

IMPLEMENTACIÓN, PARAMETRIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA RED DE
SENSORES PARA MONITOREO DE GASES EN ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS
DE MINERÍA SUBTERRÁNEA Y/O AMBIENTES CONFINADOS.

BRYANN GUTIERREZ SALCEDO

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Facultad de Ingeniería, BOYACA

Tunja, Colombia

2022

IMPLEMENTACIÓN, PARAMETRIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA RED DE
SENSORES PARA MONITOREO DE GASES EN ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS
DE MINERÍA SUBTERRÁNEA Y/O AMBIENTES CONFINADOS.

BRYANN GUTIERREZ SALCEDO

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Electrónico

Director (a):

Ingeniero Luis David Patarroyo Gutierrez

Codirector (a):

Ingeniero Eduardo Avendaño Fernández

Línea de Investigación:

Telecomunicaciones

Universidad Pedagógica y Tecnológica De Colombia

Facultad de Ingeniería, Boyacá

Tunja, Colombia

2022

Nota de Aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Tunja 05 agosto del 2022

(Dedicatoria o lema)

*La preocupación por el hombre y su destino
siempre debe ser el interés primordial de
todo esfuerzo técnico. Nunca olvides esto
entre tus diagramas y ecuaciones.*

Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

Por su orientación y sus valiosas sugerencias en momentos de duda mi agradecimiento al Ing. Luis David Patarroyo y al Ing. Eduardo Avendaño. Pero un trabajo de investigación es también fruto del apoyo vital que nos ofrecen las personas que nos estiman, sin el cual no tendríamos la fuerza y energía que nos anima a perseverar a lograr nuestras metas, gracias a mi familia, a mis padres, porque con ellos compartí una infancia feliz y soy la suma de todas las vivencias obtenidas a su lado, a mis amigos, que siempre me han prestado un gran apoyo moral y humano, necesarios en los momentos difíciles de este trabajo y esta profesión. Pero, sobre todo, gracias a mi madre, por su paciencia, comprensión y solidaridad con este proyecto, por el tiempo que me han concedido. Sin su apoyo este trabajo nunca se habría desarrollado y, por eso, este trabajo es también el suyo.

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño, implementación, parametrización y evaluación de un prototipo de transmisor inalámbrico o nodo sensor, para la medición de gas metano (CH_4) y monóxido de carbono (CO) con sensores del proveedor Figaro, que permite la transmisión de estos niveles a través de una red WSN (*Wireless Sensor Network*), a partir de la información recolectada con nodos bajo el estándar LoraWPAN, en un sistema micro controlado basado en PIC. Estos se integran en circuitos impresos (*PCB*), usando tecnología de montaje superficial (*SMD*) buscando la optimización del espacio y diseño en factor de forma apropiado para el entorno confinado. El prototipo de red final se conecta con una interfaz grafica donde se controla una base de datos MySQL donde se almacena la información recibida, además se evalúa teórica y experimentalmente la potencia de recepción de estos nodos obteniendo información de la potencia de recepción y cómo parámetro de desempeño se mide la tasa de error de paquetes (*PER*), las pruebas se realizaron en el pasillo del edificio central de la sede principal de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia entorno confinado para establecer una distancia máxima donde se puedan garantizar conectividad y confiabilidad con un bajo impacto en la PER. El sistema en general tiene como objetivo apoyar con el monitoreo y alerta en la gestión de riesgos de la minería subterránea de carbón.

PALABRAS CLAVE: (RED WSN, NODOS SENSOR, METANO, CARBONO, COBERTURA, TASA DE ERROR DE PAQUETE, DISPOSITIVOS LORA, RADIOFRECUENCIA, CONECTIVIDAD, CONFIABILIDAD).

ABSTRACT

This work presents the design, implementation, parameterization and evaluation of a wireless transmitter prototype or sensor node, for the measurement of methane gas (CH_4) and carbon monoxide (CO) with sensors from the provider Figaro, which allows the transmission of these levels through a WSN (Wireless Sensor Network), based on the information collected with nodes under the LoraWPAN standard, in a micro-controlled system based on PIC. These are integrated into printed circuit boards (PCBs), using surface mount technology (SMD) seeking space optimization and form factor design appropriate for the confined environment. The final network prototype is connected to a graphical interface where a MySQL database is controlled where the received information is stored, in addition, the reception power of these nodes is theoretically and experimentally evaluated, obtaining information on the reception power and how parameter of performance, the packet error rate (PER) is measured, the tests were carried out in the corridor of the central building of the headquarters of the Pedagogical and Technological University of Colombia, emulating the conditions of a confined and hostile environment to establish a maximum distance where connectivity and reliability can be guaranteed with a low impact on PER. The system in general aims to support the monitoring and warning in the risk management of underground coal mining.

KEYWORDS: (WSN NETWORK, SENSOR NODES, METHANE, CARBONO MONOXIDE, COVERAGE, PACKET ERROR RATE, LORA DEVICES, RADIO FREQUENCY, CONNECTIVITY, RELIABILITY).

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	5
RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	7
CONTENIDO	8
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABLAS	12
LISTA DE ECUACIONES	13
CAPITULO 1.....	12
INTRODUCCION.....	12
1.1 ANTECEDENTES.....	13
1.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	16
1.3 OBJETIVOS.....	18
GENERAL:	18
ESPECIFICOS:	18
CAPITULO 2.....	19
MARCO TEORICO	19
2.1 ¿QUE ES UN WSN? (Wireless sensor networks)	19
2.1.2. CARACTERISTICAS DE UNA WSN	19
2.2 RADIOCOMUNICACIÓN.....	20
2.2.1. TIPOS DE ENLACES DE RADIOCOMUNICACIÓN	21
2.2.2 DISPOSITIVOS DE RADIOCOMUNICACION LORA SX127XX	22
2.3 MICROCONTROLADORES	23
2.4 ELEMENTOS DE DETECCION DE GAS	25
2.4.1 SENSOR DE GAS METANO (TGS-2611).....	26
2.4.2 SENSOR DE GAS CARBONICO (CO2)	28
2.5 CONECTIVIDAD Y CONFIABILIDAD DE UNA RED.....	30
2.6 RSSI (Indicador de intensidad de la señal recibida)	31

2.7 AUTONOMIA.....	33
2.8 MODELO DE PROPAGACIÓN EN ESPACIOS CONFINADOS.....	34
2.9 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	38
CAPITULO 3.....	39
IMPLEMENTACION NODO SENSOR.....	39
3.1 DISEÑO DE HARDWARE	39
3.2. DISEÑO DEL SOFTWARE	45
3.2.1 PROGRAMACIÓN DE MICROCONTROLADOR	45
3.2.2 INTERFACE DE USUARIO	51
CAPITULO 4 PARAMETRIZACION LA RED WSN	54
4.1 MEDICION DE PONTENCIA DE SALIDA DE LOS MODULOS	54
4.2 ANCHO DE BANDA	55
4.3 RSSI Y CONECTIVIDAD	55
4.1.4 CONFIABILIDAD PACKET ERROR RATE (PER)	58
4.1.5 AUTONOMIA DEL NODO SENSOR	59
4.2 TOPOLOGIA Y METODOLOGIA DE DESPLIEGUE.....	60
CAPITULO 5 DISCUSIÓN Y APORTES.....	62
CONCLUSION.....	¡Error! Marcador no definido.
REFERENCIAS	66

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1. Emergencias y fatalidades mineras entre los años 2005 a 2022.....	16
Figura 2. Causas de las fatalidades mineras entre los años 2005 a 2022.....	17
Figura 3. Modulo AS32-TTL-100.....	23
Figura 4. Sensor Figaro 2610 LP gas	26
Figura 5. Circuito para lectura sensor figaro 2611	27
Figura 6. Respuesta sensor TGS 2611.....	27
Figura 7 Sensor gas carbónico CO2.....	28
Figura 8. Circuito para medición de gas carbónico	29
Figura 9. Ciclo de detección sensor TGS 2442.....	29
Figura 10. Respuesta de sensor TGS2442.....	30
Figura 11. Límite de sensibilidad de equipos.....	31
Figura 12. SNR de una señal en el tiempo dos casos de estudio de sensibilidad. 32	
Figura 13. Sección transversal del túnel.	35
Figura 14. Perdidas por desviación y rugosidad	37
Figura 15. Diagrama arquitectura nodo sensor.....	39
Figura 16 Circuito Impreso de Procesamiento	41
Figura 17. Circuito regulador placa de procesamiento.....	41
Figura 18. Circuito de microcontrolador	42
Figura 19. Circuito impreso sensado y transmisión.	43
Figura 20. Prototipo Nodo Sensor.....	44
Figura 21. Diseño circuito impreso final nodo trasmisor.	45
Figura 22. Microcontrolador PIC18F26K80.....	46
Figura 23. Respuesta en magnitud de filtro IIR diseñado	47
Figura 24. Respuesta en el dominio del tiempo del filtro IIR pasa bajas implementado	48

Figura 25. Diagrama de flujo main WSN.....	49
Figura 26. Diagrama de flujo ISR PIC.....	50
Figura 27 Interface de usuario	52
Figura 28. Trama de datos de cada modulo	53
Figura 29. Potencia de salida nodo sensor.....	54
Figura 30. Dispositivos de prueba para medición de potencia.....	56
Figura 31. Potencia recibida y simulación de modelo matemático.....	57
Figura 32. INDICADOR RSSI PROMEDIO.....	58
Figura 33. Red en malla.....	61

LISTA DE TABLAS

	<u>Pág.</u>
Tabla 1 Dispositivos implementados en cada modulo	43
Tabla 2. (PER) Packet error rate de la red wsn.	59

LISTA DE ECUACIONES

(1)	27
(2)	30
(3)	34
(4)	34
(5)	34
(6)	35
(7)	36
(8)	36
(9)	36
(10)	36
(11)	36
(12)	37
(13)	37
(14)	37
(15)	59
(16)	59

CAPITULO 1

INTRODUCCION

La evolución del mundo, la tecnología y la internet han dado la posibilidad de conectividad con todos, además de visualizar y almacenar datos obtenidos de distintas fuentes, por ejemplo, una red de sensores (WSN) en una aplicación IoT (Internet of Things) que permite monitorear variables en múltiples puntos simultáneamente a través de sensores que se comunican mediante el uso de transmisores inalámbricos (Qiuping, Shunbinga, & Chunquana, 2011). El uso de estas redes se extiende en diferentes campos y varía dependiendo de los requerimientos de la aplicación.

En Colombia una fuente importante de recursos es la minería con aportes de 3,3% al producto interno bruto (PIB) del país, en el cuarto trimestre del 2020, infortunadamente la minería no formal deja víctimas en el histórico con 152 personas para el año 2020 (MINAS, 2022), siendo el departamento de Boyacá uno de los más afectados a nivel nacional. En la prevención, se asiste el ingreso a la mina monitoreando los niveles de monóxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), y de esta manera tener una alerta temprana antes de que una reacción explosiva se presente, el gas metano y monóxido de carbono pueden llegar a alcanzar altas concentraciones en las minas, en consecuencia, generar daños ambientales y socioeconómicos.

Para poder realizar la medición de estas variables se implementan redes WSN, con la integración de varios nodos sensores y obtener información de los ambientes de interés. En el desarrollo de estos sistemas de adquisición, escalado, almacenamiento y visualización de la información, se requiere conocimiento de implementación de hardware y software.

En el hardware se seleccionan los dispositivos para la administración de energía, sensado, procesamiento y transmisión de la información integrándose en un circuito impreso PCB. Mediante la programación del software de estas tarjetas, el servidor

local y la aplicación Windows para validar su funcionamiento. La validación considera los parámetros físicos de la red que dependen del hardware implementado tales como la cobertura y la confiabilidad, esto por lo particular del entorno de estudio con el fin de garantizar el funcionamiento bajo las condiciones en las que trabajará el nodo en la minería subterránea bajo el estándar LoraWPAN a 433 MHz.

1.1 ANTECEDENTES

En Colombia la minería de carbón aporta a la economía del país el 3.3 % del PIB para el 2020 (Energía, 2020). De este porcentaje, empresas privadas multinacionales extraen el 90 % de toda esta producción de Carbón, el 10 % restante es extraído por empresas medianas y pequeñas (Agencia nacional de minas, 2013) que están distribuidas en diez departamentos. Boyacá es uno de los departamentos con una alta concentración de empresas dedicadas a la extracción de carbón metalúrgico (Observatorio colombiano de ciencia y tecnología, 2012), desafortunadamente, también es el departamento donde se presenta un mayor número de accidentes e incidentes con tragedias por derrumbes o explosiones mineras (Cáceres Rodríguez, Agudelo Cely, & Tejedor Estupiñán³, 2017). Estos accidentes se pueden presentar, entre otros motivos, debido a que las empresas no disponen de dispositivos para la detección de gases, o trabajan con técnicas tradicionales rudimentarias o también porque los mineros no hacen un uso correcto de los detectores.

En consecuencia, se hace necesario conocer la concentración de gases en los túneles o minas mediante una medición simultáneamente para identificar las concentraciones de gases nocivos en el ambiente de trabajo (MINAS, 2015). Este monitoreo disminuye riesgos en la salud del personal y la ocurrencia de accidentes por explosión en la atmósfera al interior de los túneles, de tal manera que se puede tomar como una nueva garantía que obedece al cumplimiento de los estándares de

seguridad reglamentados y que con la formalización minera son un mínimo requerido.

En Colombia, existe una reglamentación vigente (Consejo, 2010), y explica claramente que cada unidad de producción de carbón (UPM), debe contar con un título minero para poder comenzar y mantener una excavación. La Ley 2250 de 2022 fue expedido por el congreso de la república y exige un monitoreo de gases constante, se debe tener los equipos calibrados y con certificación para atmosferas explosivas, sin embargo, la mayoría de minas no cuentan con su título minero, y, por tanto, no cumplen las reglamentaciones necesarias, creciendo aún más las probabilidades de accidentes (Consejo, 2010).

De otra parte, aún no se ha identificado una metodología costo efectiva para apoyar el despliegue de nodos sensores en ambientes confinados, pero (Reda Senouci, Yazid Boudaren, Abdelkrim Senouci, & Mellouk, 2014) propuso el uso de una metodología de cuatro pasos:

1. Se construye modelos abstractos de cobertura y conectividad.
2. Se evalúa numéricamente la mejor topología posible.
3. Se despliega la red de sensores según la topología que se escoja.
4. Se evalúa y estima el rendimiento de la red implementada.

Por otra parte, debido a que la propagación de las ondas electromagnéticas en un escenario subterráneo presenta mayor atenuación e interferencia por las condiciones físicas *per se* de los entornos confinados como los túneles de las minas, es importante evaluar la red de sensores adecuada, que mejore la cobertura y conectividad (Peng & Qian, 2016). Para medir e informar los niveles de los gases explosivos asociados al carbón, ayudando a mitigar los eventuales accidentes que puedan presentarse en la mina (Mejia Humana & Pulido Gonzalez, 1993).

Para dar cumplimiento a los requerimientos establecidos por el Ministerio de Minas y Energía (MINAS, 2015), se debe establecer un sistema o protocolo que cubra los siguientes requerimientos:

1. Instrumentar y medirse la concentración de oxígeno.
2. Alertar el límite inferior de explosividad de los gases inflamables en presencia de gases combustibles.
3. Medir el nivel de polvo alféame de pueda causar una explosión o incendio.
4. Discriminar la presencia de gases, polvos o humos tóxicos en concentraciones que son inmediatamente peligrosas para la vida o salud.
5. Establecer medidas de protección en caso de que existan gases, polvo o humos tóxicos en concentraciones superiores a los valores permitidos.

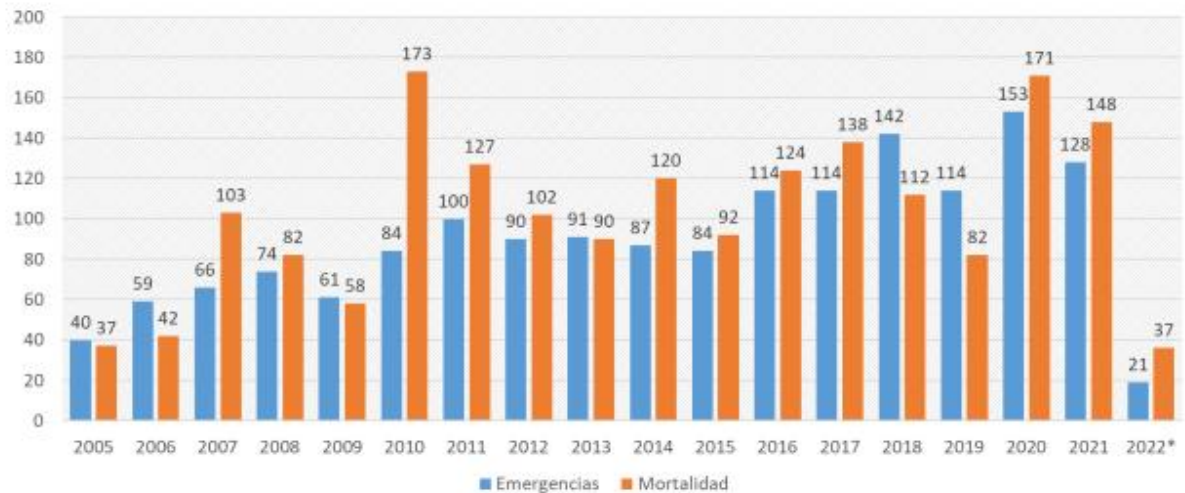
Por estas razones, y con el fin de dar cumplimiento a la reglamentación exigida por el ministerio de minas y energía, un sistema IoT basado en WSN para el monitoreo de gases en atmósferas explosivas en minas de carbón subterráneas, se muestra como una alternativa viable para minimizar riesgos y dar confiabilidad a las actividades realizadas dentro de las minas o túneles.

1.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La minería en Colombia constituye uno de los sectores económicos más importantes, debido a la cantidad de empleos que genera y el aporte del 3.3% al PIB para el cuarto trimestre del 2020 (Minas,2022). Por normativa, es necesario medir los niveles de concentración de gases explosivos en los espacios de trabajo donde se realizan actividades de minería subterránea de carbón. Todas las empresas deben garantizar un ambiente propicio para dicho fin y así poder aumentar su cobertura y operaciones de manera segura. En consecuencia, las empresas deben disponer de dispositivos de medición y monitoreo constante del ambiente de trabajo que estén certificados y calibrados apropiadamente.

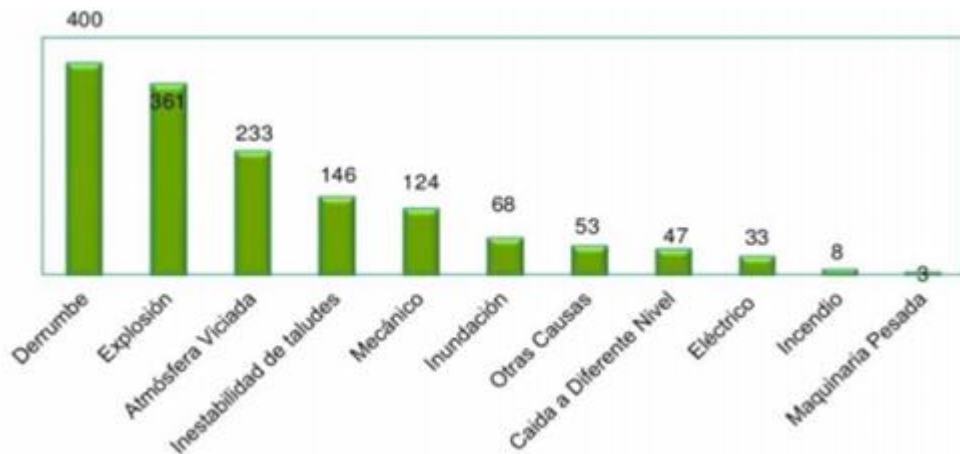
Infelizmente la ausencia de compromiso por parte de las empresas para implementar sistemas de monitoreo para la detección de estos tipos de gases, hacen que la ocurrencia de riesgos aumente atentando contra la vida del personal minero y la comunidad en general (Consejo, 2010).

Figura 1. Emergencias y fatalidades mineras entre los años 2005 a 2022



Fuente: (Minas,2022)

Figura 2. Causas de las fatalidades mineras entre los años 2005 a 2022



Fuente: (Minas, 2022)

De la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se puede extraer el comportamiento creciente de la curva de las ocurrencias junto con las fatalidades que se presentaron en el periodo de 2005 a 2019. De igual manera se soporta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** las causas de estas ocurrencias destacando las explosiones por acumulación de gases como una de las principales razones por las cuales es necesario cumplir la normativa y contribuir en la mitigación de los riesgos en esta actividad en consecuencia el monitorear la concentración de gases explosivos como metano (CH_4), para así generar alertas tempranas previniendo riesgos e incluso evitar una catástrofes.

1.3 OBJETIVOS

GENERAL:

Diseñar y desplegar una red de sensores (WSN) en malla basada en IoT para monitorear atmósferas explosivas en entornos confinados/subterráneos en minería de carbón.

ESPECIFICOS:

1. Diseñar y parametrizar un piloto de red de sensores (WSN) en malla (Mesh) basada en IoT para el monitoreo de los niveles de gases en atmósferas explosivas en entornos confinados/subterráneos.
2. Integrar módulos de sensado, comunicaciones y administración de energía en una tarjeta PCB, seleccionando componentes para lograr conectividad y cobertura en implementación de red inalámbrica de sensores.
3. Validar experimentalmente el piloto de red inalámbrica de sensores (WSN) evaluando los parámetros establecidos de cobertura y conectividad.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1 ¿QUE ES UN WSN? (Wireless sensor networks)

Las WSN son la integración de un pequeño número de nodos sensores distribuidos espacialmente, y comunicados entre sí por señales de radio, por lo tanto, las WSN generan una comunicación entre el mundo digital y el físico haciendo extensa su forma de ayudar en campos como la industria, la ciencia, el transporte, la seguridad, entre muchas más aplicaciones, de acuerdo con esto cada sensor inalámbrico en una red, recolecta información del ambiente y la envía a sus vecinos y así sucesivamente hasta que la información alcance a la estación base, constituida por un ordenador dirigido a la zona de estudio que ejecuta el procesamiento de la información (Diana, 2013), de acuerdo con esto dependiendo del uso y la aplicación existen diferentes requerimientos que deben ser satisfechos para cumplir con el objetivo de su implementación las características generales que se deben analizar en el diseño de una red se exponen en la siguiente sección.

2.1.2. CARACTERISTICAS DE UNA WSN

El desarrollo de una red de sensores inalámbricos requiere tecnologías de tres áreas de investigación: detección, comunicación y computación. Los nodos de sensores se encuentran esparcidos por la red inalámbrica tienen la capacidad tanto para la recolección de datos como para enrutarlos hacia el nodo recolector, este nodo puede comunicarse con el nodo administrador vía internet, vía satélite o de forma directa (Pérez, 2014) según sea diseñada la red WSN tiene características generales que hacen aumentar su eficiencia como:

Tolerancia a fallos: algunos sensores pudieran fallar o bloquearse debido a la falta de energía, o recibir daños físicos o interferencias medioambientales, el fallo de los nodos no debería comprometer el funcionamiento global de la red sensor.

Escalabilidad: los diseños deben ser capaces de trabajar un número de nodos del orden de centenares, millares teniendo en cuenta la alta densidad que pueden llegar a tener algunos centenares de nodos en una región.

Costos de producción: debido a que las redes de sensores consistirán en un gran número de nodos, el costo de un nodo individual es clave para que una red inalámbrica sea rentable en comparación con una conexión alamburada, si el costo de la red es más caro que el despliegue de sensores tradicionales, esta red no estaría justificada económicamente.

Limitaciones de hardware: un sensor está constituido por cuatro componentes básicos: el conversor analógico-digital (ADC), la unidad de procesamiento, el transceptor, y la unidad de energía, también puede tener otros componentes adicionales dependiendo de su aplicación como un sistema de localización y un movilizador.

Topología: el despliegue de un gran número de nodos densamente distribuidos precisa el diseño, mantenimiento y gestión de la topología aplicada, los sensores inalámbricos podrán ser arrojados en masa o colocados uno por uno en el campo sensor, estas topologías son estrella, malla, anillo o bus.

2.2 RADIOCOMUNICACIÓN

El objetivo de la radiocomunicación es establecer un enlace sin cables entre dos puntos que permita la transmisión de información. Esta idea lleva asociada una serie de retos científicos y tecnológicos que de forma sencilla se pueden resumir en utilizar las comunicaciones inalámbricas a través de redes de sensores y el internet de las cosas para así satisfacer las necesidades de transmisión de información con la máxima velocidad posible (fuentes, 2012).

Con este objetivo se han creado dispositivos para la comunicación de información con ancho de banda y canal configurable, además de ser capaces de encriptar la información antes de ser transmitida y ofrecer una seguridad adicional a la

información. Dispositivos como los transmisores LORA transmiten señales eléctricas, y permite que la manipulación e implementación sea más transparente al usuario y de esta forma se pueda obtener un enlace deseado y confiable.

2.2.1. TIPOS DE ENLACES DE RADIOCOMUNICACIÓN

En las comunicaciones entre nodos, Routers y estaciones bases aparte de la topología de conexión de los nodos, se debe hacer uso de un canal y dirección por medio del cual la transmisión de información se llevara a cabo, de acuerdo con esto, existe un tráfico de información en el canal y es muy importante saber por qué canal se transmite para evitar colisiones de datos y transmisiones innecesarias con el fin de establecer un enlace eficiente en términos energéticos entre los nodos de acuerdo con esto existen dos tipos enlace para transmitir información por radio frecuencia.

Punto a Punto:

Un enlace punto a punto se aplica para un tipo de arquitectura de red específica, en la que cada canal de datos se usa para comunicar los nodos, con el fin de establecer una conexión única entre dos nodos sin que todos los dispositivos de la red que se encuentren en el mismo canal recepten la misma información se implementan direcciones de dispositivo con la que se especifica con cual se quiere conectar sin que los demás intercambien información que no es para su procesamiento, un ejemplo donde este protocolo es necesario para establecer una dirección IP y se asigna un canal para la transmisión (Rappaport, 2004).

Broadcast:

Broadcast o difusión amplia es una conexión multipunto dentro de una red, que consiste en transferir un paquete de datos desde un punto a todos los participantes de la red de comunicación, mediante el uso de una única dirección y canal donde se encuentran enlazados todos los dispositivos donde el emisor es quien establece la conexión, el broadcast funciona de manera similar a una lista de correo electrónico, dado que los receptores no son visibles ni el emisor tiene que conocer

las direcciones de cada miembro de la red, esto es viable solo en aplicaciones que requieren de monitoreo en tiempo real de variables o paquetes de información, debido a que su actividad las obliga a estar activas en todo momento aumentando el consumo energético de cada uno de los participantes de la red (Rappaport, 2004).

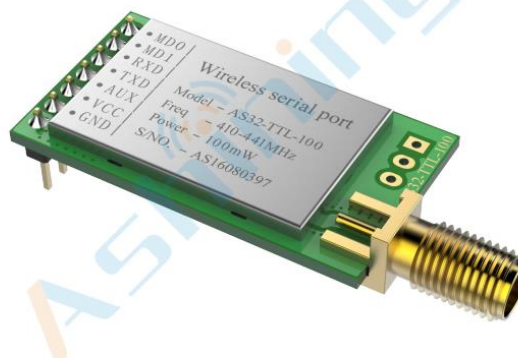
2.2.2 DISPOSITIVOS DE RADIOCOMUNICACION LORA SX127XX

LoRa (long rate) es una capa de modulación inalámbrica que se utiliza para crear enlaces de largo alcance, este sistema fue patentado por Semtech, se basa en una técnica de “espectro ensanchado” modulado mediante modulación por desplazamiento de frecuencia (Frequency Shifting Keying - FSK) y una variación del “espectro extendido” chirp (chirp spread spectrum - CSS), en la cual se mantiene las características de baja potencia de la modulación FSK, pero consiguiendo un mayor rango de comunicación; también emplea corrección directa de errores hacia adelante (Forward Error Correction - FEC) (Quimbíta, 2018), que es un método para obtener el control de errores en la transmisión de datos.

Todos los módulos Semtech Lora son transceivers RF serie SX127‘X’ con la capacidad de comunicarse con la topología maquina a máquina (M2M), por lo tanto, con este sistema se pueden crear variadas redes de comunicación de largo alcance, con esto se da la posibilidad de conectar millones de dispositivos optimizando el consumo energético, así como, aumento del ciclo de vida de las baterías de los sistemas embebidos, brindando aplicaciones con redes ideales para internet de las cosas (IoT), automatización, meteorología, seguridad industrial, tracking y aplicaciones varias.

Los dispositivos de radio Lora cuentan con un modem de largo alcance con alta inmunidad al ruido y mínimo consumo de corriente, la serie SX1278 utilizada en este proyecto hace uso de una técnica que alcanza una sensibilidad de -137 dBm y -148 dBm, la cual combinada con amplificador de bajo ruido (Low Noise Amplificator - LNA) de +20 dBm, por lo tanto, optimiza el rango de alcance y brindan la robustez necesaria para aplicaciones industriales (Munca, 2016).

Figura 3. Modulo AS32-TTL-100



Fuente: (Ashining,2010)

Estos dispositivos cuentan con tres modos de operación y uno de programación en donde se configuran parámetros como la velocidad en baudios, canal, dirección, modo de operación (punto-punto, broadcast) encriptación de datos según lo requiera la aplicación, estos dispositivos carecen de una unidad de procesamiento central (CPU) que los controle, para esto existen microcontroladores como se muestra a continuación.

2.3 MICROCONTROLADORES

Un microcontrolador es un ordenador que contiene en su interior un procesador, soporte, memoria y puertos de entrada y salida, todo esto en un pequeño chip que hace más fácil su manipulación (Velasco, 2015). Los microcontroladores tienen diferentes familias que difieren en la forma de interconexión interna, los procesadores RISC tienen un conjunto más pequeño de instrucciones con pocos nodos de direccionamiento y los procesadores CISC tienen un conjunto más grande de instrucciones con muchos nodos de direccionamiento, por ejemplo los microcontroladores PIC son una familia de microcontroladores tipo RISC fabricados por Microchip Technology Inc. y derivados del PIC1650, originalmente desarrollado por la división de microelectrónica de General Instruments. Es por esto que el microcontrolador PIC implementa a través de una especificación detallada de las instrucciones, cuyo número puede variar desde 35 para PIC de gama baja a 70 para

los de gama alta. Estos criterios se clasifican entre los que realizan operaciones entre el acumulador (CPU de computadora) y una constante, entre el acumulador y una posición de memoria, instrucciones de condicionamiento y de salto/retorno, implementación de interrupciones y una para pasar a modo de bajo consumo el llamado modo Sleep.

Existen varios tipos de arquitecturas de microcontroladores como:

- Procesador RISC
- Arquitectura Harvard
- Pipeline
- Formato de instrucciones ortogonal
- Arquitectura basada en banco de registros

con características y funcionalidades distintas como:

- Periféricos: temporizadores, puertos paralelos/serie, interrupciones, 12c USB, a/d etc.
- Capacidades variables de memoria/datos
- Programación “en el sistema”
- Modo de bajo consumo
- Pines de alta corriente
- Encapsulados pequeños desde 8 pines.

La selección de estos dispositivos se hace de acuerdo a la velocidad de procesamiento de la información, el número de periféricos, conjunto de instrucciones y su consumo de potencia que son requerimientos propios de cada aplicación en la que se desee implementar en el microcontrolador, además del tipo de sensores y actuadores al que serán interconectados a éste, por ejemplo, sensores de medición de gas que se presentan en la siguiente sección.

2.4 ELEMENTOS DE DETECCIÓN DE GAS

El propósito principal de un sistema de detección, es medir los niveles de acumulación de una concentración de gas antes de que llegue a un nivel umbral e iniciar un proceso de mitigación para evitar que se produzca un accidente, iniciando acciones correctivas como el cierre de válvulas de seguridad y activación las alarmas de advertencia, o apertura de ventiladores para controlar el flujo de oxígeno y aire en la mina.

Por lo tanto, los sensores para la detección de gases y vapores, son transductores que usan propiedades de los gases para generar una señal eléctrica adecuada y proporcional a la concentración de dicho gas, y monitorizar puntos críticos donde se pueden presentar fugas o acumulaciones de gases peligrosos, estos sensores se deben conectar a un controlador entre un encapsulado anti explosión ATEX con una pantalla o indicadores de alarma, a estos se suele denominar sistema fijo (Leib, 2010), la complejidad de cualquiera de estos sistemas de detección depende del medio y el uso que se quiera dar a los datos, ya que, el almacenamiento de datos permite que la información esté disponible en cualquier momento para lograr identificar zonas problemáticas y a su vez asistir en la implementación de medidas de seguridad. Si el sistema se va a usar sólo como indicador, las salidas de los sensores pueden ser simples y el almacenamiento de los datos no es necesario, en consecuencia, al elegir un sistema a implementar es importante conocer cómo se va a usar la información, para que se pueda diseñar un apropiado sistema. (Winterfell, 2009).

De acuerdo a esto para la supervisión de un gas tóxico, el uso de sistemas multipunto ha demostrado su potencial para resolver una amplia variedad de problemas de exposición en el lugar de trabajo, debido que al monitorear e informar a la estación base o controladores de las zonas donde las concentraciones de agentes contaminantes exceden el umbral, se pueden llevar a cabo acciones de alerta al personal o evacuación de zonas con riesgo potencial.

El número de niveles de alarma disponibles varía según los umbrales de los sensores y puntos críticos en la mina, pero normalmente se pueden definir hasta tres niveles, dependiendo de los requisitos normativos, a continuación, se presentan los sensores seleccionados para la implementación de los nodos sensores que serán desplegados.

2.4.1 SENSOR DE GAS METANO (TGS-2611)

Para realizar la medición de gas metano se utiliza el sensor figaro 2611 que funciona analógicamente haciendo uso del principio de la oxidación del gas en la superficie del elemento catalítico, proporciona una variación en su resistencia dependiendo de la concentración del gas con un bajo consumo de potencia y larga vida útil, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el sensor Figaro TGS2611.

Figura 4. Sensor Figaro 2610 LP gas



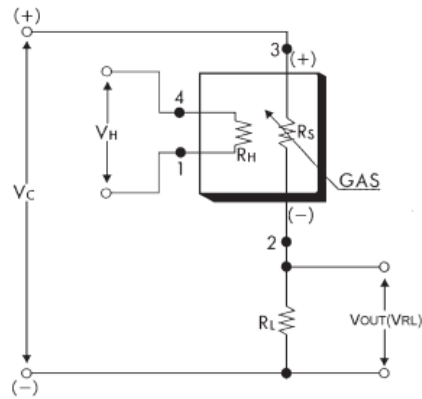
Fuente: (Figaro,TGS2611)

Este sensor requiere de un circuito externo comprendido por una resistencia sobre la cual se realiza la medición del voltaje analógico en la Para realizar la medición de gas metano se utiliza el sensor figaro 2611 que funciona analógicamente haciendo uso del principio de la oxidación del gas en la superficie del elemento catalítico, proporciona una variación en su resistencia dependiendo de la concentración del

gas con un bajo consumo de potencia y larga vida útil, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el sensor Figaro TGS2611.

Figura 4

Figura 5. Circuito para lectura sensor figaro 2611

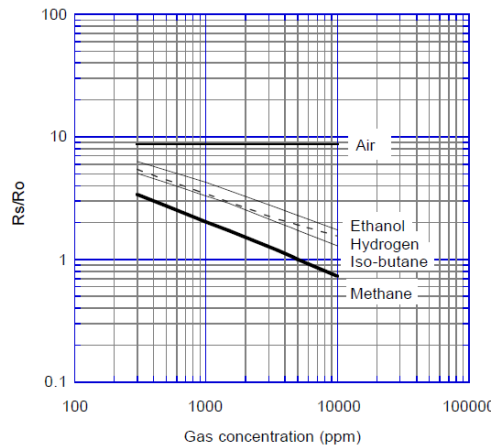


Fuente: (Figaro,TGS2611)

El circuito mostrado en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** esta descrito por la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

$$R_S = \left(\frac{V_C}{V_{RL}} - 1 \right) * R_L \quad (1)$$

Figura 6. Respuesta sensor TGS 2611



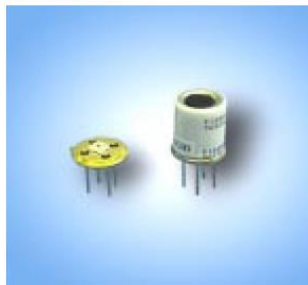
Fuente: (Figaro,TGS2611)

Haciendo uso de la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y de la gráfica de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se implementa un algoritmo en el microcontrolador y se obtiene el valor de la resistencia R_s/R_o eléctricamente al cual se le hace una escalización y se imprime el valor de la concentración del gas presente en el ambiente.

2.4.2 SENSOR DE GAS CARBONICO (CO2)

El sensor figaro 2442, mide gas metano a partir de la variación de resistencia en función de la concentración del gas, este sensor tiene una salida analógica, con un bajo consumo de potencia y larga vida útil.

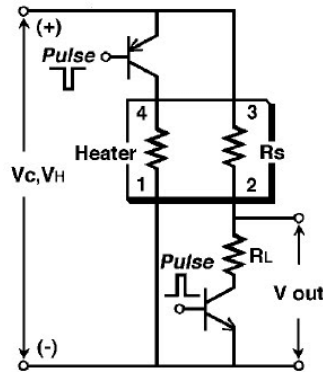
Figura 7 Sensor gas carbónico CO2



Fuente:(Figaro,TGS2442)

Este sensor requiere de un circuito externo comprendido por dos transistores para controlar el flujo de corriente y una resistencia sobre la cual se realiza la medición del voltaje analógico del sensor de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

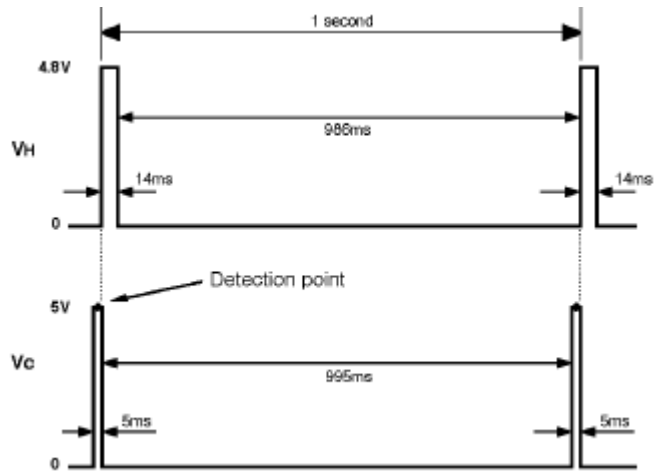
Figura 8. Circuito para medición de gas carbónico



Fuente:(Figaro,TGS2442)

Este circuito muestra dos elementos adicionales al circuito del sensor de gas carbono mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**En este caso, el elemento sensor requiere de la aplicación de un ciclo de precalentamiento para una correcta medición, esto se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 9. Ciclo de detección sensor TGS 2442

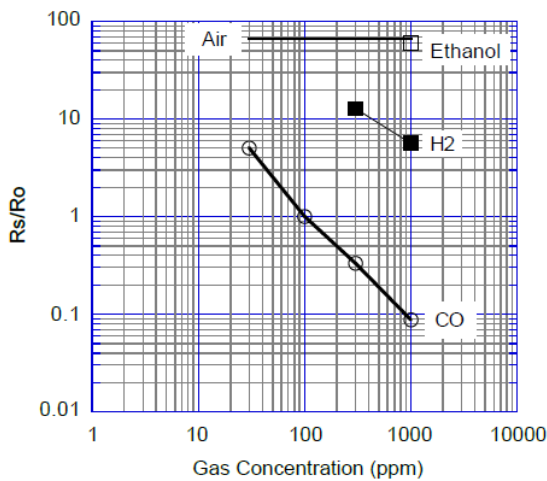


Fuente:(Figaro,TGS2442)

Siguiendo las indicaciones de la hoja de especificaciones si implementa un algoritmo que cumple los tiempos de calentamiento del sensor debido a que este posee un elemento calefactor, el cual si excede el tiempo de encendido produce migración de materiales al elemento sensor los cuales afectan la medición y a futuro el sensor.

$$R_s = \frac{V_c * R_L}{V_{out}} - R_L \quad (2)$$

Figura 10. Respuesta de sensor TGS2442



Fuente:(Figaro,TGS2442)

Haciendo uso de la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y de la gráfica de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se implementa un algoritmo en el microcontrolador y se obtiene el valor de la resistencia R_s/R_o eléctricamente y con este su equivalente a las partes por millón ppm de la concentración del gas.

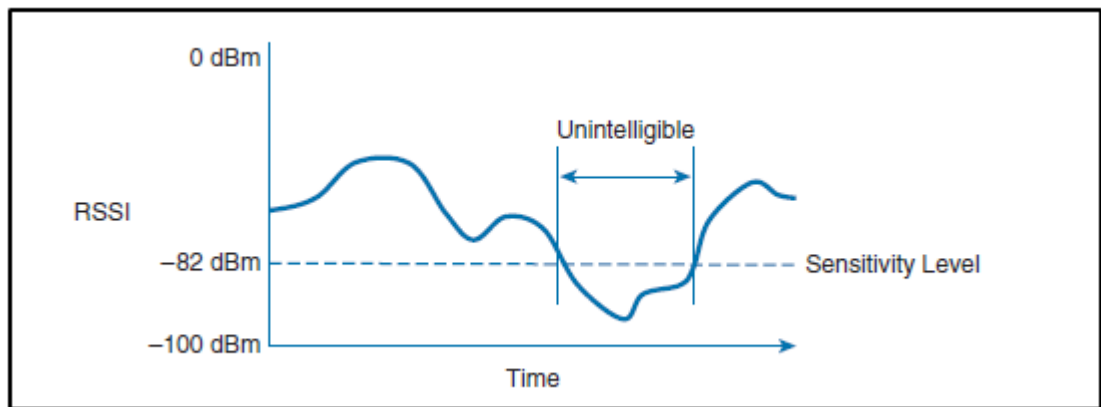
2.5 CONECTIVIDAD Y CONFIABILIDAD DE UNA RED

Cuando se transmiten ondas de radio, existen parámetros importantes que describen el comportamiento y funcionalidad de los enlaces, estos parámetros son la potencia de recepción y el indicador intensidad de fuerza de la señal recibida (RSSI) de la señal receptada de nodo sensor en el medio en el que se va implementar, ya que estos parámetros se ven afectados o atenuados por la distancia, las personas, y señales/objetos de interferencia que se encuentran en el medio, como el ruido debido a equipos y maquinaria, es por esto que el gran reto de las comunicaciones de radio es garantizar un enlace, que sea lo más confiable y tenga el mayor alcance posible, para entregar al cliente la información optimizando al máximo los recursos, para esto existen estudios de potencia de recepción y RSSI que se explican en la siguiente sección.

2.6 RSSI (Indicador de intensidad de la señal recibida)

Este indicador es la escala que mide el nivel de potencia de la señal recibida en redes inalámbricas, su unidad de medida es el dBm (decibeles referidos a milivatios). En el equipo receptor los niveles de potencia de señal recibida van desde los 0dBm (mejor señal) -100 dBm (señal muy débil) o menos (HUAWEI, 2019). Cada receptor tiene un nivel de sensibilidad “sensitivty level” o umbral “threshold” que divide lo que puede entender (señal útil) de lo que no. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, muestra una variación del indicador RSSI de una señal recibida que varía en el tiempo, quedando en ciertos instantes por debajo de la sensibilidad de recepción, eso significa que no es posible la comprensión de los datos recibidos, además, se muestra el rango de cobertura que puede tener un dispositivo.

Figura 11. Límite de sensibilidad de equipos.

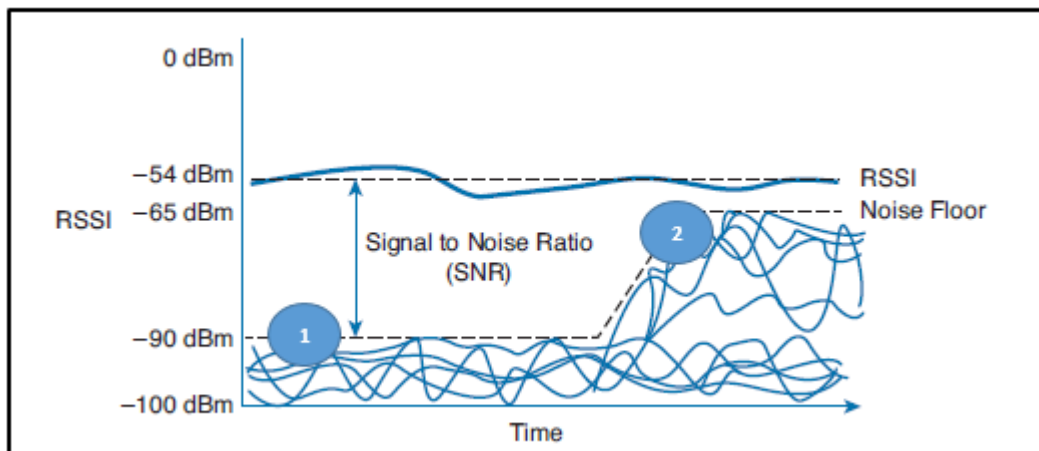


Fuente: (HUAWEI, 2019)

El valor del Indicador de intensidad de la señal recibida (*RSSI*) se centra en la señal esperada, sin importar las otras señales recibidas también. Todas las demás señales recibidas en la misma frecuencia son tratadas como ruido, el nivel de ruido o el promedio de la fuerza de señal de ruido es llamado Piso de Ruido “Noise Floor”. La fuerza de la señal debe ser mayor al piso de ruido para que la señal pueda ser recibida y entendida correctamente, la diferencia entre el nivel de señal y el ruido es

llamado “Signal to Noise Ratio” (SNR) y es medido en decibeles (dB). Un SNR alto es preferido, debido a que si el piso entre la señal recibida y la sensibilidad del equipo es baja el enlace estaría en un límite de eficiencia menor ya que el rango de potencia de recepción se ve afectada en algunos instantes de tiempo estando por debajo de la sensibilidad perdiéndose información. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el indicador RSSI de una señal comparada con el piso de ruido, en dos casos de estudio cuando se tiene un piso de ruido alto de -65 dBm y cuando no -90 dBm dando el resultado de SNR (HUAWEI, 2019), es decir, cuando se tiene mucho ruido o no, a continuación se presentan los dos casos.

Figura 12. SNR de una señal en el tiempo dos casos de estudio de sensibilidad.



Fuente: (HUAWEI, 2019)

CASO 1 .- RSSI = -54 dBm

Piso de Ruido = -90 dBm

$$\text{SNR} = -54 \text{ dBm} - (-90 \text{ dBm}) = 36 \text{ dB}$$

CASO 2. - RSSI = -54 dBm

$$\text{Piso de Ruido} = -65 \text{ dBm}$$

$$\text{SNR} = -54 \text{ dBm} - (-65 \text{ dBm}) = 11 \text{ dB}$$

2.7 AUTONOMIA

Aunque algunos dispositivos portátiles y de IoT funcionan de forma autónoma, como los seguidores alimentados solarmente, pero la mayoría depende de baterías como fuente de energía. La elección del tipo y tamaño de batería en dispositivos IoT portátiles compactos y los wearables ligeros son vitales y dependen en gran medida de las necesidades operativas (Raad, 2021).

Como se mencionó anteriormente, los productos IoT suelen ser alimentados por una batería y las aplicaciones portátiles se volverán inútiles, si la vida de la batería es poco fiable y/o corta. La capacidad de una batería (normalmente en amperios hora) es una medida de la cantidad de carga almacenada por la batería y está determinada por la masa del material químicamente activo dentro de la batería. La capacidad indica la cantidad máxima de energía que puede entregar la batería bajo condiciones específicas. Una batería con una capacidad de 2000 mAh (miliamperios hora) significa que la batería puede entregar 2000 mA de corriente en una hora, 1000 mA para dos horas, o 500 mA durante cuatro horas, etc.

El presupuesto de energía se ocupa del análisis de la cantidad de energía que un dispositivo dado requiere para su funcionamiento. Aquí, este análisis es necesario para determinar cuánto tiempo funcionará el dispositivo portátil con una batería de una capacidad dada antes de apagarse. Esto se determina calculando cuánto tiempo pasará un dispositivo en cada uno de sus modos de operación (sleep o espera y corriendo o funcionando) y luego sumando las energías gastadas en cada modo para esto se usa la Ecuación (3).

$$I_{\text{promedio}} = \frac{I_{\text{SLP}} * t_{\text{slp}} + I_{\text{run}} * t_{\text{run}}}{t_{\text{SLP}} + t_{\text{run}}} \quad (3)$$

Donde:

I_{SLP} es la corriente de modo sleep o espera.

t_{slp} es el tiempo que se encuentra en modo de espera.

I_{run} es la corriente de funcionamiento activo.

t_{run} es el tiempo en el que está activo.

Para encontrar el tiempo de operación se usa la siguiente expresión:

$$I_{\text{promedio}} = \frac{\text{Capacidad Batería}}{\text{tiempo de operación}} \quad (4)$$

2.8 MODELO DE PROPAGACIÓN EN ESPACIOS CONFINADOS

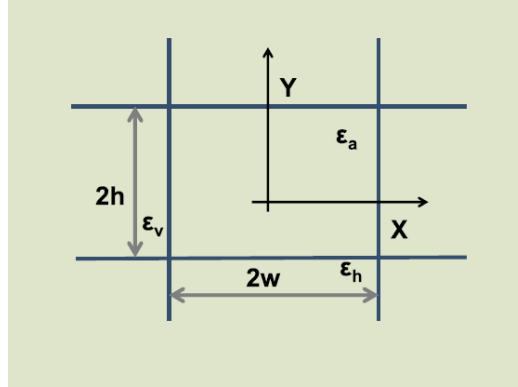
El modelo que mejor se adapta a las características de propagación para el proyecto con excelentes resultados en túneles es desarrollado y probado por (Alok Ranjan, 2019):

$$P_{\text{rec}}(x, y, z) = P_{\text{tras}} G_t G_r \left(\frac{1}{E_0} \sum_{m,n} C_{m,n} \cdot E_{m,n}^{\text{eigen}}(x, y) \cdot e^{-(\alpha_{mn} + j\beta_{mn}) \cdot z} \right)^2 \quad (5)$$

En este modelo se tienen en cuenta las características físicas del túnel como el ancho, alto y largo del túnel con las coordenadas (x,y,z) respectivamente, tomando

una vista transversal del túnel como se muestra en la Figura 11 se supone que el transmisor se encuentra en el centro, la altura es $2h$ y el ancho es $2w$.

Figura 13. Sección transversal del túnel.



Fuente: (Alok Ranjan, 2019)

Suponiendo que el túnel tiene pérdidas de propagación por sus características físicas y estas se modelan como una guía de ondas dieléctrica usando las características de permitividad relativa (ϵ) y conductividad relativa (σ) de los techos/pisos y paredes para describirlos de forma eléctrica siendo k_h, k_v y k_a los parámetros eléctricos físicos del túnel en la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran estos parámetros.

$$k_h = \epsilon_0 \epsilon_h + \frac{\sigma_h}{j2\pi f_0}, k_v = \epsilon_0 \epsilon_v + \frac{\sigma_v}{j2\pi f_0}, k_a = \epsilon_0 \epsilon_a + \frac{\sigma_a}{j2\pi f_0} \quad (6)$$

Donde ϵ_h, ϵ_v y ϵ_a son la permitividad relativa de los techos/pisos, paredes y aire respectivamente, la frecuencia de transmisión es f_0 . La permeabilidad magnética se considera igual que en el espacio libre μ_0 , para una guía de ondas en un dieléctrico se puede expresar el número de onda como $k = 2\pi f_0 \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_a}$, y la distribución del campo electromagnético se puede expresar como una función propia desarrollando las ecuaciones de maxwell para obtener una expresión como se muestra a continuación en la Ecuación (7) :

$$E_{m,n}^{eigen}(x,y) \cong \sin\left(\frac{m\pi}{2W}x + \psi_x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{2h}y + \psi_y\right) \quad (7)$$

Donde: $\psi_x = \pi/2$ si m es par y $\psi_x = 0$ si m es impar, $\psi_y = \pi/2$ si n es impar y $\psi_y = 0$ si n es par. La distribución del campo electromagnético (EM) en el plano del transmisor se expresa con la sumatoria de todos los frentes de onda significativos como se muestra a continuación:

$$E^{Rx}(x,y,z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{m,n} \cdot E_{m,n}^{eigen}(x,y) \cdot e^{-(\alpha_{mn} + j\beta_{mn}) \cdot Z} \quad (8)$$

Donde la intensidad $C_{m,n}$ en el plano de transmisión del túnel de la mina se da como:

$$C_{m,n} = \frac{E_0 \pi}{wh \sqrt{1 - \left(\frac{m\pi}{2wk}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{2hk}\right)^2}} \cdot \sin\left(\frac{m\pi}{2w}x_0 + \psi_x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{2h}y_0 + \psi_y\right) \quad (9)$$

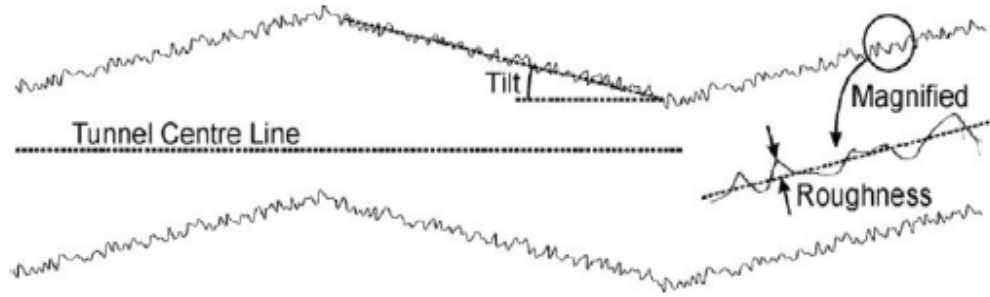
El coeficiente de corrimiento de fase β y el factor de atenuación α son descritos por las Ecuaciones (10) y (11) :

$$\beta_{m,n} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{m\pi}{2w}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{2h}\right)^2} \quad (10)$$

$$\alpha_{m,n} = \frac{1}{w} \left(\frac{m\pi}{2wk}\right)^2 \cdot R_e \frac{1}{\sqrt{k_v - 1}} + \frac{1}{h} \left(\frac{n\pi}{2hk}\right)^2 \cdot R_e \frac{1}{\sqrt{k_h - 1}} \quad (11)$$

Para integrar las pérdidas por rugosidades en las paredes y por las desviaciones del centro de la sección transversal del túnel como se muestra en la .

Figura 14. Perdidas por desviación y rugosidad



Fuente: (Alok Ranjan, 2019)

Estas pérdidas son expresadas por las Ecuaciones (12) y (13).

$$L_{Tilt} = \frac{4.343\pi^2\theta^2 z}{\lambda} \quad (12)$$

$$L_{roughness} = 4.343\pi^2 h^2 \lambda \left(\frac{1}{2w^4} + \frac{1}{2h^4} \cdot z \right) \quad (13)$$

Modelando estas pérdidas se puede calcular el total de perdidas sumándolas como se muestra a continuación:

$$PL_{TOTAL} = PL_{modal} + L_{mine} \quad (14)$$

Donde:

$$PL_{modal} = P_{tras} - P_{rev} \text{ y } L_{mine} = L_{roughness} + L_{Tilt}$$

2.9 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

Esta es una metodología de investigación cuantitativa experimental donde se tiene como resultado final un prototipo de red WSN para la medición de gas metano y

monóxido de carbono en entornos confinados, la integración de nodos sensores se inicia con una revisión bibliográfica de las tecnologías existentes para las WSN desarrolladas, obteniendo requerimientos de una arquitectura base para una implementación de estos nodos y así poder comprobar su correcto funcionamiento.

Teniendo esta arquitectura establecida se seleccionan los dispositivos para la implementación del hardware diseñando la interconexión de estos en un circuito impreso que para efectos de pruebas se plantea en dos fases:

- El diseño de un circuito impreso para el procesamiento de información.
- El diseño de un circuito impreso para el sensado y transmisión.

Luego de realizar el diseño de hardware se procede con el software además de comprobar el funcionamiento, se parametrizan los nodos sensores diseñados en cuanto a conectividad y confiabilidad, para lo cual se tomaron mediciones de potencia con el equipo Anritsu S332E Site Master, además se transmitieron 50.000 paquetes para calcular la tasa de error y evaluar el enlace a distintas distancias variando de 0 a 60 m el rango, en un entorno confinado como lo es el pasillo del tercer piso del edificio central de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia de la Sede Tunja, para comprobar los resultados obtenidos del modelo matemático y definir la distancia máxima en que pueden conectarse los dispositivos con una tasa de error aceptable.

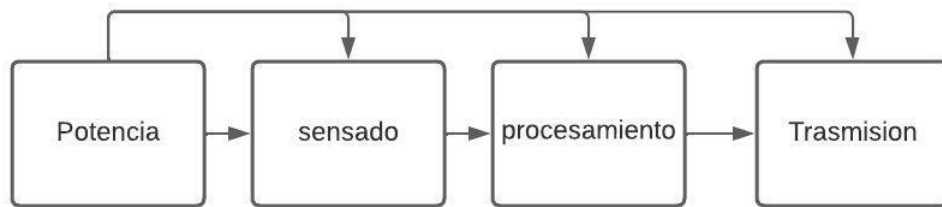
CAPITULO 3

IMPLEMENTACION NODO SENSOR

3.1 DISEÑO DE HARDWARE

Para la realizar pruebas de trasmisión y establecer la cobertura y confiabilidad que posee cada nodo sensor, se propone la arquitectura de los nodos sensores mostrada en la Figura 15.

Figura 15. Diagrama arquitectura nodo sensor.



Fuente: (Propia)

Partiendo de este punto se realizó el diseño y selección de dispositivos para la integración de un prototipo de nodo transmisor, empezando por el diseño del bloque de sensado; debido a la aplicación se comenzó con el tipo de sensores para la medición de gas metano y monóxido de carbono para obtener información sobre los dispositivos y los circuitos adicionales que estos requieren para funcionar bajo las condiciones de un entorno confinado, determinando la viabilidad en términos monetarios y funcionales.

Luego se escogió el microcontrolador para el bloque de procesamiento y se procede hacer un estudio de la potencia o consumo promedio que la interconexión de todos los bloques de la Figura 15 requieren, para poder diseñar el bloque de potencia, como el dispositivo tiene como finalidad ser portable requiere de baterías para dar una autonomía.

Después de tener las características de consumo de potencia pasamos a la selección de los dispositivos del bloque de potencia, para que se regule la energía desde las baterías hacia cada uno de los bloques de sensado,

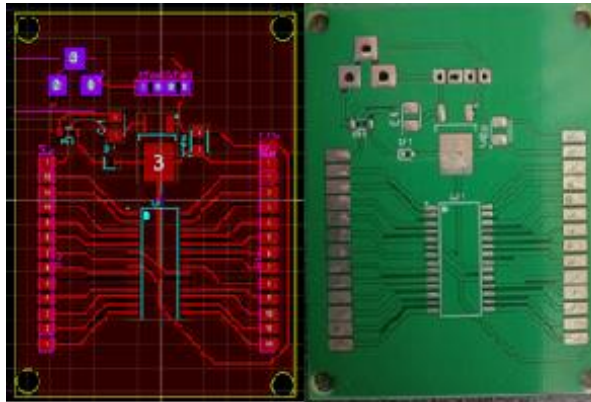
procesamiento y transmisión, en este punto se tuvo en cuenta el consumo de potencia de los sensores por lo que se estableció que el uso de estos es solo requerido por el microcontrolador cuando se necesite hacer una medición, por lo que se planteó diseñar un prototipo entregable de dos fases en las que los bloques quedasen separados tanto el procesamiento con el sensado y transmisión.

Los requerimientos para la primera fase son:

- Circuito procesador de información
- Acceso a los periféricos y/o pines del microcontrolador
- Conexión a cargador y un banco de baterías
- Circuito de administración de energía fijo (regulador)

En esta fase se realizó un estudio de los circuitos necesarios para que el microcontrolador tenga un correcto funcionamiento, el cual es alimentado a 5V con un par de baterías de 3.7 V de 1700 mA conectadas en serie al regulador de voltaje que tiene como función regular la tensión al nivel requerido por el microcontrolador, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**6 se muestra con detalle la placa simulada e implementada físicamente.

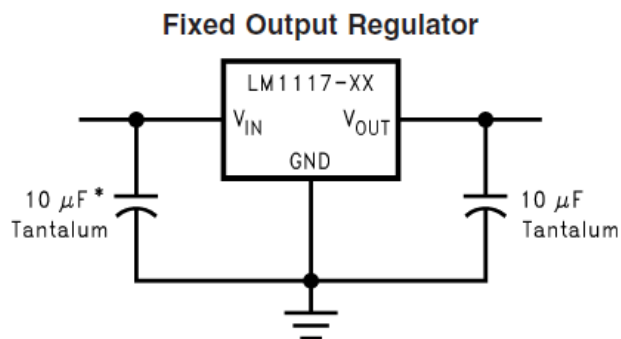
Figura 16 Circuito Impreso de Procesamiento



Fuente: Propia

El regulador fijo LM1117 de la placa procesamiento es seleccionado por su capacidad de corriente y su bajo consumo de potencia en funcionamiento, y lo hace ideal para aplicaciones con baterías (T.Instruments), en la implementación de este circuito se requieren dos capacitores uno de entrada y uno de salida, el PCB diseñado se muestra **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 17. Circuito regulador placa de procesamiento



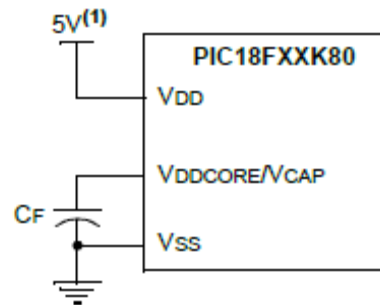
Fuente: (T.Instruments)

Con este circuito de la Figura 17 podemos alimentar o energizar la placa de procesamiento, en donde está situado el microcontrolador que para poder funcionar necesita implementar el capacitor CF de voltaje de núcleo que se

muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.8**. Debido a que no es reconocido por ningún programador el microcontrolador y no es posible programarlo, en la implementación se recomienda que el capacitor CF tenga una baja resistencia SR con el fin de dar estabilidad al núcleo del microcontrolador y trabaje con normalidad.

Figura 18. Circuito de microcontrolador

Regulator Enabled (PIC18FXXK80 Parts):



Fuente: (Microchip)

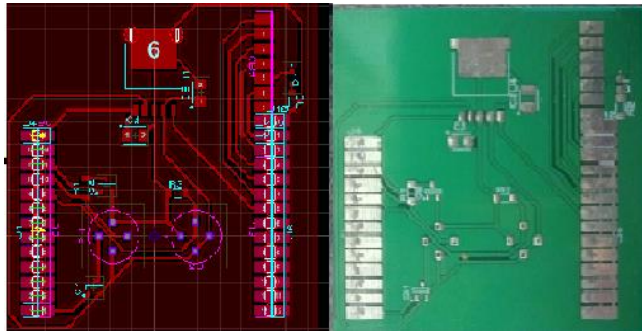
La segunda fase consiste en el diseño de la placa de sensado y comunicación definiendo los siguientes requerimientos para su implementación:

- Sensores para la detección de gas (Metano, Monóxido Carbono).
- Módulo de comunicación por radio frecuencia.
- Circuito de administración de energía con habilitación.
- Circuito para medir la carga de la batería.

En esta fase se implementó un circuito de regulación con habilitación para controlar el encendido de los sensores y con esto aumentar la vida útil y una autonomía mejorada de cada módulo, para satisfacer este requerimiento se seleccionó el circuito integrado LM2576 que permite habilitar el encendido de los sensores. Para la tarjeta de comunicación lora sx1278 se conecta al regulador fijo de la placa de procesamiento con el fin de habilitar una conexión

disponible y confiable a otros módulos, la placa diseñada se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.9.**

Figura 19. Circuito impreso sensado y transmisión.



Fuente: Propia

De acuerdo a los resultados del diseño, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se resumen los componentes y cantidades necesarios de dispositivos en cada nodo sensor.

Tabla 1 Dispositivos implementados en cada modulo

Componente	Cantidad
Pic18f26k80	1
Regulador lm1117	1
Regulador lm22576	1
Capacitores	5
Sensor CO_2 tgs2242	1
Sensor CH_4 tgs2611	1
Resistencias	4

Transistores	2
As32 ttl 100 lora	1
Circuito impreso	2

Fuente: propia

Después de obtener los dispositivos y tener los circuitos impresos diseñados se procede a soldar los componentes obteniendo el prototipo entregable de nodo sensor mostrado en la Figura 20.

Figura 20. Prototipo Nodo Sensor



Fuente: Propia

Teniendo estos resultados se procedió a diseñar una placa PCB en la que se integren todos los dispositivos mencionados anteriormente con el fin de miniaturizar e integrar todo en un diseño único para todo el nodo sensor este se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.9.**

Figura 21. Diseño circuito impreso final nodo transmisor.



Fuente: Propia

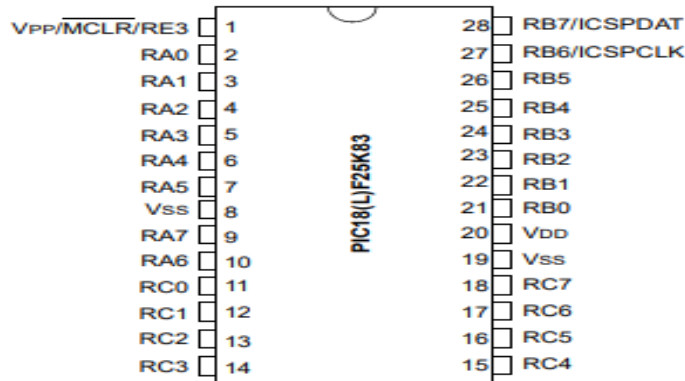
3.2. DISEÑO DEL SOFTWARE

3.2.1 PROGRAMACIÓN DE MICROCONTROLADOR

La recolección de datos requiere de una unidad de procesamiento o CPU que se encarga de tomar la medición presente en el sensor y enviar a la estación base la información para ser mostrada en pantalla o almacenada; para esta labor se seleccionó el microcontrolador PIC18F26K80, con características de uso industrial, bajo consumo de potencia y que posee los periféricos necesarios para la aplicación, dentro de sus características cuenta con:

- Un convertidor análogo a digital (ADC) de 12 bits con varios canales para convertir los valores de tensión de los sensores que miden la concentración de los gases.
- Un transmisor receptor asíncrono universal (USART) para controlar el módulo AS32-TTL-100 con tecnología Lora enviar información.

Figura 22. Microcontroller PIC18F26K80



Fuente: (Microchip)

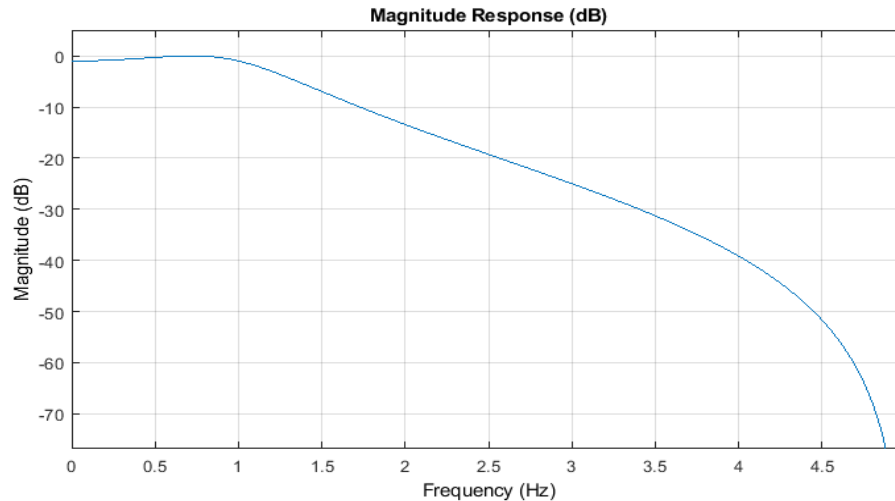
Estos circuitos integrados (IC) se programaron en MPLABX IDE haciendo uso del compilador XC8 para implementar el diagrama de flujo que se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**5 para medir y transmitir por radio frecuencia las concentraciones de los gases. Estas mediciones se adquieren haciendo uso del conversor análogo a digital (A/D) de 12 bits (incluido en el microcontrolador seleccionado) el cual se activa únicamente al momento del muestreo obteniendo la información de la variación de voltaje de los sensores que miden la concentración de los gases metano y monóxido de carbono junto al valor del voltaje de la batería, a cada medición se le aplica un filtro digital de respuesta infinita al impulso (IIR) pasa bajas con las siguientes especificaciones de diseño:

- Frecuencia de corte de $F_c = 1$ Hz.
- Frecuencia de muestreo de $F_s = 10$ Hz.
- Orden 2.
- Atenuación de banda de paso 1 dB

Haciendo uso de la herramienta Design Digital Filter (FDATool) del software MATLAB para diseñar el filtro y obtener los coeficientes e implementarlos en

una ecuación de diferencias que deberá ejecutarse en un algoritmo dentro del microcontrolador. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.3** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.4**, se muestra la respuesta en magnitud y tiempo respectivamente.

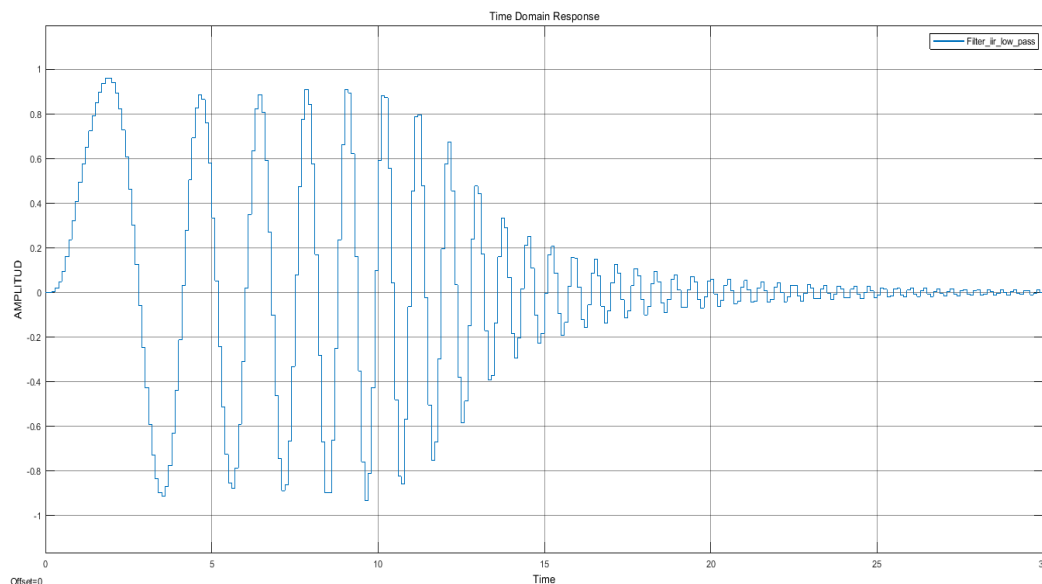
Figura 23. Respuesta en magnitud de filtro IIR diseñado



Fuente: Propia

Cumpliendo con las especificaciones de diseño como son la atenuación en banda de paso de 1dB. De este filtro se exportaron con sus coeficientes a simulink y se evaluó en el dominio del tiempo haciendo un barrido frecuencial de 0.1 a 10 Hz en 20 segundos obteniendo la respuesta envolvente que se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.4** verificando así el funcionamiento; con estos coeficientes se formuló la ecuación de diferencias que describe el filtro y es la que se implementa en el microcontrolador para más información sobre la ecuación véase el **Anexo 1**.

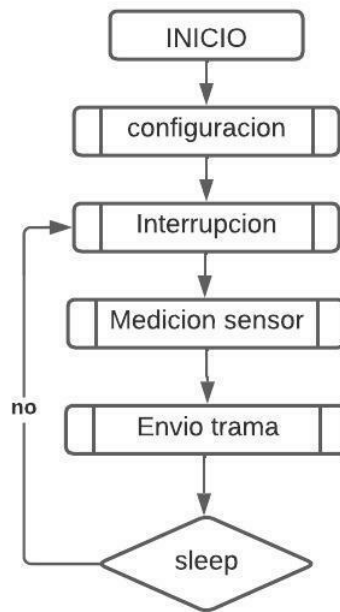
Figura 24. Respuesta en el dominio del tiempo del filtro IIR pasa bajas implementado



Fuente: Propia

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.5** muestra en el diagrama de flujo del PIC18F26K80, en la configuración se realiza la programación de los parámetros de funcionamiento del microcontrolador (frecuencia operación, configuración de bits), los periféricos requeridos para la aplicación, son el conversor análogo a digital con 3 canales, el temporizador TMR0 para la temporización, una usart para la comunicación serial entre el módulo de radiofrecuencia Lora (AS32 TTL-100), posteriormente se tiene el servicio de interrupciones (ISR) en donde se hace la configuración de la aplicación WSN punto a punto, donde cada módulo posee su dirección y canal por donde es contactado por otros módulos y el monitor, se continuo con la medición de las

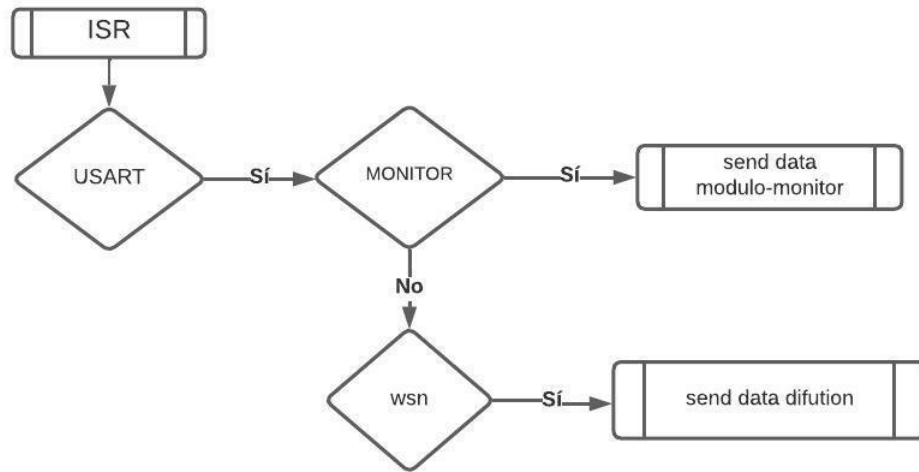
Figura 25. Diagrama de flujo main WSN



Fuente: Propia

variables donde se controla la habilitación del regulador y temporización para la correcta medición de los sensores, después de hacer este ciclo el microcontrolador apaga el regulador de energía de la placa de sensores y entra en modo ahorro de energía (SLEEP) mientras se le solicita un nuevo dato, esto con el fin de incrementar la autonomía del sistema y, solo realizar las mediciones cuando se requieren y con esto poder controlar la frecuencia de muestreo desde la estación base, la cual no puede exceder un Hertz puesto que el tiempo mínimo para leer el sensor de carbono es de 1 segundo.

Figura 26. Diagrama de flujo ISR PIC



Fuente: Propia

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.6¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el diagrama de flujo de la interrupción del microcontrolador, donde se implementa la aplicación WSN, que comienza con una solicitud de información desde la estación base y con esto informar al módulo qué modo va operar, es decir cada que llegue un dato por interrupción de comunicación de radio, el nodo sensor debe verificar que debe hacer con la información recibida, como esta red local trabaja sobre el canal de 433 MHz con un enlace punto a punto y una característica especial del módulo AS32-TTL-100 es hacer radio difusiones de canal (broadcast) en configuración punto a punto, es decir tener la posibilidad de enviar datos para un solo dispositivo como es la estación base o donde todos los nodos en el mismo canal receptan la información sin conocer la dirección de destino y así tener una red en malla punto a punto de bajo consumo energético, ya que cada nodo sensor se encuentra en modo ahorro de energía hasta que se reciba un paquete.

El servicio de interrupción ISR de cada nodo tiene la capacidad de enviar por difusión la información contenida en su memoria y retransmitir la de otros nodos hasta que llegue a la estación base, estos modos son:

- Monitor: El nodo recibe comando monitor de la estación base realiza una medición de los sensores, y envía la información de sus sensores y los que tenga alojados en su memoria únicamente a la dirección del monitor.
- WSN: El nodo sensor recibe comando wsn, efectúa la difusión de la información contenida en su memoria enviando la medición de sus sensores y la recepción de otros nodos por medio de difusión en canal.

Al hacer una solicitud desde la estación base, el nodo sensor o receptor más cercano realiza la difusión de la información de su memoria y su vez avisa a los demás nodos cercanos el modo de operación, al recibir los datos el nodo receptor envía una trama completa de los valores albergados en su memoria de nodos sensores al monitor de esta manera se aumenta el rango de la distancia de transmisión y la estación base, con esto la cobertura de la red, con el fin de verificar los datos que son enviados por la wsn en la siguiente sección se describe la implementación de una interface grafica hecha en Python que controla el funcionamiento o modo de operación de la red, el almacenamiento en un servidor local usando Xamp una distribución gratuita junto con MySQL y con esto darle la escalabilidad a red remota IoT para la manipulación y visualización de la información.

3.2.2 INTERFACE DE USUARIO

Con el fin de almacenar y visualizar en pantalla la información transmitida, se diseñó una interface de usuario en Python donde se controla una base de datos de MySQL donde se guardan los datos, en esta interface el usuario debe seleccionar el puerto serie al que se conectó el receptor, el modo en que se hará la solicitud de la información que puede ser monitor o WSN, además del número de la serie o

dispositivos en línea con el cual se quiere conectar en caso de estar en modo monitor, en el modo WSN caso contrario, no será tomada en cuenta la serie seleccionada y se hará la solicitud de la información, con un tiempo de espera 2*número de nodos en línea para esperar el tiempo necesario para recibir y almacenar en la base de datos del servidor local la lectura de la difusión de los dispositivos conectados donde se guardan los datos en formato de id, fecha e información receptada de cada nodo sensor, estos poseen una serie única en la red de sensado, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.7** se puede observar la interface diseñada, que cuenta con 5 botones que se explican a continuación:

Figura 27 Interface de usuario

The screenshot shows a software interface titled "Interface De Usuario WSN". It is divided into two main sections. The left section, titled "REGISTRO DE DATOS", contains a form for adding new data. The right section displays a table of recorded data.

Form Section (Left):

- Agregar Nuevos Datos:**
 - Selección Puerto:** A dropdown menu with "COM2" selected.
 - Modo red:** A dropdown menu with "wsn" selected.
 - Serie de Nodo:** A text input field containing "1".
 - Número de nodos:** A text input field containing "2".
- Control:**
 - Buttons: REGISTRAR, LIMPIAR, ELIMINAR.
 - A search bar with a button: BUSCAR POR SERIE.
 - A button: MOSTRAR DATOS ALMACENADOS.

Table Section (Right):

	id	fecha	serie	metano(pp)	carbono(p)	bateria(%)
-	57	2022-09-	1	5011.0	238.0	68.0
-	58	2022-09-	1	4060.0	259.0	84.0
-	59	2022-09-	1	4060.0	259.0	84.0
-	60	2022-09-	1	2483.0	522.0	67.0
-	61	2022-09-	1	2483.0	522.0	67.0
-	62	2022-09-	1	1698.0	553.0	82.0
-	63	2022-09-	1	3755.0	259.0	84.0
-	64	2022-09-	1	4370.0	272.0	80.0
-	65	2022-09-	1	70.0	387.0	84.0
-	66	2022-09-	1	461.0	291.0	84.0
-	67	2022-09-	1	439.0	264.0	80.0
-	68	2022-09-	1	456.0	450.0	84.0
-	69	2022-09-	1	570.0	138.0	84.0
-	70	2022-09-	1	422.0	306.0	84.0
-	71	2022-09-	1	34.0	656.0	84.0
-	72	2022-09-	1	8828.0	191.0	84.0
-	73	2022-09-	1	8832.0	215.0	72.0
-	74	2022-09-	1	24.0	9.0	83.0
-	75	2022-09-	1	273.0	20.0	83.0
-	76	2022-09-	1	8828.0	530.0	67.0
-	77	2022-09-	1	9.0	690.0	84.0

Fuente: propia

Botón registrar : realiza la solicitud y recepción de datos por medio del puerto serie seleccionado para el caso en la Figura 27 se muestra el COM2 por donde se está comunicando el pc con el receptor de la estación base.

Botón Limpiar: En la interface tenemos una tabla donde mostramos la información este botón limpia el contenido de esta tabla.

Botón eliminar : Con el fin de eliminar algún elemento seleccionado en la tabla se usa un método para eliminar la selección, por ejemplo, en la Figura 27 se muestra la selección del id 56 en la tabla si se pulsa este botón se elimina toda esta fila de la tabla.

Botón Buscar Serie: este tiene la función de buscar la serie puesta en la barra de buscar, mostrando en la tabla los datos de la serie que se quiere buscar con este botón se filtran los datos por número de serie o nodo sensor.

Botón Mostrar datos almacenado: Realiza la lectura de toda la información contenida en la base de datos y la muestra en la tabla de la interface de usuario.

Esta interface recibe los datos haciendo uso del protocolo Json, un protocolo de comunicación serial en la cual se envían los datos en formato String o cadena como clave-valor con el fin de identificar los datos, la trama completa por sensor transmisor diseñado se muestra **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.8.**

Figura 28. Trama de datos de cada modulo

`\S1:\1\M1:\xxxx\C1:\xxxx\B1:\xxxx\n`

Fuente. Propia

Con este formato de datos junto con la programación de un enlace punto a punto en los módulo AS32-TTL100 de lora, donde cada uno posee una dirección única, se logra tener un enlace confiable, que no contiene colisión de datos ni perdidas de información por transmisiones de datos que no serán procesados, con esto se asegura que el módulo siempre este activo en modo de espera y solo trabaje cuando

sea requerido por la estación base logrando así una aplicación remota de fácil acceso con una alta autonomía.

CAPITULO 4

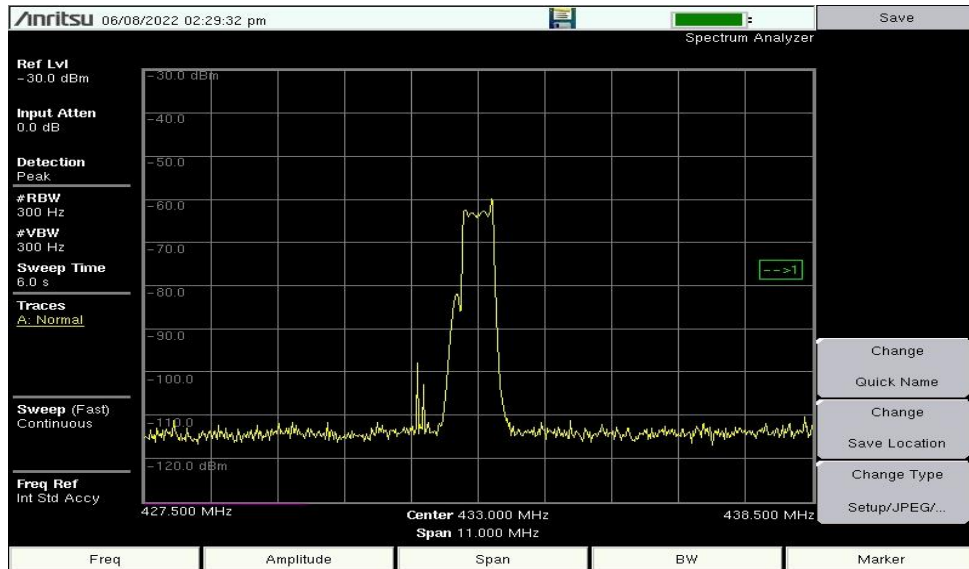
PARAMETRIZACION LA RED WSN

Para dar conectividad y confiabilidad a la red se efectúan pruebas de transmisión de información evaluando mediciones de potencia y numero de paquetes recibidos en el pasillo del tercer piso en el edificio central de la Universidad que tiene un alto de 4 m, un ancho de 3 m y una profundidad máxima de 60 m estas características son usadas para simular el modelo matemático (Alok Ranjan, 2019), y su comparación con el resultado obtenido de las pruebas que se exponen a continuación.

4.1 MEDICION DE PONTENCIA DE SALIDA DE LOS MODULOS

Para esta prueba se utilizó el analizador de espectros presente en el laboratorio de electrónica de la UPTC seccional Tunja para evidenciar la potencia de transmisión comprobando experimentalmente la intensidad en dBm de la señal Los resultados de medición se muestran a continuación:

Figura 29. Potencia de salida nodo sensor



Fuente. Propia

De los resultados obtenidos se comprobó las especificaciones del módulo AS32TTL-100 de LORA, modulo que estaba configurado en una frecuencia de 433 MHz con una máxima potencia de 20 dbm los cuales son verificados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

4.2 ANCHO DE BANDA

El ancho de banda del sistema esta descrito por el número de canales que posee el módulo AS32 TTL 100 que se centra en frecuencia de banda libre y opera en la frecuencia 433 MHz, este módulo posee 31 canales que inician desde 410 MHz a 441 MHz, por consiguiente, el ancho de banda del sistema es de 31 MHz, estos canales son configurables y dependen de las características fisicas y eléctricas que posee cada módulo trasmisor.

4.3 RSSI Y CONECTIVIDAD

La conectividad de la red está dada por la sensibilidad de potencia recibida del hardware implementado a diferentes distancias, midiendo la potencia recibida para

saber si un enlace tiene una conectividad que garantice los fines de la aplicación. Con el fin de establecer la conectividad de los sensores transmisores diseñados se escogió el pasillo del tercer piso del edificio central de la UPTC sede Tunja con el fin de simular un espacio confinado semejante a un túnel, debido a las características físicas que tiene el pasillo asemeja las condiciones necesarias para la prueba en la que se tomó un barrido de canal con el analizador de espectro obteniendo la potencia de recepción en todo el canal junto con el RSSI de la señal medida, variando la distancia entre transmisor y analizador de espectros se tomaron 3 muestras del barrido, en la Figura 30 se puede apreciar que se colocaron a la misma altura de 1.5 m del suelo y se fue extendiendo la distancia entre transmisor y receptor de 5 a 60 metros obteniendo en pantalla del analizador de espectros el valor de dBm de la señal recibida.

Figura 30. Dispositivos de prueba para medición de potencia



Fuente: Propia

La potencia media recibida en cada una de las mediciones se muestra en la Figura 31 se expone los datos promedios de los barridos de canal hechos por el analizador

de espectros donde se muestra la atenuación de la señal con el aumento de la distancia, adicionalmente se realizó la simulación del modelo matemático usando un script en Matlab para obtener la potencia de recepción que se predice con el modelo matemático en esta simulación se tuvo en cuenta los siguientes parámetros propios del pasillo y el trasmisor:

Altura: 4 m

Ancho: 3 m

Profundidad Max: 60 m.

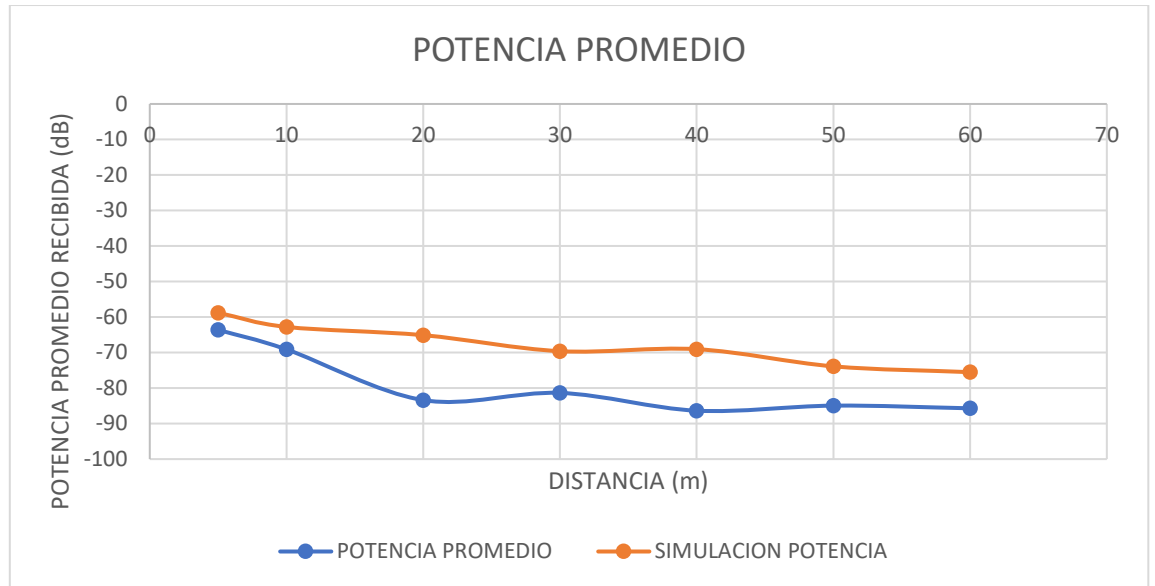
Potencia de transmisión: 20 dBm

Ganancia de transmisor: 2 dBi

Ganancia de receptor: 2 dBi

En la Figura 31 se puede apreciar la superposición de la información obtenida de la simulación y lo medido por el analizador.

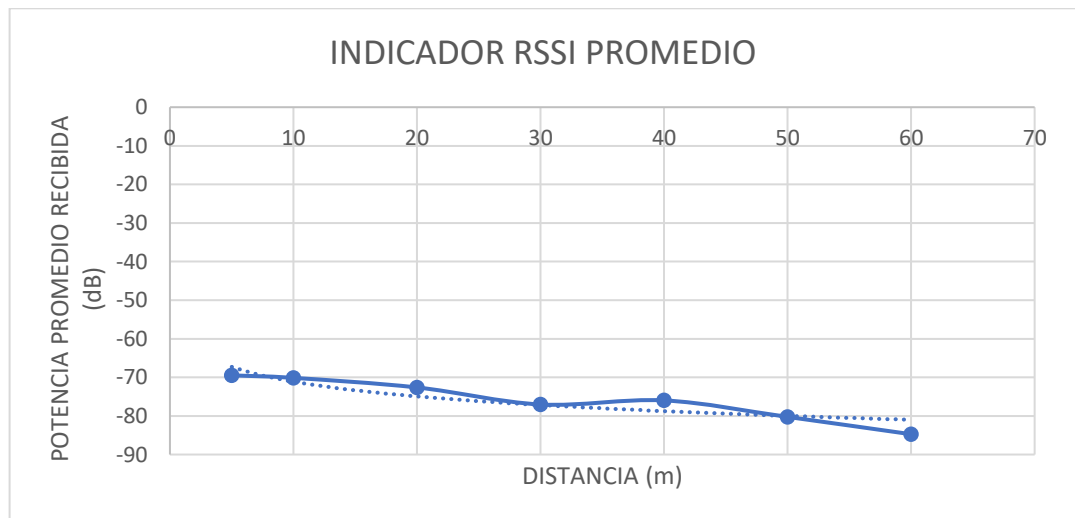
Figura 31. Potencia recibida y simulación de modelo matemático.



Fuente : Propia

El promedio del RSSI de la señal transmitida fue tomado del promedio de las 550 muestras de las 3 veces que se midieron con el analizador para cada distancia el resultado se muestra en la Figura 32.

Figura 32. Indicador RSSI Promedio



Fuente : Propia

Según la literatura la cobertura o capacidad de mantener un enlace está dada por la sensibilidad de la recepción del dispositivo usado para el caso del módulo transmisor de radio frecuencia AS32-TTL100 posee una sensibilidad de recepción de hasta -134 dBm esto nos indica que a las distancias que nosotros tomamos los datos se obtiene una conectividad demostrándolo con la recepción de los paquetes que los nodos, y es aquí donde se establece que el SNR de la señal recibida es de -55 dBm un valor alto deseable en la solución planteada demostrando que la red tiene cobertura en el escenario planteado, a continuación se procede a realizar el estudio de la confiabilidad para definir la distancia máxima a la que el error de transmisión sea aceptable.

4.1.4 CONFIABILIDAD PACKET ERROR RATE (PER)

La confiabilidad de una red está dada por la cantidad de información que puede transmitir y recibir sin errores en los datos, para encontrar el error se transmitieron 50.000 paquetes a las diferentes distancias de 5 a 60 metros para evaluar el error de paquete de la comunicación entre nodos sensores los resultados se consignaron en la Tabla 2.

Tabla 2. (PER) Packet error rate de la red wsn.

DISTANCIA (m)	PAQ error %
5	0.14
35	0.14
45	5.84
60	5.24

Fuente. Propia

En la Tabla 2 Tabla 2. (PER) Packet error rate de la red wsn. se establece el error de transmisión de paquetes en la cual se puede establecer que para distancias superiores a los 40 metros el error es de 5.84% reduciendo la eficiencia de la red, también hay que recalcar que al momento de realizar las mediciones había flujo de

personas en el entorno de igual manera se demuestra que el enlace se establece y se interpreta.

4.1.5 AUTONOMÍA DEL NODO SENSOR

El tiempo que el módulo transmisor puede estar en línea se encontró haciendo el análisis de la autonomía del sistema en modo de espera (sleep) y en uso continuo(run) para definir este tiempo en un intervalo de muestreo de 2 segundos, donde se tomaron las mediciones de corriente promedio en modo de espera de 8 mA y en uso continuo de 250 mA.

$$I_{\text{promedio}} = \frac{8\text{mA} * 1 + 250\text{mA} * 1}{2} = 0.129\text{A} \quad (15)$$

Como las baterías conectadas en serie suman una capacidad de voltaje entregando 8V a 1700 mAh se encuentra el tiempo que esta capacidad puede administrar la energía bajo este intervalo de muestreo.

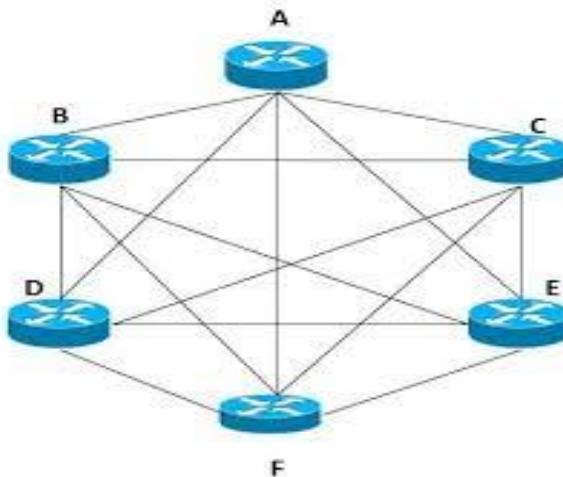
$$t_{\text{operacion}} = \frac{1700\text{mAh}}{0.129\text{A}} = 13,7 \text{ h} \quad (16)$$

Con este intervalo de muestreo el sistema es capaz de transmitir durante un día completo usando las baterías a su capacidad nominal lo que hace que el la vida útil de estas sea menor por lo tanto se recomienda usarlas baterías a un 70% de su capacidad nominal, con esto logramos que la vida útil se alargue, además de asegurar que los módulos tengan suficiente energía y puedan estar en línea disponibles para medir las variables del sistema con estas consideraciones la capacidad de la batería sería de 1Ah obteniendo un tiempo de operación de 9 h horas en uso continuo bajo el mismo intervalo de muestreo, también se analizó la autonomía de esta capacidad en modo de espera para definir el tiempo que el módulo estará activo sin recibir solicitudes antes de apagarse que son 120 h equivalente a 5 días, con el fin de demostrar el funcionamiento de un despliegue se implementan dos nodos con los cuales se hicieron las pruebas en la siguiente sección se expone la topología de despliegue y funcionamiento de la red WSN implementada.

4.2 TOPOLOGÍA Y METODOLOGÍA DE DESPLIEGUE

Las red WSN tiene la característica de tener una conexión de en malla además del direccionamiento de dispositivos conectados en la misma red, en este caso se tiene una red local montada sobre el canal de 433 Mhz, en donde los nodos transmisores y receptores son inalámbricos y se comunican entre sí, como se muestra en la Figura 33, este enlace se logra mediante la difusión de canal, con el fin de aumentar la cobertura se establece por código que la recepción de información de otros nodos sea retransmitida inmediatamente hasta llegar a la estación base.

Figura 33. Red en malla.

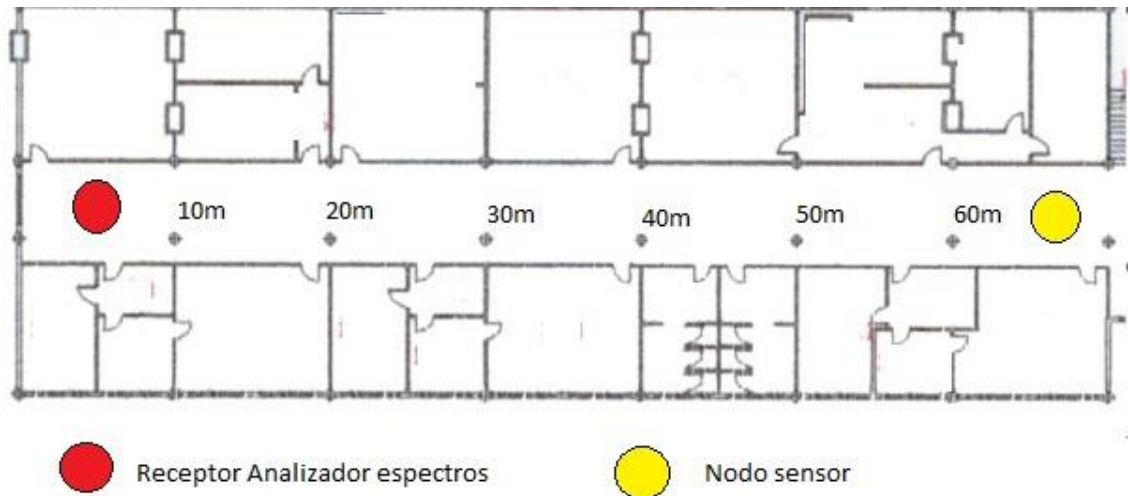


Fuente(Cisco,Packetracer)

Este enlace se logra al tener una difusión de canal donde todos están conectados al mismo canal con una única dirección local asignada al módulo al momento de

programarlo, el plano de despliegue para la medición y verificación del modelo matemático esta descrito en la Figura 34.

Figura 34.Plano despliegue nodo.



CAPITULO 5

DISCUSIÓN Y APORTES

Para el diseño del firmware de la tarjeta de procesamiento se implementó un código en C usando el compilador XC8 del software MPLABX IDE además del Programador de Microchip Pickit3, a estas se les conectan los transmisores de radio frecuencia Lora con una previa asignación de una dirección y canal (**Ver Anexo2**), cada transmisor Lora puede trabajar en modo punto a punto y al mismo tiempo broadcast por esta razón es necesario especificarle en qué modo será la conexión, para ser más explícitos y ejemplificando, si se tiene dos nodos sensores activos, cada uno denotado como S1 y S2 respectivamente y la estación base desea conectarse con el nodo S2 en modo monitor, para realizar esto se debe seleccionar en la interfaz de usuario el modo monitor y establecer la serie 2, al presionar el botón registrar, la interfaz le asigna la dirección a la serie y efectúa la solicitud de la información enviando la dirección y canal seguido del comando monitor se espera un tiempo de 2 segundos, por cada medición, si la conexión es exitosa se obtiene en pantalla en la tabla de la Figura 27, agregándose los datos a la base exitosamente, sin embargo,

en el modo WSN o broadcast y la conexión con todos los módulos en el canal es exitosa y todos los nodos reciben el comando WSN y empezarán a difundir la información por el canal estos reciben información por el más cercano y es retransmitida hasta que se obtengan al menos una muestra por cada serie, es decir con la serie identificamos de que nodo son los datos y con el número de nodos activos sabemos cuántas series debemos recibir para que la muestra sea correcta, esta propuesta posee como ventaja la optimización de código, memoria y energía, esto último porque el nodo sensor siempre está en modo ahorro de energía hasta que se realiza la solicitud ejecuta la acción y vuelve al reposo quedando en estado disponible para recibir y enviar información.

Cada nodo sensor desplegado posee la capacidad de enlazarse con otros módulos y retransmitir la información de los demás a la estación base, así se aumenta la cobertura de la red, como recomendación para una correcta lectura de los sensores, el tiempo del periodo de muestreo se debe definir de acuerdo a los tiempos de propagación y el despliegue de nodos transmisores, esto para garantizar la recepción de información en la estación base, a continuación se presenta un caso que permite entender lo mencionado:

Si se despliegan dos nodos transmisores S1 y S2 a una distancia de 60 m y estos a su vez una distancia de 60 m de la estación base se debe tener en cuenta que:

- El tiempo mínimo de muestreo se establece en 1 segundo debido a que el sensor de monóxido de carbónico CO necesita un ciclo de precalentamiento y corresponde a ese tiempo.
- El número de módulos en la línea de red.
- El tiempo de retardo que tiene la propagación de la información entre módulos.

El incremento de número de nodos hace que se aumente el tiempo de retardo para la toma de mediciones, con el fin de considerar el dimensionamiento de la red, para

ajustar el tiempo de retardo se debe seleccionar en la interfaz gráfica el número de nodos en línea, esto con el fin de que el aplicativo final tenga la fluidez esperada y evitar problemas de sincronización por el tiempo de espera de los datos. Estos datos son recibidos por un transmisor-receptor Lora que se conecta mediante un convertidor RS-232 a USB, este permite la conexión a un computador y asigna un puerto COM serial que se lee por la interfaz gráfica diseñada.

En resumen, la red comienza a funcionar con una solicitud de información que se envía a los módulos desde la estación base, los módulos se comunican entre ellos y retornan la información que es verificada y almacenada en una base de datos, de esta manera se realizan las pruebas de funcionamiento experimental que permite visualizar en pantalla las concentraciones de gas medida por los sensores, esto haciendo uso de la interfaz gráfica.

Para la parametrización de la red se estableció el despliegue punto a punto entre el un nodo sensor y el analizador de espectros mostrado en la Figura 34. Plano despliegue nodo., se transmitieron paquetes para establecer la medición de potencia recibida, para validar el modelo matemático que nos establece dicha medición y validar el funcionamiento en contraste con los resultados experimentales obtenidos, evidenciando que el enlace se puede lograr a una distancia de 60 metros de acuerdo a la sensibilidad de los módulos Lora, además la medición del RSSI de la señal recibida en todas las distancias se encuentra por encima del valor de la sensibilidad, en la Figura 32 se muestra el valor medio obtenido, con esto se demuestra que la cobertura en un entorno confinado y hostil como el pasillo de la sede central de la UPTC se establece, sin embargo, con las mediciones de error de paquete se obtuvo resultados que arrojan un error superior al 5% para distancias superiores a 40 metros, esta medición se pudo ver haber afectado porque al momento de hacer las mediciones se encontraban presente personas.

CONCLUSIÓN

En este proyecto de grado, se diseñó y desplegó una red de sensores (WSN) en topología malla basada en IoT para monitorear atmósferas explosivas en un entorno confinado como lo es el pasillo del tercer piso del edificio central de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia sede Tunja que emula condiciones de entorno confinado, se obtuvo un piloto de red que integro módulos de sensado, comunicaciones y administración de energía en circuitos impresos PCB. Se validó experimentalmente su funcionamiento, las mediciones de potencia eléctrica en cada módulo mostraron que en funcionamiento se requieren de 600 mW con un tiempo de uso de 9 horas, para incrementar la autonomía de los módulos se configuraron componentes y se incluyó un regulador con habilitación para energizar los sensores únicamente cuando se requiera la medición, con esto se logra tener una autonomía de 125 horas en espera y un máximo de 10 horas en modo monitor para un intervalo de muestreo de 2 segundos usando el 70% de la capacidad nominal de la batería. Además, se obtuvo la distancia máxima a la que se pueden enlazar los dispositivos con un error en la PER menor al 2%, esta distancia corresponde a 40 metros, por otro lado, se demostró la exactitud del aproximado teórico que se logra evaluando el modelo matemático teniendo un error máximo del 16% en las mediciones tomadas.

REFERENCIAS

- Agencia nacional de minas. (2013). *Carbon*. Obtenido de <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/carbon.pdf>
- Ali Moridi, M., Sharifzhadeh, M., Kawamura, Y., & Doo Jang, H. (2017). Development of wireless sensor networks for underground communication and monitoring systems (the cases of underground mine environments). *Science Direct*, 12. Obtenido de <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0886779817306776?token=A4DD7F943F2A0F292B9A24F238D9FA1E3FF45639A19D7D886D76F7B2A24CDC418D0A4A2AD83BEE3B3335C10A29C87B74&originRegion=us-east-1&originCreation=20210727162647>
- Alok Ranjan, H. S. (2019). Modeling and measurements for wireless communication networks in underground mine environments. *science direct*.
- ashinging. (s.f.). *AS32-TTL 100 DATASHEET*.
- Cáceres Rodríguez, W., Agudelo Cely, O. I., & Tejedor Estupiñán³, R. A. (2017). Las exportaciones y el crecimiento. *CENES*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/cenes/v37n65/0120-3053-cenes-37-65-175.pdf>

- Consejo, P. E. (2010). *Directiva de Prevención y Control Integrado de la Contaminación*. Obtenido de <https://www.ippc.int/es/publications/367/>
- Diana, A. (2013). Estado del arte de sensores inalámbricos.
- Emigdio Malaver, J. R. (2010). A New Propagation Model for WLAN Operating at 2.4 GHz, in Indoor Environments. *TELEMATIQUE*, 23.
- Energia, M. d. (2020). *Análisis Del Comportamiento Del Pib Minero Primer Trimestre De 2019*. Obtenido de [Https://Www.Minenergia.Gov.Co/Analisis-Minero](https://www.minenergia.gov.co/Analisis-Minero)
- fuentes, j. j. (2012). *Fundamentos de radiación y radiocomunicación*. sevilla: universidad de sevilla.
- Gaona, M. T. (2016). Algoritmo de encaminamiento con reconfiguración de topología para red de sensores inalámbricos aplicada a una Microrred en modo "Isla".
- HUAWEI. (15 de 03 de 2019). *Descripción de RSSI y SNR para equipos WLAN de Huawei*. Obtenido de <https://forum.huawei.com/enterprise/es/descripci%C3%B3n-de-rssi-y-snr-para-equipos-wlan-de-huawei/thread/510787-100239>
- IBM. (08 de 03 de 2021). *IBM* . Obtenido de DOCUMENTATION: <https://www.ibm.com/docs/es/i/7.1?topic=methods-routing-point-point-connections>
- Leib, A. (2010). detectores de gases .
- LEY2250. (2022). LEY 2250.
- Mejia Humana, L. J., & Pulido Gonzalez, O. (1993). Regiones y Zonas con Carbon en Colombia. *Universidad Nacional* .
- Mendoza, F. B. (2020). Red de sensores inalámbricos multisalto para sistemas domóticos de bajo costo y área extendida.
- Microchip. (s.f.). *PIC18FXX80 DATASHEET*.
- MINAS, A. N. (22 de 09 de 2015). *DECRETO 1886*. Obtenido de AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA: <https://www.anm.gov.co/?q=content/decreto-1886-de-2015minminas>

- MINERIA, A. N. (2020). *Emergencias Mineras*. Obtenido de http://www.anm.gov.co/?q=emergencias_mineras%20
- Munca, J. D. (2016). dispositivo lora de comunicacion a largo alcance y bajo consumo energetico para aplicaciones del ambito del desarrollo. 25.
- Observatorio colombiano de ciencia y tecnología. (2012). *La ciencia, la tecnología y la innovación al servicio del desarrollo regional*. Obtenido de <https://ocyt.org.co/wp-content/uploads/2017/07/pedcti-boyaca.pdf>
- P. P. (2019). Red de Sensores Inalambricos para la Adquisición de Datos en Casas de Cultivo, .
- Peng, R., & Qian, J. (2016). A Power-Efficient Clustering Protocol for Coal Mine Face Monitoring with Wireless Sensor Networks Under Channel Fading Conditions. *MDPI*.
- Pérez, C. U. (2014). Metodología para una red de sensores inalámbricos,.
- Qiuping, W., Shunbinga, Z., & Chunquana. (2011). Study on key technologies of Internet of Things perceiving. *SciVerse ScienceDirect*, 8. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811052854?via%3Dihub>
- Quimbita, M. A. (2018). evaluacion de pasarela LoRa/LoRaWAN en entornos urbanos. 8.
- Raad, H. (2021). *Fundamentals of IoT and Wearable Technology Design, First Edition*. IEEE.
- Rappaport, T. S. (2004). *wirerless communication principles and practice*.
- Reda Senouci, M., Yazid Boudaren, M. E., Abdelkrim Senouci, M., & Mellouk, A. (2014). A smart methodology for deterministic deployment of wireless sensor networks,. *IEEE*.
- T.Instruments. (s.f.). *Flash Microcontroller Programing Specification*.
- Velasco, N. (2015). sistema embebido para la conexion de un PLC siemens s7-200 a la red gsm.
- Wiley. (2021). Product Development and Design Considerations. *IEEE*, 25.

Winterfell, H. (2009). Introduccion a los sistemas de deteccion de gases . *Draguer, tecnologia para la vida* .

Zhao, H., & Yang, W. (2018). An emergency rescue communication system and environmental monitoring subsystem for underground coal mine based on wireless mesh network. *international journals of distributed sensor networks*, 20. Obtenido de <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1550147718805935>

Anexo 1. Ecuación de diferencias del filtro IIR

Coeficientes extraídos de Matlab:

$$num = 0.0704 \quad 0.1408 \quad 0.0704$$

$$den = 1.0000 \quad -1.1997 \quad 0.5157$$

$$\frac{y_{(z)}}{x_{(z)}} = \frac{0.0704 Z^0 + 0.1408 Z^{-1} + 0.0704 Z^{-2}}{1.0000 Z^0 - 1.1997 Z^{-1} + 0.5157 Z^{-2}}$$

$$y_{(z)} = 0.0704 x + 0.1408 Z^{-1}x + 0.0704 Z^{-2}x + 1.1997 Z^{-1}y - 0.5157 Z^{-2}y$$

Se aplica trasformada de Z^{-1} y se obtiene la ecuación de diferencias.

$$y_{(n)} = 0.0704 x(n) + 0.1408 x(n - 1) + 0.0704 x(n - 2) + 1.1997 y(n - 1) - 0.5157 y(n - 2)$$

Esta es la ecuación que se implementa en el microcontrolador.

Anexo 2. Programación de transmisor de radio frecuencia Lora.

Lo primero es establecer una conexión con el módulo de radio frecuencia para esto se debe conectar en nivel TTL alto o a 5 voltios las entradas M0 y M1 que es el modo de programación, al conectarlo al pc mediante un convertidor RS-232 a USB se asignara un puerto COM accedemos con una herramienta de escritorio abrimos el puerto y enviamos el comando que debe tener el siguiente formato:

COMANDO + ADDH + AHHL + SPEED + CHAN + OPTION

Cada da registro es de 8 bits y está en hexadecimal para programar el módulo transmisor y que este retenga la información aun cuando hallamos quitado la energía se debe enviar el comando C0 con esto el módulo sabe que se debe retener la información la dirección se configura con los dos registros ADDH Y ADD donde podemos tener 2^16 dispositivos conectados en un solo canal, el registro SPEED configura la comunicación RS232, el registro canal contiene el número del canal en

el caso por defecto es el 17 y es el de 433 Mhz, en el registro OPTION escogemos el modo de operación del si es punto a punto o broadcast, en el caso de la red montada sobre este canal se obtiene la siguiente trama que es enviada:

$$0xC0 + 0x00 + 0xXX + 0x1A + 0x17 + C0$$

Donde xx corresponde a la dirección que se le asigna al transmisor, al enviar este comando el transmisor Lora responde con una cadena OK y con esto se tiene el módulo completamente programado.