sus respectivos tipos.

Figura 39. Clasificación de los protocolos de enrutamiento.



Fuente: Traducido de (Shabbir & Hassan, 2017)

## PROTOSCOLOS BASADOS EN LA ORGANIZACIÓN DE RED

Con respecto a la organización de la red, la mayoría de los protocolos de enrutamiento se ajustan a una de tres clases: planos o centrados en datos, jerárquicos y basados en ubicación.

- **Protocolos de enrutamiento planos:** En el enrutamiento plano o también llamado centrado en datos, las técnicas se basan principalmente en la transmisión de información especificada por ciertos atributos en lugar de recopilar datos de ciertos nodos. Dado que los datos se solicitan a través de consultas, la denominación basada en atributos es necesaria para especificar las propiedades de los datos.

El protocolo de sensor para información vía negociación (SPIN. Sensor Protocols for Information via Negotiation) es el primer protocolo centrado en datos, que considera la negociación de datos entre nodos para eliminar datos redundantes y ahorrar energía. Más tarde, la difusión dirigida (Intanagonwiwat, Govindan, & Estrin, 2000) se ha desarrollado y se ha convertido en un gran avance en el enrutamiento centrado en datos.

También se han propuesto muchos otros protocolos basados en la difusión dirigida (DD), como el enrutamiento consciente (eficiente, óptimo) de la energía, el enrutamiento de 'rumores' basado en consultas; la idea es enrutar las consultas a los nodos que hayan observado un evento en particular en vez de inundar toda la red para obtener información sobre un evento. Está concebido para entornos donde el enrutamiento geográfico no es posible. Tiene buen desempeño solo si el número de eventos es pequeño, de lo contrario los costos de mantener los nodos *sinks* y las tablas de eventos se vuelven inviables. (Shah & Rabaey, 2002).

En resumen, en los protocolos de enrutamiento centrado en datos o planos, los nodos juegan un papel igual y pueden establecer una ruta por operación local y retroalimentación de información entre ellos fácilmente. Pero para las redes a gran escala, la detección frecuente de topología puede invalidar las rutas descubiertas, lo que llevaría a un alto retraso y gasto en la red. Este fenómeno se puede resolver de manera eficiente en una red de enrutamiento basada en la jerarquía.

- **Protocolos de enrutamiento jerárquico:** En el enrutamiento basado en la jerarquía (Niu, Tao, Wu, Huang, & Cui, 2006) y (Hyeon & Kim, 2010) todos los nodos se dividen en diferentes grupos (zonas o clústeres). Cada grupo elige una cabeza de grupo CH de acuerdo con reglas específicas. El intercambio de datos entre los clústeres fue transmitido por el nodo de puerta de enlace, sin tener en cuenta los detalles de cómo se transmitirán los datos transmitidos al destino. En una palabra, el enrutamiento basado en la jerarquía no solo minimiza el gasto de la red al

disminuir el número de nodos que participan en el mantenimiento del enrutamiento, sino que también aumenta la estabilidad de la red al dividir la red en subredes fáciles de controlar. Algunos nodos pueden reenviar datos en nombre de otros, mientras que otros nodos solo generan y propagan sus propios datos (Zhang, Xu, & Xu, 2015).

Los protocolos jerárquicos designan un nodo guía del agrupamiento (CH) que puede ser seleccionado de entre los sensores desplegados o puede ser más robusto que otros nodos sensores en términos de energía, ancho de banda y memoria. Por lo tanto, la carga de la transmisión a la BS se maneja a través del nodo guía. El protocolo jerárquico consta de dos capas principales. Una de ellas se usa para seleccionar los nodos maestros o CH y la otra se encarga del enrutamiento. Sin embargo, muchas técnicas de esta categoría no se centran en el enrutamiento, sino en dictaminar quién y cuándo se enviarán o procesarán los datos, o en la asignación de un canal. (Querol, 2011)

- **Protocolo basado en ubicación o localización:** Los protocolos basados en la ubicación utilizan la información de posición para transmitir los datos a las regiones deseadas. Es decir, se basan en el conocimiento de la posición de cada uno de los dispositivos conformadores de la red. El direccionamiento de los nodos se realiza mediante la ubicación de cada uno de ellos y en la mayoría de estos protocolos se calcula la distancia entre nodos mediante la detección de la potencia recibida de los nodos vecinos (Maroto, 2010). En otras palabras, dependen de la información de ubicación de los nodos para tomar decisiones de enrutamiento.
- **Protocolos por descubrimiento de ruta:** En función del mecanismo (descubrimiento de ruta) utilizado para encontrar la ruta hasta el destino o en otras palabras por la forma en que la fuente crea una ruta hacia el destino, estos protocolos de enrutamiento se pueden clasificar en: proactivos, reactivos e híbridos.
- **Protocolo de enrutamiento proactivo:** En el modo proactivo, los nodos de sensores monitorean continuamente el entorno y envían periódicamente los datos monitoreados al usuario a una velocidad de ciclo constante. Las rutas se estiman antes de que se necesiten, los protocolos reactivos descubren rutas a pedido, es decir, cada vez que una fuente desea enviar datos a un receptor y no tiene una ruta establecida (Bhattacharyya, Kim, & Pal, 2010).

Un ejemplo de este tipo de protocolo es Optimized Link-State Routing Algorithm (OLSR) que incorpora la filosofía utilizada en protocolos tradicionales como OSPF de 'Estado de los Enlaces'. En este algoritmo todos los nodos se intercambian mensajes para formarse una visión consistente de toda la red y así poder decidir el encaminamiento de paquetes. (Subiela & León, 2012). Por tanto, su principal ventaja



es que las rutas están disponibles siempre que sean necesarias y no se incurre en retrasos para determinarlas.

Esta categoría de protocolos también se describe a menudo como basada en tablas, porque las decisiones de reenvío local se basan en el contenido de una tabla de enrutamiento que contiene una lista de destinos, combinada con uno o más vecinos de siguiente salto que conducen a estos destinos y costos asociados con cada opción de próximo salto. Estas tablas son:

- Tabla de distancias de los nodos vecinos
- Tabla de enrutamiento hacia nodos vecinos.
- Tabla de costos de enlace o de energía de transmisión.
- Tabla con número de secuencia de los mensajes de actualización.

El protocolo basado en vector de distancia de secuencia de destino (DSDV, Destination Sequence Distance Vector) eliminan los retrasos en el descubrimiento de rutas, pueden ser demasiado “agresivos” ya que se establecen rutas que tal vez nunca se necesiten. Además, el intervalo de tiempo entre el descubrimiento de la ruta y el uso real de la ruta puede ser muy grande, lo que puede conducir a rutas obsoletas (Dung, Hieu, Choi, & Kim, 2017). Definitivamente, el costo de establecer una tabla de enrutamiento puede ser significativo, por ejemplo, en algunos protocolos implica la propagación de la información local de un nodo (como su lista de vecinos) a todos los demás nodos de la red (Gunjan, Maheshwari, & Sharma, 2018).

- **Protocolo de enrutamiento reactivo:** Se activan después de que ha ocurrido un evento que conduce a la conservación de energía, pero también a una respuesta más lenta. En el descubrimiento de ruta mediante protocolo de enrutamiento reactivo se descubren y se establecen bajo peticiones, con el consumo de energía que lleva asociado. Estos algoritmos optimizan los recursos evitando el envío de paquetes de forma innecesaria. (Palma, 2009). Como contrapartida, sufren una pérdida de tiempo cada vez que realizan el descubrimiento de la ruta, es decir provoca demoras antes de que se produzca la transmisión de datos real. Se califica a AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) como protocolo reactivo, considerado para ser utilizado en una red ad hoc con nodos móviles, que se caracteriza por cambios frecuentes de conectividad debido al posible movimiento de los nodos. El protocolo de enrutamiento AODV es el más aceptable para redes Ad Hoc móviles generales, ya que consume muy poco ancho de banda y la sobrecarga también es baja en comparación con el protocolo de enrutamiento DSDV (proactivo). (Zamora, Philco, & Estupiñan, 2019).
- **Protocolo de enrutamiento híbrido:** Los protocolos de enrutamiento híbrido conservan una ideología proactiva en un contorno local y reactiva a nivel más completa. Han sido diseñados para atender las necesidades de aplicaciones que



requieren una respuesta ágil ante variaciones abruptas en los parámetros que están siendo medidos o monitoreados. El protocolo ZRP (Zone Routing Protocol). Es un protocolo híbrido que agrupa nodos en zonas geográficas. Utiliza el enrutamiento proactivo DVA (Algoritmo de vector de distancia) entre nodos dentro de zonas individuales y el enrutamiento reactivo DSR (Enrutamiento de origen dinámico) entre zonas.

Otro protocolo de ruteo es TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols) se caracteriza por la monitorización continua del entorno por parte de los sensores. Estos sensores transmiten datos a una frecuencia reducida, solo cuando las mediciones realizadas se encuentran dentro de un rango de interés predefinido. Esto permite mantener un equilibrio entre la eficiencia energética y la precisión de la información transmitida. Operan bajo el concepto de clústeres a pesar de que la formación de clústeres provoca cierta inviabilidad ya que no facilita la escalabilidad, o el crecimiento de la red. Otro tipo de protocolo es APTEEN (AdaPtive TEEN) que ahorra más energía que el protocolo TEEN, ya que cambia los rangos de umbral de sus medidas de acuerdo con las necesidades y al tipo de aplicación, respondiendo mejor a eventos críticos. Su desventaja es que tiene más complejidad y demora que TEEN.

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) Crea grupos de nodos basados en la fuerza de la señal y usa cabezas de grupo para agregar, comprimir y transmitir paquetes a la BS. El número óptimo de cabezas de clúster se estima en alrededor del 5% del total de nodos, mientras que todos los procesos, como la fusión de datos y la agregación de datos, se realizan localmente en los clústeres. Durante la operación LEACH, los CH cambian aleatoriamente para equilibrar la energía restante y la vida útil de la red. Sin embargo, dado que utiliza enrutamiento de un solo salto, no se recomienda para redes de sensores implementadas en áreas extensas. También produce gastos generales de comunicación a la BS.

- **Protocolos de enrutamiento basados en su operación:** La clasificación de protocolos de enrutamiento según su operación se diferencia en cinco tipos:
  1. Basados en Negociación (Negotiation): Estos protocolos utilizan una serie de mensajes de negociación entre nodos para eliminar duplicados en la información y evitar el envío de datos redundantes al siguiente nodo o al sumidero. En este enfoque, los nodos intercambian información sobre los datos que han recopilado y procesado, negociando para determinar cuál de ellos enviará la información al siguiente paso en la ruta de comunicación. Este proceso ayuda a reducir el tráfico de datos innecesario y mejora la eficiencia de la red al minimizar la duplicación de información.

2. Basados en Multiruta (Multi-Path): Estos protocolos utilizan múltiples caminos de comunicación en lugar de depender de una única ruta. Al emplear varios caminos alternativos para enviar datos desde el nodo emisor al receptor, se puede mejorar el rendimiento de la red al distribuir la carga de tráfico de manera más equitativa y reducir la congestión en una ruta específica. Además, el enrutamiento por múltiples caminos aumenta la fiabilidad de la comunicación al proporcionar redundancia en caso de fallos en algún enlace o nodo.
3. Basados en Consultas (Query): Aquí, los nodos destinatarios propagan una consulta de información a través de la red, solicitando datos específicos o realizando una tarea de sensado. La consulta se propaga desde un nodo inicial hacia la red, y cuando un nodo que posee la información solicitada la identifica, responde a la consulta enviando los datos al nodo que inició la consulta. Este enfoque minimiza el tráfico de red al enviar datos solo cuando son solicitados activamente, reduciendo así el consumo de energía y mejorando la eficiencia de la transmisión de datos en la red de sensores.
4. Basados en Calidad de Servicio (QoS): Donde la red debe satisfacer ciertas métricas de QoS, como delay, energía, ancho de banda, cuando envía datos al nodo sumidero, conservando de esta forma una red equilibrada en consumo energético y calidad de la información. Tanto la red como el nodo central enfrentan situaciones que demandan una coordinación efectiva. La ausencia de una coordinación centralizada y de límites en los recursos disponibles puede originar desafíos. El nivel de servicio y sus atributos están estrechamente vinculados al tipo específico de aplicación que se está considerando.
5. Basados en Coherencia (Coherent): Donde la información es enviada después de un mínimo procesado a los nodos encargados de la agregación. El procesamiento en coherencia es una estrategia típica para elaborar algoritmos de enrutamiento eficientemente energéticos.

Es importante considerar estrategias de enrutamiento y protocolos de comunicación eficientes para garantizar una operación sostenible y de larga duración de las WSN. Además, se han propuesto algoritmos de enrutamiento inteligentes que tienen en cuenta factores como la ubicación de los nodos, la densidad de la red y las condiciones del entorno para optimizar la eficiencia energética y maximizar la vida útil de la red. Muchos protocolos y mecanismos usados en las WSN son soluciones exclusivas, mientras que las soluciones basadas en estándares surgen lentamente.

Al respecto de manera coyuntural, los estándares son importantes para la interoperabilidad y facilitan el diseño y la implementación de aplicaciones WSN. La estandarización en IoT y la arquitectura de las WSN dentro del IoT es fundamental para garantizar la

interoperabilidad, la seguridad y el desarrollo sostenible de estas tecnologías. Por lo tanto, un desafío clave en el diseño de estas redes es la escalabilidad de los sistemas IoT y WSN, permitiendo la creación de soluciones más robustas, interoperables y seguras. Además, de proporcionar un marco común para el desarrollo y la implementación de nuevas tecnologías y aplicaciones en el ámbito del IoT y las WSN.

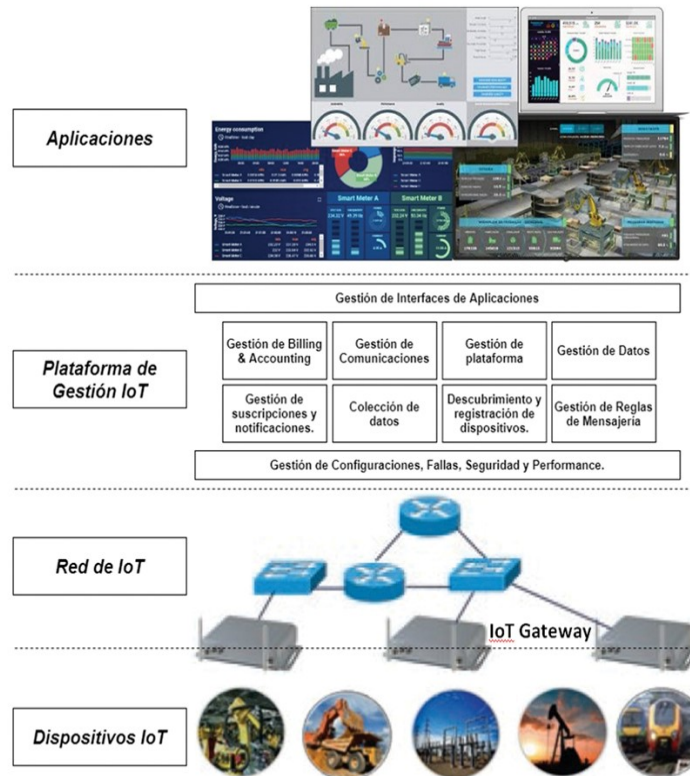
### ARQUITECTURA WSN SEGÚN EL IOT

La arquitectura de una WSN dentro del contexto IoT se compone de las siguientes capas principales:

- 1. Capa de Dispositivos:** En esta capa, se encuentran los nodos sensores que están dispersos en el área de interés. Abarca diversos sensores para medir magnitudes como temperatura, humedad, presión, entre otras. Cada nodo es capaz de recolectar datos y comunicarse de manera inalámbrica con otros nodos o con BS más cercana.
- 2. Capa de Red:** En esta capa, se gestionan las comunicaciones entre los nodos sensores y la infraestructura de red. Los nodos pueden transmitir datos entre ellos mediante enrutamiento ad hoc o utilizar protocolos de comunicación para enviar la información recopilada a la BS. Se emplean tecnologías inalámbricas como ZigBee, Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi, o protocolos de redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) según los requisitos específicos de la aplicación.
- 3. Capa de Gestión o Middleware:** Proporciona servicios de gestión de datos, seguridad, y coordinación de recursos para facilitar la interoperabilidad entre los nodos sensores y las aplicaciones IoT. Esta capa actúa como un puente entre la capa de red y la capa de aplicaciones. También puede incluir funciones de filtrado, agregación y procesamiento de datos para reducir la cantidad de información transmitida y mejorar la eficiencia del sistema.
- 4. Capa de Aplicaciones:** Esta capa se encarga de procesar los datos recibidos desde los nodos sensores y ofrecer servicios o aplicaciones basadas en ellos. Los datos recopilados pueden ser analizados, almacenados y visualizados para tomar decisiones en tiempo real o para análisis posteriores. Esta capa puede integrarse con sistemas externos o aplicaciones IoT para aprovechar los datos en diferentes contextos. También se encarga de ofrecer interfaces de usuario o servicios basados en los datos recolectados. Estos pueden incluir paneles de control en tiempo real para monitorear variables específicas, alertas automáticas cuando se detectan eventos importantes o incluso la generación de informes y visualizaciones para análisis más detallados.

# REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

Figura 40. Arquitectura WSN para IoT



Fuente: (Musso, 2021)

## REDES DE SENSORES Y ACTUADORES

Durante las últimas dos décadas, ha habido un notable aumento en el interés por las redes de sensores/actuadores (SAN, Sensor-Actuator Network) o, de manera más general, en los sistemas de control en red (NCS, Networked Control Systems). En comparación con las arquitecturas de sistemas convencionales, los NCS presentan numerosas ventajas, como la reducción del cableado del sistema, una mayor facilidad en el diseño, diagnóstico y mantenimiento, así como un menor costo. Además, ofrecen mayor flexibilidad, confiabilidad y seguridad. Como resultado de estas ventajas, los NCS se han implementado ampliamente en diversas áreas, como en automóviles, aviones, naves espaciales, vehículos autónomos, sistemas de transporte, sistemas de energía, monitoreo remoto y adquisición de datos, procesos químicos y diversas plantas de fabricación.

Hasta el momento, la investigación en NCS se ha centrado principalmente en varias limitaciones de comunicación básicas que pueden ocasionar degradación del rendimiento o pérdida de estabilidad, tales como los retrasos inducidos por la red, pérdida de paquetes, corrupción o desorden de datos, así como la limitación de velocidad de datos y los efectos de cuantificación. La restricción de acceso al medio es otro tema crucial digno de una investigación profunda, ya que se refiere al hecho de que la red no puede acomodar todos los nodos (sensores, actuadores, subsistemas, etc.) simultáneamente en cualquier momento. Además, existen otras cuestiones abiertas que requieren investigación.

Como un tipo especial de NCS, las redes de sensores/actuadores suelen estar equipadas con una amplia variedad de dispositivos avanzados en capacidades de detección, comunicación, computación y movilidad, que demandan una cantidad considerable de energía. Además, las baterías que alimentan estos dispositivos tienen una capacidad limitada y no son fácilmente reemplazables o recargables. Esto plantea una serie de cuestiones interesantes y desafiantes, como la localización, cobertura y enrutamiento de redes móviles de sensores/actuadores, entre otras.

### ENFOQUE DE WSN

Una WSN es una extensión de la WSN y es una infraestructura ubicua dentro de un sistema ciber físico (CPS Cyber-Physical System), junto con las redes inalámbricas y las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), Este tipo de red integra la industria 4.0 la cual facilita que las fábricas existentes sean lo suficientemente inteligentes como para producir productos de alta calidad con menores costos de fabricación.

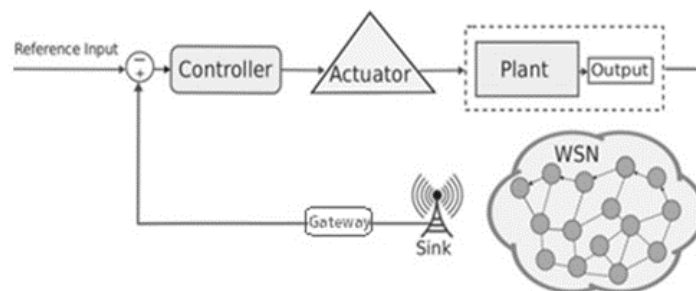
Dado que el rendimiento es una parte integral de los procesos y sistemas industriales, por tanto, la tendencia creciente es integrar sensores y controladores de proceso (actuadores) para realizar tareas de detección y actuación. Es decir, los nodos de sensores han sido

integrados con actuadores. Estos actuadores también se denominan actores en el contexto de WSN. No solo actúan sobre el entorno físico, sino que también poseen capacidades de red como recibir, transmitir, procesar y retransmitir datos. Por ejemplo, un robot que trabaja en las industrias puede actuar sobre el entorno físico por medio de varios motores y servomotores (actuadores). Por lo tanto, sensores y actuadores se utilizan para los propósitos de atender el tiempo de actividad de la producción (y evitar situaciones costosas de inactividad), mantener la calidad (y evitar el desperdicio y el reproceso costosos) y proporcionar una funcionalidad de control crítica de una fábrica moderna y en red. (y su equipo automatizado asociado, instrumentación y otros sistemas).

Al respecto, se indica que cualquier pérdida de señales de comunicación confiables puede significar un impacto directo y costoso en los resultados de una empresa y, en el peor de los casos, incluso generar un entorno de trabajo inseguro para los empleados.

La figura 41 muestra el lazo de control de un proceso o planta que recibe señales o datos de una WSN centralizada.

*Figura 41. Lazo de control para conformar una WSAN*



Fuente: Adaptado de (Raza, Faheem, & Guenes, 2019)

La incorporación de WSAN en diversas máquinas y fases de los procesos productivos, junto con el uso de la computación en la nube, ha incrementado su conectividad y ha estimulado la utilización de capacidades necesarias para aprovechar la información generada en las nuevas formas de fabricación. La comunicación en las aplicaciones WSAN suele basarse en un modelo de comunicación impulsado por eventos, lo que implica un enfoque centrado en los datos en sí, a diferencia del modelo tradicional basado en direcciones. Por lo tanto, el modelo de solicitud/respuesta, que es un modelo de comunicación asincrónica, ya no es adecuado para las aplicaciones WSAN. Además, las redes de sensores/actuadores requieren un modelo de comunicación más flexible y escalable debido a la naturaleza altamente dinámica de estos entornos.

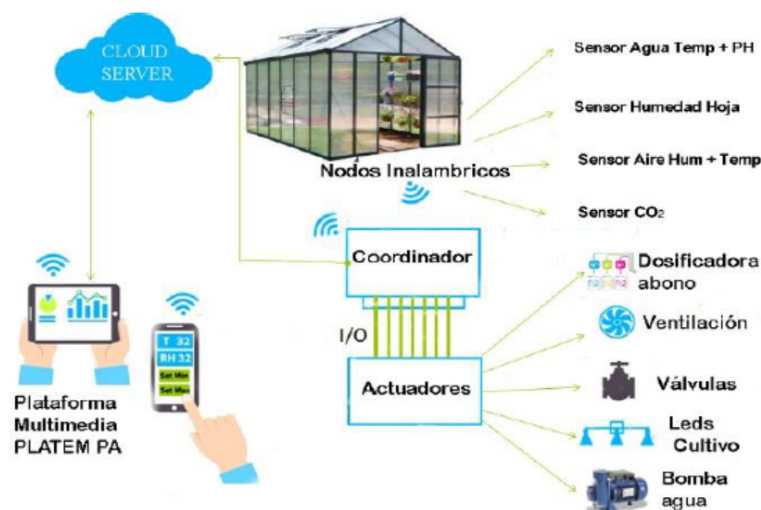
Un ejemplo sobre WSAN es un sistema con una red de sensores que monitorea de manera continua un invernadero. Los datos relativos al entorno, la calidad del agua y el estado de

## REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

las plantas se registran en un servidor accesible para agricultores del sector. Simultáneamente, un nodo coordinador utiliza estos datos para controlar diversos actuadores, como dosificadores de fertilizantes, sistemas de iluminación y válvulas de riego, que intervendrán en los cultivos. La interfaz gráfica y de control proporciona acceso a esta información y está diseñada para la interacción entre el usuario y el sistema inteligente, facilitando la gestión de los cultivos mediante su motor y reglas de inteligencia. Además, fomenta el intercambio de opiniones y experiencias entre los usuarios de la plataforma. La red ha sido sometida a pruebas para evaluar el tráfico generado por los nodos en diversas condiciones

Véase la figura 42.

Figura 42. Ejemplo de una WSN



Fuente: (Cambra, Sendra, Lloret, & Jimenez, 2017)

. Tanto los actuadores como la transmisión de datos de los dispositivos con sensores se llevan a cabo de forma inalámbrica. En este caso, se ha seleccionado el transceptor NRF24L01 de Nordic Semiconductor para la comunicación inalámbrica. El chip de comunicaciones elegido es un Atmel de 8 bits, conocido por su bajo consumo energético, y está disponible en formato comercial, montado en una placa electrónica con conexiones para sensores, zócalos para el transceptor de radio y porta pilas.

Se espera que una WSN para el IoT proporcione una infraestructura robusta y adaptable para la recopilación de datos, el control de dispositivos y la automatización de procesos, contribuyendo así a la transformación digital y a la mejora de la eficiencia en diversos sectores y aplicaciones.



# CAPITULO 3

SIMULACIÓN DE APLICACIÓN IOT DE ALUMBRADO PÚBLICO



## ALUMBRADO PÚBLICO PARA CIUDADES INTELIGENTES

Se requieren inversiones en el desarrollo, la implementación y las pruebas de proyectos de IoT, es decir hay costos para la selección de hardware, software y de la analítica de los datos. Los nuevos proyectos requieren mecanismos o procedimientos para probarlos, lo que involucra tiempo, esfuerzo y costos de desarrollo. Sin embargo, para disminuir el costo asociado con el desarrollo y la prueba del sistema, se puede simular el sistema IoT. Así, la simulación de entornos ayuda a modelar el sistema, razonar sobre él y aprovechar el conocimiento obtenido para optimizarlo.

### EL MODELADO

Un modelo es una representación de la construcción y funcionamiento de algún sistema de interés. Un modelo es similar pero más simple que el sistema que representa. Las simulaciones suelen estar basadas en un modelo generado por software. Uno de los propósitos de un modelo es predecir el efecto de los cambios en el sistema. Por un lado, un modelo debe ser una aproximación cercana al sistema real e incorporar la mayoría de sus características más destacadas. Entonces un modelo es una abstracción teórica del mundo real que tiene dos utilidades fundamentales:

- Reducir la complejidad, permitiendo distinguir las características importantes que están detrás de un proceso, ignorando detalles de menor importancia que harían el análisis innecesariamente laborioso.
- Realizar predicciones concretas, que se puedan probar mediante experimentos u observaciones. De esta forma, los modelos dirigen los estudios empíricos en una u otra dirección.

Una cuestión importante en el modelado es la validez del modelo. Las técnicas de validación del modelo incluyen la simulación del modelo en condiciones de entrada conocidas y la comparación de la salida del modelo con la salida del sistema.

Las clasificaciones de modelos matemáticos incluyen modelaciones deterministas (las variables de entrada y salida son valores fijos) o estocásticas (al menos un valor de entrada o salida es probabilística); estático (no se tiene en cuenta el tiempo) Se puede estudiar el funcionamiento del modelo y, por tanto, se pueden inferir propiedades relativas al comportamiento del sistema real o de su subsistema.

### LA SIMULACIÓN

El uso de la simulación para modelar sistemas dinámicos complejos y cambiantes puede ofrecer conocimientos que son difíciles de obtener con otros métodos. En su sentido más amplio, la simulación es una herramienta para evaluar el desempeño de un sistema,

existente o propuesto, bajo diferentes configuraciones de interés y durante largos períodos de tiempo real.

La simulación se usa antes de que un sistema existente sea modificado o construido, con el fin de reducir las posibilidades de incumplimiento de las especificaciones, para eliminar cuellos de botella imprevistos, para evitar la subutilización o la sobreutilización de recursos y para optimizar el rendimiento del sistema. Por ejemplo, la simulación se puede utilizar para responder preguntas como: ¿Cuál es el mejor diseño para una nueva red de telecomunicaciones?, ¿Cómo funcionará una red de telecomunicaciones cuando la carga de tráfico aumente en un 50%?, ¿Cómo afectará un nuevo algoritmo de enrutamiento en una red de sensores?, ¿Qué protocolo de red optimiza rendimiento de la red?.

La simulación es una metodología que ha evolucionado en paralelo al desarrollo de los computadores y que se ha consolidado como una herramienta que podría significar una reducción a los altos costos que implican la construcción de una red de datos o experimentar un control de proceso industrial. Normalmente, los modelos de simulación son estocásticos y dinámicos. Al respecto, el diseño de entornos de simulación de IoT se ha abordado centrándose en aspectos de bajo nivel, como sensores, motas, etc. Por lo general, se requiere capacidades de programación para implementar la simulación del entorno de IoT. El desarrollo dirigido por modelos es un área emergente de la ingeniería de software que tiene como objetivo desarrollarlos a partir de modelos de dominio. En síntesis, las simulaciones se utilizan para una variedad de aplicaciones. de una forma más sencilla analiza características, efectúa una evaluación preliminar del proceso y predecir posibles fallas o formas de mejorar el proceso con derivaciones de ahorro de tiempo y dinero. Permitiendo así probar teorías e ideas antes de implementarlas en el mundo real.

## CUPCARBON

Es un simulador de eventos discretos y es particularmente relevante en ámbitos académicos y científicos ya que permite múltiples funciones que se utilizan para la simulación de ciudades inteligentes y escenarios de redes inalámbricas avanzadas basadas en IoT. El simulador CupCarbon es una herramienta valiosa pues no solo facilita la comprensión visual de los principios fundamentales de las redes de sensores y su funcionamiento, sino que también permite a los investigadores probar diversas configuraciones, como topologías inalámbricas y protocolos.

Este simulador ofrece dos entornos de simulación distintos. El primero está dedicado al diseño de escenarios de movilidad y la generación de eventos naturales, como incendios y emisiones de gases, además de simular objetos móviles como vehículos y dispositivos voladores (por ejemplo, drones, insectos, entre otros). El segundo entorno de simulación representa eventos discretos en WSN, teniendo en cuenta el escenario diseñado en el primer entorno. Su objetivo es diseñar, visualizar, depurar y validar algoritmos distribuidos de monitorización, recogida de datos ambientales, etc., y crear escenarios ambientales con variables o magnitudes para que serán detectadas con nodos estáticos o móviles.

Al basarse en nodos, cada sensor se considera un nodo o agente independiente. Estos nodos se pueden programar en el Lenguaje Específico de Dominio (DSL) de CupCarbon llamado senScript. Este término indica que es un código o instrucciones donde las variables no se declaran, pero se pueden inicializar (comando set). A partir de este script, también es posible generar códigos para plataformas de hardware como Arduino/XBee, etc. Los sensores pueden comunicarse a través de tecnologías de comunicación inalámbrica, (bajo estándar IEEE 802.15.4) como ZigBee, 6LoWPAN, Wi-Fi y LoRa.

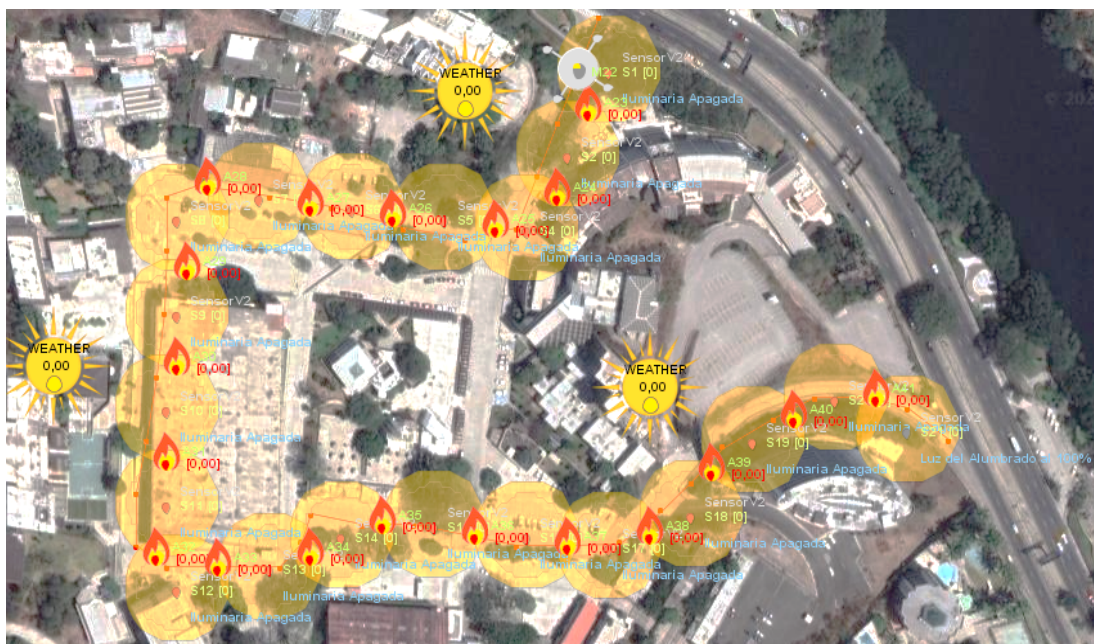
El simulador integra dos modelos de propagación de radio; uno en 2D que permite estimar muy rápidamente la atenuación del canal y la respuesta al impulso del canal según un gran número de receptores. El segundo es un trazado de rayos 3D completo asociado con un algoritmo Monte-Carlo. Es capaz de explotar el ligero comportamiento difuso de las superficies de reflexión, pero aún no la difracción. Además, dado que utiliza una rutina completa de trazado de rayos 3D, exige muchas pruebas de intersección entre los rayos y los objetos geométricos (edificios), lo que lleva a un mayor tiempo de cálculo. Se está realizando una implementación específica en GPU y debería permitir una reducción significativa del tiempo de cálculo. El programa consta con dos tipos de ambiente de simulación, el primero se basa en la simulación de los eventos discretos, mientras que el segundo se centra en eventos naturales con su respectiva movilidad incorporada.

## SIMULACIÓN DE ALUMBRADO INTELIGENTE

Se lleva a cabo la simulación de 21 dispositivos de iluminación conocidas como lámparas inteligentes distribuidas dentro del campus de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil (UCSG). Un escenario real con alumbrado en sus vías de acceso, De esta manera con CupCarbon se plantea un escenario con un sistema de alumbrado inteligente, el cual permite reducir el consumo de energía de las lámparas y a su vez extender la vida útil de las mismas (tiempo de vida de 5 años y medio).

Las lámparas inteligentes (nodos) trabajan de forma individual, es decir, cada uno de estos elementos no depende de los otros, es totalmente independiente, están programadas para detectar el movimiento de un objetivo en un determinado radio de detección y en base a esto actuar o mejor dicho encender la lámpara de alumbrado

Figura 43. Escenario virtual de alumbrado público inteligente

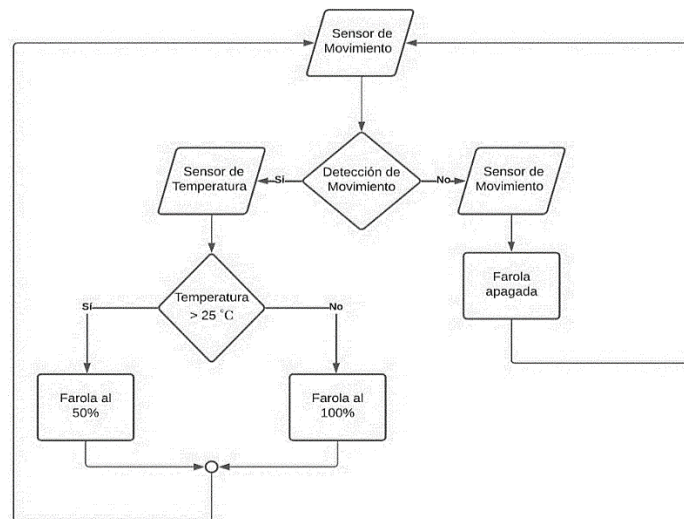


Dentro de cada nodo se debe detectar también la luminosidad natural (mañana o tarde) e inclusive detectar la temperatura del entorno que rodea a los nodos (lámparas inteligentes) y en base a sus valores sensados, regular la intensidad de las lámparas En la simulación se analiza el funcionamiento de un alumbrado público inteligente al establecer cada lámpara como un nodo inteligente, estos pueden decidir el porcentaje de su iluminación con base a la luz del entorno que le circunda y de la proximidad que detecte sus sensores. La regulación de potencia de la lampara se lo explica en los próximos 3 casos:

- El primer caso, una vez que el grado del sensor de movimiento está en umbral bajo (no se detecta ningún movimiento), las lámparas estarán apagadas independientemente de que la temperatura sea alta o baja en el perímetro.
- El segundo caso, una vez que el grado de sensor de desplazamiento está en umbral alto (se detecta desplazamiento de parte de los vehículos e incluso peatones), las lámparas se encenderán al 50% de su capacidad, si detectan una temperatura superior a 25 °C en su perímetro.
- El tercer caso, una vez que el grado de sensor de desplazamiento está en umbral alto, las lámparas se encenderán al 100% de su capacidad, si detectan una temperatura menor a 25 °C en su perímetro (por ejemplo, en la noche y en la mañana).

La figura 44 muestra la representación gráfica de las variaciones y acciones en el sistema de alumbrado inteligente.

Figura 44. Diagrama de flujo para el alumbrado inteligente



Según el diagrama de flujo al principio se comprueba la detección de movimiento (rango de detección), en el caso de no detectar ningún movimiento, la lámpara se mantiene apagada, sin embargo, si detecta un movimiento y además la temperatura de su entorno, se tendrá las siguientes opciones; si la temperatura está por encima de los 25°C el porcentaje de iluminación de la lámpara es del 50%, caso contrario, si la temperatura es inferior, la lámpara se ilumina al 100%. El criterio del rango de temperatura por debajo de 25° C es para indicar al sistema inteligente que es de noche, caso contrario (superior a 25°C) es un horario de mañana o tarde, Y se puede suponer que existe luz natural.

**DESCRIPCIÓN DE NODOS EN CUPCARBON**

Se declaran 21 lámparas por cada una de ellas existe una tarjeta de control con un sensor de movimiento. Una vez detecte cualquier objetivo móvil (vehículo, persona, etc.) este se enciende para respectivamente operar el sensor de luminosidad y establecer regulación de luminosidad (puede referirse como potencia en la lámpara). En la tabla 2 se detalla la lista de elementos (nodos).

*Tabla 2. Descripción de nodos de la red (alumbrado inteligente)*

<b>ID y Nombre del elemento</b>	<b>Descripción del elemento utilizado</b>
S1: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S2: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S3: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S4: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S5: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S6: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S7: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S8: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S9: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S10: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S11: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S12: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S13: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S14: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S15: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S15: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S16: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S17: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S18: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S19: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S20: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S21: Nodo sensor de luz	lámpara inteligente
S22: Nodo móvil	(Objetivo con movilidad)
S23: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S23: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S24: Gas Sensor	Simulador atmosférico



## REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

S25: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S26: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S27: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S28: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S29: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S30: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S31: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S32: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S33: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S34: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S35: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S36: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S37: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S38: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S39: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S40: Gas Sensor	Simulador atmosférico
S41: Gas Sensor	Simulador atmosférico

- Del S1al S21: Son las lámparas, las cuales tienen incorporado el sensor de movimiento y de luminosidad, para actuar sobre ellas.
- El S22: Es un objetivo móvil, el cual cumple la función de moverse y avanzar la ruta que antes se trazó en el mapa.
- Del S23 al S41: Se definen como sensores de gas (variable del simulador CupCarbon), su utilización sirve para generar eventos analógicos (parámetros ambientales como la temperatura, la humedad, gases, etc.) Esta selección requiere el uso de la ventana “Generador de eventos naturales” para crear archivos con los valores deseados en la simulación.

Se indica que la adición de la variable gas genera valores que se basan en la distribución gaussiana. Se indica que, una vez establecido los 18 sensores de gas, estos poseen un radio de alcance bastante corto, por lo cual se sitúa en medio de cada 2 nodos sensores. Además, se agregan sensores meteorológicos, que permiten mostrar en pantalla la temperatura del entorno o perímetro, ya que, si no se tiene este dispositivo, no se tendría datos de visualización de la temperatura.

*Figura 45 Escenario con sensores meteorológicos*

## REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES



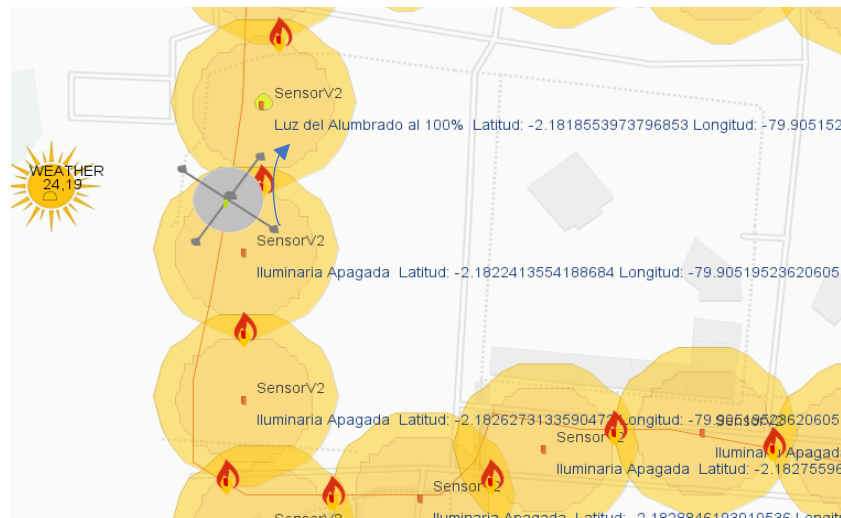
Antes de ser ejecutado la simulación se visualizan 21 lámparas dentro del campus universitario. La distancia de separación entre cada una de ellas es de 100 metros. Se posiciona un objetivo móvil (vehículo liviano o pesado, cruzando las calles de la ruta trazada) al principio de los nodos sensores (postes con lámparas), Una vez detectado el objetivo móvil (auto, persona, etc.) a través del sensor de movimiento, esta hace encender la lámpara, su porcentaje de luminosidad es regulado por un sensor que regula la energía de cada lámpara, permitiendo así aumentar o disminuir por completo esa intensidad de luz. Por lo tanto, si la temperatura es inferior a 25 °C las lámparas encienden al 100%, caso contrario que la temperatura sea superior a 25°C encienden al 50%.



## CONSUMO DE ENERGÍA

Para un análisis del consumo de potencia de las lámparas son de 100W (vatios), lo que implica que cada lámpara funcione al 100% de su intensidad de luz. Así se consume 100 Joules (J), al funcionar al 50% o mitad de su capacidad, estas consumen 50 J y no consumen ninguna potencia si estas se encuentran apagadas.

*Figura 46. Objetivo móvil en rango de detección*



En la figura 46 se muestra el inicio de la detección del objetivo (marca color gris) que se dirige en una ruta con sentido norte. Se trabaja con un indicador para observar la temperatura que va cambiando cada segundo (el tiempo de cambio de temperatura es a elección del usuario, en este caso es de un segundo). El objetivo si es un vehículo, este se mueve por el trazado de líneas en color rojo, las cuales son la ruta que seguirá el objetivo en el mapa.

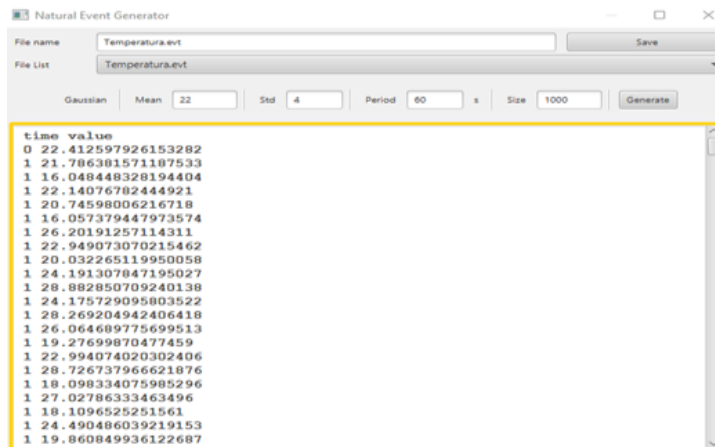
Según la programación, una vez que el vehículo entre en el sector o zona de detección la lámpara se encenderá con base a la temperatura del entorno. Adicional a esto se incorpora una marca o indicador de color verde, el cual se enciende una vez el vehículo ingresa al sector de detección. Este último aspecto identifica cuando entra en funcionamiento el sensor de movimiento, se incorpora también la función de GPS en todos los nodos sensores, lo que permitirá precisar la longitud y latitud de todos los nodos sensores en el mapa.

En el proceso de simulación se pueden realizar varios cambios de temperatura mediante la herramienta: Generador de eventos naturales. Esta funcionalidad permite crear los valores aleatorios de temperatura comprendidos entre los 16 a 28°C los cuales se estableció previamente. Además, permite colocar cuantos valores de temperatura se desea producir de manera automática.

## REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

La figura 47 muestran valores (variación) dadas por el generador de eventos naturales.

Figura 47. Generación de variación de temperatura en CupCarbon



Estos valores que se crean son cargados en todos los sensores de gas, ya que ellos son los encargados de representar las variaciones de temperatura, con el fin que los nodos sensores ubicados en las lámparas puedan operar de manera correcta en la simulación.

En la figura 48 se muestra el código utilizado en el senScript de CupCarbon, para luego cargarlo en cada uno de los nodos sensores del simulador.

Figura 48. Código para nodos sensores o lámparas inteligentes

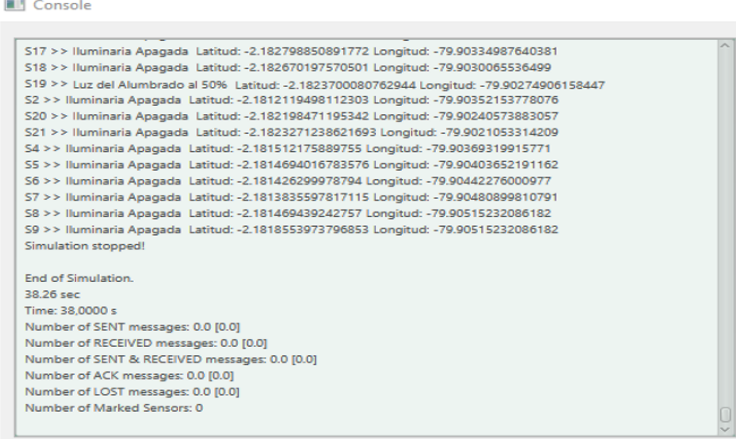
```
Script List
SensorV2.csc

loop
  #Sensor Analogico
  areadsensor x
  rdata x a b c
  #Sensor Digital
  dreadsensor v
  getinfo p
  getpos2 w z
  if (p==0)
    print "Iluminaria Apagada" " Latitud:"z "Longitud:"w
    cprint "Iluminaria Apagada" " Latitud:"z "Longitud:"w
    mark 0
  else
    if (c>25)
      print "Luz del Alumbrado al 50%" " Latitud:"z "Longitud:"w
      cprint "Luz del Alumbrado al 50%" " Latitud:"z "Longitud:"w
      battery bat
      set new bat-50
      battery set new
      mark 1
    else
      print "Luz del Alumbrado al 100%" " Latitud:"z "Longitud:"w
      cprint "Luz del Alumbrado al 100%" " Latitud:"z "Longitud:"w
      battery bat
      set new bat-100
      battery set new
      mark 1
    end
  end
end
delay 1000
```

Si se desea obtener la información de cada uno de los nodos sensores simulados, se usa el código cprint, el cual permite mostrar la información de todos los elementos en la

consola de CupCarbon de manera individual. Se puntualiza que al emplear el código "cprint", se puede acceder a datos importantes de cada nodo sensor, como la luminosidad detectada, la presencia de vehículos en su área de cobertura, y el estado de la lámpara asociada. Esto facilita el monitoreo y la evaluación del desempeño de la aplicación desarrollada, ya que se pueden verificar los valores de luminosidad y los ajustes de luminosidad de las lámparas en función de la detección de vehículos por parte de los nodos sensores. Además, al mostrar la información de manera individual en la consola de CupCarbon, se puede realizar un seguimiento detallado de cada nodo sensor y detectar posibles problemas o anomalías en el funcionamiento de la aplicación. Esto permite realizar ajustes y mejoras necesarias para optimizar el rendimiento y la eficacia del sistema de iluminación basado en la detección de vehículos.

*Figura 49. Detalle de nodos con cprint de CupCarbon*



```
Console
S17 >> Iluminaria Apagada Latitud: -2.182798850891772 Longitud: -79.90334987640381
S18 >> Iluminaria Apagada Latitud: -2.182670197570501 Longitud: -79.9030065536499
S19 >> Luz del Alumbrado al 50% Latitud: -2.1823700080762944 Longitud: -79.90274906158447
S2 >> Iluminaria Apagada Latitud: -2.1812119498112303 Longitud: -79.90352153778076
S20 >> Iluminaria Apagada Latitud: -2.182198471195342 Longitud: -79.90240573883057
S21 >> Iluminaria Apagada Latitud: -2.1823271238621693 Longitud: -79.9021053314209
S4 >> Iluminaria Apagada Latitud: -2.181512175889755 Longitud: -79.90369319915771
S5 >> Iluminaria Apagada Latitud: -2.1814694016783576 Longitud: -79.90403652191162
S6 >> Iluminaria Apagada Latitud: -2.181426299978794 Longitud: -79.90442276000977
S7 >> Iluminaria Apagada Latitud: -2.1813835597817115 Longitud: -79.90480899810791
S8 >> Iluminaria Apagada Latitud: -2.181469439242757 Longitud: -79.90515232086182
S9 >> Iluminaria Apagada Latitud: -2.1818553973796853 Longitud: -79.90515232086182
Simulation stopped!

End of Simulation.
38.26 sec
Time: 38.0000 s
Number of SENT messages: 0.0 [0.0]
Number of RECEIVED messages: 0.0 [0.0]
Number of SENT & RECEIVED messages: 0.0 [0.0]
Number of ACK messages: 0.0 [0.0]
Number of LOST messages: 0.0 [0.0]
Number of Marked Sensors: 0
```

El simulador CupCarbon tiene la posibilidad de exportar archivos con los datos simulados de cada uno de los nodos sensores y gases sensores, a través del código printfile, el cual permite generar un archivo sin extensión, el cual se lo puede abrir en cualquier editor de texto, ya sea Word, Excel y entre otros más, ya que estos datos pueden ser utilizados para un futuro análisis de la simulación, cabe destacar que al usar esta función, se demanda más recursos del computador, ya que mientras se ejecuta la simulación, se están creando y re escribiendo archivos por cada nodo sensor que se está utilizando en la simulación.

## REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

Figura 50. Comando printfile de CupCarbon

	A
58	Iluminaria Apagada Tiempo: 57.0 Latitud: -2.0436243901478464 Longitud: -79.948410987854
59	Iluminaria Apagada Tiempo: 58.0 Latitud: -2.0436243901478464 Longitud: -79.948410987854
60	Luz del Alumbrado al 100 Tiempo: 59.0 Latitud: -2.0436243901478464 Longitud: -79.948410987854
61	Luz del Alumbrado al 100 Tiempo: 60.0 Latitud: -2.0436243901478464 Longitud: -79.948410987854
62	Luz del Alumbrado al 100 Tiempo: 61.0 Latitud: -2.0436243901478464 Longitud: -79.948410987854
63	Luz del Alumbrado al 100 Tiempo: 62.0 Latitud: -2.0436243901478464 Longitud: -79.948410987854
64	Iluminaria Apagada Tiempo: 63.0 Latitud: -2.0436243901478464 Longitud: -79.948410987854
65	Iluminaria Apagada Tiempo: 64.0 Latitud: -2.0436243901478464 Longitud: -79.948410987854
66	Iluminaria Apagada Tiempo: 65.0 Latitud: -2.0436243901478464 Longitud: -79.948410987854
67	Iluminaria Apagada Tiempo: 66.0 Latitud: -2.0436243901478464 Longitud: -79.948410987854
68	Iluminaria Apagada Tiempo: 67.0 Latitud: -2.0436243901478464 Longitud: -79.948410987854
69	Iluminaria Apagada Tiempo: 68.0 Latitud: -2.0436243901478464 Longitud: -79.948410987854
70	Iluminaria Apagada Tiempo: 69.0 Latitud: -2.0436243901478464 Longitud: -79.948410987854

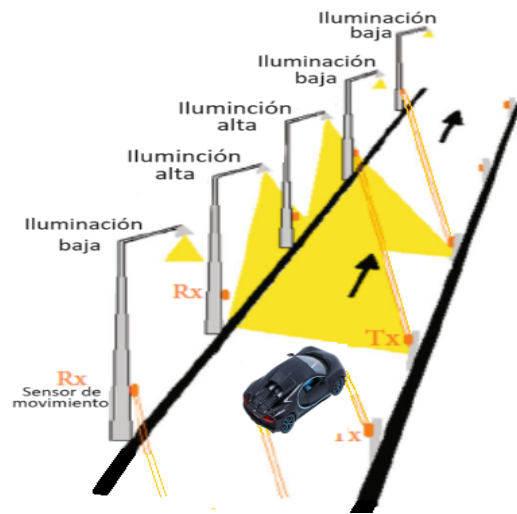
En la figura 51 se aprecia el consumo de energía que tiene cada una de las lámparas inteligentes simuladas en CupCarbon, el consumo de energía de cada nodo sensor cambia en base al porcentaje de luminosidad utilizado y por el tiempo que se mantiene encendido cada una de las lámparas inteligentes, debido a que la temperaturas de un entorno varia a cada instante, por el uso de los sensores de gas, los cuales son los responsables de la temperarte del entorno, estos resultados pueden variar dependiendo la temperatura si es mayor o menor, si sobrepasa los 25°C en el entorno las lámparas se mantienen en un 50% de su luminosidad.

Figura 51. Visualización de porcentaje de luminosidad



En el caso contrario, cuando la temperatura sea menor a la indicada, las lámparas encienden al 100% de su luminosidad, lo cual genera un mayor consumo de energía.

*Figura 52. Ubicación de sensores para atenuación de alumbrado*



### **SISTEMA REAL DE ALUMBRADO PÚBLICO INTELIGENTE**

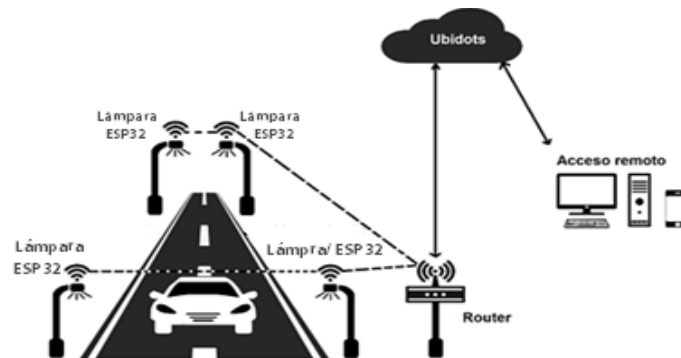
El sistema real puede habilitarse con comunicación Wi-Fi o LoRa. Para tal efecto se utiliza ESP32 como controlador y módulo Wi-Fi el cual tiene un protocolo liviano como transporte de telemetría para la implementación de alumbrado público inteligente. Para reducir el costo del sistema, todos los nodos de alumbrado público están conectados con un solo enrutador utilizando una red de malla. Cada nodo ESP32 tiene sus respectivos sensores para regulación de potencia y detección de proximidad a objetivos móviles. El sistema se controla automáticamente en función de los datos (códigos del programa) almacenados en una estación base central.

## OPERACIÓN PARA SISTEMA REAL CON ESP 32

En una implementación real cada lámpara de alumbrado público estará instalada en un poste y cerca de cada lámpara se instalan los nodos ESP32 los cuales, en base a sus códigos de control, reconocen las señales de sus sensores específicos y surgirá una actuación de regulación de la intensidad luminosa de cada lámpara. A su vez se envía los datos a la plataforma Ubidots para la respectiva observación por este aspecto de uso del servicio de cómputo en la nube, se cataloga como aplicación IoT para ciudades inteligentes.

Los detectores empleados; son un sensor DHT-11 para monitorear la temperatura del entorno y un sensor HC-SR501 para detectar el movimiento de objetivos (automóvil y peatón). El dispositivo ESP32 enciende la iluminación al 100% si se detecta al objetivo y la temperatura menor a 24°C, si la temperatura es mayor a 25°C la iluminación es al 50%, caso contrario que el sensor de movimiento no detecte ningún objetivo, este apaga la lámpara. A continuación, se muestra una imagen del diagrama esquemático del sistema propuesto de alumbrado inteligente IoT con un ESP32. El criterio de los rangos de grados centígrados puede variar, se elige menos de 24°C porque podría aplicarse para horas de la tarde y noche.

Figura 53. Diseño de alumbrado público inteligente con ESP32





## CONEXIONES DE ESP32 PARA ALUMBRADO INTELIGENTE

Se declaran las conexiones de sensores con ESP32 y otros dispositivos que componen la tarjeta controladora para cada una de las lámparas de alumbrado público.

- **Conexión ESP32 – Sensor de temperatura DHT11:** Los pines utilizados en esta conexión fueron el pin GPIO13 con el pin de transmisión de datos del sensor, también se conecta los 5V y el pin de GND para su alimentación.
- **Conexión ESP32 – Sensor de movimiento HC-SR501:** Los pines utilizados en esta conexión fueron el pin GPIO25 con el pin de transmisión de datos del sensor, también se conecta los 5V y el pin de GND para su alimentación.
- **Conexión ESP32 – Foco led:** Los pines utilizados en esta conexión fueron el pin GPIO36 para la regulación de intensidad de iluminación del led y respectivamente el pin de GND.

En la figura 54 se muestra las conexiones descritas y en la figura 55 la conexión para pruebas.

Figura 54. Conexiones de tarjeta de control y sensores

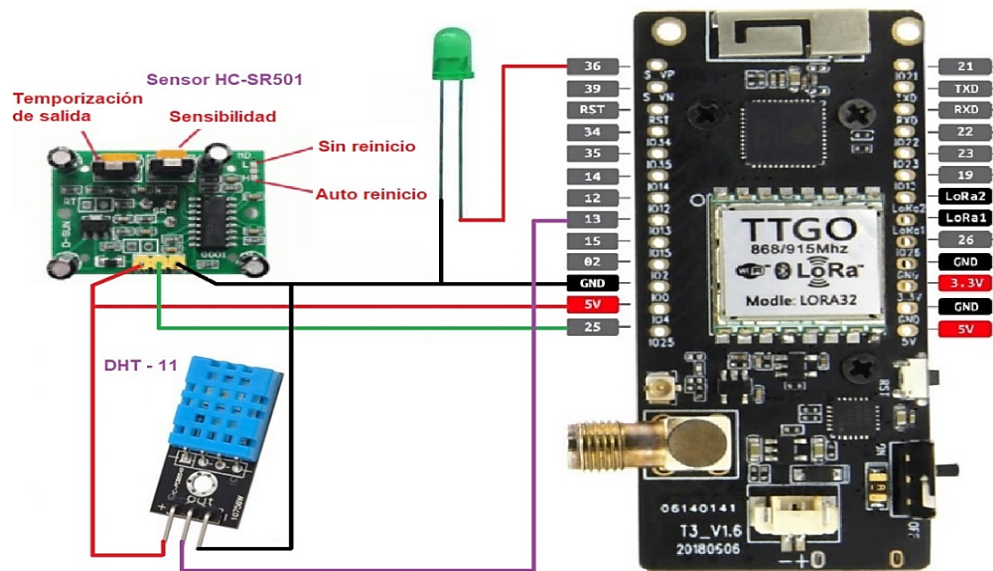
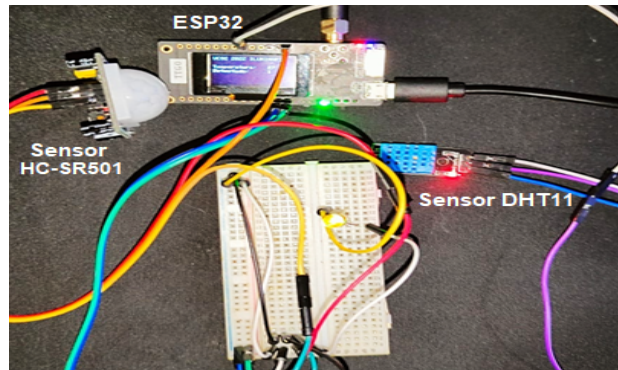


Figura 55. Conexión para prueba

## REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES



La programación se ejecuta en el entorno de desarrollo integrado Arduino IDE se configuran el sensor de temperatura, el de movimiento, el foco led, y el módulo de comunicación LoRa del dispositivo ESP32. En el enlace:

<https://www.dropbox.com/scl/fi/x8p4b5n4apcc2qtaojzzl/iLUMINACION-CON-ESP32.docx?dl=0&rlkey=cu807cb3b64fc6e06xyj7l22g> se encuentran los códigos empleados para esta propuesta de alumbrado público inteligente.

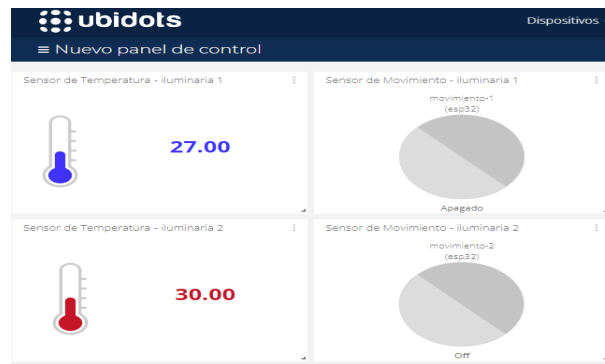


## PLATAFORMA UBIDOTS IOT

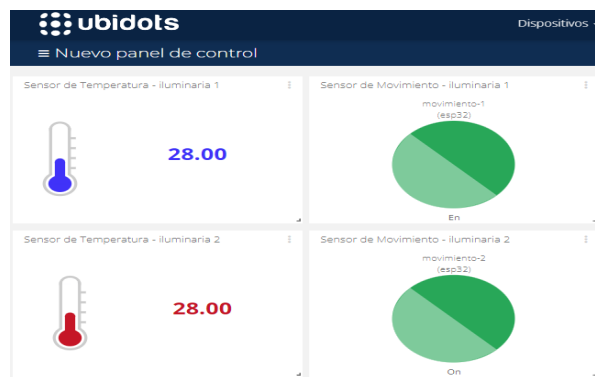
La aplicación de monitoreo y control Ubidots facilita el servicio de cómputo y analítica de seis variables, para criterios de prueba esta aplicación resulta valiosa. Sin embargo, para fines de implementación real con más de 6 variables debe contratarse el servicio.

En la figura 56 se muestra estado apagado y en figura 57 estado de encendido de lámparas 1 y 2, en ambas imágenes se muestra un termómetro e indican la temperatura en grados centígrados entregada por sus respectivos sensores de temperatura DHT11 y también un indicador de apagado o encendido (color gris o verde) del sensor de movimiento cuando detecta al objetivo móvil.

*Figura 56. Sensor de movimiento de lámpara 1 y 2 con estado de apagado*



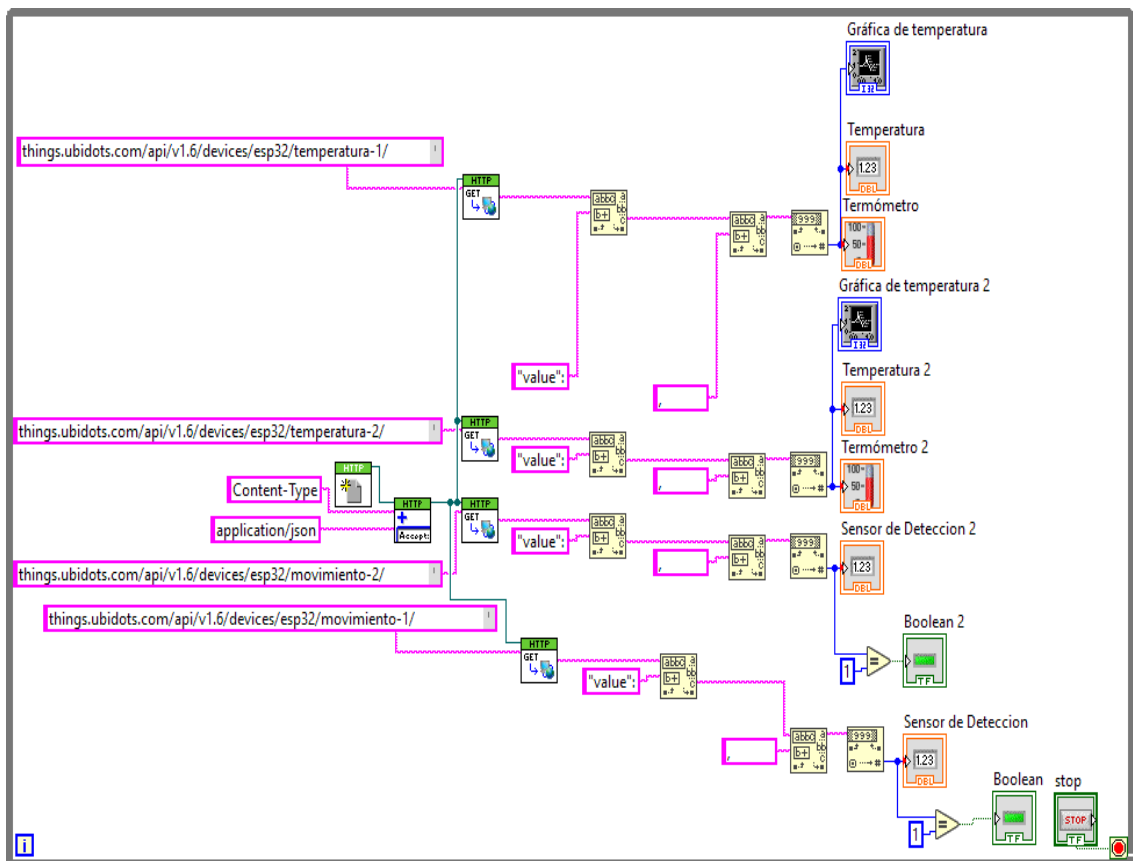
*Figura 57. Sensor de movimiento de lámparas 1 y 2 con estado encendido.*



## INTERFAZ GRÁFICA CON LABVIEW

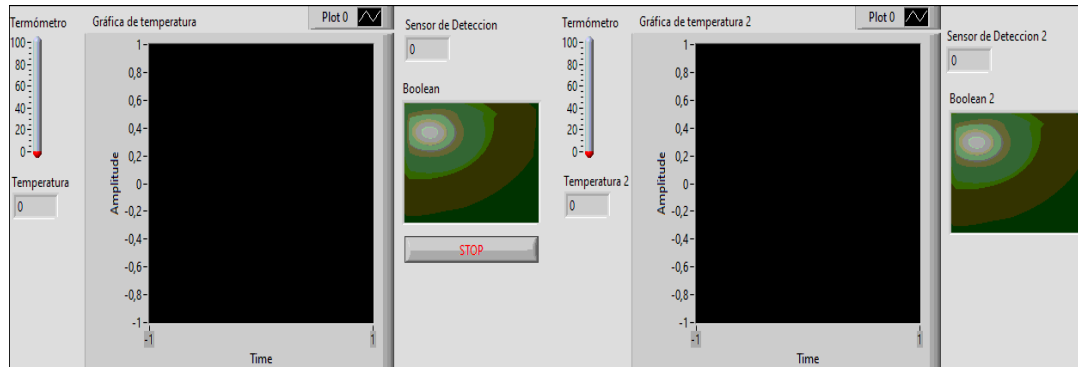
En la figura 58 se muestra la programación en Labview, la cual adquiere los datos correspondientes del sensor de temperatura y de movimiento de la plataforma Ubidots, a través del token que ofrece dicha plataforma, adicional se coloca una interfaz gráfica para comparar el patron de temperatura con respecto al tiempo, para su respectivo analisis y también un indicador booleano que muestra el encendido del sensor de movimiento.

Figura 58. Programación en LabVIEW para interfaz gráfica



En la figura 59 se muestra la interfaz gráfica del panel frontal

Figura 59. Panel frontal realizado en LabVIEW



En una condición de falla, el controlador ESP32 envía la señal de falla al dispositivo central (estación base) a través de la nube. Al recibir esta señal, la estación base envía un correo o mensaje al operador. Para enviar el correo se utiliza el protocolo SMTP. En las figuras 61 y 62 se muestran las respuestas gráficas por los dos eventos que se presentan con la detección de movimiento cuando un objetivo móvil está en la zona de detección de cada nodo, en este caso cuando el sensor de movimiento esta apagado y encendido respectivamente.

Figura 60. Sensor de movimiento apagado de lámpara 1 en LabVIEW.

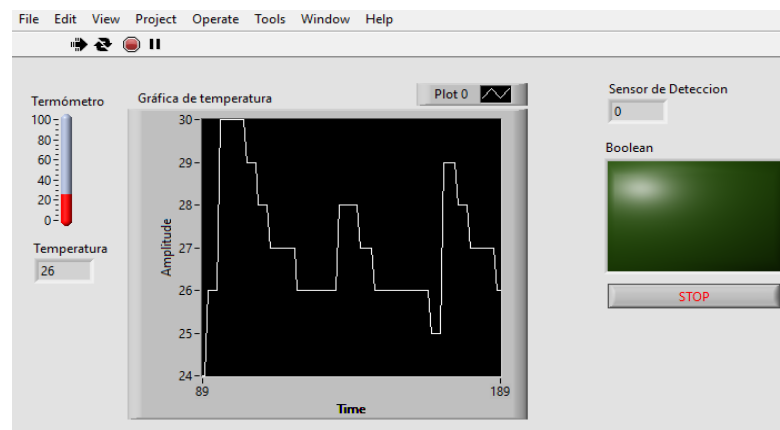
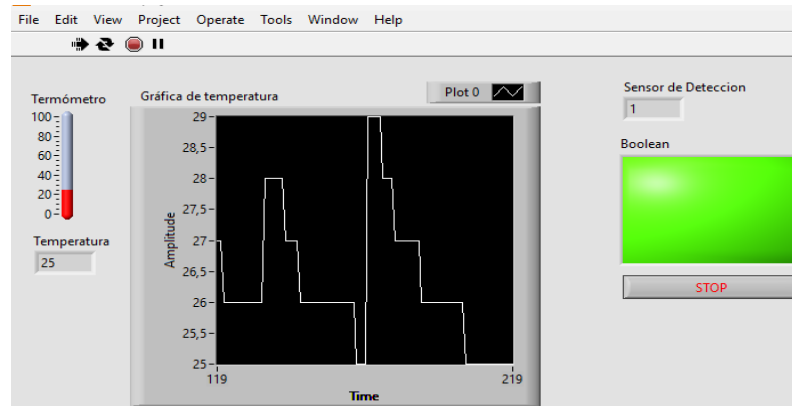


Figura 61. Sensor de movimiento encendido de lámpara 1 en LabVIEW.



En síntesis, el esquema de un alumbrado público inteligentes basado en ESP32 como tarjeta de control deberá transmitir señales de información o datos hacia una estación base o gateway para que se enlace al servicio de cómputo y analítica en la nube, Con la plataforma Ubidots se generan reportes en tiempo real. Con LabVIEW se tiene una interfaz gráfica del comportamiento por la regulación de potencia (porcentaje de luminosidad) de cada lámpara.

# CAPITULO 4

APLICACIÓN IOT CON ESP 32

Se detalla una aplicación IoT para monitorear algunas variables como temperatura, humedad y ruido. Se emplea la tarjeta controladora ESP32 TTGO LoRa32. Esta tarjeta incorpora un módulo LoRa32 433 / 470 Mhz que permite transmitir de forma bidireccional datos a grandes distancias.

Esta tarjeta sirve para desarrollar sistemas enfocados al internet de las cosas IoT y para la transición de datos mediante LoRa y así poder controlar sensores y actuadores, de igual manera está diseñada para mostrar información al usuario mediante la pantalla OLED integrada y así evitar el cableado que típicamente se realiza cuando se quiere integrar un display a los proyectos.

## ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS

- Modelo: TTGO LoRa32 433 Mhz V1.6.1

Incluye:

- 1 x Cable para batería
- 2 x Tiras Header macho
- 1 x Antena
- Voltaje de alimentación MicroUsb: 5V/1A
- Interruptor de encendido
- Conector IPX / IPEX para antena SMA
- Conector con rosca para antena SMA
- Chip USB a Serial: CH9102F
- Rango de temperatura: -40 °C ~ + 85 °C
- Dimensiones: 64.47 x 27mm x 8.54mm

## INTERFAZ DE CARGA Y DESCARGA DE BATERÍA DE LITIO

- Conector de batería: JST 1.25mm 2 pines
- Corriente máxima de carga: 500 Ma

## PANTALLA

- Display OLED
- Tamaño: 0.96 pulgadas
- Resolución: 128×64 píxeles
- Controlador: SSD1306 dirección I2C 0x3C

## LORA32

- Frecuencia de funcionamiento: 433Mhz
- Potencia de transmisión: + 20dBm
- Sensibilidad de recepción:
  - -139dBm @ LoRa y 62.5Khz y SF = 12 y 146bps
  - -136dBm @ LoRa y 125Khz y SF = 12 y 293bps
  - -118dBm @ LoRa y 125Khz y SF = 6 y 9380bps
  - -123dBm@FSK&5Khz&1.2Kbps
- Error de frecuencia: +/- 15 KHz
- Espacio FIFO: 64 bytes
- Velocidad de datos:
  - 1.2K~300Kbps@FSK
  - 0.018K~37.5Kbps@LoRa
- Modo de modulación: FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa TM, OOK
- Forma de interfaz: SPI
- Corriente de sueño:
  - 0.2uA@SLEEP
  - 1.5uA@IDLE
- Función RSSI digital
- Corrección automática de frecuencia
- Control de ganancia automática

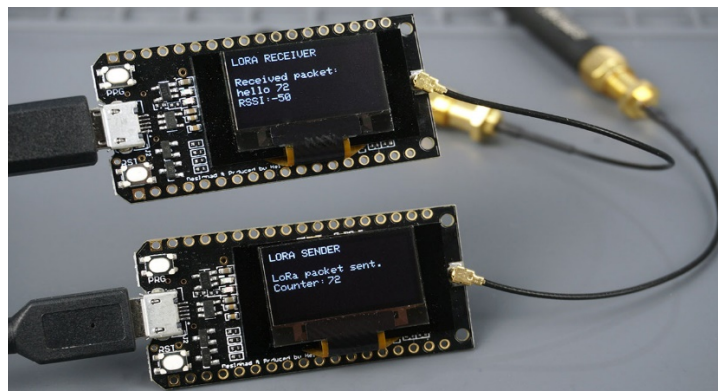
## REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

- Manejador de paquetes de datos altamente configurable
- Pines: 26(DIo / IOo), 23(IRQ / RESET), 18(NSS / SE), 5(SCK), 27(MOSI / SDI), 19(MISO / SDO)

### ESP32

- ESP chip: ESP32 PICO-D4
- Flash: 4MB
- Wifi:
  - Protocolo: 802.11 b / g / n (802.11n, velocidad de hasta 150 Mbps)  
Polimerización A-MPDU y A-MSDU, admite intervalo de protección de 0,4  $\mu$ s
  - Rango de frecuencia: 2,4 GHz ~ 2,5 GHz
- Bluetooth:
  - Protocolo: Cumple con el estándar Bluetooth v4.2 BR / EDR y BLE
  - Frecuencia de radio: Con receptor NZIF de sensibilidad de -97dBm, emisor AFH de clase 1, clase 2 y clase 3
  - Frecuencia de audio: Frecuencia de audio CVSD y SBC

*Figura 62, Vista de tarjeta*



Fuente: (Random Nerds Tutorials, 2019)



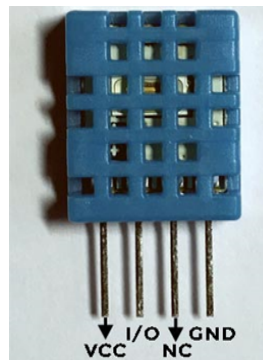
## SENSOR DE TEMPERATURA DHT-11

El detector DHT-11 es un sensor con una alta fiabilidad y estabilidad debido a su señal digital calibrada. Se lo adquiere de dos maneras, de forma individual solo el sensor DHT-11, o insertado en una PCB. La diferencia en precio no es excesiva y la versión con PCB aporta una resistencia pull-up de 5 k $\Omega$  y un LED que indica de forma luminosa su funcionamiento. Otra diferencia entre estas dos versiones del DHT-11 son los pines. En la versión sin PCB se tiene 4 pines y en la versión con PCB se tiene 3 pines.

Los pines de la versión sin PCB del DHT11 son:

- VCC: alimentación
- I/O: transmisión de datos
- NC: no conecta, pin al aire
- GND: conexión a tierra

*Figura 63. DHT11*



*Fuente: (Valle, 2020)*

Los pines de la versión con PCB del DHT-11 son:

- GND: conexión con tierra
- DATA: transmisión de datos
- VCC: alimentación

## SENSOR DE RUIDO LM393

Es un pequeño sensor basado en el LM393 y un micrófono muy sensible. Para proyectos de automatización y domótica funciona perfecto, puedes controlar luces, alarmas, incluso un pequeño robot seguidor de sonidos. Tiene un potenciómetro por lo que es posible configurar el volumen sin problema.

Características

- Alimentación 5V
- Interfaz 3 pines.
- Programa ejemplo para ARDUINO

*Figura 64. Sensor LM393*



*Fuente: (FLYROBO, 2020)*

Cada sensor de temperatura, humedad y ruido recolectará datos y se enlaza a una plataforma en la nube (Ubidots) la programación de cada sensor será en python será por la IDE de Arduino, además se efectúa una interface con LabView para visualizar los datos de las variables. Se detalla el procedimiento:

### 1. CONFIGURACIÓN DEL ESP32 TTGO

- Conectar los sensores de temperatura, humedad y ruido al ESP32 TTGO LoRa32 según las especificaciones del fabricante de cada sensor.
- Utilizar el IDE de Arduino para programar el ESP32 TTGO LoRa32 en Python utilizando el firmware MicroPython. Puedes encontrar guías en línea sobre cómo instalar MicroPython en el ESP32 y cómo programarlo con Python.
- Programar el ESP32 TTGO LoRa32 para leer los datos de los sensores a intervalos regulares y enviarlos a través de la conexión LoRa a la plataforma Ubidots. Se utiliza la biblioteca LoRa para Python para la comunicación LoRa.

## 2. CONFIGURACIÓN DE UBIDOTS:

- Crear una cuenta en Ubidots si aún no la tienes.
- Crear un nuevo dispositivo en Ubidots para representar tu ESP32 TTGO LoRa32.
- Definir variables en Ubidots para representar la temperatura, humedad y ruido que serán enviadas por el ESP32 TTGO LoRa32.
- Obtener la clave de la API de Ubidots que necesitarás para enviar datos desde el ESP32 TTGO LoRa32 a Ubidots.
- Programación del ESP32 TTGO LoRa32 para enviar datos a Ubidots:
- Utilizar la clave de la API de Ubidots en tu código Python para configurar la conexión con Ubidots.
- Enviar los datos de temperatura, humedad y ruido al dispositivo y variables correspondientes en Ubidots utilizando el protocolo HTTP o MQTT según la preferencia y compatibilidad de Ubidots.

## 3. CREACIÓN DE LA INTERFAZ EN LABVIEW:

- Abrir LabVIEW y crea un nuevo VI (Virtual Instrument).
- Utilizar las herramientas de LabVIEW para diseñar la interfaz gráfica. Se puede incluir gráficos, medidores, indicadores numéricos, etc., según tus necesidades de visualización.
- Utilizar el módulo de comunicación serial de LabVIEW para establecer comunicación con el ESP32 TTGO LoRa32 a través del puerto serial. El ESP32 TTGO LoRa32 puede emular un puerto serial a través de USB.
- Procesar los datos recibidos del ESP32 TTGO LoRa32 y actualiza los elementos de la interfaz gráfica en LabVIEW para mostrar los valores de temperatura, humedad y ruido en tiempo real.

## 4. PRUEBA Y DEPURACIÓN:

- Probar todo el sistema para asegurarte de que los datos se estén recopilando correctamente desde los sensores, se estén enviando a Ubidots y se estén visualizando adecuadamente en la interfaz de LabVIEW.
- Realizar ajustes y correcciones según sea necesario para garantizar un funcionamiento óptimo.

## ARDUINO

Arduino es una plataforma de creación de electrónica de código abierto, la cual está basada en hardware y software libre, flexible y fácil de utilizar para los creadores y desarrolladores. Arduino ofrece la plataforma Arduino IDE (Entorno de Desarrollo

Integrado), que es un entorno de programación con el que cualquiera puede crear aplicaciones para las placas Arduino, de manera que se les puede dar todo tipo de utilidades.

### **LABVIEW**

En LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) los programas se conocen como instrumentos virtuales (VIs). Estos VIs pueden ser utilizados individualmente o combinados para crear sistemas más complejos. LabVIEW es capaz de manejar grandes proyectos que involucran miles de VIs, lo que equivale a millones de líneas de código en lenguajes de programación convencionales. Además, LabVIEW ofrece prácticas de programación que permiten optimizar el rendimiento y la calidad del software desarrollado. La versión 7.0 de LabVIEW introduce una innovación significativa con la introducción de un nuevo tipo de subVI llamado VIs Expreso (Express VIs). Estos VIs son interactivos y cuentan con una configuración de caja de diálogo que permite a los usuarios personalizar la funcionalidad del VI Expreso según sus necesidades específicas.

A diferencia de los VIs estándar, que son modulares y personalizables mediante cableado y funciones, los VIs Expreso ofrecen una experiencia más intuitiva y directa para configurar y adaptar la funcionalidad del software. Esto representa un avance importante en la flexibilidad y la facilidad de uso de LabVIEW, permitiendo a los usuarios personalizar sus aplicaciones de manera más eficiente y con menos esfuerzo técnico. Si existe una versión más reciente de LabVIEW disponible, recomendaría consultar la documentación oficial de National Instruments para obtener información actualizada sobre las características y mejoras más recientes.

En el contexto del control de ciertas variables ambientales utilizando CupCarbon, LabVIEW puede ser utilizado para crear una interfaz gráfica de usuario que permita visualizar y controlar los datos recopilados por los sensores de la red. Esta interfaz puede mostrar información en tiempo real sobre la temperatura, humedad y ruido detectados por los sensores. Además, LabVIEW facilita la creación de programas complejos que integran diferentes funciones y procesos, lo que garantiza un control efectivo y una supervisión detallada del sistema de variables ambientales en una zona urbana.

### **CONEXIONES FÍSICAS DEL EMISOR**

Se emplea el conector respectivo y se carga la programación en el microcontrolador de la tarjeta. Véase figura 65 y 66.

# REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

Figura 65. Conexiones de nodo transmisor



Figura 66. Conexiones del nodo receptor



## CÓDIGOS DEL EMISOR

Se muestran la programación para el nodo emisor

Figura 67. Códigos para nodo emisor

```
emicoya Arduino 1.8.15
Archivo Editor Programa Herramientas Ayuda

emisor

//Librerías para LoRa.
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>

//Librería para sensor de temperatura DHT-11 y su pin a utilizar.
#include <DHTRobot_DHT11.h>
DHTRobot_DHT11 DHT;
#define DHT11_PIN 25

//Librerías para pantalla OLED.
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

//definir los pines utilizados por el módulo transceptor LoRa del ESP32.
#define SCK 5
#define MISO 19
#define MOSI 27
#define SS 15
#define RST 23
#define DIO0 26
```

# REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

```
.....  
// Bandas disponibles a utilizar para la comunicación.  
//433MHz for Asia  
//868MHz for Europe  
//915MHz for North America  
#define BAND 868MHz // actualmente en uso.  
  
#define BUTTON_A 15  
#define BUTTON_B 32  
#define BUTTON_C 14  
#define WIRE WIRE  
  
//Variable para conteo de ciclos para determinar el numero de paquetes enviados.  
int Contador = 0;  
  
//Permite configurar la resolución de la pantalla, en este caso es de 128 x 46.  
Adafruit_SSD1306 display = Adafruit_SSD1306(128, 46, WIRE);  
  
void setup() {  
    //Restablecer la pantalla OLED a través del software.  
    .....  
  
void setup() {  
    //Restablecer la pantalla OLED a través del software.  
    pinMode(OLED_RST, OUTPUT);  
    digitalWrite(OLED_RST, LOW);  
    delay(20); // el delay del refresco puede ser mayor o menor dependiendo del modelo de pantalla a utilizar.  
    digitalWrite(OLED_RST, HIGH);  
  
    //Inicializar la pantalla OLED.  
    Wire.begin(OLED_SDA, OLED_SCL);  
    if(!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPWCC, 0x3C, false, false)) { // Dirección 0x3C para 128x64.  
        Serial.println(F("Asignación de SSD1306 fallo")); // Esto se muestra a través del puerto serial.  
        for(;;); // No continua la secuencia, se repite para siempre hasta que se detecte.  
    }  
  
    display.clearDisplay(); // para limpiar lo que se muestra en el display.  
    display.setTextColor(WHITE); // permite seleccionar el color del texto.  
    display.setTextSize(1); // permite seleccionar el tamaño de la letra.  
    display.setCursor(0,0); // coordenadas de la pantalla donde se desea colocar.  
    display.print("LORA REMITENTE "); // texto a mostrar en el display.  
    display.display();  
  
.....  
  
clearDisplay(); // para limpiar lo que se muestra en el display.  
setTextColor(WHITE); // permite seleccionar el color del texto.  
setTextSize(1); // permite seleccionar el tamaño de la letra.  
setCursor(0,0); // coordenadas de la pantalla donde se desea colocar.  
print("LORA REMITENTE "); // texto a mostrar en el display.  
display();  
  
Iniciar el monitor serial.  
Serial.begin(9600); // Establecer el valor del puerto serial.  
  
Serial.println("Prueba de envío LoRa");  
  
//Inicializar SPI LoRa.  
// (SCK, MISO, MOSI, SS);  
// Conectar el módulo transceptor LoRa.  
// (SS, RST, DIO0);  
  
//Inicializar el módulo LoRa.  
//.begin(BAND) {  
//Serial.println("Error al iniciar LoRa!");  
.....  
  
void loop() {  
    //para iniciar lectura del sensor de temperatura DHT-11.  
    DHT.read(DHT11_PIN);  
    int sensorValue = analogRead(36);  
    float noise = sensorValue*(100/1023.0);  
  
    Serial.print("Enviando paquete: ");  
    Serial.println(Contador);  
  
    //Enviar paquete LoRa al receptor.  
    LoRa.beginPacket(); //iniciar paquete.  
    LoRa.print(DHT.temperature);  
    LoRa.print(" ");  
    LoRa.print(DHT.humidity);  
    LoRa.print(" ");  
    LoRa.print("Contador: ");  
    LoRa.print(Contador);  
    LoRa.print(noise);  
    LoRa.endPacket();//envío del paquete.  
}
```

# REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

```
    LoRa.print("Contador: ");
    LoRa.print(Contador);
    LoRa.print(noise);
    LoRa.endPacket();//envio del paquete.

    display.clearDisplay();
    display.setCursor(0,0);// coordenadas de la pantalla donde se desea colocar.
    display.println("UCMG 2022");// texto a mostrar en el display.
    display.setCursor(0,20);// coordenadas de la pantalla donde se desea colocar.
    display.setTextSize(1);// permite seleccionar el tamaño de la letra.
    display.print("Paquete LoRa enviado.");// texto a mostrar en el display.
    display.setCursor(0,30);// coordenadas de la pantalla donde se desea colocar.
    display.print("Contador: ");// texto a mostrar en el display.
    display.setCursor(60,30);// coordenadas de la pantalla donde se desea colocar.
    display.print(Contador); // dato a mostrar en el display.
    display.display();

    Contador++;
    //Tiempo de retraso que se le da al bucle para que se repita de 5 segundos.
    delay(5000);
}
```

## CÓDIGOS DEL RECEPTOR

Se muestra el código para el nodo receptor

Figura 68, Código de nodo receptor

```
Receptor_WIFI_ESP32_OLED_LORA_V1
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include "UbidotsEsp32mqtt.h"

//Definimos primero el Token que nos brinda la plataforma Ubidots para hacer la conexión/
const char "UBIDOTS_TOKEN" = "88FF-DhoCv4q3ViuCn3JAjpiq0Hro5X";
//Definimos SSID y PASSWORD de nuestra red WiFi/
const char "WIFI_SSID" = "Claro_ASM100CLABO";
const char "WIFI_PASS" = "PAULINA1102001";
//Definimos el nombre de nuestro dispositivo, el cual aparecerá en la plataforma Ubidots/
const char "DEVICE_LABEL" = "ESP32";
//Definimos las variables que se medirán y que serán publicadas en la plataforma Ubidots/
const char "VARIABLE_LABEL_1" = "Basal";
const char "VARIABLE_LABEL_2" = "Contador";
const char "VARIABLE_LABEL_3" = "Temperatura";
const char "VARIABLE_LABEL_4" = "Humedad";
const char "VARIABLE_LABEL_5" = "Ruido";
//Definimos la frecuencia de publicación de 5 segundos/
const int PUBLISH_FREQUENCY = 5000;
//Definimos unas variables extra, que incluye la librería/
unsigned long timer;
uint8_t analogPin = 34;
//Definimos que las variables de la librería UBIDOTS trabajarán con el Token/
Ubidots ubidots("UBIDOTS_TOKEN");
}

//Librerías for OLED Display
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

//define the pins used by the LoRa transceiver module
#define SCK 5
#define MISO 19
#define MOSI 27
#define SS 18
#define RST 23
#define DIO0 26

//433E6 for Asia
//868E6 for Europe
//915E6 for North America
#define BAND 868E6

#if defined(ESP32)
#define BUTTON_A 15
#define BUTTON_B 32
#define BUTTON_C 14
#define WIRE Wire
#elif defined(ARDUINO_STM32_FEATHER)
#define BUTTON_A PA15
#define BUTTON_B PC7
#define BUTTON_C PC5
#define WIRE Wire
#else // 32u4, M0, M4, nr52840 and 328p
#define BUTTON_A 9
#define BUTTON_B 6
#define BUTTON_C 5
#define WIRE Wire
#endif
```

# REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

```
int counter = 0;

//Permite configurar la resolución de la pantalla, en este caso es de 128 x 46.
Adafruit_SSD1306 display = Adafruit_SSD1306(128, 46, &Wire);

String LoRaData;

void callback(char *topic, byte *payload, unsigned int length)
{
  Serial.print("Message arrived ["]:
  Serial.print(topic);
  Serial.print("] ");
  for (int i = 0; i < length; i++)
  {
    Serial.print((char)payload[i]);
  }
  Serial.println();
}

void setup() {

  pinMode(OLED_RST, OUTPUT);
  digitalWrite(OLED_RST, LOW);
  delay(20); // el delay del refresqueo puede ser mayor o menor dependiendo del modelo de pantalla a utilizar.
  digitalWrite(OLED_RST, HIGH);

  //inicializar la pantalla OLED.
  Wire.begin(OLED_SDA, OLED_SCL);
  if(!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3c, false, false)) { // Dirección 0x3c para 128x64.
    Serial.println(F("Asignación de SSD1306 fallo")); // Esto se muestra a través del puerto serial.
    for(;;); // No continua la secuencia, se repite para siempre hasta que se detecte.
  }

  display.clearDisplay(); // para limpiar lo que se muestra en el display.
  display.setTextColor(WHITE); // permite seleccionar el color del texto.
  display.setTextSize(1); // permite seleccionar el tamaño de la letra.
  display.setCursor(0,0); // coordenadas de la pantalla donde se desea colocar.
  display.print("RECEPTOR LoRa"); // texto a mostrar en el display.
  display.display();

  //Inicializar el monitor serial.
  Serial.begin(9600); // Establecer el valor del puerto serial.

  Serial.println("Prueba receptor LoRa");

  //SPI LoRa pins
  SPI.begin(SCK, MISO, MOSI, SS);
  //setup LoRa transmitter module
  LoRa.setPins(SS, RST, DIO0);

  if (!LoRa.begin(BAND)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
    while (1);
  }
  Serial.println("Error al iniciar LoRa");
  display.setCursor(0,10);
  display.println("LoRa Inicializando");
}

String humedad= LoRaData.substring(3,5);
float humedades = humedad.toFloat();

String contador= LoRaData.substring(5,20);

String contadorvalor= LoRaData.substring(15,20);
float contadorvalores = contadorvalor.toFloat();
int rssi = LoRa.packetRssi(); //Imprime RSSI del paquete.
Serial.print(" with RSSI ");
Serial.println(rssi);

String ruido=LoRaData.substring(21,25);
float ruidos = ruido.toFloat();

// Mostrar información.
display.clearDisplay(); // para limpiar lo que se muestra en el display.
display.setCursor(0,0); // coordenadas de la pantalla donde se desea colocar.
display.print("UC3G 2022"); // texto a mostrar en el display.
display.setCursor(0,20); // coordenadas de la pantalla donde se desea colocar.
display.print("Mensaje recibido"); // texto a mostrar en el display.
display.setCursor(0,30); // coordenadas de la pantalla donde se desea colocar.
display.print(LoRaData); // datos a mostrar en el display.
display.setCursor(0,40); // coordenadas de la pantalla donde se desea colocar.
display.print("RSSI:"); // texto a mostrar en el display.
display.setCursor(30,40); // coordenadas de la pantalla donde se desea colocar.
display.print(rssi); // dato a mostrar en el display.
display.display();
if (!ubidots.connected())
```



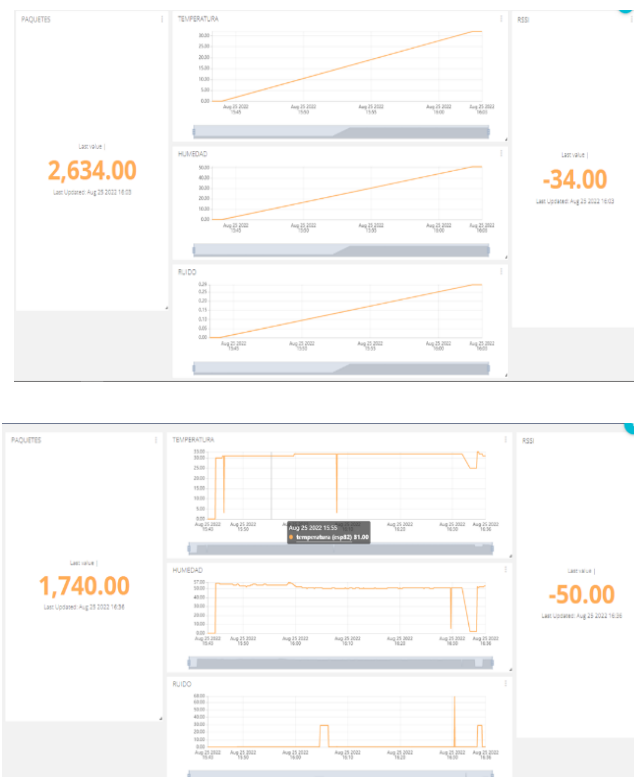
# REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES

```
if (!ubidots.connected())
{
  ubidots.reconnect();
}
//En esta condicional, iniciamos la medición de Temperatura y Humedad del sensor, y la información será enviada a la Plataforma/
if (abs(millis() - timer) > PUBLISH_FREQUENCY)
{
  ubidots.ods(VARIABLE_LABEL_1, temp);
  ubidots.ods(VARIABLE_LABEL_2, contadorvaloree);
  ubidots.ods(VARIABLE_LABEL_3, temperatura);
  ubidots.ods(VARIABLE_LABEL_4, humedad);
  ubidots.ods(VARIABLE_LABEL_5, ruido);
  //Definimos que el valor de Humedad será enviado por la variable 2, a la plataforma Ubidots/
  //hacemos la publicación de los datos en el dispositivo definido/
  ubidots.publish(DEVICE_LABEL);
  timer = millis();
}
}
ubidots.loop();
}
```

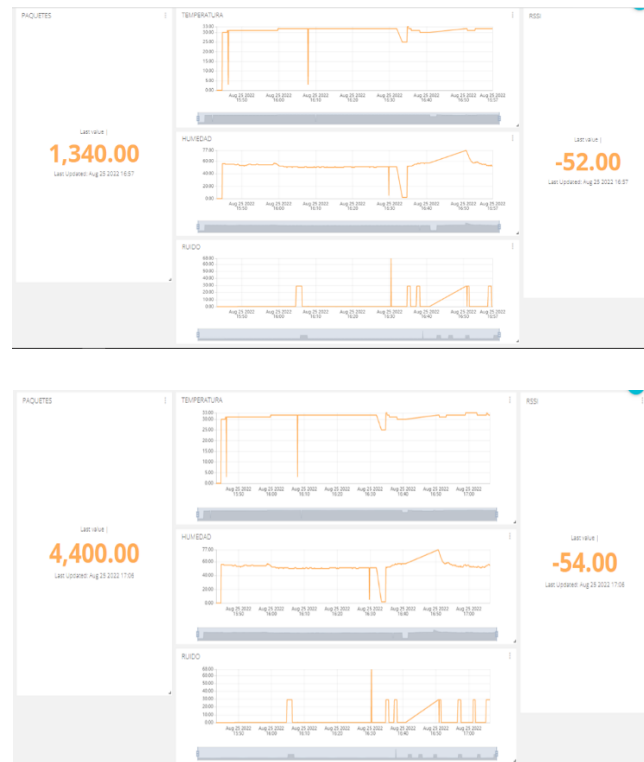
## CAPTURAS DE DATOS POR UBIDOTS

En figura 70 se muestran capturas de datos sensados.

Figura 69. Datos obtenidos



## REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS: ENFOQUE A TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES



Como se ha indicado los datos de temperatura, humedad y ruido utilizando el ESP32 TTGO LoRa32, los envíe a la plataforma en la nube Ubidots y a través de una interfaz de usuario para visualizar estos datos en tiempo real se utiliza LabVIEW como herramienta más analítica.

El procedimiento descrito es una base sólida para desarrollar una aplicación IoT que tiene valor y utilidad, especialmente en contextos donde la monitorización de temperatura, humedad y ruido es crítica, como en entornos industriales, agrícolas, o incluso en aplicaciones domésticas para monitorear la calidad del aire. Sin embargo, siempre hay margen para mejoras y expansiones, y aquí hay algunas sugerencias para mejorar la aplicación y agregar otras plataformas tecnológicas:

- **Mejora de la eficiencia y la precisión de los sensores:** Utilizar sensores de alta calidad y calibrados puede mejorar la precisión de los datos recopilados. Además, la implementación de algoritmos de compensación y filtrado de datos puede mejorar la calidad de las mediciones.
- **Integración con otras plataformas en la nube:** Además de Ubidots, hay muchas otras plataformas en la nube disponibles que ofrecen funcionalidades específicas y pueden agregar valor a la aplicación. Algunas opciones incluyen

AWS IoT, Google Cloud IoT Core, Microsoft Azure IoT, entre otras. La integración con estas plataformas puede ofrecer características adicionales como análisis avanzado, almacenamiento a largo plazo, y más opciones de visualización.

- **Implementación de Machine Learning para análisis de datos:** Integrar técnicas de Machine Learning para analizar los datos recopilados puede proporcionar información útil y acciones predictivas. Por ejemplo, se podrían predecir tendencias de temperatura o humedad y tomar acciones preventivas en consecuencia.
- **Añadir capacidades de control remoto:** Si es relevante para tu aplicación, podrías integrar capacidades de control remoto para ajustar parámetros ambientales en respuesta a las mediciones. Esto podría hacerse a través de una interfaz en la nube o incluso mediante comandos enviados desde la interfaz de LabVIEW.
- **Explorar tecnologías de comunicación adicionales:** Además de LoRa, considera otras tecnologías de comunicación como Wi-Fi, Bluetooth o incluso 5G, dependiendo de los requisitos de alcance, ancho de banda y consumo de energía de tu aplicación.
- **Agregar seguridad adicional:** A medida que tu aplicación IoT crezca, la seguridad se vuelve aún más importante. Considera la implementación de cifrado de extremo a extremo, autenticación de dispositivos y otros mecanismos de seguridad para proteger los datos y la integridad del sistema.

En cuanto a cómo integrar estas mejoras, cada una requerirá un enfoque específico. Por ejemplo, para integrarse con otras plataformas en la nube, necesitarás desarrollar adaptadores o interfaces que traduzcan los datos del formato utilizado por el ESP32 TTGO LoRa32 a los formatos admitidos por esas plataformas. Para la implementación de Machine Learning, necesitarás desarrollar modelos y algoritmos específicos, y luego integrarlos en tu aplicación para realizar análisis predictivos. En general, la integración de estas mejoras implicará desarrollo de software adicional y posiblemente hardware, pero pueden agregar un valor significativo a tu aplicación IoT.

### REFLEXIONES FINALES:

Es posible que en el corto plazo se tengan avances significativos en el campo de la tecnología de hardware y software para IoT, incluyendo el uso de componentes como memristores o memcapacitores en tarjetas de control como el ESP-32. Esto podría ser un punto de ruptura tecnológica para:

- **Eficiencia energética:** Los memristores y memcapacitores tienen el potencial de ser más eficientes energéticamente en comparación con los componentes

tradicionales, lo que podría permitir que los dispositivos IoT funcionen durante períodos más largos con baterías más pequeñas o incluso recolectando energía del entorno.

- **Almacenamiento y procesamiento local:** Los memristores y memcapacitores también tienen propiedades que pueden facilitar el almacenamiento y procesamiento de datos directamente en el nodo sensor, lo que reduce la necesidad de transferir grandes cantidades de datos a la nube para su procesamiento.
- **Menor costo y tamaño:** Este aspecto es fundamental para nodos sensores inteligentes. Si los memristores y memcapacitores pueden integrarse de manera efectiva en las tarjetas de control como el ESP-32, podrían ayudar a reducir el costo y el tamaño de los dispositivos IoT, lo que los haría más accesibles y ubicuos.
- **Mayor capacidad de aprendizaje:** Estos componentes también podrían mejorar la capacidad de los dispositivos IoT para aprender y adaptarse a su entorno, lo que les permitiría tomar decisiones más inteligentes de manera autónoma sin la necesidad de una conexión constante a la nube.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la adopción de nuevas tecnologías siempre está sujeta a una serie de factores, incluyendo la madurez de la tecnología, la disponibilidad de componentes y la aceptación del mercado. Además, el desarrollo de software innovador también desempeñará un papel crucial en el aprovechamiento del potencial de estos avances en hardware. En resumen, si bien es posible que los memristores y memcapacitores potencien las tarjetas de control para IoT en el futuro, su impacto real dependerá de una variedad de factores y el tiempo exacto de su adopción masiva es difícil de predecir.

## REFERENCIAS

- Achanta, S. (2013). *Classification of Radar systems Depending on Technologies*.  
Obtenido de [http://articlesece.blogspot.com/2013/07/classification-of-radar-systems\\_16.html](http://articlesece.blogspot.com/2013/07/classification-of-radar-systems_16.html)
- Advanticsys. (2013). *Plataforma de sensor inalámbrico Mote CM5000-MSP*.  
Obtenido de <https://telosbsensors.wordpress.com/>
- Ahmad, A., Javaid, N., Khan, Z., Qasim, U., & Alghamdi, T. (2014). *(ACH)2: Routing Scheme to Maximize Lifetime and Throughput of Wireless Sensor Networks*.  
Obtenido de IEEE Sensors Journal, Vol. 14, Issue. 10, pp. 3516-3532:  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6825849>
- Al-Karaki, J., & Kamal, A. (2004). *Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey*. *IEEE Wirel. Commun.* 11 : 6-28.
- Álvarez, R. (2019). *Y las ondas se convirtieron en partículas*. Obtenido de IMUS:  
<https://institucional.us.es/blogimus/2019/04/y-las-ondas-se-convirtieron-en-particulas/>
- Berserkerus/Wikimedia Commons. (2019). *¿Cómo funciona la radio?* Obtenido de  
<https://n9.cl/152cz>
- Bhattacharyya, D., Kim, T.-h., & Pal, S. (2010). *A Comparative Study of Wireless Sensor Networks and Their Routing Protocols*. Obtenido de Sensors Journal (Basel). 2010; 10(12): 10506–10523.:  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3231091/>
- Bría, R. (Junio de 2015). *Introducción a Procesamiento de Señales Radar*. La Plata, Argentina.
- CALTECH. (2012). *Jet Propulsion Laboratory*. Obtenido de Radar Science & Engineering: <https://radar.jpl.nasa.gov/science/applications/>
- Cambra, C., Sendra, S., Lloret, J., & Jimenez, J. (2017). *Red de Sensores Inalámbricos de Bajo Consumo Energético en Agricultura Hidropónica*. Obtenido de JITEL:  
<http://ocs.editorial.upv.es/index.php/JITEL/JITEL2017/paper/view/6631>
- Chen, X., Wang, X., & Chen, X. (2013). *Energy-Efficient Optimization for Wireless Information and Power Transfer in Large-Scale MIMO Systems Employing*

*Energy Beamforming*. Obtenido de IEEE Wireless Communications Letters, Vol. XX, NO. Y, 2013: <https://arxiv.org/pdf/1309.6027.pdf>

Diferenciador. (2019). *Reflexión y refracción de la luz*. Obtenido de <https://www.diferenciador.com/reflexion-y-refraccion-de-la-luz/>

Dirección General de Fabricaciones Militares. (2014). *Radares*. Obtenido de <http://www.fab-militares.gov.ar/radares/>

Dung, L., Hieu, T., Choi, S., & Kim, B. (2017). *An Impact of Beamforming on the Path Connectivity in Cognitive Radio Ad Hoc Networks*. Obtenido de Sensors Journal 2017, 17(4), 690;: doi:10.3390/s17040690

Educapedia. (2023). *Reflexión y Refracción de ondas*. Obtenido de <https://cursoparalaunam.com/la-reflexion-y-la-refraccion-de-ondas>

El Radar. (2019). *Componentes del radar*. Obtenido de <http://elradar.50webs.com/componentes.htm>

Electrek. (2018). *GM anuncia asociación con la startup de Boston WiTricity para desarrollar tecnología de carga inalámbrica*. Obtenido de <https://n9.cl/4f2xi>

Electricidad sin cables. (2009). *¿Cómo funciona la energía eléctrica inalámbrica?* Obtenido de <https://electricidadsincables.blogspot.com/>

Galileo. (2020). *Nueva constelación de satélites podría provocar colisiones, dice la NASA*. Obtenido de Nueva constelación de satélites podría provocar colisiones, dice la NASA

Gunjan, Maheshwari, P., & Sharma, A. (2018). *Modified TEEN for Handling Inconsistent Cluster Size Problem in WSN*. Obtenido de International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, 2018, pp. 1-6.: doi: 10.1109/WiSPN

Hubot. (2017). *Kit 16 sensores SmartHome Arduino (SKU 504R11)*. Obtenido de <https://hubot.cl/producto/kit-16-sensores-smarhome/>

Hyeon, S., & Kim, K. (2010). *A new geographic routing protocol for aircraft ad hoc networks*. Obtenido de Proceedings of the IEEE/AIAA 29th Digital Avionics Systems Conference (DASC), pp. 2.E.2-1–2.E.2-8.

- Iglesias, A. (2020). *Así se reparte el espectro radioeléctrico con la llegada de la 5G*. Obtenido de El Español: <https://n9.cl/idxeo>
- Intanagonwiwat, C., Govindan, R., & Estrin, D. (2000). *Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks*. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '00, pages 56–67, New York, NY, USA, ACM*.
- Jaén, M. (2011). *Tesla: la electricidad tiene un doble sentido*. Obtenido de Libros Maravillosos: <https://n9.cl/fokoi>
- Kamgueu, P., Nataf, E., & Djotio, T. (2017). Architecture for an efficient integration of wireless sensor networks to the Internet through Internet of Things gateways. En *S. Journal*.  
<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1550147717744735>.
- Khan Academy. (2020). *La luz: ondas electromagnéticas, espectro electromagnético y fotones*. Obtenido de <https://n9.cl/xs3q7>
- Khan, J., Qureshi, H., & Iqbal, A. (2016). *Energy management in Wireless Sensor Networks: A survey*. Obtenido de Hal Journal: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01283728/document>
- Li, S., Kim, J., Han, D., & Lee, K. (2019). *A Survey of Energy-Efficient Communication Protocols with QoS Guarantees in Wireless Multimedia Sensor Networks*. Obtenido de *Sensor*. 19 (1), 199;:  
<https://doi.org/10.3390/s19010199>
- Libelium. (2015). *50 aplicaciones de sensores para un mundo más inteligente*. Obtenido de [http://www.libelium.com/resources/top\\_50\\_iot\\_sensor\\_applications\\_ranking/#show\\_infographic](http://www.libelium.com/resources/top_50_iot_sensor_applications_ranking/#show_infographic)
- Liu, Y., Wu, Q., Zhao, T., Tie, Y., Bai, F., & Jin, M. (2019). *An Improved Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks*. Obtenido de *Sensors* 19(20), 4579;: <https://doi.org/10.3390/s19204579>
- Maroto, S. (2010). *Desarrollo de aplicaciones basada en WSN*. Obtenido de <https://n9.cl/k8qkd>



- Mathews, M. (2022). *A Study on Quantum Radar Technology Developments and Design Consideration for its integration*. Obtenido de <https://arxiv.org/pdf/2205.14000.pdf>
- Musso, G. (2021). *Sobre internet de las cosas*. Obtenido de AADECA: <https://aadeca.org/index.php/tag/conectividad-industrial/>
- Niu, X., Tao, Z., Wu, G., Huang, J. C., & Cui, L. (2006). *Hybrid cluster routing: an efficient routing protocol for mobile ad hoc networks*. Obtenido de Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 3554–3559.
- Omwanda, E. (2024). *LOS MEMCAPACITORS DE LA STARTUP ALEMANA SEMRON ESTÁN LISTOS PARA TRANSFORMAR EL PROCESAMIENTO DE IA*. Obtenido de <https://www.cryptopolitan.com/es/los-memcondensadores-de-semron-transforman-el-procesamiento-de-ia/>
- OpenStack. (2021). *El espectro electromagnético*. Obtenido de <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-2/pages/16-5-el-espectro-electromagnetico>
- Ortega-Corral, C., Acosta del Río, O., & López, J. (2017). *Arquitecturas y protocolos avanzados de enrutamiento de redes inalámbricas de sensores*. Obtenido de <http://201.151.251.123/ftp/transparencia/2017/2/41A/Arquitecturas%20y%20protocolos%20avanzados%20de%20enrutamiento%20de%20redes.PDF>
- Palma, A. (2009). *Análisis de protocolos de enrutamiento para redes de sensores inalámbricas*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/30042564.pdf>
- Pérez, C. (2010). *Introducción al Radar*. Obtenido de Departamento de Ingeniería de Comunicaciones Universidad de Cantabria: <http://personales.unican.es/perezvr/pdf/Introduccion%20al%20Radar.pdf>
- Querol, J. (2011). *Estudio y evaluación de prestaciones de redes inalámbricas de sensores*. Obtenido de Tesis Universidad de Valencia: [https://riUNET.upv.es/bitstream/handle/10251/10354/Proyecto\\_Querol.pdf](https://riUNET.upv.es/bitstream/handle/10251/10354/Proyecto_Querol.pdf)
- Random Nerds Tutorials. (2019). *Placa OLED TTGO LoRa32 SX1276: Primeros pasos con Arduino IDE*. Obtenido de <https://randomnerdtutorials.com/ttgo-lora32-sx1276-arduino-ide/>

- Raza, Faheem, & Guenes. (2019). *Industrial wireless sensor and actuator networks in industry 4.0: Exploring requirements, protocols, and challenges- A MAC survey*. p. 7).
- RF Wireless World. (2012). *Doppler Radar*. Obtenido de <http://www.rfwireless-world.com/Tutorials/doppler-radar.html>
- Sahoo, P., Chiang, M., & Wu, S. (2016). *An Efficient Distributed Coverage Hole Detection Protocol for Wireless Sensor Networks*. Obtenido de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4813961/>
- Shah, R., & Rabaey, J. (2002). *Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks*. In *2002 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record. WCNC 2002 (Cat. No.02TH8609), volume 1, pages 350–355*.
- Subiela, R., & León, A. (2012). *Simulación de protocolos de encaminamiento en redes móviles ad hoc con NS-2*. Obtenido de <https://personales.upv.es/aleon/pubs/ursio5.pdf>
- Suciu, I. (2020). *Energy aware optimization for Radio Technologies*. Obtenido de PhD Program in Network Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya: <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/668889/TIS1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Última Hora. (2022). *Electrónica: Del transistor al memristor, el microchip del futuro*. Obtenido de <https://www.ultimahora.com/electronica-del-transistor-al-memristor-el-microchip-del-futuro-n3007864>
- Wolf, C. (2020). *Dúplex de transmisión-recepción*. Obtenido de Radar Tutorial: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/an50.es.html>
- Wolff, C. (2013). *Radar Basics*. Obtenido de <http://www.radartutorial.eu/08.transmitters/Magnetron.en.html>
- Xing, G., Wang, X., Zhang, Y., & Lu, C. (2009). *Integrated coverage and connectivity configuration for energyconservation in sensor networks*. Obtenido de ACM Transactions on Sensor ACM Transactions on Sensor.
- Yébenes, J. (2013). *Gaceta Aeronautica*. Obtenido de Las radio ayudas y la navegación aérea: <http://www.gacetaeronautica.com/gaceta/wp-101/?p=5748>

- Zafeiropoulos, A., Spanos, D.-E., Arkoulis, S., & Konstantinou, N. (2011). En *Data management in sensor networks using Semantic web technologies* (pág. Capítulo 11E). Atenas: Nova Science.
- Zamora, N., Philco, O., & Estupiñan, E. (2019). "The performance of QoS in wireless sensor networks," *2019 14th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Coimbra, Portugal, 2019, pp. 1-5*. Obtenido de <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8760756&isnumber=8760589>
- Zhang, X., Xu, C., & Xu, J. (2015). *Hierarchical ZRP's performance vs ZRP's performance in MANET*. Obtenido de Proceedings of the IEEE International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN '15), pp. 423–426,.
- Zhuo, M., Liu, L., Zhou, S., & Tian, Z. (2021). *Survey on security issues of routing and anomaly detection for space information networks*. Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41598-021-01638-z.pdf?proof=t%2525C2%2525A0>

ISBN: 978-9942-33-855-6



**compAs**  
Grupo de capacitación e investigación pedagógica

   @grupocompas.ec  
compasacademico@icloud.com