


	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2

Neiva, 09 de diciembre de 2016

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

William Henry Cañón Miranda, con C.C. No. 1075242655,

José Luíís Rodríguez Vanegas, con C.C. No. 1081182672,





autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE VARIABLES DE SUPERFICIE DE POZO UTILIZANDO TECNOLOGÍA ZIGBEE presentado y aprobado en el año 2016 como requisito para optar al título de INGENIERO ELECTRÓNICO;

autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.

- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.

- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.





	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Firma: William Henry Cañón

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: [Handwritten Signature]

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 3

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de variables de superficie de pozo utilizando tecnología Zigbee

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Cañón Miranda	William Henry
José Luís	Rodríguez Vanegas

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Pérez Camacho	Carlos Alberto





ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Soto Otálora	Agustín
Molina Mosquera	Johan Julián

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Electrónico

FACULTAD: de ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Electrónica

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						  
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3

CIUDAD: Neiva **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2016 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 93

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas X Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general___
 Grabados___ Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos X
 Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas o Cuadros___

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Ninguno

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>inglés</u>	<u>español</u>	<u>inglés</u>
1. <u>Red de sensores</u>	<u>Network sensors</u>	6. <u>Python</u>	<u>Python</u>
2. <u>IS</u>	<u>IS</u>		
3. <u>Xbee</u>	<u>Xbee</u>		
4. <u>Zigbee</u>	<u>Zigbee</u>		
5. <u>Microcontrolador</u>	<u>Microcontroller</u>		

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Este trabajo presenta el diseño de un prototipo inalámbrico para el monitoreo de variables de superficie de pozo para operación de perforación utilizando tecnología ZIGBEE; al tiempo que integra diferentes áreas de la electrónica. Para un mejor desempeño, el prototipo diseñado busca acercarse a los estándares IS (INTRINSIC SAFETY). La red de sensores fue diseñada con el módulo XBEE S2, ya que cuenta con un microcontrolador interno capaz de procesar los datos provenientes directamente de los sensores para luego ser transmitidos de manera remota. El software utilizado para la validación y pruebas de los datos recibidos se basa en un



GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 3
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

lenguaje de programación de código abierto denominado Python. La validación del sistema se hace bajo pruebas de laboratorio, considerando los diferentes factores presentes en la industria.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This paper presents the design of a wireless prototype for the monitoring of surface pit variables in well drilling operation, using ZigBee technology; while it is integrating different areas of electronics. For best performance, the designed prototype seeks to approach the IS (INTRINSIC SAFETY) standards. The sensors network was designed with the XBEE S2 module, since it has an internal microcontroller capable of data processing coming directly from the sensors and then be transmitted remotely. The used software for validation and testing of received data is based on an open-source programming language called Python. System validation is done under laboratory tests, considering the different factors in the industry, such as noise and interference for the propagation of the signal transmitted through the network.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: Agustín Soto Otálora

Firma:

Nombre Jurado: Johan Julián Molina Mosquera

Firma:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE
VARIABLES DE SUPERFICIE DE POZO UTILIZANDO TECNOLOGÍA ZIGBEE

WILLIAM HENRY CAÑÓN MIRANDA
JOSÉ LUÍS RODRÍGUEZ VANEGAS

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA
2016

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE
VARIABLES DE SUPERFICIE DE POZO UTILIZANDO TECNOLOGÍA ZIGBEE

WILLIAM HENRY CAÑÓN MIRANDA
JOSÉ LUÍS RODRÍGUEZ VANEGAS

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:
INGENIERO ELECTRÓNICO

Director CARLOS ALBERTO PÉREZ CAMACHO
Docente Programa de Ingeniería Electrónica

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

NEIVA

2016

Nota de aceptación:

Firma del Director del Proyecto

Firma del Primer Jurado

Firma del Segundo Jurado

Neiva, Noviembre de 2016

A Dios, por la oportunidad, la fortaleza, el respaldo
y la sabiduría para lograr alcanzar tan importante
logro, a mi familia por ese apoyo, y esperanza
puesta en mí, muchas gracias.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Surcolombiana por su labor educativa brindada durante el transcurso del pregrado

Al ingeniero Carlos Alberto Pérez Camacho, nuestro director de proyecto por su constante apoyo y acertada dirección.

A todo el cuerpo docente, al cuerpo administrativo del programa de ingeniería electrónica por brindarnos su acompañamiento en el transcurso de estos años.

Finalmente, a nuestros amigos y compañeros de estudio que nos respaldaron incondicionalmente en toda esta etapa haciéndola más agradable.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. GENERALIDADES	17
2.1 MUD LOGGING	17
2.2 ESTÁNDARES Y REGULACIONES PARA AMBIENTES PELIGROSOS.	18
2.2.1 DSEAR (The Dangerous Substances and Explosive Atmospheres Regulations)	18
2.2.2 ATEX (Atmosferas Explosivas)	19
2.2.3 Seguridad Intrínseca (IS)	21
2.4 PROTOCOLO HART	24
2.5 COMUNICACIONES INALÁMBRICAS INDUSTRIALES	26
2.6 Redes inalámbricas de sensores (WSN)	26
2.7 TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS INDUSTRIALES	28
2.7.1 Tecnología Wireless-Hart (estándar)	28
2.7.2 Tecnología ISA 100.11a (estándar)	28
2.7.3 Tecnología ZigBee (estándar)	29
2.7.3.1 Tipos de dispositivos ZigBee	31
2.7.3.2 Topologías de red ZigBee	32
2.8 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4	34
2.8.1 Canales que usa el estándar IEEE 802.15.4	35
2.8.2 Tipos de dispositivos IEEE 802.15.4	36
2.8.3 Modelo de transferencia de datos	37
2.8.4 Transferencia de datos hacia un coordinador	37
2.8.5 Transferencia de datos de un coordinador	38
2.8.6 Transferencia de datos entre dispositivos semejantes	39
2.8.7 Transmisión en radio frecuencia RF	40
2.9 Aplicaciones ZigBee y el estándar IEEE 802.15.4.	41
2.10 ¿POR QUÉ ZIGBEE?	42

Cuadro 6. Diferencias entre ZigBee, Bluetooth y Wi-Fi	43
3. DESARROLLO METODOLÓGICO	44
3.1 Descripción general del sistema	44
3.2 Recursos de Hardware	45
3.2.1 Módulos Xbee Tx y Rx	45
3.2.1.1 Características y diferencias entre las series Xbee	46
3.2.1.2 Módulos Xbee S2	46
3.2.1.3 Funcionalidades de los Módulos Xbee S2	50
3.2.2 Entrada analógica de corriente 4-20 mA	51
3.2.3 Entrada analógica en niveles de tensión 0-5V	53
3.2.4 Circuitos de Alimentación	54
3.2.5 Sensores	56
3.2.5.1 Características de los sensores	56
3.2.6 Diseño de la red Mesh	60
3.2.6.1 Configuración de los Módulos Xbee S2	60
3.2.6.2 Identificación de las funcionalidades de la red	63
Figura 35. Niveles de potencia de la señal transmitida	64
3.2.7 Protección del prototipo	64
3.2.8 identificación de la trama de datos	65
4. RESULTADOS	67
4.1 Interfaz gráfica	67
4.2. Monitoreo del proceso	69
4.3. Base de Datos Virtual	71
Figura 43. Base de datos virtual	72
4.4. Estructura física del prototipo.	75
4.5 Prueba de conexión del sistema	76
5. CONCLUSIONES	78
6. RECOMENDACIONES	79
BIBLIOGRAFÍA	80
ANEXOS	83

LISTA DE CUADROS

	pág
Cuadro 1. clasificación de zonas peligrosas, estándares europeos y EE.UU	22
Cuadro 2. Estándares y métodos de protección	23
Cuadro 3. Niveles de protección IS	24
Cuadro 4. Bandas de frecuencia en ZigBee	30
Cuadro 5. Frecuencias utilizadas para los canales IEEE 802.15.4	36
Cuadro 6. Diferencias entre ZigBee, Bluetooth y Wi-Fi	43
Cuadro 7. Comparación entre las series Xbee	46
Cuadro 8. Especificaciones generales de los Xbee S2	47
Cuadro 9. Pines del módulo Xbee S2	49
Cuadro 10. Características eléctricas (DC) de los módulos Xbee S2	49

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Circuito intrínsecamente seguro	24
Figura 2. Señal tipo HART, FSK	25
Figura 3. Conexión básica tipo Hart	26
Figura 4. Esquema de un dispositivo autónomo en una red WSN	27
Figura 6. Topología en estrella para una red ZigBee	32
Figura 7. Topología en árbol para una red ZigBee	33
Figura 8. Topología en malla para una red ZigBee	34
Figura 9. Arquitectura del estándar IEEE 802.15.4 y ZigBee	35
Figura 10. Canales usados en el estándar IEEE 802.15.4	36
Figura 11. Comunicación hacia un coordinador, red con beacons	38
Figura 12. Comunicación hacia un coordinador, red sin beacons	38
Figura 13. Comunicación de un coordinador en una red beacons	39
Figura 14. Comunicación de un coordinador en una red si beacons	39
Figura 15. Técnica del espectro disperso	40
Figura 16. Aplicaciones de la tecnología ZigBee	41
Figura 17. Aplicaciones basadas en el estándar IEEE 802.15.4	42
Figura 18. Flujo del proceso de adquisición y transmisión de datos	44
Figura 19. Diagrama en bloques del prototipo	45
Figura 20. Diagrama esquemático del módulo Xbee S2	48
Figura 21. Hardware Xbee S2	50
Figura 22. Circuito inversor	52
Figura 22. Circuito inversor	53
Figura 23. Circuito adaptador 0-5v	54

Figura 24. Circuito del prototipo	55
Figura 25. Circuito para el sensor de nivel	56
Figura 26. Circuito para el sensor de gas	57
Figura 27. Circuito para el sensor de presión	58
Figura 28. Circuito para el sensor de RPM	59
Figura 29. Red Mesh	60
Figura 30. Xbee Como coordinador	61
Figura 31. Identificación Del Nodo	61
Figura 32. Xbee, Router, PAN ID	62
Figura 33. Identificación Del Nodo Sensor	63
Figura 34. Identificación Del Canal ADC	63
Figura 35. Niveles de potencia de la señal transmitida	64
Figura 36. Protección del prototipo	64
Figura 37. Ventana de inicio de la interfaz	67
Figura 38. Información de la interfaz	67
Figura 39. Vista principal de la interfaz gráfica	68
Figura 40. Barra de herramientas	69
Figura 41. Prueba 1: Emulación del proceso de perforación	70
Figura 42. Prueba 2: emulación del proceso de perforación	71
Figura 43. Base de datos virtual	72
Figura 44. Variable 1. Gas	73
Figura 45. Variable 2. Golpes de la bomba	73
Figura 46. Variable 3 Nivel de las piscinas	74
Figura 47. Variable 4, peso de la sarta de perforación	74
Figura 48. Variable 5, Profundidad de la broca	75
Figura 49. Hardware del prototipo	75

Figura 50. Nivel de conexión entre el sensor 1 y el coordinador de la red	76
Figura 51. Nivel de conexión entre el sensor 2 y el coordinador de la red	77
Figura 52. Nivel de conexión entre el sensor 3 y el coordinador de la red	77

LISTA DE ANEXOS

	pág
ANEXO A. Algoritmo del sistema	84
ANEXO B. Circuito del prototipo	91
ANEXO C. Comandos para el ingreso a la base de datos	92
ANEXO D. Plugins utilizados en Python	93

GLOSARIO

MUD LOGGING: es un registro continuo realizado desde cabinas especializadas para la recolección de datos durante la perforación de pozos petroleros, para así llevar un control litológico y operacional.

PROTOCOLO HART: es un protocolo que define una comunicación bidireccional en lazos de control industrial; o también llamados lazos de corriente 4-20mA.

PYTHON: es un lenguaje de programación abierto y de alto nivel; con característica multiparadigma, es decir orientada a objetos, programación interpretativa y funcional.

RED MESH: es un tipo de red inalámbrica multirayecto, puede utilizar el estándar ZigBee, cumple con los requisitos para la cual se diseña en cuanto coste y operación.

SENSOR: es un dispositivo transductor, capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación y convertirlas en variables eléctricas.

XBEE: es un pequeño dispositivo que opera bajo el estándar Zigbee y es capaz de realizar enlaces inalámbricos a través del medio, haciendo interconexión unos con otros. Desarrollado por Digi

XCTU: es un software diseñado por Digi para la programación y configuración de los módulos Xbee.

ZIGBEE: es una alianza y a la vez un estándar que define la creación de redes inalámbricas tipo MESH; es decir un conjunto de protocolos de alto nivel para la radiodifusión digital de bajo consumo y basada en el estándar IEEE 802.15.4.

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño de un prototipo inalámbrico para el monitoreo de variables de superficie de pozo para operación de perforación utilizando tecnología ZIGBEE; al tiempo que integra diferentes áreas de la electrónica. Para un mejor desempeño, el prototipo diseñado busca acercarse a los estándares IS (INTRINSIC SAFETY). La red de sensores fue diseñada con el módulo XBEE S2, ya que cuenta con un microcontrolador interno capaz de procesar los datos provenientes directamente de los sensores para luego ser transmitidos de manera remota. El software utilizado para la validación y pruebas de los datos recibidos se basa en un lenguaje de programación de código abierto denominado Python. La validación del sistema se hace bajo pruebas de laboratorio, considerando los diferentes factores presentes en la industria.

PALABRAS CLAVE: *Red de sensores, IS, Xbee, ZigBee, Microcontrolador, Open Source, Python.*

ABSTRACT

This paper presents the design of a wireless prototype for the monitoring of surface pit variables in well drilling operation, using ZigBee technology; while it is integrating different areas of electronics. For best performance, the designed prototype seeks to approach the IS (INTRINSIC SAFETY) standards. The sensors network was designed with the XBEE S2 module, since it has an internal microcontroller capable of data processing coming directly from the sensors and then be transmitted remotely. The used software for validation and testing of received data is based on an open-source programming language called Python. System validation is done under laboratory tests, considering the different factors in the industry, such as noise and interference for the propagation of the signal transmitted through the network..

KEYWORDS: *Network sensors, IS, Xbee, ZigBee, Microcontroller, Open Source, Python*

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la evolución de las comunicaciones inalámbricas lleva consigo una evolución trascendental en sus diferentes campos de aplicación, un ejemplo de esto son las WFN (Wireless Field Network) las cuales bajo ciertos protocolos o tecnologías (ZIGBEE, WIRELESS-HART, ISA.100 etc.;) logran que las comunicaciones inalámbricas industriales sean una solución confiable a la hora de monitorear variables de proceso¹.

Las WSN (Wireless Sensor Network) son redes interconectadas con un gran número de dispositivos distribuidos espacialmente², que utilizan sensores con el fin de controlar diversos procesos realizados en puntos distantes en un área determinada, estas redes pueden ser del tipo (WLAN y WPAN) redes de área local y personal respectivamente. A medida que se va acrecentando su uso en la industria, estas redes no solo permiten a los usuarios acceder a información al instante, si no que facilita la posibilidad de llegar a lugares de difícil acceso para ser monitoreados; a la vez que son soluciones económicas y fiables.

Por lo anterior, la realización de este proyecto busca crear una alternativa económica, viable, confiable y que en lo posible cumpla con los estándares IS (Intrínsecamente seguros) para el monitoreo de algunas variables presentes durante la perforación de pozos petroleros (golpes de la bomba, gas, peso de la sarta, profundidad de la broca y volumen de los tanques); esto debido a que en muchos de los procesos, la información proveniente del sensor es llevada hasta su unidad de monitoreo por medio de cables, que al pasar del tiempo y debido a su constante exposición a condiciones ambientales hostiles (lluvia, movimientos de la maquinaria utilizada, sol, etc.) hace que las señales se pierdan o lleguen a dicha unidad con valores erróneos; esto lleva a generar; costos elevados y un análisis poco confiable de las parámetros en cuestión. A su vez este proyecto integra varias ramas de la ingeniería electrónica logrando así poner en práctica los conocimientos adquiridos durante el proceso de formación como ingenieros, de igual forma la versatilidad del prototipo y más aún la accesibilidad al mismo, hacen de esta apuesta una oportunidad para incursionar en un futuro en la creación de empresa.

¹ Velasco, G. J., 2013. Evaluación y Selección de Alternativas de Comunicación de Transmisión Inalámbrica Para Los Campos de Producción Petrolera en Ecopetrol, Universidad Javeriana.115p

² Aakvaag, N., Frey J.E.,2008. Redes de Sensores Inalámbricos, Nuevas soluciones de Interconexión Para la Automatización Industrial. Revista ABB, Vol. 2, pp.1-4.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un prototipo de una unidad de monitoreo de superficie de pozo utilizando tecnología ZigBee.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Implementar la instrumentación para adquirir y monitorear las variables: volumen de las piscinas, profundidad de la broca, golpe de la bomba, medición de gas y peso de la sarta.

Desarrollar un prototipo que en lo posible cumpla con los estándares IS (Intrinsic Safety)

Implementar los esquemas de protección necesarios para prevenir daños que pueda generar el ambiente externo al sistema de comunicación

Realizar la validación del funcionamiento del dispositivo

Desarrollar una herramienta de software básica para el monitoreo de la información adquirida

2. GENERALIDADES

2.1 MUD LOGGING. Mud Logging ,en su aplicación convencional, implica el monitoreo, registro y evaluación de información que llega a la superficie durante la perforación de pozos, con la exclusión de los datos de los sensores de fondo de pozo³.

A la hora de realizar la perforación de un pozo petrolero; se debe tener en consideración una serie de variables de suma importancia, las cuales por motivos de seguridad y rendimiento, son constantemente monitoreadas⁴.

En la perforación de pozos las variables más importantes de monitoreo son:

- Nivel de las piscinas
- Densidad del lodo
- Temperatura del lodo
- PH del lodo
- Conductividad del lodo
- H₂S (Ácido Sulfhídrico)
- RPM de la sarta
- Velocidad de golpe de la bomba
- Profundidad de la corona
- El peso de la sarta de perforación
- Toque

Los sensores utilizados en los procesos de perforación, se dividen en dos conjuntos; digitales y analógicos.

Sensores digitales

- Sensor de la profundidad de la corona
- Sensor de la profundidad del malacate (DDS)
- Sensores de proximidad

Sensores analógicos

³ DATALOG (Manual de Entrenamiento En Campo) versión 4.4; 2001

⁴ DATALOG (Manual de Entrenamiento En Campo) versión 4.4; 2001

- Sensor ultrasónico para nivel de tanque
- Sensor de nivel (flotante) para nivel de tanque
- Sensor de densidad de lodo
- Sensor de temperatura del lodo
- Sensor de PH del lodo
- Sensor de conductividad del lodo
- Sensor de presión de bomba (tubería vertical)
- Sensor de carga del gancho
- Sensor de torque hidráulico
- Sensor para flujo del lodo
- Sensor de H₂S en el ambiente

2.2 ESTÁNDARES Y REGULACIONES PARA AMBIENTES PELIGROSOS.

Todos los métodos utilizados al momento de realizar un procedimiento industrial, en este caso el monitoreo de variables de superficie de pozo, están regulados por estándares de seguridad industrial, los cuales están encargados de establecer cómo y bajo qué circunstancias se debe realizar dicho proceso, para lograr así una correcta instalación y funcionamiento de los dispositivos utilizados.

Estos estándares están regidos por unas directrices y regulaciones como las que se muestran a continuación⁵.

2.2.1 DSEAR (The Dangerous Substances and Explosive Atmospheres Regulations)⁶. La regulación del 2002 para el manejo de sustancias peligrosas y atmosferas explosivas (SI 2002/2776) Establece requerimientos mínimos para la protección de los trabajadores contra el fuego y riesgos de explosiones relacionados a sustancias peligrosas y atmósferas potencialmente explosivas dentro de un campo que se considere peligros por los los procesos industriales involucrados en sus plantas.⁷

Además, para obtener un mayor control sobre el manejo de estas sustancias, DSEAR revocó o modificó una gran cantidad de legislación antigua relacionada a sustancias inflamables y polvos incluyendo los Líquidos Altamente Inflamables y las regulaciones de 1972 (SI 1972/917) de los Gases de Petróleo Licuado y la

⁵ Disponible en la web: www.fluke.com/fluke/coes/soluciones/seguridad-intrinseca

⁶ Disponible en la web: www.hse.gov.uk/fireandexplosion/dsear-regulations.html

⁷ Dangerous substances and explosive atmospheres Dangerous Substances and Explosive Atmospheres Regulations 2002, segunda edición .2013

sección 31 del Acta de Fábricas de 1961. Las normas de seguridad se mantuvieron a través de una combinación de requisitos de la DSEAR y ACOPs que refleja las prácticas en la legislación anterior..⁸

2.2.2 ATEX (Atmosferas Explosivas). En su forma general, ATEX es el nombre común dado a las directivas europeas para el control de atmosferas explosivas; una atmosfera explosiva, se entiende como toda mezcla, en condiciones atmosféricas, de aire y sustancias inflamables en forma de gas, vapor o polvo en la que, tras la ignición se propaga la mezcla no quemada.⁹

Se distinguen dos tipos de atmosferas ATEX:

- Atmosferas de gas explosivas
- Atmosfera con polvo explosivo

Para que se dé una atmosfera potencialmente explosiva se requiere la combinación de la mezcla de una sustancia inflamable o combustible con un oxidante a una concentración determinada, y una fuente de ignición.

PARAMETROS CARACTERISTICOS ATEX

- a. Rango de explosividad
- b. Límite inferior de explosividad (LIE)
- c. Límite superior de explosividad (LSE)
- d. Temperatura de inflamación o punto de destello
- e. Temperatura de ignición o de autoignición
- f. Temperatura máxima superficial
- g. Energía mínima de inflamación

De los anterior se desprenden las tres normativas que regulan la prevención de riesgos en atmosferas explosivas

- Real Decreto 400/1996 relativo a los aparatos y sistemas de protección para uso en atmosferas potencialmente explosivas [transposición de la directiva 94/9/CE (ATEX-100)]¹⁰
- Real Decreto 681/2003 sobre protección de la salud y seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de la presencia de

⁸ Dangerous substances and explosive atmospheres Dangerous Substances and Explosive Atmospheres Regulations 2002, segunda edición .2013

⁹ Disponible en la web: <http://www.atmosferasexplosivas.com/>

¹⁰ Disponible en la web: <http://www.atmosferasexplosivas.com/>

atmosferas explosivas en el lugar de trabajo [Trasposición de la Directiva 99/92/CE (ATEX-137)]¹¹

- La Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales determina el cuerpo básico de garantías y responsabilidades para una adecuada protección de la salud de los trabajadores en el lugar de trabajo, dejando al desarrollo de normas reglamentarias la fijación de las medidas mínimas para la adecuada protección (Art. 43 Ley 31/1995 LPRL)

Seguidos por real decreto 400/1996 ; los equipos destinados a trabajos en estos tipos de atmosferas se agrupan según: ¹²

Aparatos Grupo I: Para trabajos en minas o en instalaciones exteriores donde se puedan producir atmosferas explosivas

- a. Categoría M 1: Nivel de protección muy alto
- b. Categoría M 2: Nivel de protección alto

Aparatos Grupo II: Son los destinados al uso en otros lugares en los que puede haber peligro de formación de atmosferas explosivas

- a. Categoría 1: Nivel de protección muy alto. Aun fallando un medio de protección, existe otro que sigue manteniendo el nivel de protección
- b. Categoría 2: Alto nivel de protección
- c. Categoría 3: nivel normal de protección

Pero aparte de que se agrupan como se mencionó anteriormente lo equipos, específicamente eléctricos deben contar o ser construido con algún arreglo o modo de protección como los siguientes

d = envolvente antideflagrante. El equipo eléctrico está encerrado en el interior de una envolvente capaz de resistir la explosión y de no transmitir la inflamación al ambiente circundante, ni por sus juntas de unión, ni por otras comunicaciones.

e = seguridad aumentada. Se basa en asegurar la no formación de arcos, chispas o sobrecalentamientos en aparatos, tomando: un coeficiente de seguridad elevado, bornes especiales inflamables, aislantes de alta calidad y con un IP54 mínimo.

i = seguridad intrínseca. Un aparato o circuito es intrínsecamente seguro cuando no sea capaz de producir chispas o efectos térmicos suficientes para provocar la inflamación de una atmósfera de gas determinada. Está indicado para

¹¹ Disponible en la web: <http://www.atmosferasexplosivas.com/>

¹² Disponible en la web: <http://www.atmosferasexplosivas.com/>

instrumentación, ya que consiste en diseñar circuitos en baja tensión y reducir la intensidad tomando, además, en consideración los posibles defectos que puedan producirse y los almacenamientos de energía en condensadores, cables e inductancias.

p = sobrepresión interna. Las máquinas o materiales eléctricos están provistos de una envolvente o instalados en una sala en la que se impide la entrada de los gases o vapores inflamables, manteniendo en su interior aire o un gas no inflamable, a una presión superior al atmosférico exterior.

q = aislante pulverulento. Las partes bajo tensión del material eléctrico están completamente sumergidas en una masa de aislante pulverulento.

m = encapsulado. Los elementos a proteger están encerrados en una resina, de tal manera que una atmósfera explosiva no pueda ser inflamada ni por chispas, ni por contacto partes calientes internas al encapsulado.

2.2.3 Seguridad Intrínseca (IS). La seguridad intrínseca se puede definir como el tipo de protección donde cualquier chispa o efecto térmico no es capaz de causar ignición de una mezcla inflamable o material combustible en aire bajo condiciones de ensayos establecidos.

En el caso de la seguridad intrínseca cuando se usan equipos eléctricos en una ubicación clasificada como peligrosa, debe contar con el certificado correspondiente y proporcionar el nivel de protección requerido; el método de selección siempre se basará en el tipo de clasificación de la zona peligrosa. Esta clasificación varía en todo el mundo, pero por lo general a dos subtipos: Europa ha adoptado la filosofía de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en lo referente a la "zonificación." La información y las especificaciones para la clasificación de zonas están definidas en la norma IEC EN60079-10 y en las normativas nacionales. Además, la instalación y el funcionamiento de sistemas eléctricos en ubicaciones peligrosas y la clasificación de zonas en la Comunidad Europea están definidos en la directiva 94/9/CE (ATEX) mencionada anteriormente¹³.

Según los estándares europeos y estadounidenses; las clasificaciones de las zonas peligrosas se muestran en el cuadro 1.

¹³ Mettler Toledo - Artículo técnico - Soluciones intrínsecamente seguras;2013

Cuadro 1. clasificación de zonas peligrosas, estándares europeos y estadounidenses

Sustancia	Características de las zonas peligrosas	Clasificación de zonas peligrosas			Categoría de equipo
		USA NEC500	USA NEC505/NEC506	ATEX 94/9/CE	
Gases/ Vapores	La presencia de una atmósfera explosiva es continua .	División 1	Clase 1 (NEC505)	Zona 0	1G
	Puede crearse una atmósfera explosiva ocasionalmente .			Zona 1	2G (1G)
	Puede crearse una atmósfera explosiva con poca frecuencia o en periodos cortos de tiempo .	División 2		Zona 2	3G (1G y 2G)
Polvos	La presencia de una atmósfera explosiva es continua .	División 1	Clase 2 (NEC506)	Zona 20	1D
	Puede crearse una atmósfera explosiva ocasionalmente .			Zona 21	2D (1D)
	Puede crearse una atmósfera explosiva con poca frecuencia o en periodos cortos de tiempo .	División 2		Zona 22	3D (1D y 2D)

Fuente: Mettler Toledo

Uno de los factores importantes a la hora de establecer un sistema o área intrínsecamente segura, es el método de protección contra ignición, que en todas sus aplicaciones dependerá probablemente del tipo de zona o ubicación peligrosa. Y otras consideraciones como; el tamaño el equipo, la función normal del mismo, requisitos de energía, costo de instalación y la flexibilidad del mantenimiento del método de protección¹⁴.

En el cuadro 2 se aprecia una descripción general de los tipos de protección estandarizados; que, aunque varíen dependiendo del país donde se aplique estos principios de protección concuerdan en todos los países.

¹⁴ Mettler Toledo - Artículo técnico - Soluciones intrínsecamente seguras;2013

Cuadro 2. Estándares y métodos de protección

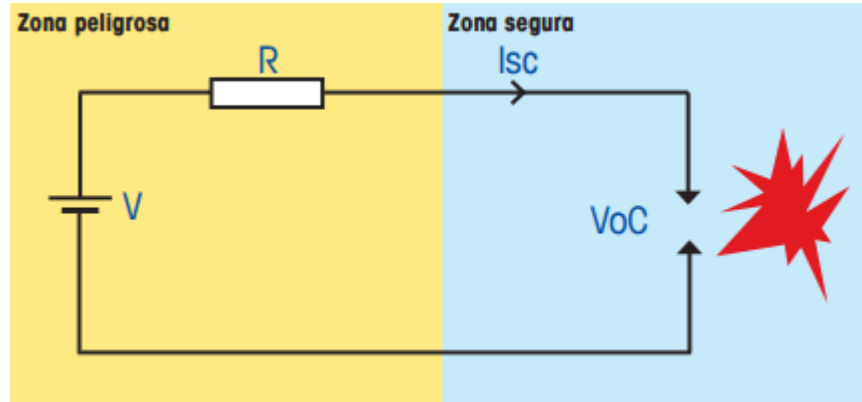
Tipo de protección	Marcado		Fundamento	Estándar			Clasificación de zona	
	UE	EE. UU.		IEC/EN	EE. UU.	CSA	Zonas (ATEX 94/9/CE)	Divisiones (NEC 500)
Normativa general	Ex	AEx	Base para el tipo de protección	60079-0	FM 3600 UL 60079-0	60079		
Seguridad intrínseca	Ex ia	AEx ia	Energía límite, sin chispas ni temperatura en superficie	60079-11	FM 3610 UL 60079-11	60079-11	0, 1 y 2	1 y 2
	Ex ib	AEx ia					1 y 2	
	Ex ic						2	
A prueba de fuego	Ex d	AEx d	Contención explosión Extinción llamas	60079-1	ISA 60079-1 UL 60079-1	60079-1	1 y 2	1 y 2
Aumento de la seguridad	Ex e	AEx e	Carcasa hermética al agua y al polvo	60079 -7	ISA 60079-7 UL 60079-7	60079-7	1 y 2	1 y 2
No chispeante	Ex nA	AEx nA	Dispositivo no chispeante	60079-15	ISA 60079-15 UL 1203	60079-15	2	2
	Ex nC	AEx nC	Componentes y dispositivos chispeantes					
	Ex nL	AEx nL	Energía limitada, sin chispas ni superficies calientes					
Encapsulamiento	Ex m	AEx m	Mantenimiento de la atmósfera explosiva lejos de cualquier fuente de ignición	60079-18	ISA 60079-18 UL 60079-18	60079-18	0, 1 y 2	1 y 2
Presurizada	Ex p	AEx p	Purga de la carcasa	60079-2	FM 3620 UL 60079-2	60079-2	1 y 2	1 y 2
Inmersión en aceite	Ex o	AEx o	Mantenimiento de la atmósfera explosiva lejos de la fuente de ignición	60079-6	ISA 60079-6 UL 60079-6	60079-6	1 y 2	1 y 2

Fuente: Mettler Toledo

En el caso de los circuitos eléctricos intrínsecamente seguros, se establece que cumplen con esta característica cuando este produce energía por debajo del nivel mínimo de energía de ignición (MIE), de acuerdo con la definición de estándares adecuados¹⁵. Estos circuitos se diseñan con el fin de limitar la tensión en circuito abierto (Voc) y la corriente de corto circuito (Isc).

¹⁵ Mettler Toledo - Artículo técnico - Soluciones intrínsecamente seguras;2013

Figura 1. Circuito intrínsecamente seguro



Fuente: Mettler Toledo

Para categorizar los niveles de clasificación en los que se basa el nivel de seguridad y el número de fallas permitidas; la seguridad intrínseca ofrece tres niveles como se muestran en el cuadro 3

Cuadro 3. Niveles de protección IS

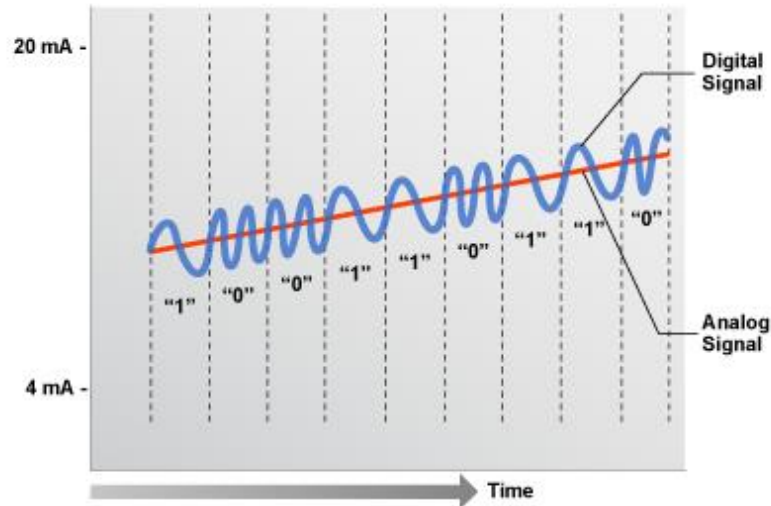
Nivel de protección	ai	ib	ic
Zona peligrosa	Zona 0, 1, 2/División 1	Zona 1, 2/División 1	Zona 2/División 2
Fallos posibles	2	1	Funcionamiento normal

Fuente: Mettler Toledo

2.4 PROTOCOLO HART. Uno de los métodos comúnmente utilizados para la transmisión de los datos provenientes de un sensor específico, ligado a un proceso determinado es el llamado lazo de corriente de 4-20 mA; este tipo de comunicación es estructurado bajo el protocolo denominado HART (*highway addressable remote transducer*); es un protocolo abierto de uso común en los sistemas de control, configurable para la supervisión de datos de instrumentos de campo; este protocolo usa la norma Bell 202, modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) con el objetivo de empalmar señales digitales de comunicación a bajo nivel sobre 4 a 20 mA¹⁶, como se observa en la figura 2.

¹⁶ Disponible en la web: http://sp.hartcomm.org/hcp/tech/aboutprotocol/aboutprotocol_how.html

Figura 2. Señal tipo HART, FSK



Fuente: HART Communication Foundation

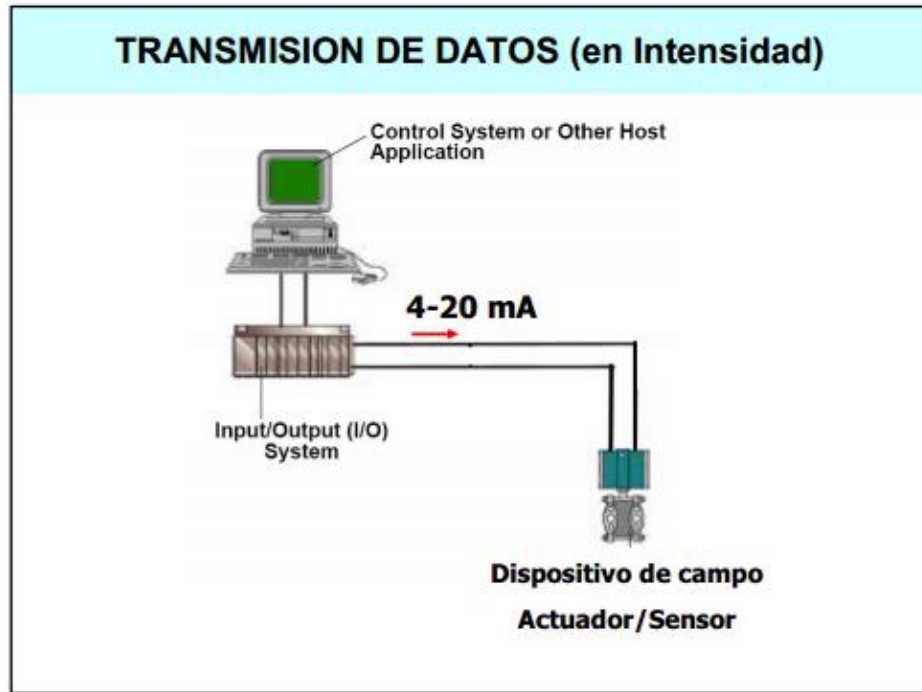
En la figura 2 se observa como el protocolo proporciona dos canales de comunicación simultáneos: la señal analógica de 4 a 20 mA (esta comunica el valor primario medido) y una señal digital (contiene información del dispositivo, diagnóstico, valores medidos o acumulados adicionales); algunas características de este protocolo son:

- Permite soportar hasta 256 variables
- Los transmisores pueden conectarse entre sí a través de un bus y conectarse con 15 dispositivos (PLCs, PCs, etc.)
- Entrega una alternativa económica de comunicación digital
- Implica un ahorro considerable en materiales electrónicos en las instalaciones multipunto.
- Se comunica a 1200bps
- Es un protocolo maestro /esclavo

En la figura 3 se puede apreciar la conexión básica para un lazo de corriente de 4-20 mA (HART) ¹⁷.

¹⁷ Hart Communication Foundation

Figura 3. Conexión básica tipo Hart



Fuente: <http://www2.emersonprocess.com/es-es/brands/rosemount/Pages/index.aspx>

2.5 COMUNICACIONES INALÁMBRICAS INDUSTRIALES. La evolución que han traído consigo las telecomunicaciones, lleva a que su campo de acción a través de diferentes aplicaciones sea más amplio y versátil; un ejemplo de eso es el avance que han tenido las WFN (Wireless Field Network), las cuales bajo ciertos protocolos o tecnologías (ZIGBEE, WIRELESS-HART, ISA.100 etc.) logran que este tipo de comunicaciones inalámbricas industriales sean una solución confiable a la hora de monitorear variables de proceso^{18 19}.

2.6 Redes inalámbricas de sensores (WSN). Un sistema WSN de sensores inalámbricos se describe como una red con numerosos dispositivos distribuidos espacialmente, donde se utilizan sensores para controlar diversas condiciones en

¹⁸ Velasco, G. J., 2013. Evaluación y Selección de Alternativas de Comunicación de Transmisión Inalámbrica Para Los Campos de Producción Petrolera en Ecopetrol, Universidad Javeriana.115p

¹⁹ Aakvaag, N., Frey J.E.,2008. Redes de Sensores Inalámbricos, Nuevas soluciones de Interconexión Para la Automatización Industrial. Revista ABB, Vol. 2, pp.1-4.

distintos puntos (algún proceso que requiera de supervisión constante); los dispositivos, denominados nodos, son unidades autónomas que constan de un microcontrolador, una fuente de energía, un radio transceptor y un elemento sensor²⁰.

Figura 4. Esquema de un dispositivo autónomo en una red WSN²¹



Fuente: Juan Carlos Suarez Barón, Adam, Frey 2006

En este contexto, este tipo de redes constituyen un sistema de comunicación de datos flexible que permite reemplazar las tan extensas redes alambradas; estas redes propagan los datos adquiridos en un medio de transmisión no guiado mediante ondas electromagnéticas a través de antenas. Las redes inalámbricas se pueden clasificar según la cobertura y el ancho de banda, en cuatro grupos²²

WWAN: Red inalámbrica de área amplia (Wireless Wide Área Network)

WMAN: Red inalámbrica de área metropolitana (Wireless Metropolitan área Network)

WLAN: Red inalámbrica de área local (Wireless Local Área Network)

WPAN: Red inalámbrica de área personal (Wireless Personal Área Network)

²⁰ Aakvaag, N., Frey J.E.,2008. Redes de Sensores Inalámbricos, Nuevas soluciones de Interconexión Para la Automatización Industrial. Revista ABB, Vol. 2, pp.1-4.

²¹ Suarez, J. C., 2013.Diseño y Construcción de un Sistema de Monitoreo Para Invernaderos Apoyado con Tecnología Zigbee. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Colombia. 131p

²² Suarez, J. C., 2013.Diseño y Construcción de un Sistema de Monitoreo Para Invernaderos Apoyado con Tecnología Zigbee. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Colombia. 131p

2.7 TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS INDUSTRIALES. Son los métodos, procesos, protocolos y demás configuraciones bajo las cuales se puede establecer una red de sensores industriales, entre estas tenemos:

2.7.1 Tecnología Wireless-Hart (estándar). Se define como un estándar de comunicación inalámbrica abierto que opera actualmente en la banda de radio ISM (Industrial Scientific Medical) de 2.4GHz, usando el estándar IEEE 802.15.4. Esta tecnología está diseñada para crear una red de dispositivos tipo "Mesh" (malla), con capacidad de auto-organización y auto-reparación.

En una red Wireless HART, cada estación (dispositivo de campo) forma una red, sirviendo simultáneamente como una fuente de señal y un repetidor. Entonces, el transmisor original envía un mensaje a su vecino más cercano, el que pasa esta información hacia otros dispositivos hasta que el mensaje alcanza la estación base y su destinatario²³.

Algunas características de una Wireless HART²⁴:

- ❖ Auto-organizables
- ❖ La convivencia con otras redes inalámbricas
- ❖ Admite las topologías estrella y malla
- ❖ Dispositivos intrínsecamente seguros
- ❖ Se ajusta a la adición de nuevos instrumentos
- ❖ Se adapta a los cambios en la infraestructura de la planta

2.7.2 Tecnología ISA 100.11a (estándar). La Sociedad Internacional de Automatización (ISA) comenzó a trabajar en una familia de estándares que definen los sistemas inalámbricos para la automatización industrial y aplicaciones de control. El primer estándar que surgió fue ISA100.11a, que fue ratificado como estándar de ISA en septiembre de 2009. ISA100.11a tiene como objetivo proporcionar una comunicación inalámbrica segura y fiable para aplicaciones no críticas de vigilancia y control²⁵.

²³ Hart Communication Foundation; Disponible en la web: <http://www.hartcomm.org>

²⁴ WirelessHART® System Engineering Guide. Revisión 3.0, IEC 62591

²⁵ ISA-SP100, Disponible en la web: <http://www.isa.org>

Características de una red WFN ISA100.11a²⁶ ²⁷

- Input/Output (I/O): Un dispositivo que proporciona datos (sensor) o utiliza los datos (actuador) de otros dispositivos.
- Router: Un dispositivo que es capaz de enrutar los datos de otros dispositivos en la red.
- Provisioning: Un dispositivo que es capaz de abastecer a otros dispositivos, lo que les permite unirse a una red específica.
- Backbone Router: Un dispositivo que es capaz de enrutar los datos a una red troncal o desde una red troncal.
- Gateway: Un dispositivo que proporciona una interfaz entre la red inalámbrica y la red de la planta o directamente a una aplicación final de una red de la planta.
- System Manager: Una aplicación que regula la red, los dispositivos de red y comunicaciones de red.
- Security Manager: Una aplicación que, en conjunto con el administrador del sistema, proporciona un funcionamiento seguro del sistema.
- System Time Source: Un dispositivo que se encarga de mantener la fuente de tiempo principal para el sistema

2.7.3 Tecnología ZigBee (estándar). ¿QUÉ ES ZIGBEE? Es un estándar que define un conjunto de protocolos para la creación de redes inalámbricas de corta distancia y baja velocidad de datos.

ZigBee está diseñado para comunicar datos a través de entornos hostiles de RF que son comunes en aplicaciones comerciales e industriales²⁸.

ZigBee utiliza la banda ISM para usos industriales, científicos y médicos; en concreto, 868 MHz en Europa, 915 en Estados Unidos y 2,4 GHz en todo el mundo²⁹.

²⁶ ISA100.11a Wireless Systems for Industrial Automation: Process Control and Related Applications, ISA-100.11a-2009 Standard, 2009.

²⁷ Velasco, G. J., 2013. Evaluación y Selección de Alternativas de Comunicación de Transmisión Inalámbrica Para Los Campos de Producción Petrolera en Ecopetrol, Universidad Javeriana.115p

²⁸ ZigBee Alliance, Disponible en la web: <http://www.zigbee.org>

²⁹ Barneda, I., 2008. Zigbee Aplicado A La Transmisión de Datos de Sensores Biomédicos. Universidad Autónoma de Barcelona. 106p

El uso de esta tecnología basada en el estándar IEEE 802.15.4, hace que ZigBee sea idóneo para implementar este tipo de redes inalámbricas³⁰; en el cuadro 4 se pueden apreciar las distintas bandas de frecuencia a las que opera la tecnología ZigBee³¹

Cuadro 4. Bandas de frecuencia en ZigBee

	Frequency (MHz)	Number of Channels	Modulation	Chip Rate (Kchip/s)	Bit Rate (Kb/s)	Symbol Rate (Ksymbol/s)	Spreading Method
	868-868.6	1	BPSK	300	20	20	Binary DSSS
	902-928	10	BPSK	600	40	40	Binary DSSS
Optional	868-868.6	1	ASK	400	250	12.5	20-bit PSSS
	902-928	10	ASK	1600	250	50	5-bit PSSS
Optional	868-868.6	1	O-QPSK	400	100	25	16-array orthogonal
	902-928	10	O-QPSK	1000	250	62.5	16-array orthogonal
	2400-2483.5	16	O-QPSK	2000	250	62.5	16-array orthogonal

Fuente: Almansa, J.J

Características de la tecnología ZigBee incluyen ³²:

- Soporte para múltiples topologías de red como de punto a punto, punto a multipunto y redes de malla
- Ciclo de trabajo de baja - ofrece batería de larga duración
- Baja latencia
- Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
- Hasta 64.770 nodos por red
- 128-bit AES de cifrado para las conexiones de datos seguras
- Anticolisión, reintentos y reconocimientos

³⁰ ZigBee Alliance, Disponible en la web: <http://www.zigbee.org>

³¹ Almansa, J.J.,2013. Desarrollo e Implementación Utilizando Arduino y Zigbee con un Sensor Ultrasónico Para Control de Nivel de Llenado. 109p

³² IEEE 802.15, Disponible en la web: <http://www.ieee802.org/15>

Dentro de la creación de redes tipo WFN ZigBee, se encuentran las siguientes Características³³.

- Puede usar las bandas libres ISM (6) de 2,4 GHz (Mundial), 868 MHz (Europa) y 915 MHz (EEUU).
- Una red ZigBee puede estar formada por hasta 255 nodos los cuales tienen la mayor parte del tiempo el transceiver ZigBee dormido con objeto de consumir menos que otras tecnologías inalámbricas.
- Un sensor equipado con un transceiver ZigBee pueda ser alimentado con dos pilas AA durante al menos 6 meses y hasta 2 años.
- Óptimo para redes de baja tasa de transferencia de datos.
- Solo manipula pequeños paquetes de información comparados con otras tecnologías

2.7.3.1 Tipos de dispositivos ZigBee. Dependiendo del papel que desempeñen en la red la ZigBee Alliance define tres diferentes tipos de dispositivos³⁴.

Coordinador ZigBee (ZC): Es el dispositivo más completo de la red; debe existir uno por red, independientemente de la topología utilizada; sus principales funciones son las de controlar la red y los caminos por donde se debe conectar los distintos dispositivos para que la información transmitida cumpla la función establecida; requiere memoria y capacidad de computación.

Router ZigBee (RZ): Es el encargado de interconectar los dispositivos separados en la topología de la red. se puede asociar con el coordinador de la red o con otro Router ZigBee; además ofrece un nivel de aplicación para la ejecución del código de usuario.

Terminal o Dispositivo final ZigBee (ZED): Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un Router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos configurados de la misma manera y no se responsabiliza del control de la pérdida de paquetes; así este tipo de nodo puede permanecer dormido el tiempo que sea necesario, aumentando la vida media de sus baterías; y sus requerimientos de memoria son mínimos.

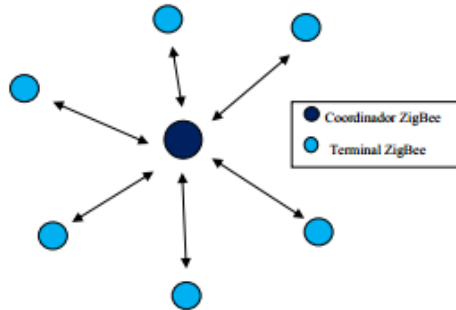
³³ Velasco, G. J., 2013. Evaluación y Selección de Alternativas de Comunicación de Transmisión Inalámbrica Para Los Campos de Producción Petrolera en Ecopetrol, Universidad Javeriana.115p

³⁴ ZigBee Alliance, Disponible en la web: <http://www.zigbee.org>

2.7.3.2 Topologías de red ZigBee. Como ya se había mencionado anteriormente, las topologías de red siempre vendrán definidas y limitadas por el tipo de tecnologías utilizada para el diseño de una determinada red, en este caso de sensores (WSN); dentro de sus estructuras, ZigBee permite las siguientes topologías de red:

Topología Estrella: dentro de ZigBee es la más simple y limitada de todas, ya que consiste solo en un coordinador ZigBee y un grupo de terminales ZigBee los cuales se pueden comunicar única y exclusivamente con el coordinador de la red; la figura 6 muestra un ejemplo de este tipo de configuración de red³⁵.

Figura 6. Topología en estrella para una red ZigBee



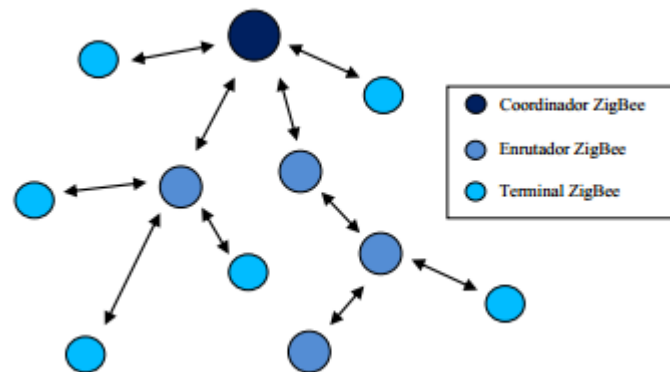
Fuente: Avilés, J.F.; 2010

Una de las ventajas que trae consigo esta topología es la facilidad a la hora de implementarla, haciéndola adecuada para redes temporales y el fallo de un nodo periférico no tendrá influencia en el comportamiento general de la red.

Topología Árbol: Básicamente la red se forma con un coordinador y un grupo determinado de dispositivos terminales y enrutadores ZigBee, el encargado de administrar la red y asociar las terminales y enrutadores es el coordinador, para formar distintos niveles de conexión. La figura 7 se muestra la estructura para esta topología.

³⁵ Avilés, J.F., 2010. Desarrollo de un Sistema de Adquisición de Datos LAN (Zigbee) con Interfaz WAN (GPRS/EDGE). Universidad Simón Bolívar .114p

Figura 7. Topología en árbol para una red ZigBee



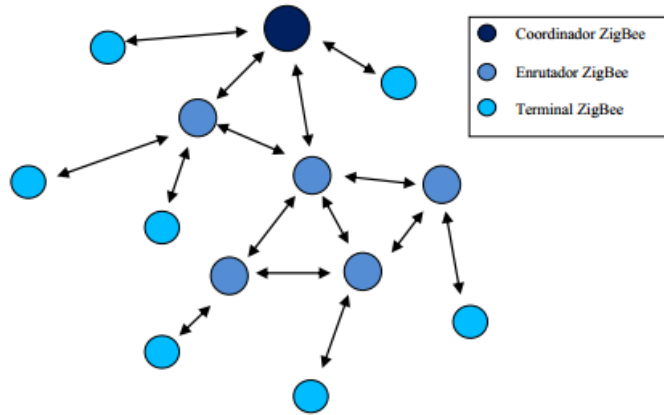
Fuente: Avilés, J.F.; 2010

Esta topología tiene como ventaja que, si ocurre una falla en un nodo, no implica la interrupción en las comunicaciones, el problema radica en que los mensajes son recibidos por todas las estaciones sin importar a quien vaya dirigido; además, debido a la presencia de un medio de transmisión compartido entre las muchas estaciones, pueden producirse interferencias entre las señales cuando dos o más nodos transmiten al mismo tiempo, por lo cual es necesario utilizar información de control en las tramas que se encargan de vigilar quien transmite y recibe en cada instante³⁶.

Topología Malla: Aunque es muy similar a la topología en árbol; esta permite una comunicación más flexible en los dispositivos enrutadores ya que permite la comunicación directa; brindando así una mayor eficiencia en la propagación del mensaje porque se cuenta con un mayor número de rutas alternas enlazadas a todos los dispositivos evitando así la congestión de la red. La figura 8 muestra el esquema de una topología ZigBee malla

³⁶ Avilés, J.F., 2010. Desarrollo de un Sistema de Adquisición de Datos LAN (Zigbee) con Interfaz WAN (GPRS/EDGE). Universidad Simón Bolívar .114p

Figura 8. Topología en malla para una red ZigBee



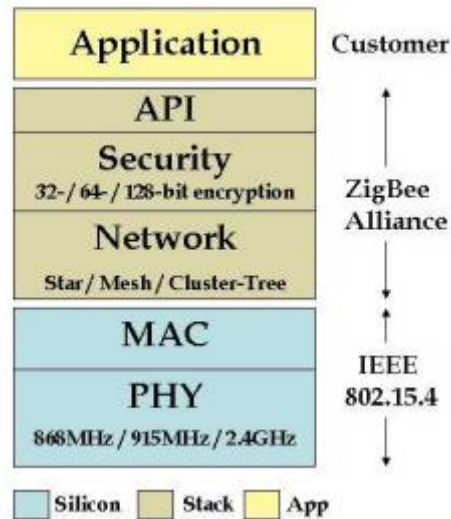
Fuente: Avilés, J.F; 2010

La ventaja de esta topología es la capacidad de auto regeneración que tiene la red a la hora de perder la comunicación un nodo determinado con su coordinador, haciendo esta red muy versátil y confiable.

2.8 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ESTÁNDAR IEEE 802.15.4. La IEEE 802.15.4 es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con tasa de baja transmisión de datos (low-rate Wireless personal área network, LR-WPAN)³⁷, siendo esta la base en la que se define la especificación o tecnología ZigBee, que se encarga de ofrecer una solución completa para las redes inalámbricas industriales, ya que crea niveles superiores del stack de protocolos que el estándar no cubre, como se aprecia en la figura 9.

³⁷ Velasco, G. J., 2013. Evaluación y Selección de Alternativas de Comunicación de Transmisión Inalámbrica Para Los Campos de Producción Petrolera en Ecopetrol, Universidad Javeriana.115p

Figura 9. Arquitectura del estándar IEEE 802.15.4 y ZigBee



Fuente: Ayala Cázarez Gerardo

Dentro de las características del estándar podemos encontrar las siguientes:

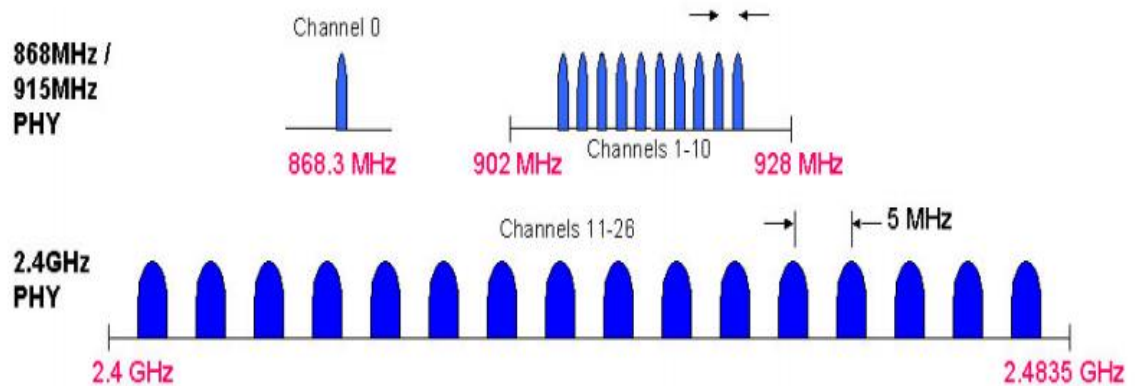
- Transferencia de datos en el rango de 20kbps, 40kbps, 100kbps y 250kps; para la conexión a baja velocidad
- Topologías en estrella (multipunto) o punto a punto (point to point), con configuraciones ajustables a la necesidad requerida
- Asignaciones de direcciones cortas de 16 bits (redes de hasta 65536 dispositivos) o extendidas de 64 bits (para direcciones IEEE MAC)
- El estándar IEEE 802.15.4 define múltiples niveles de seguridad.
- El protocolo 802.15.4 está diseñado para la monitorización y para aplicaciones de control donde la duración de la pila es importante.

2.8.1 Canales que usa el estándar IEEE 802.15.4. como se había mencionado anteriormente el estándar IEEE 802.15.4 define 27 canales en las 3 bandas de frecuencia establecidas dentro de sus características; las cuales se distribuyen de la siguiente manera:

- 1 canal en la banda 868 MHz
- 10 canales en la banda de 915MHz
- 16 canales en la banda de 2.4 GHz

En la figura 7 se muestra la distribución de dichos canales en el espectro de frecuencia, junto con la separación que existe entre las frecuencias centrales de cada canal.

Figura 10. Canales usados en el estándar IEEE 802.15.4



Fuente: Silica; IEEE 802.15.4 y ZigBee

En el caso de la frecuencia central para cada uno de estos canales está definida como se muestra en el cuadro 5.

Cuadro 5. Frecuencias utilizadas para los canales IEEE 802.15.4

Número de Canales	Frecuencia central del Canal (MHz)
$k = 0$	868.3
$k = 1, 2, \dots 10$	$906 + 2(k - 1)$
$k = 11, 12, \dots 26$	$2405 + 5(k - 11)$

Fuente: Silica; IEEE 802.15.4 y ZigBee

2.8.2 Tipos de dispositivos IEEE 802.15.4. En base a la funcionalidad de los dispositivos distribuidos en la red, el estándar IEEE 802.15.4 plantea la siguiente clasificación:

Dispositivo de Funcionalidad Completa (FFD): También conocido como nodo activo, es capaz de recibir mensajes en formato 802.15.4 gracias a la memoria adicional y a la capacidad de computar; puede funcionar como coordinador o Router, o puede ser usado en dispositivos de red que actúen de interface con los usuarios.

Dispositivos de Funcionalidad Reducida (RFD): También conocidos como nodo pasivo, su capacidad y funcionalidad son limitadas con el objetivo de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad; básicamente son los sensores/actuadores de la red.

Estos RFD están limitados a utilizar topología estrella, no pueden ser ni coordinadores ni enrutadores, solo son capaces de comunicarse con el coordinador de la red³⁸.

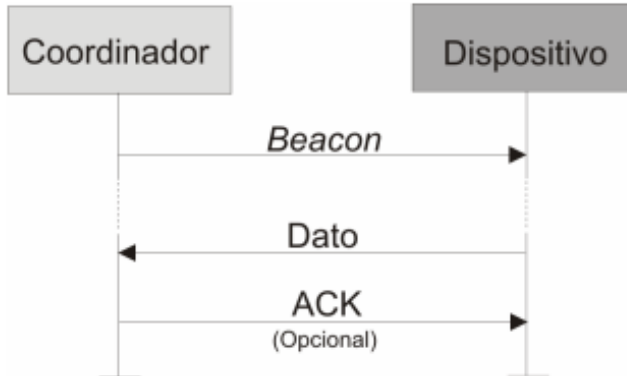
2.8.3 Modelo de transferencia de datos. Habiendo considerado los dispositivos involucrados tanto en ZigBee como en lo que soporta el estándar IEEE 802.15.4, se muestra a continuación la interacción que tienen dichos dispositivos para transferir la información en una red, independientemente de su estructura de red; aquí se establecen tres tipos de transferencia de datos; cuando la red está establecida con beacons o sin ellos.

2.8.4 Transferencia de datos hacia un coordinador. Si en la red están habilitados los beacons, el dispositivo que desea hacer la transmisión escucha primero el canal para sincronizarse con la estructura de la supertrama; Cuando tiene acceso al medio envía la trama de datos hacia el coordinador empleando el protocolo CSMA-CA ranurado. El coordinador puede confirmar la recepción completa enviando opcionalmente una trama de reconocimiento (ACK, Acknowledgment), la figura 11 muestra la secuencia que realiza este tipo de transmisión³⁹.

³⁸ Moreno, P.C., 2009. Construcción de Una Red Zigbee Prototipo Para la Adquisición de Datos desde Transmisores de corriente de Dos Hilos. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. 65pp

³⁹ Paz, J.S.,2008. Diseño y Construcción de Un Módulo Transmisor Receptor Inalámbrico Para el Manejo de Sensores Con el Protocolo Estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee). Universidad Tecnológica de la Mixteca .116p

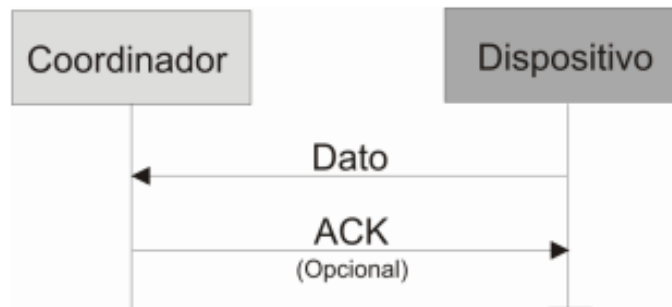
Figura 11. Comunicación hacia un coordinador, red con beacons



Fuente: Paz, Santiago

Para redes que no utilizan beacons, la comunicación es definida así; la trama es enviada por el dispositivo al coordinador usando CSMA-CA no ranurado, dicho coordinador puede confirmar la recepción completa enviando una ACK como trama opcional. La figura 12 muestra este tipo de comunicación.

Figura 12. Comunicación hacia un coordinador, red sin beacons



Fuente: Paz, Santiago

2.8.5 Transferencia de datos de un coordinador. Si la red cuenta con beacons, el dispositivo coordinador indica que hay datos pendientes por enviar, los demás dispositivos escuchan constantemente el medio y si uno de ellos identifica los datos como destino, este envía un comando MAC solicitando dichos datos usando un CSMA-CA ranurado. La figura 13 muestra dicha secuencia.

Figura 13. Comunicación de un coordinador en una red beacons



Fuente: Paz, Santiago

Ahora si la red no cuenta con beacons, el coordinador almacena los datos hasta que un dispositivo le envía una trama MAC solicitándolos y si estos datos existen el coordinador envía un ACK y los datos haciendo uso del CSMA-CA ranurado, como se muestra en la figura 14.

Figura 14. Comunicación de un coordinador en una red si beacons



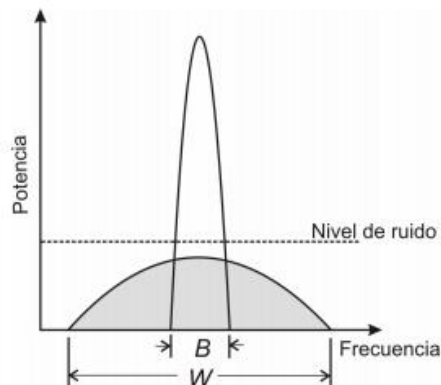
Fuente: Paz, Santiago

2.8.6 Transferencia de datos entre dispositivos semejantes. Los dispositivos se comunicarán con cualquier otro dispositivo siempre y cuando estén dentro de su rango de alcance, y estos deben estar recibiendo constantemente o bien sincronizarse entre ellos para lograr una mejor transferencia.

2.8.7 Transmisión en radio frecuencia RF. Para la transmisión de datos en RF, el estándar define la utilización de la técnica de codificación de espectro disperso de secuencia directa. Esta técnica utiliza un patrón de bits redundante (señal de chip) por cada uno de los bits que componen la trama. La señal de chip es un código de ruido pseudo-aleatorio (PN, Pseudo-random Noise), que aumenta el ancho de banda de la transmisión y reduce la densidad de potencia espectral⁴⁰.

Esto quiere decir que si a la señal original de un ancho de banda determinado B se le aplica dicha técnica se obtendrá una señal con un ancho de banda W , donde $W > B$. Con esta dispersión la potencia del ancho de banda B se distribuye en el ancho de banda W ; como se observa en la figura 15.

Figura 15. Técnica del espectro disperso



Fuente: Paz, Santiago

La utilización de esta técnica permite que coexistan distintos dispositivos dentro del mismo medio, ya que los demás dispositivos solo escuchan 'ruido' si no tienen la misma secuencia pseudo-aleatoria para reconstruir la información. Dentro de las especificaciones del protocolo estándar IEEE 802.15.4, se define el tipo de modulación a emplear dependiendo de la frecuencia utilizada. En la frecuencia de 2.4GHz se define una velocidad de transmisión de 250kbps, y se emplea una técnica de modulación M-ario cuasi-ortogonal, con $M=16$ ⁴¹

⁴⁰ Paz, J.S.,2008. Diseño y Construcción de Un Módulo Transmisor Receptor Inalámbrico Para el Manejo de Sensores Con el Protocolo Estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee). Universidad Tecnológica de la Mixteca .116p

⁴¹ Paz, J.S.,2008. Diseño y Construcción de Un Módulo Transmisor Receptor Inalámbrico Para el Manejo de Sensores Con el Protocolo Estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee). Universidad Tecnológica de la Mixteca .116p

2.9 Aplicaciones ZigBee y el estándar IEEE 802.15.4. La tecnología ZigBee que se complementa con el estándar IEEE 802.15.4 están definidos para usarse en aplicaciones embebidas con requerimientos muy bajos en trasmisión de datos y consumo energético⁴², dichas aplicaciones pueden ser de propósito general con características auto organizables tales como; control industrial, albergar sensores, recolectar datos médicos, etc.; en la figura 16 y 17 respectivamente se pueden apreciar dichas aplicaciones y su campo de acción complementadas con el estándar.

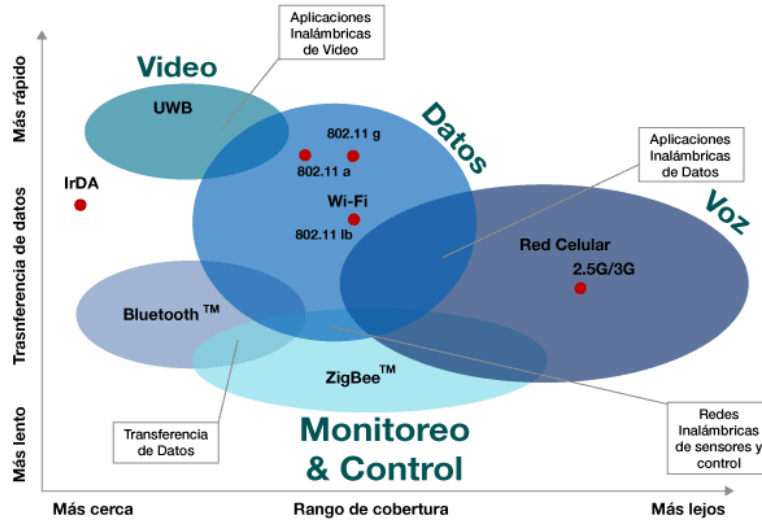
Figura 16. Aplicaciones de la tecnología ZigBee



Fuente: <http://sg.com.mx/content/view/310>

⁴² Disponible en la web: <http://sg.com.mx/content/view/310>

Figura 17. Aplicaciones basadas en el estándar IEEE 802.15.4



Fuente: <https://sx-de-tx.wikispaces.com/ZIGBEE>⁴³

2.10 ¿POR QUÉ ZIGBEE? Dentro de todas las posibilidades en cuanto a la tecnología se refiere; con las que se cuenta para formar una red WSN; ZigBee cumple en la gran mayoría de sus aspectos para suplir las necesidades existentes en un determinado monitoreo a un proceso en específico; además cuenta con la posibilidad de utilizar dispositivos de bajo consumo; es especial y útil para redes de sensores en entornos industriales, médico y demóticos; la banda en el espectro en frecuencia a la que trabaja es de carácter libre; menor consumo energético comparado con Wi-Fi y Bluetooth; permite crear redes flexibles, además el número de nodos que se puede crear con este tipo de tecnología es mucho más amplio comparado por ejemplo con Bluetooth; en el cuadro 6 se aparecían las más importantes diferencias entre los tipos de tecnología mencionados (Wi-Fi , ZigBee y Bluetooth)⁴⁴.

⁴³ Disponible en la web: <https://sx-de-tx.wikispaces.com/ZIGBEE>

⁴⁴ Chaparro, M., 2011. Red Inalámbrica de Fibra Óptica de Plástico con Tecnología Zigbee. Universidad Carlos III de Madrid. 179p

Cuadro 6. Diferencias entre ZigBee, Bluetooth y Wi-Fi⁴⁵.

COMPARATIVA PRINCIPALES ESTÁNDARES DE COMUNICACIÓN		
ZigBee	Bluetooth	WiFi
Estándar 802.15.4.	Estándar 802.15.1.	Estándar 802.11.
250 kbps	1 Mbps	Hasta 54 Mbps
TX 35 mA	TX 40 mA	TX > 400 mA
Standby 3µA	Standby 200 µA	Standby 20 mA
32-60 KB memoria	100+ KB memoria	100+KB memoria
Iluminación, sensores, control remoto...	Telecomunicaciones, audio...	Internet....
Red en malla, punto a punto o punto a multipunto	Punto a multipunto	Punto a multipunto

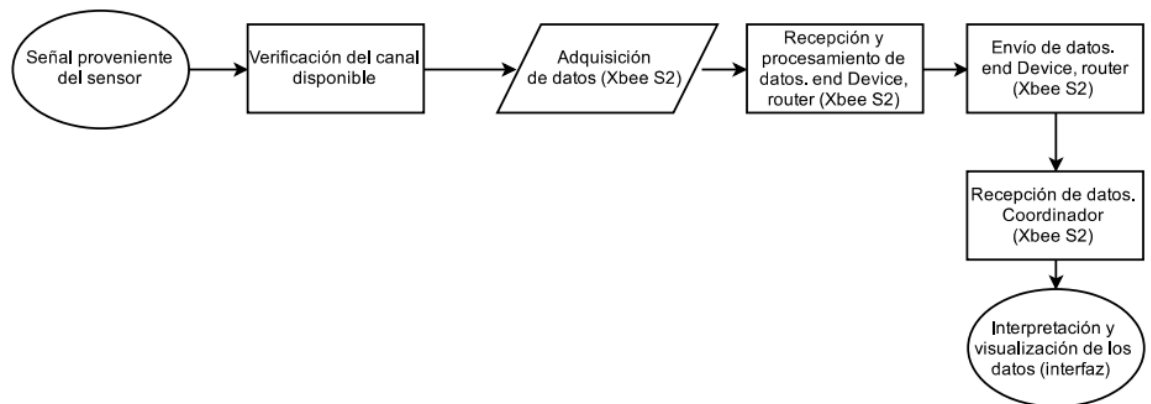
Fuente: Chaparro de la peña mercedes

⁴⁵ ZigBee Alliance, Disponible en la web: <http://www.zigbee.org>

3. DESARROLLO METODOLÓGICO

3.1 Descripción general del sistema. El alcance general de este proyecto, es diseñar un prototipo de monitoreo inalámbrico para supervisar variables de superficie de pozo, al mismo tiempo que se pueda vincular dicho dispositivo a cualquier proceso de tipo industrial donde se requiera una supervisión constante del estado actual del sistema; el prototipo cuenta con un tipo de comunicación abierta para su transmisión, ya que se basa en el estándar IEEE 802.15.4; el nivel de protección del mismo es acercado a los estándares IS; todo esto con el fin de brindar un alternativa económica y viable para la supervisión de procesos industriales donde el sistema esté ya instalado, y se cuente con dispositivos antiguos automatizados o monitoreados. Toda la información proveniente de los sensores cuyas señales pueden ser de tipo (0-5v) o (4-20 mA) son analizadas, almacenadas y procesadas en un software diseñado para tal función. En la figura 18 se muestra un diagrama de flujo básico, donde se describe el proceso para la transmisión, recepción y procesamiento de las señales generadas desde el sensor.

Figura 18. Flujo del proceso de adquisición y transmisión de datos



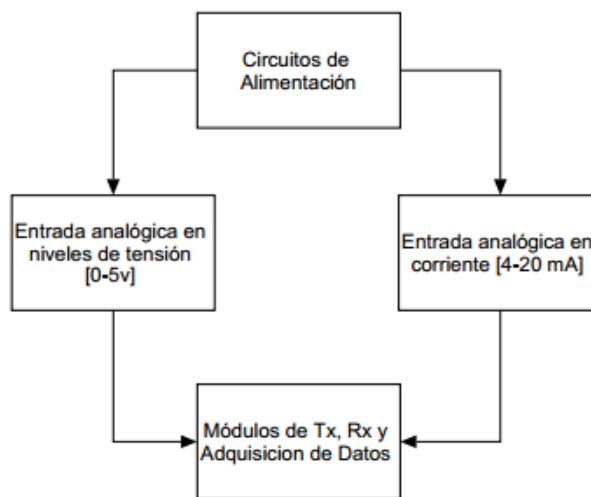
Fuente: Autores

La red diseñada será una red tipo Mesh, formada con los módulos Xbee S2 como se verá más adelante en este documento, una ventaja del prototipo frente a otros diseños anteriormente planteados, es que se hace uso del microcontrolador interno

de los módulos para realizar todo el trabajo de la red; es decir adquisición, transmisión y recepción de los datos.

3.2 Recursos de Hardware. En forma estructural en cuanto a hardware se refiere, el prototipo diseñado cuenta con cuatro bloques, como se muestra en la figura 19.

Figura 19. Diagrama en bloques del prototipo



Fuente: Autores

Para un mejor análisis del hardware se comenzará analizando los módulos de transmisión y recepción.





3.2.1 Módulos Xbee Tx y Rx. Los módulos Xbee son dispositivos fabricados bajo la firma Digi International; estos módulos Xbee son soluciones integradas que brindan un medio inalámbrico para la interconexión y comunicación entre dispositivos. Estos módulos utilizan el protocolo de red llamado IEEE 802.15.4 para crear redes FAST POINT-TO-MULTIPOINT (punto a multipunto); o para redes PEER-TO-PEER (punto a punto). Fueron diseñados para aplicaciones que requieren de un alto tráfico de datos, baja latencia y una sincronización de comunicación predecible⁴⁶; cada Xbee tiene un microcontrolador interno que ejecuta un programa conocido como firmware, encargado de controlar las diferentes funciones para las cuales está diseñado el módulo. La gama y versatilidad de estos dispositivos, hacen que cada

⁴⁶ Disponible en la Web: <http://xbee.cl/>

día se vaya mejorando su arquitectura y funcionamiento, existen diferentes tipos de Xbee, los cuales dependiendo de su capacidad y del diseño para el cual sea requerido se dividen en serie 1 y serie 2; entre muchos otros que a la fecha se vienen mejorando.

3.2.1.1 Características y diferencias entre las series Xbee. La diferencia fundamental entre cada una de las series anteriormente mencionadas radica en, el tipo de red que pueden formar, la potencia de trasmisión, y el número de canales de entrada y salida⁴⁷. En el cuadro 7 se pueden apreciar algunas comparaciones entre estas series Xbee.

Cuadro 7. Comparación entre las series Xbee

	 XBee 1mW 802.15.4 Chip Antenna Wire Antenna	 XBee PRO 802.15.4 Chip Antenna Wire Antenna	 XBee Series 2 ZigBee Wire Antenna	 XBee Series 2 PRO ZigBee Wire Antenna
Compatibility	Series 1	Series 1	Serie 2	Series 2
Antenna	Chip Wire	Chip Wire	Wire	Wire
RF Data Range	250 kbps/up to 115 kbps	250 kbps/up to 115 kbps	250 kbps/up to 1 Mbps	250 kbps/up to 1 Mbps
Indoor Range	100 ft	300 ft (90 m)	133 ft (40 m)	300 ft (90 m)
Outdoor Range	300 ft (100 m)	1 mile (1.6 km)	400 ft (120 m)	2 miles (3.2 km)
Transmit Power	1 mW (+0 dBm)	60 mW (+18 dBm)	1.25 mW (+1 dBm)	63 mW (+18 dBm)
Digital I/O	(8) digital I/O	(8) digital I/O	(10) digital I/O	(10) digital I/O
Topology	Peer-to-Peer, Point-to-Point, Point-to-Multipoint	Peer-to-Peer, Point-to-Point, Point-to-Multipoint	Peer-to-Peer, Point-to-Point, Point-to-Multipoint	Peer-to-Peer, Point-to-Point, Point-to-Multipoint
Encryption	128-bit AES	128-bit AES	128-bit AES	128-bit AES
Channels	16 Direct Sequence Channels	12 Direct Sequence Channels	16 Direct Sequence Channels	15 Direct Sequence Channels
Supply Voltage	2.8 - 3.4 VDC (Absolute) / 3.0 - 3.4 (Recommended)	2.8 - 3.4 VDC (Absolute) / 3.0 - 3.4 (Recommended)	2.7 - 3.6 VDC	2.1 - 3.6 VDC
Transmit Current	45 mA	215 mA	35 mA	205 mA
Receive Current	50 mA	55 mA	38 mA	47 mA
Power-down Current	< 10 uA	< 10 uA	< 1 uA	< 3.5 uA

Fuente: López David y Gala Sergio

3.2.1.2 Módulos Xbee S2. Para la realización de este proyecto se seleccionan los módulos Xbee S2, gracias a sus características en cuanto a trasmisión, procesamiento de información, y lo más importante, que su microcontrolador interno es adecuado para hacer la adquisición de datos provenientes de los sensores, haciendo que el prototipo no cuente con demasiados retardos al no ser necesario

⁴⁷ López, D. y Gala, S. 2012. Red Inalámbrica para Instrumentación de Procesos. Universidad Politécnica de Catalunya, Vol. 1, 254p

un microcontrolador externo. Dentro de las características más importantes de estos módulos se encuentran las que se nombran a continuación en el cuadro 8 de manera general⁴⁸.

Cuadro 8. Especificaciones generales de los Xbee S2

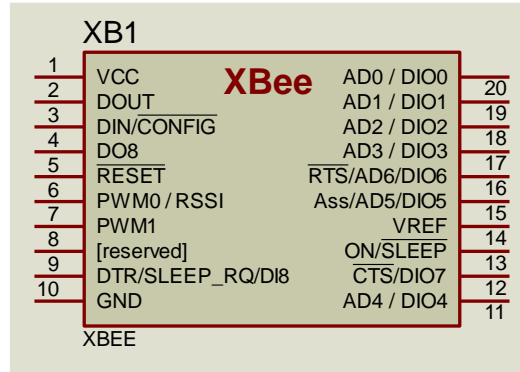
Specification	XBee Series 2
Performance	
Indoor/Urban Range	up to 133 ft. (40 m)
Outdoor RF line-of-sight Range	up to 400 ft. (120 m)
Transmit Power Output (software selectable)	2mW (+3dBm)
RF Data Rate	250,000 bps
Serial Interface Data Rate (software selectable)	1200 - 230400 bps (non-standard baud rates also supported)
Receiver Sensitivity	-95 dBm (1% packet error rate)
Power Requirements	
Supply Voltage	2.8 – 3.4 V
Operating Current (Transmit)	40mA (@ 3.3 V)
Operating Current (Receive)	40mA (@ 3.3 V)
Power-down Current	< 1 uA @ 25°C
General	
Operating Frequency Band	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)
Operating Temperature	-40 to 85° C (industrial)
Antenna Options	Integrated Whip, Chip, RPSMA, or U.FL Connector
Networking & Security	
Supported Network Topologies	Point-to-point, Point-to-multipoint, Peer-to-peer & Mesh
Number of Channels (software selectable)	16 Direct Sequence Channels
Addressing Options	PAN ID and Addresses, Cluster IDs and Endpoints (optional)
Agency Approvals	
United States (FCC Part 15.247)	Pending
Industry Canada (IC)	Pending
Europe (CE)	Pending

Fuente: <http://www.farnell.com/datasheets/27606.pdf>

Todos los dispositivos Xbee independientemente de la serie, siempre dentro de su estructura traen 20 pines, asignados a sus diferentes funciones como se muestra en la figura 20.

⁴⁸ Disponible en la Web: <http://www.farnell.com/datasheets/27606.pdf>

Figura 20. Diagrama esquemático del módulo Xbee S2



Fuente: Autores; Proteus.

Las conexiones mínimas que se deben realizar para que el módulo, independientemente de su serie se pueda conectar hacia una computadora son: VCC; GND; DIN; DOUT; RTS; y DTR. Cabe resaltar nuevamente que estas señales deben ser acondicionadas a los niveles de voltaje que maneja el dispositivo y que se especificaron el cuadro 8 (2.8 a 3.3V) ⁴⁹.

La descripción detallada de cada uno de los 20 pines que posee el dispositivo, se resaltan en el cuadro 9

En cuanto a las características eléctricas, este dispositivo también posee ventajas muy significativas pues no necesita de grandes cantidades de voltaje para que funcione de manera adecuada, se puede decir que con un par de baterías es posible energizar este dispositivo asegurando ahorro y aprovechamiento de energía, estas características se muestran en el cuadro 10.

⁴⁹ Disponible en la Web: <http://www.farnell.com/datasheets/27606.pdf>

Cuadro 9. Pines del módulo Xbee S2

Pin #	Name	Direction	Description
1	VCC	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DIO8	Either	Digital I/O 8
5	RESET	Input	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	PWM0 / RSSI / DIO10	Output	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator / Digital IO
7	PWM / DIO11	Either	Digital I/O 11
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ/ DI8	Input	Pin Sleep Control Line or Digital Input 8
10	GND	-	Ground
11	DIO4	Either	Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP	Output	Module Status Indicator
14	[reserved]	-	Do not connect
15	Associate / DIO5	Either	Associated Indicator, Digital I/O 5
16	RTS / DIO6	Either	Request-to-Send Flow Control, Digital I/O 6
17	AD3 / DIO3	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0	Either	Analog Input 0 or Digital I/O 0

Fuente: <http://www.farnell.com/datasheets/27606.pdf>

Cuadro 10. Características eléctricas (DC) de los módulos Xbee S2

Symbol	Parameter	Condition	Min	Typical	Max	Units
V _{IL}	Input Low Voltage	All Digital Inputs	-	-	0.2 * VCC	V
V _{IH}	Input High Voltage	All Digital Inputs	0.8 * VCC	-	0.18 * VCC	V
V _{OL}	Output Low Voltage	I _{OL} = 2 mA, VCC >= 2.7 V	-	-	0.18 * VCC	V
V _{OH}	Output High Voltage	I _{OH} = -2 mA, VCC >= 2.7 V	0.82 * VCC	-	-	V
I _{IN}	Input Leakage Current	V _{IN} = VCC or GND, all inputs, per pin	-	-	0.5 uA	uA
TX	Transmit Current	VCC = 3.3 V	-	45	-	mA
RX	Receive Current	VCC = 3.3 V	-	50	-	mA
PWR-DWN	Power-down Current	SM parameter = 1	-	< 10	-	uA

Fuente: <http://www.farnell.com/datasheets/27606.pdf>

con todas las características ya conocidas de los módulos, en su forma general; para este proyecto se consideran las características que se muestran a continuación:

- ✓ Distancia de comunicación: 120m con líneas de vista y 40m en interiores
- ✓ Velocidad máxima de transmisión de hasta 1Mbps (en este caso de 1200bps)
- ✓ Menor consumo de energía frente a la serie 1
- ✓ Antena tipo cable y tipo pcb
- ✓ 10 E/S digitales y 4 entradas ADC a 10 bits
- ✓ Ideales para el monitorio industrial remoto
- ✓ Operan en la banda libre de 2.4GHz
- ✓ Potencia de transmisión de 1,25 mW (1 dBm)
- ✓ Funciona con voltaje de 2,1 a 3,6 VCC; corriente de transmisión de 35 mA, corriente de recepción de 38 mA

3.2.1.3 Funcionalidades de los Módulos Xbee S2. Como ya se había mencionado anteriormente estos dispositivos versátiles nos ayudaran a realizar la adquisición de los datos a través de sus 4 canales adc; los módulos Xbee S2 admiten cuales quiera de las topologías de red ya descritas; con las características establecidas por la misma claro está, es decir a través de un software de configuración llamado XCTU se le pueden atribuir todos los parámetros permitidos por el dispositivo para cumplir una tarea específica dentro de la red (en este caso red tipo Mesh), admiten configuraciones tales como coordinador, enrutador y dispositivo final, basado en el estándar IEEE 802.15.4. En la figura 21 se muestra la estructura física del Xbee S2 utilizado para el desarrollo del proyecto.

Figura 21. Hardware Xbee S2



Fuente: Digi

El modo de operación de cada dispositivo está basado en las características de cada uno de ellos y en la necesidad que se requiera; por ejemplo, los modos más requeridos para dichas configuraciones son; el modo transparente, el de bajo consumo, y los modos de comando (modo api y modo de comandos AT), en los modos de comando, el actual software de configuración ofrece una ventaja significativa con respecto a sus versiones predecesoras, ya que estas

configuraciones se pueden realizar de manera más dinámica sin la necesidad de introducir comandos como se verá más adelante.

Modo transparente: representa un enlace serie entre dos módulos

Modo de bajo consumo: es una función que permite mediante la configuración de un pin, hacer que el dispositivo se apague y encienda durante ciertos periodos de tiempo.

Los modos de comando son utilizados para la configuración del módulo. En este modo se pueden leer y escribir los parámetros de configuración del módulo. En este estado los caracteres recibidos son interpretados como comandos. Los módulos soportan dos tipos de modo comando diferente, el modo AT y el modo API⁵⁰.

Modo AT: En este modo es posible configurar el módulo Xbee mediante un terminal conectado por el puerto serie a la UART del Xbee, enviando caracteres ASCII.⁵¹

Modo API: es el modo que sirve para leer o escribir comandos en el módulo, además de ser el medio en que se envían las lecturas y escrituras de los pines respectivos de entrada y salida del mismo; usando este modo en una aplicación específica esta puede enviar datos a diferentes módulos sin tener que cambiar la dirección de destino mediante configuración, ya que cada frame (trama) que es enviada, contiene un campo asignado para la dirección de destino.

3.2.2 Entrada analógica de corriente 4-20 mA. Ya conociendo todas las características de los módulos Xbee S2, se procede a realizar la etapa de adaptación de las señales provenientes de los sensores, en este caso para la señal Hart, se consideraron las siguientes características:

- La entrada de corriente puede ser positiva o negativa
- Se debe hacer necesaria la conversión de corriente a voltaje para poder ser leída por los módulos
- El voltaje de entrada para los canales adc del módulo soportan entradas en el rango de 0-1.2V

Para dar solución a las dos primeras consideraciones, existe en el mercado un dispositivo que configurado de una forma correcta y sin necesidad de adicionarle elementos externos, puede convertir esa señal de 4-20mA a una señal adecuada de 0-5v, este dispositivo es el RCV420 de la firma BURR BROWN; para el diseño

⁵⁰ Navarro, J., 2013. Control Inalámbrico Basado en Redes Inalámbricas de Sensores Mediante Módulos Xbee. 198p

⁵¹ Navarro, J., 2013. Control Inalámbrico Basado en Redes Inalámbricas de Sensores Mediante Módulos Xbee. 198p

del prototipo se hace uso de la entrada para corrientes positivas que trae el RCV420⁵².

Para la solución respectiva a la segunda consideración, se implementa un circuito inversor, ya que la ganancia como se expresa en la ecuación 1 es menor a la unidad; es decir proporcional a los 1.2v que se requieren a la entrada de los canales adc, este circuito inversor se implementa con el integrado AD712, los cálculos para dicho inversor se muestran a continuación

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_1}$$

Ecuación 1.

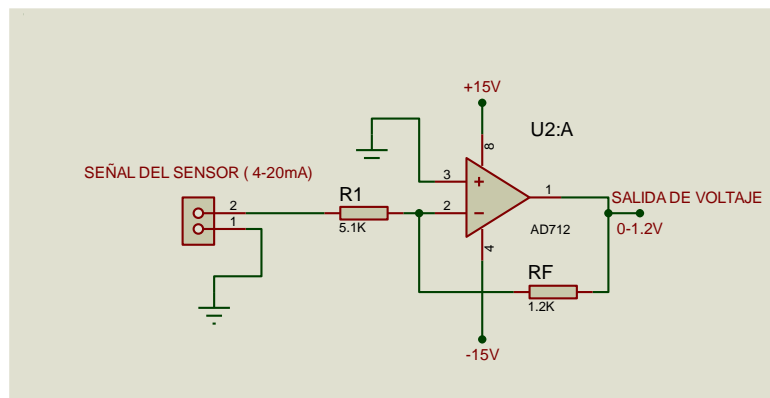
Usando la ecuación 1 para el máximo valor de entrada y salida, se obtiene una ganancia de 0.24 como se observa y fijando un valor comercial de 1.2kΩ para el resistor Rf obtenemos:

$$G = -\frac{1.2v}{5v} = -\frac{1.2k\Omega}{R_1}$$

$$0.24 * R_1 = 1.2k\Omega$$

$$R_1 = \frac{1.2k\Omega}{0.24} = 5k\Omega; \text{ con valor comercial de } 5.1k\Omega$$

Figura 22. Circuito inversor

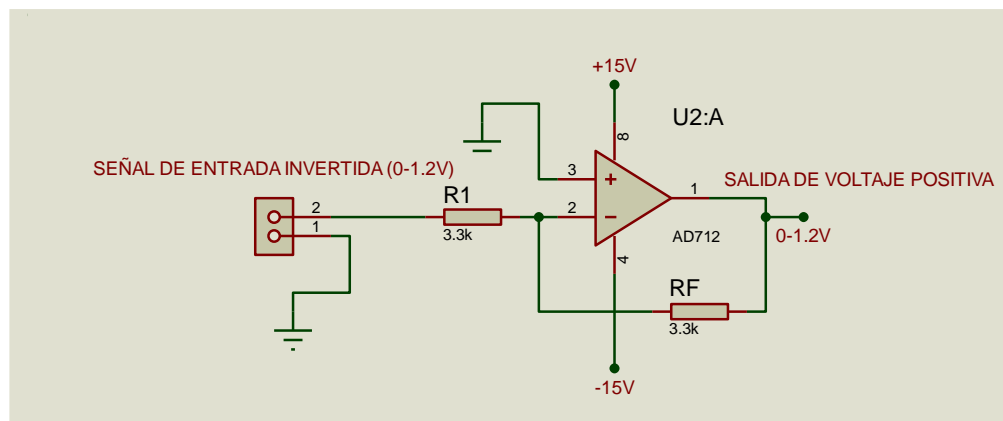


Fuente: Autores (Proteus)

⁵² Disponible en la web: <http://www.ti.com/sc/bb2>

Utilizando la misma ecuación 1 se hace nuevamente un circuito inversor con ganancia unitaria con el fin de lograr convertir las tensiones negativas que provienen del primer inversor utilizado para reducir los niveles de tensión entregados por el RCV420, se utiliza nuevamente el AD712 ya que posee dos amplificadores operacionales dentro del mismo encapsulado, este circuito se muestra en la figura 22.

Figura 22. Circuito inversor

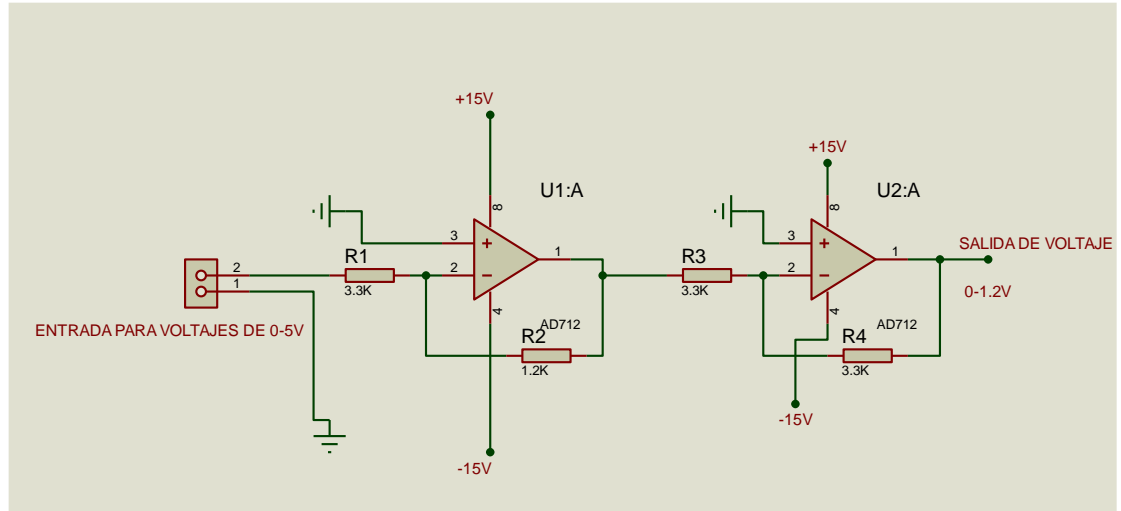


Fuente: Autores (Proteus)

3.2.3 Entrada analógica en niveles de tensión 0-5V. En cuanto a los sensores cuyas salidas están provistas para entregar niveles de tensión de 0-5V se diseñan dos circuitos que cumplan las características propuestas para la adquisición de datos. Como primera medida, se hace uso del mismo integrado AD712 para la reducción e inversión de la señal ya descrita, es decir con la ganancia menor a la unidad; con respecto al inversor de ganancia unitaria, se eligen los resistores con valor comercial como se muestra en la figura 23, se resalta que la tarjeta es multifuncional es decir con la posibilidad de seleccionar cualquiera de las dos entradas descritas; el circuito completo del prototipo se muestra en la figura 24.

$$G = -\frac{1.2v}{1.2v} = -\frac{3.3k\Omega}{3.3k\Omega} = 1$$

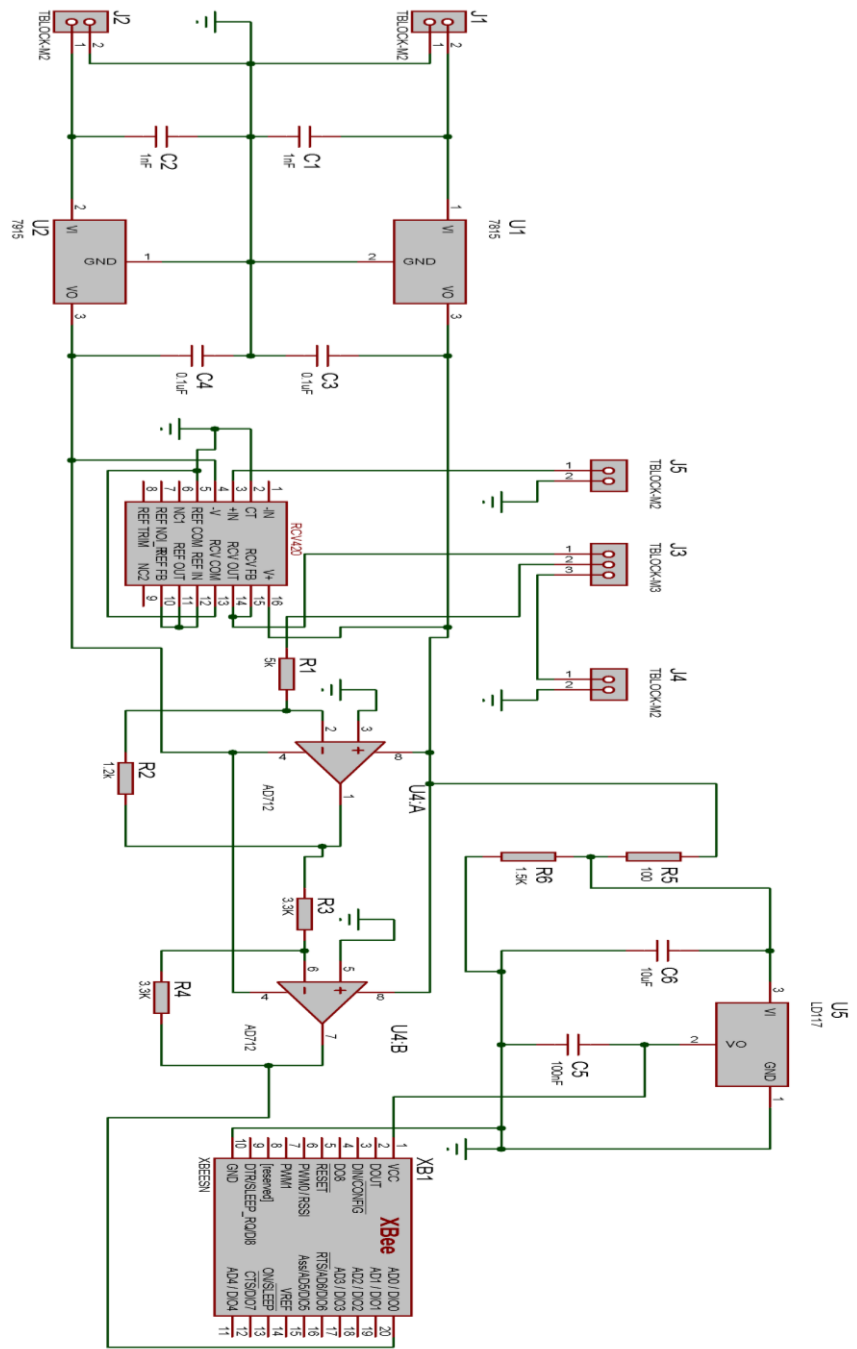
Figura 23. Circuito adaptador 0-5v



Fuente: Autores (Proteus)

3.2.4 Circuitos de Alimentación. Ésta etapa del proyecto describe de manera general los circuitos, y la forma de garantizar el constante flujo de energía que se le debe suministrar al prototipo para su funcionamiento; como fuente principal de dicho prototipo, se hace uso de una alternativa nueva que se viene utilizando alrededor del mundo; este tipo de energía será proporcionada por paneles solares garantizados a 24 Voltios, ya que este valor es el más utilizado para energizar los sensores de tipo industrial, para los dispositivos que no soportan los 24 Voltios se diseña e implementan fuentes adaptadas como se muestran en la figura 24

Figura 24. Circuito del prototipo



Fuente: Autores (Proteus)

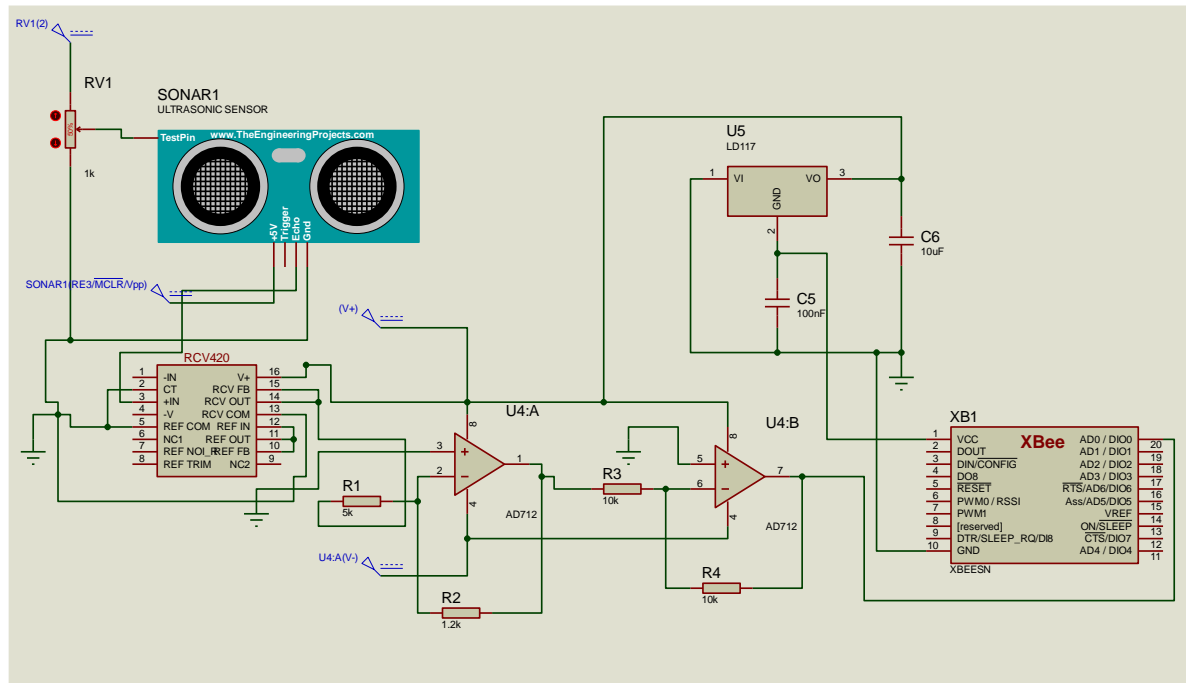
3.2.5 Sensores. Para la implementación del prototipo se utilizan 5 sensores los cuales se describen a continuación; 2 de ellos cuentan con salida tipo Hart y tres con salidas estándar 0-5V.

3.2.5.1 Características de los sensores. Sensor de nivel: este sensor de tipo ultrasonido y de referencia UB1000-18GM75-I-V15 de la marca PEPPERL+FUCHS con las siguientes características básicas⁵³.

- Voltaje de alimentación: 10...24VDC
- Rango de detección 70 ... 1000mm
- Retardo de respuesta: aprox. 125 ms
- Tipo de salida: 4...20mA

En la siguiente figura se establecen las conexiones necesarias de dicho sensor como parte integrada de la tarjeta principal mostrada en la figura 24.

Figura 25. Circuito para el sensor de nivel



Fuente: Autores (Proteus)

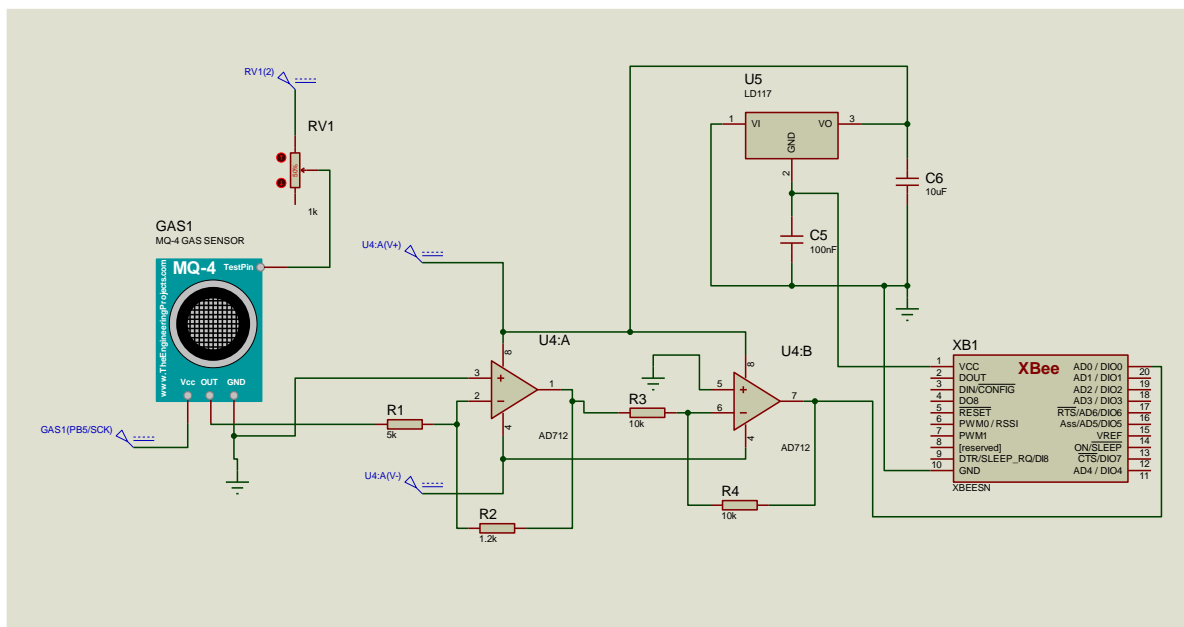
Cabe resaltar que el diagrama para el sensor de nivel, hace uso del convertidor de 4-20 mA a 0-5V (RCV)

⁵³ Disponible en la web: http://files.pepperl-fuchs.com/selector_files/navi/productInfo/edb/204535_spa.pdf

Sensor de gas: para esta variable en específico, se selecciona un sensor cuya función dentro del sistema es la de detectar las partes por millón (Ppm) de un gas que esté siendo generado durante la perforación, para la clasificación y tipo de gas se hace uso de un cromatógrafo que por su costo no hace parte de este proyecto; el sensor utilizado es el MQ4 cuyas características se citan a continuación⁵⁴.

- Voltaje de alimentación: 5VDC
- Tipo de salida análoga en niveles de tensión
- Rango de detección 200-10000ppm
- Temperatura de operación -20°C~70°C

Figura 26. Circuito para el sensor de gas



Fuente: Autores (Proteus)

En la figura 26 se puede visualizar de manera detallada las conexiones necesarias para la adquisición y procesamiento de los datos provenientes del sensor de gas, cuya salida no hace uso del convertidor de corriente a voltaje RCV420

Sensor de presión: es un sensor de presión de membrana de la firma ABB Instrumentación, de la serie 420T transmisor electrónico de presión de dos hilos; es el utilizado para medir en este caso el peso de la sarta, esta medición se hará de

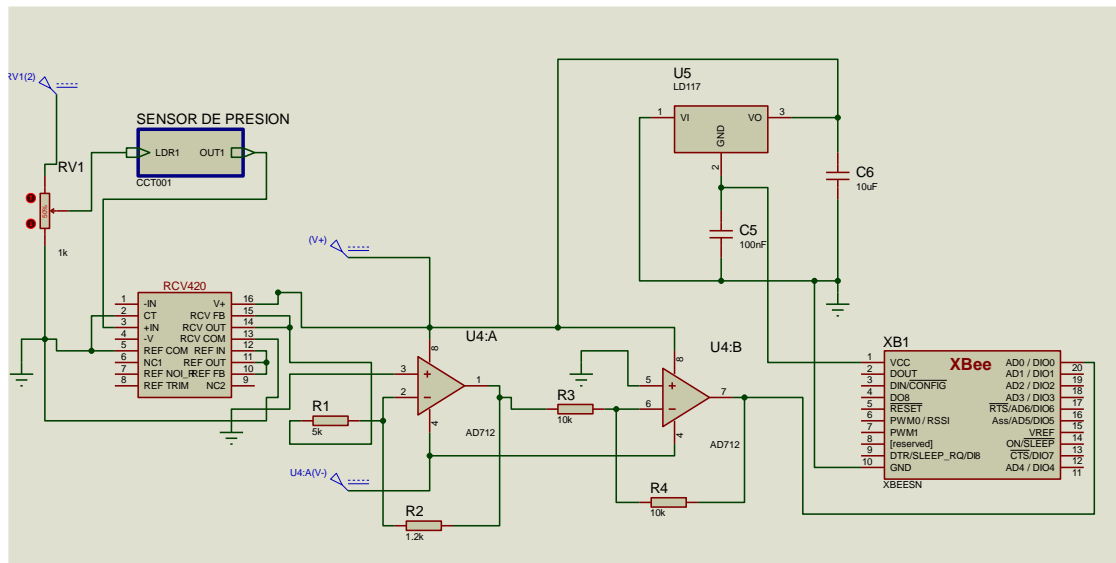
⁵⁴ Disponible en la web: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-4.pdf>

forma indirecta con una relación dada en la ecuación 2; las características básicas de este sensor se muestran a continuación.

- Voltaje de alimentación: 24VDC
- Span ajustable de 0 -160 psi
- Salida Hart: 4-20mA, lineal y proporcional a la presión de entrada
- Utiliza un sensor capacitivo de cerámica cerrado herméticamente

Como se había mencionado anteriormente la variable del peso de la sarta se medirá de forma indirecta usando la salida 4-20mA provista por un sensor de presión; es decir, para este caso se usará el RCV420 con el fin de realizar la conversión de corriente a voltaje; dichas conexiones se muestran a continuación.

Figura 27. Circuito para el sensor de presión (profundidad)



Fuente: Autores (Proteus)

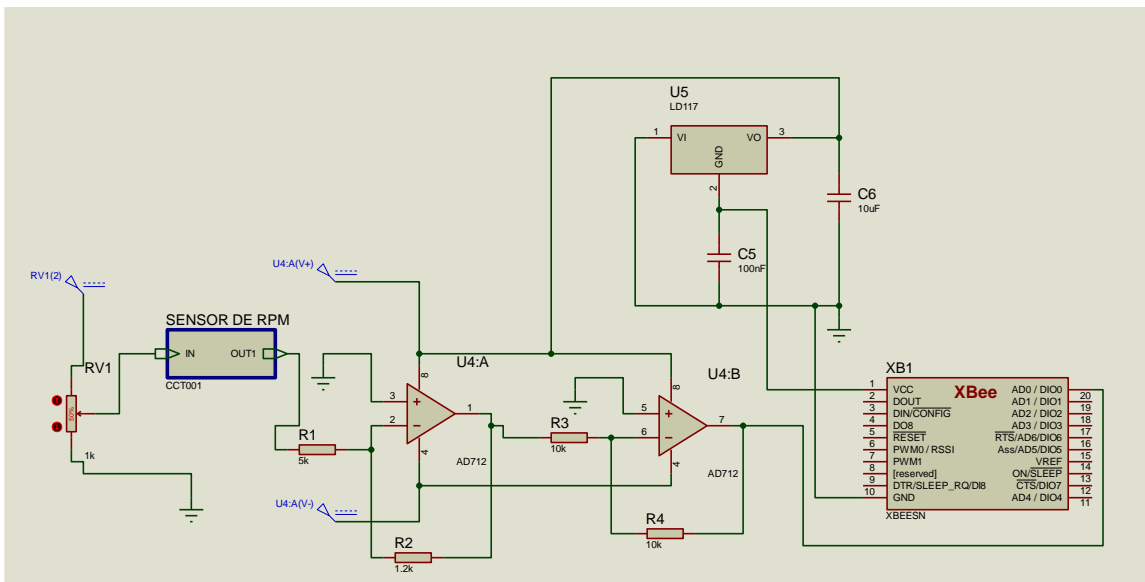
Sensor óptico: los sensores ópticos, en este caso los tipos Sharp son ideales para utilizarse como contadores de eventos ya que a partir de su interferencia en el haz de luz generan una señal que puede ser utilizada para tal fin; es decir es un sensor medidor de distancias por infrarrojos que indica mediante una salida analógica la distancia medida. La tensión de salida varía de forma no lineal cuando se detecta un objeto en una distancia entre 10 y 80 cm. La salida está disponible de forma continua y su valor es actualizado cada 32 ms. La referencia de dicho sensor y sus características se describen a continuación:

- ✓ Referencia: GP2Y0A21YK0F
- ✓ Rango de detección: 10 a 80 cm

- ✓ Tipo de salida: analógica
- ✓ Dimensiones: 29.5x13x13.5mm
- ✓ Consumo de corriente. 30 mA típico
- ✓ Voltaje de alimentación: 4.5 a 5.5 Voltios

Tanto para emular los golpes de la bomba y la profundidad de la broca, se hace uso de un sensor con salida de 0-5V (es decir sin necesidad de la conversión de corriente a voltaje) de tipo infrarrojo, sus conexiones se pueden ver en la figura 28.

Figura 28. Circuito para el sensor de (RPM)



Fuente: Autores (Proteus)

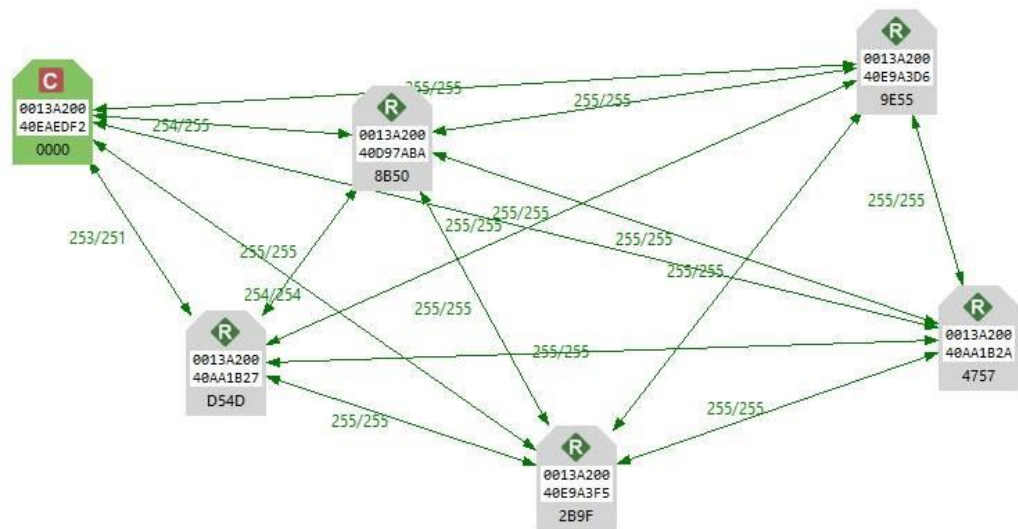
La utilidad del sensor para el desarrollo del proyecto está designada para la variable “golpes de la bomba” en la cual a través de pulsos generados por dicho sensor se va haciendo un conteo constante de los cambios representados en niveles de tensión; este conteo es necesario para determinar las revoluciones por minuto (RPM) a las cuales está trabajando la bomba utilizada para la inyección de lodo; que posteriormente se llevara a medidas de caudal; siendo esta la que realmente se determinada a través de dichas RPM

El sensor óptico anteriormente descrito también será utilizado para sensar la variable “profundidad de la broca” ya que mediante un contador se hará que cada vez que se haga el conteo la distancia a la que baje la broca irá cambiando de manera proporcional acercándose a los valores típicos en un proceso de perforación.

3.2.6 Diseño de la red Mesh. Para la fase de diseño es de vital importancia evaluar los distintos dispositivos que sirviendo a la tecnología ZigBee cumplen con los requerimientos del proyecto, en este caso; cobertura, coste, rendimiento y facilidad de acceso.

Como se había mencionado anteriormente los módulos Xbee S2 son los ideales para las necesidades requeridas en nuestro proyecto, la red poseerá un dispositivo coordinador y 5 dispositivos finales como se muestra en la figura 29. La configuración y programación de los dispositivos se muestra a continuación.

Figura 29. Red Mesh



Fuente: Autores

3.2.6.1 Configuración de los Módulos Xbee S2. Xbee como coordinador: al ser la parte central que conforma la red, este debe conocer las direcciones MAC de cada uno de los dispositivos a los cuales debe conectarse para formar el enlace; esa configuración se da bajo las condiciones y parámetros que se introducen al dispositivo mediante el software XCTU; se usan parámetros de trama API para realizar un mejor encapsulamiento de los datos; en las siguientes figuras se describe el proceso de configuración del dispositivo coordinador.

En la primera pestaña ID PAN ID se realiza la configuración general para la identificación de la red; este PAN ID será el mismo para todos los dispositivos de la red ya que es el identificador general de la red (20101). Los demás parámetros que en la figura 29 se muestran, son los genéricos para la red que se desea implementar;

para la figura 30 el ítem modificado señala única y exclusivamente el nombre identificador del coordinador en la red.

Figura 30. Xbee Como coordinador

Product family: XB24-ZB **Function set:** ZigBee Coordinator API **Firmware version:** 21A7

▼ **Networking**
Change networking settings

i	ID PAN ID	20101		
i	SC Scan Channels	FFFF	Bitfield	
i	SD Scan Duration	3	exponent	
i	ZS ZigBee Stack Profile	0		
i	NJ Node Join Time	FF	x 1 sec	
i	OP Operating PAN ID	20101		
i	OI Operating 16-bit PAN ID	32DB		
i	CH Operating Channel	17		
i	NC Number of Re...ing Children	A		

Fuente: Autores

Figura 31. Identificación Del Nodo

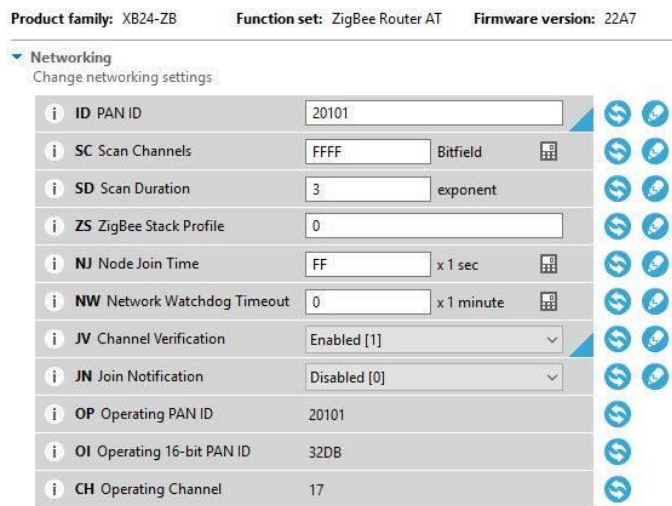
▼ **Addressing**
Change addressing settings

i	SH Serial Number High	13A200		
i	SL Serial Number Low	40EAEDF2		
i	MY 16-bit Network Address	0		
i	DH Destination Address High	0		
i	DL Destination Address Low	FFFF		
i	NI Node Identifier	COORDINADOR		
i	NH Maximum Hops	1E		
i	BH Broadcast Radius	0		
i	AR Many-to-One ...oadcast Time	FF	x 10 sec	
i	DD Device Type Identifier	30000		
i	NT Node Discovery Backoff	3C	x 100 ms	
i	NO Node Discovery Options	0		

Fuente: Autores

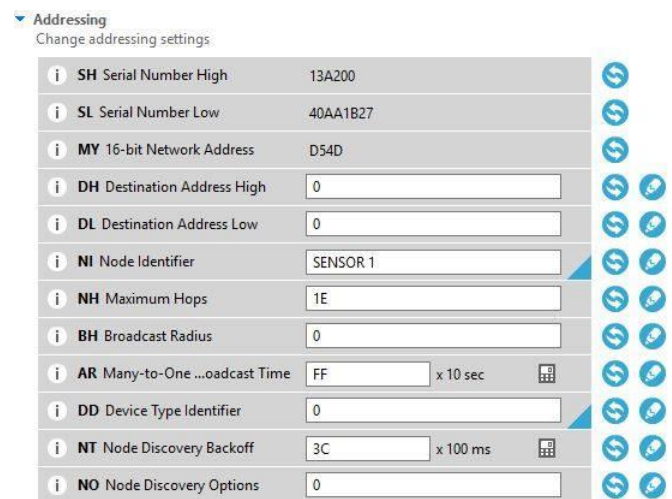
Xbee como dispositivo final (Router): la forma de configuración se da bajo las mismas consideraciones que ofrece el software XCTU; cada uno de estos dispositivos se configuran con los parámetros de los que depende cada variable (sensor) medida, tales como; periodo de muestreo, selección del canal ADC necesario y la dirección de red PAN ID ya que es la identificación general del sistema; las configuraciones necesarias se describen a continuación en las siguientes figuras, el proceso para cada sensor es el mismo; considerando únicamente la diferencia en los tiempos de muestreo de cada variable y las direcciones MAC reconocibles para el coordinador.

Figura 32. Xbee, Router, PAN ID



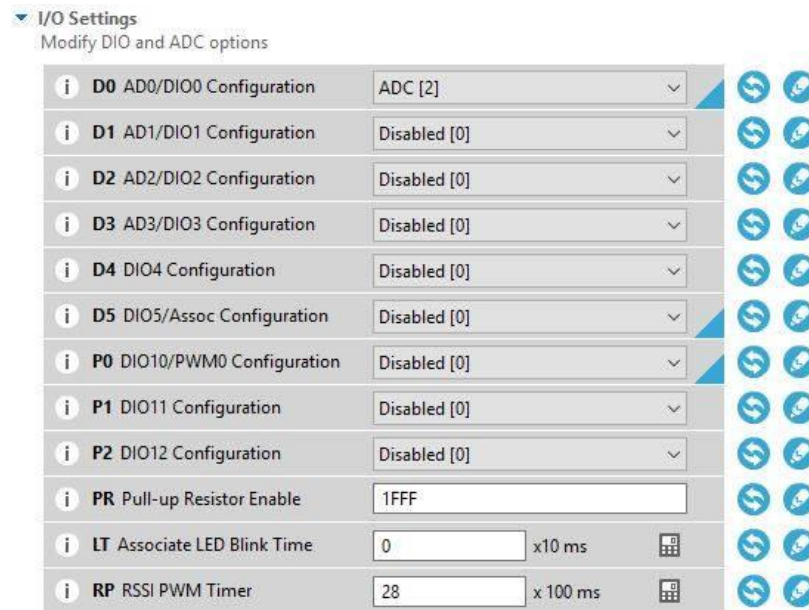
Fuente: Autores

Figura 33. Identificación Del Nodo Sensor



Fuente: Autores

Figura 34. Identificación Del Canal ADC

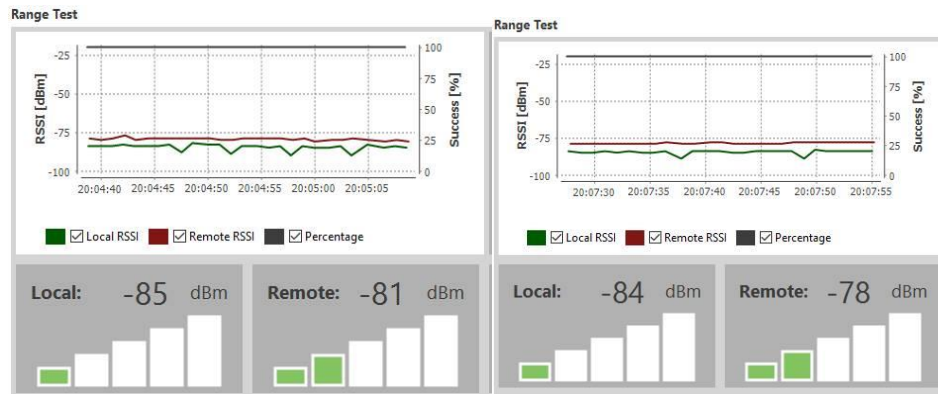


Fuente: Autores

3.2.6.2 Identificación de las funcionalidades de la red. Dentro de las funciones de la red en este proyecto y como se habían mencionado en apartes anteriores, se puede establecer la característica de auto regeneración de la misma, ya que si uno de los nodos por alguna razón deja de funcionar esta es capaz de seguir transmitiendo y buscando las posibles fallas; además que cumple con la condición de conexiones redundantes para corregir este tipo de errores y hacer una transmisión más efectiva.

Dicha relación se puede observar en la figura 35. Donde la intensidad de la señal recibida y transmitida desde el coordinador hasta uno de los nodos se mantiene en niveles óptimos para que la red funcione.

Figura 35. Niveles de potencia de la señal transmitida.



Fuente: Autores

3.2.7 Protección del prototipo. De acuerdo a uno de los objetivos del proyecto y siguiendo las normas y directivas que en su conjunto forman los estándares IS; la protección del prototipo se basa en las siguientes consideraciones y parámetros que se muestran en la figura 36.

- ✓ Cl. I, Div. 1 & 2, Groups B*, C, D
- ✓ Cl. II, Div. 1, Groups E, F, G
- ✓ Cl. II, Div. 2, Groups F, G
- ✓ Cl. III
- ✓ NEMA 3, 4, 7CD, 9EFG

Es de resaltar que, por los costos de cada una de las cajas de protección, para el proyecto se hace uso de la muestra de una de ellas, pues las características para las demás son en esencia las mismas.

Figura 36. Protección del prototipo



Fuente: Autores

3.2.8 identificación de la trama de datos. Para una mejor comprensión de lo que ocurre a nivel de software con cada una de las variables monitoreadas con el prototipo anteriormente descrito; en la siguiente sintaxis de código se aprecia un ejemplo de cómo se reciben, se procesan y se visualizan los datos a través de su interfaz; es decir la manera en que el programa por medio de la identificación de las direcciones MAC y de las tramas (paquetes de datos) que son enviadas por cada Xbee, convierte estos datos en valores que pueden ser interpretados por el usuario.

```
api_responses = {b"\x92":
    {'name':'rx_io_data_long_addr', #Identificador de la trama recibida
    'structure':
        [{'name':'source_addr_long','len':8}, #Dirección MAC del XBEE
que envía la señal y la que usamos para hacer la discriminación de la información
recibida por el coordinador de parte de todos los XBEE usados para sensor (8 bytes)
        {'name':'source_addr', 'len':2}, #Dirección corta del XBEE que
envía la señal (2 bytes)
        {'name':'options', 'len':1}, #Comando API que se envía al
dispositivo AT (1 byte)
        {'name':'samples', 'len':None}], #Diccionario en el cual va la
información (El ADC que está siendo usado y el respectivo valor que está leyendo
ese ADC) enviada por el XBEE que está en el sensor
    'parsing': [('samples', lambda xbee,original:
xbee._parse_samples(original['samples']))]},
```

Ejemplo de trama recibida por el coordinador de parte de uno de los Xbee:

```
{'options': b'\x01', 'source_addr': b'\xd8P', 'source_addr_long':
b'\x00\x13\xa2\x00@\xd9z\xba', 'samples': [{'adc-0': 570}], 'id':
'rx_io_data_long_addr'}
```

Estructura del código utilizado para discriminar e identificar la dirección MAC en cada Xbee:

```

ser = serial.Serial('COM3', 9600) #Se inicia la conexión serial
xbee = ZigBee(ser) #Se carga la librería para la lectura de datos del XBEE

while True:
    # Wait for response

    response = xbee.wait_read_frame() #Se espera a que el coordinador reciba una
trama enviada por alguno de los 5 XBEE puestos a sensar las variables. Dicha trama
viene en forma de vector.

    src = response['source_addr_long'] #Se busca la dirección MAC del XBEE que
envió la trama por medio del identificador 'source_addr_long'

    if src == b'\x00\x13\xa2\x00@\xaa\x1b*': #Una vez discriminada la dirección MAC
se procede a extraer la información del ADC

        adc0 = response['samples'][0]['adc-0'] #Se extrae el valor de lectura que hizo
el adc del XBEE que envió esa trama

```


4. RESULTADOS

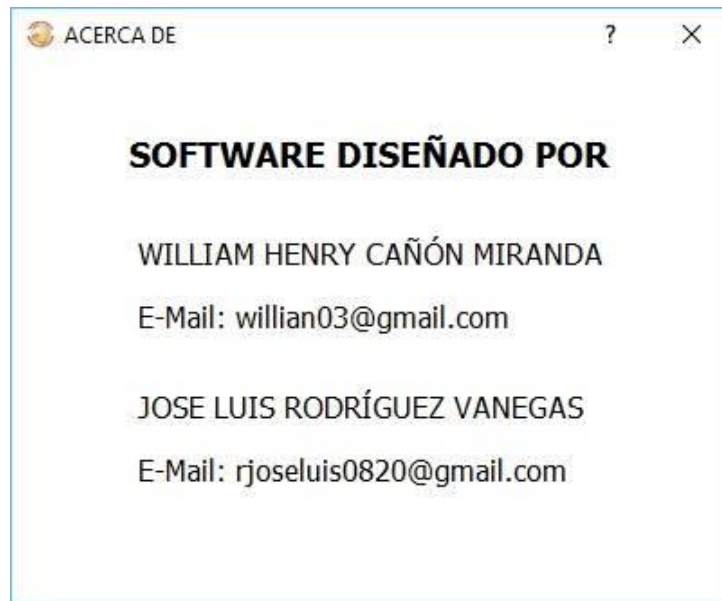
4.1 Interfaz gráfica. La interfaz para el propósito descrito, se diseña bajo un lenguaje de programación abierto (Open Source) denominado Python, el cual permite una interacción muy acorde y funcional con los módulos de transmisión inalámbrica Xbee; la interfaz cuenta con dos vistas iniciales y su ventana principal tal como se muestra en la figura 37, 38 y 39 respectivamente.

Figura 37. Ventana de inicio de la interfaz



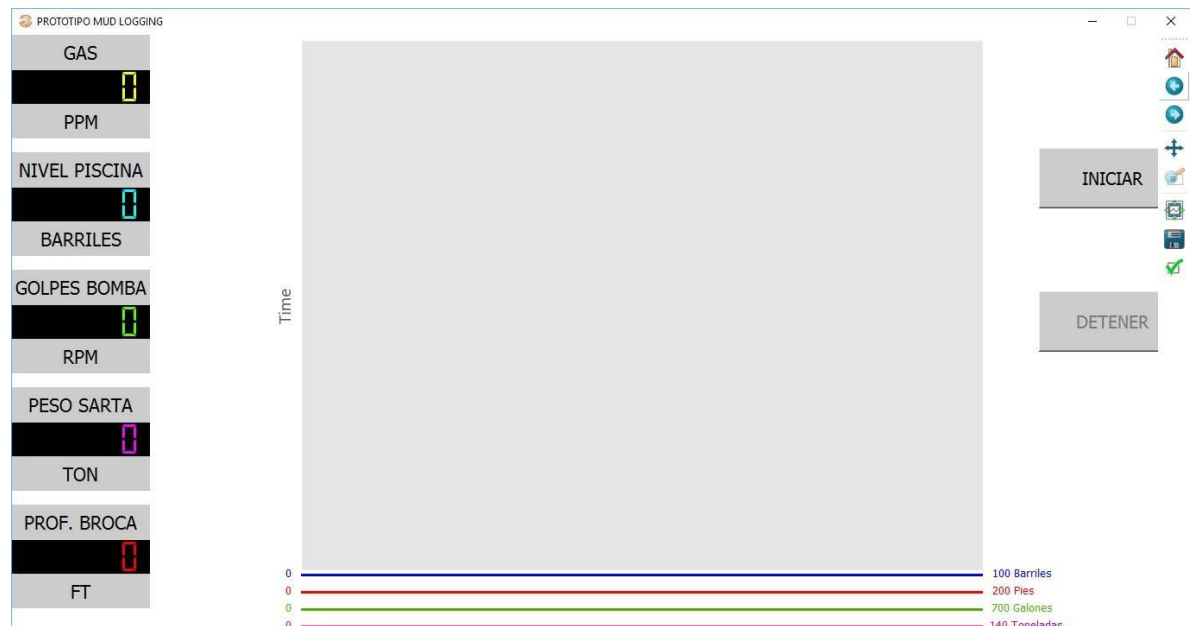
Fuente: Autores

Figura 38. Información de la interfaz



Fuente: Autores

Figura 39. Vista principal de la interfaz gráfica

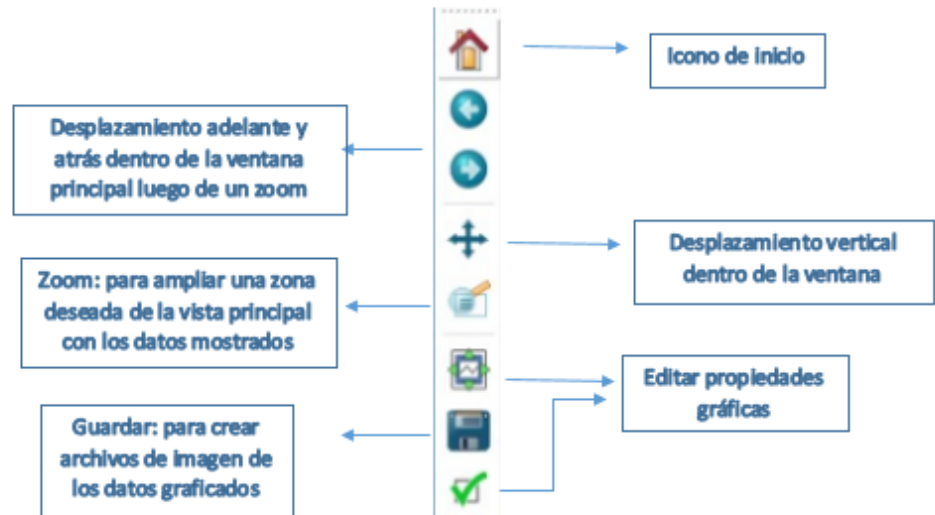


Fuente: Autores

Se buscó que dicha interfaz sea amigable a cualquier tipo de usuario, en las 3 vistas que posee

- Primera vista: Es donde el usuario tiene la posibilidad acceder a la vista principal y a la información de la misma mediante las opciones que esta muestra (figura 37)
- Segunda vista: Es donde se observa la información de los desarrolladores de la interfaz (figura 38)
- Vista principal: Es la vista más importante de la interfaz en su aspecto más general, pues es donde se visualizan los datos que son monitoreados en el proceso de Mud Logging en tiempo real (figura 38); esta a su vez cuenta con una barra de herramientas (figura 39); Donde cada icono cumple una función determinada.

Figura 40. Barra de herramientas

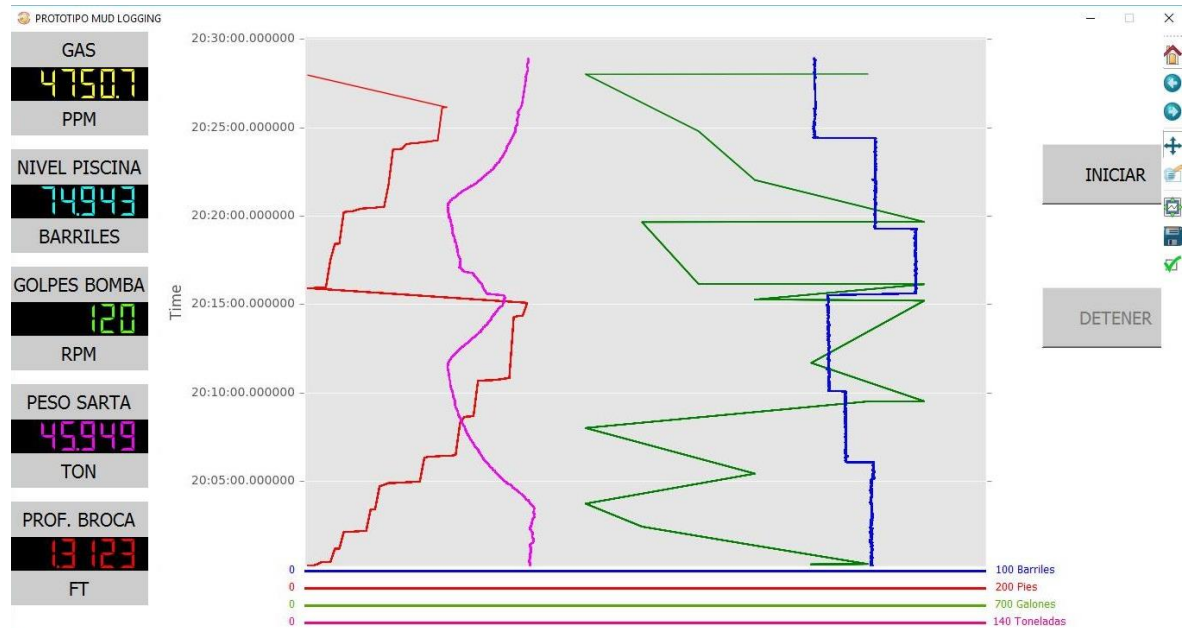


Fuente: Autores

4.2. Monitoreo del proceso. Tal como se aprecia en la figura 40, se monitorean las 5 variables escogidas para la realización del proyecto y mencionadas anteriormente, se emula la perforación de un pozo petrolero durante 30 minutos, aquí se grafican

4 de las 5 variables, ya que para la variable gas en este caso, se mostrará si hay o no la presencia del mismo, esto debido a que la identificación del tipo de gas la realiza un instrumento específico para eso y que por costo no se incluye en este proyecto (cromatógrafo).

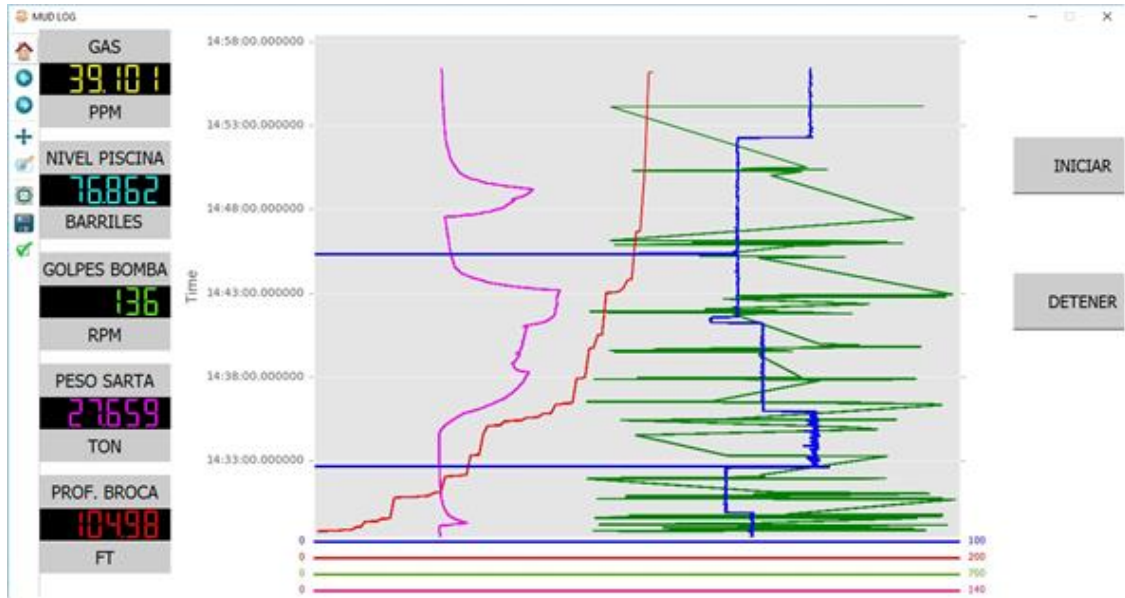
Figura 41. Prueba 1: Emulación del proceso de perforación



Fuente: Autores

En la figura que se muestra a continuación se hace una comparación por un tiempo diferente en la emulación de un proceso de perforación, con el fin de apreciar el comportamiento de las variables en cuestión, más exactamente en la variable rpm; pues al ser modificado en tiempo de respuesta del contador implementado se aprecia una respuesta más inestable del caudal que se está midiendo.

Figura 42. Prueba 2: emulación del proceso de perforación



Fuente: Autores

4.3. Base de Datos Virtual. Adicional a la interfaz gráfica para la visualización de la información adquirida, se crea una base de datos, para esto se utiliza un sistema de gestión de bases de datos relacional de acceso libre y el más popular a nivel mundial (MySQL), esta base de datos se podrá visualizar bajo el mismo lenguaje de programación utilizado para la interfaz (Python) ya que permite una relación ideal para el almacenamiento de todos los datos; estos valores son organizados en tablas independientes, es decir una por cada variable monitoreada; los campos mostrados en cada tabla vienen descritos como se aprecia en la figura 43.

Figura 43. Base de datos virtual.

```
MySQL 5.7 Command Line Client
affiliates. Other names may be trademarks of their respective
owners.

Type 'help;' or '\h' for help. Type '\c' to clear the current input statement.

mysql> show databases;
+-----+
| Database |
+-----+
| information_schema |
| mysql |
| variables |
+-----+
3 rows in set (0.00 sec)

mysql> use variables;
Database changed
mysql> show tables;
+-----+
| Tables_in_variables |
+-----+
| gas |
| golpes |
| nivel |
| peso |
| profundidad |
+-----+
5 rows in set (0.00 sec)

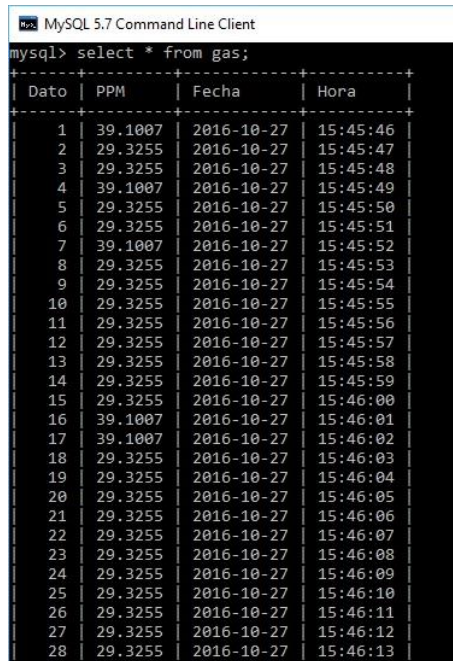
mysql> describe peso;
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| Field | Type | Null | Key | Default | Extra |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| Dato | int(10) unsigned | NO | PRI | NULL | auto_increment |
| TON | float | YES | | NULL | |
| Fecha | date | YES | | NULL | |
| Hora | time | YES | | NULL | |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
4 rows in set (0.02 sec)

mysql> _
```

Fuente: Autores

En la primera tabla descrita en la figura 43, se muestra el recuadro de acceso a la información de la base de datos, posterior a ello (segunda tabla), podemos observar las variables que están involucradas en el proceso. El recuadro o tabla siguiente muestra los parámetros generales de una de las variables escogidas, para este ejemplo, el peso de la sarta; la tabla almacenará en sus respectivas columnas el valor medido en toneladas, la fecha y la hora en que se toma dicho dato; para una mejor comprensión a continuación se toman las variables ya mencionadas durante la emulación del proceso de perforación, tal como aparece las figuras 44, 45, 46, 47 y 48.

Figura 44. Variable 1. Gas

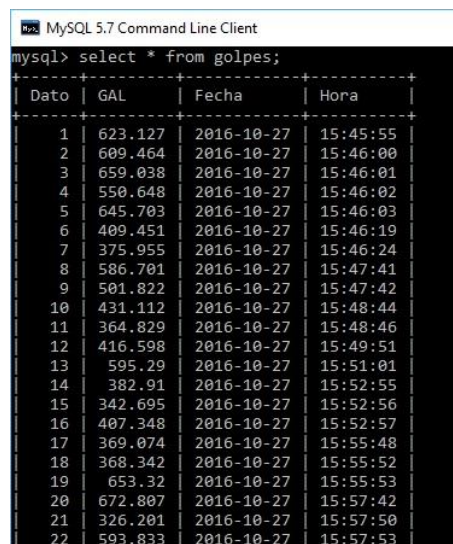


```
mysql> select * from gas;
```

Dato	PPM	Fecha	Hora
1	39.1007	2016-10-27	15:45:46
2	29.3255	2016-10-27	15:45:47
3	29.3255	2016-10-27	15:45:48
4	39.1007	2016-10-27	15:45:49
5	29.3255	2016-10-27	15:45:50
6	29.3255	2016-10-27	15:45:51
7	39.1007	2016-10-27	15:45:52
8	29.3255	2016-10-27	15:45:53
9	29.3255	2016-10-27	15:45:54
10	29.3255	2016-10-27	15:45:55
11	29.3255	2016-10-27	15:45:56
12	29.3255	2016-10-27	15:45:57
13	29.3255	2016-10-27	15:45:58
14	29.3255	2016-10-27	15:45:59
15	29.3255	2016-10-27	15:46:00
16	39.1007	2016-10-27	15:46:01
17	39.1007	2016-10-27	15:46:02
18	29.3255	2016-10-27	15:46:03
19	29.3255	2016-10-27	15:46:04
20	29.3255	2016-10-27	15:46:05
21	29.3255	2016-10-27	15:46:06
22	29.3255	2016-10-27	15:46:07
23	29.3255	2016-10-27	15:46:08
24	29.3255	2016-10-27	15:46:09
25	29.3255	2016-10-27	15:46:10
26	29.3255	2016-10-27	15:46:11
27	29.3255	2016-10-27	15:46:12
28	29.3255	2016-10-27	15:46:13

Fuente: Autores

Figura 45. Variable 2. Golpes de la bomba



```
mysql> select * from golpes;
```

Dato	GAL	Fecha	Hora
1	623.127	2016-10-27	15:45:55
2	609.464	2016-10-27	15:46:00
3	659.038	2016-10-27	15:46:01
4	550.648	2016-10-27	15:46:02
5	645.703	2016-10-27	15:46:03
6	409.451	2016-10-27	15:46:19
7	375.955	2016-10-27	15:46:24
8	586.701	2016-10-27	15:47:41
9	501.822	2016-10-27	15:47:42
10	431.112	2016-10-27	15:48:44
11	364.829	2016-10-27	15:48:46
12	416.598	2016-10-27	15:49:51
13	595.29	2016-10-27	15:51:01
14	382.91	2016-10-27	15:52:55
15	342.695	2016-10-27	15:52:56
16	407.348	2016-10-27	15:52:57
17	369.074	2016-10-27	15:55:48
18	368.342	2016-10-27	15:55:52
19	653.32	2016-10-27	15:55:53
20	672.807	2016-10-27	15:57:42
21	326.201	2016-10-27	15:57:50
22	593.833	2016-10-27	15:57:53

Fuente: Autores

Figura 46. Variable 3 Nivel de las piscinas

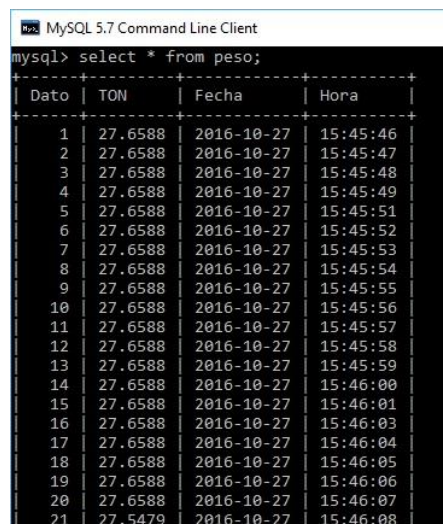


```
mysql> select * from nivel;
```

Dato	BRL	Fecha	Hora
1	66.2108	2016-10-27	15:45:46
2	66.4027	2016-10-27	15:45:47
3	66.3068	2016-10-27	15:45:48
4	66.4027	2016-10-27	15:45:48
5	66.2108	2016-10-27	15:45:49
6	66.4987	2016-10-27	15:45:50
7	66.3068	2016-10-27	15:45:51
8	66.2108	2016-10-27	15:45:52
9	66.2108	2016-10-27	15:45:52
10	66.2108	2016-10-27	15:45:53
11	66.3068	2016-10-27	15:45:54
12	66.3068	2016-10-27	15:45:55
13	66.3068	2016-10-27	15:45:56
14	66.3068	2016-10-27	15:45:56
15	66.4027	2016-10-27	15:45:57
16	66.4027	2016-10-27	15:45:58
17	66.2108	2016-10-27	15:45:59
18	66.4027	2016-10-27	15:46:00
19	66.4987	2016-10-27	15:46:00
20	66.4027	2016-10-27	15:46:01
21	66.2108	2016-10-27	15:46:02
22	66.2108	2016-10-27	15:46:03
23	65.827	2016-10-27	15:46:04

Fuente: Autores

Figura 47. Variable 4, peso de la sarta de perforación

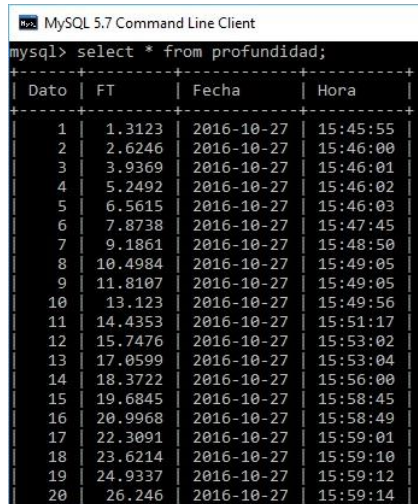


```
mysql> select * from peso;
```

Dato	TON	Fecha	Hora
1	27.6588	2016-10-27	15:45:46
2	27.6588	2016-10-27	15:45:47
3	27.6588	2016-10-27	15:45:48
4	27.6588	2016-10-27	15:45:49
5	27.6588	2016-10-27	15:45:51
6	27.6588	2016-10-27	15:45:52
7	27.6588	2016-10-27	15:45:53
8	27.6588	2016-10-27	15:45:54
9	27.6588	2016-10-27	15:45:55
10	27.6588	2016-10-27	15:45:56
11	27.6588	2016-10-27	15:45:57
12	27.6588	2016-10-27	15:45:58
13	27.6588	2016-10-27	15:45:59
14	27.6588	2016-10-27	15:46:00
15	27.6588	2016-10-27	15:46:01
16	27.6588	2016-10-27	15:46:03
17	27.6588	2016-10-27	15:46:04
18	27.6588	2016-10-27	15:46:05
19	27.6588	2016-10-27	15:46:06
20	27.6588	2016-10-27	15:46:07
21	27.5479	2016-10-27	15:46:08

Fuente: Autores

Figura 48. Variable 5, Profundidad de la broca



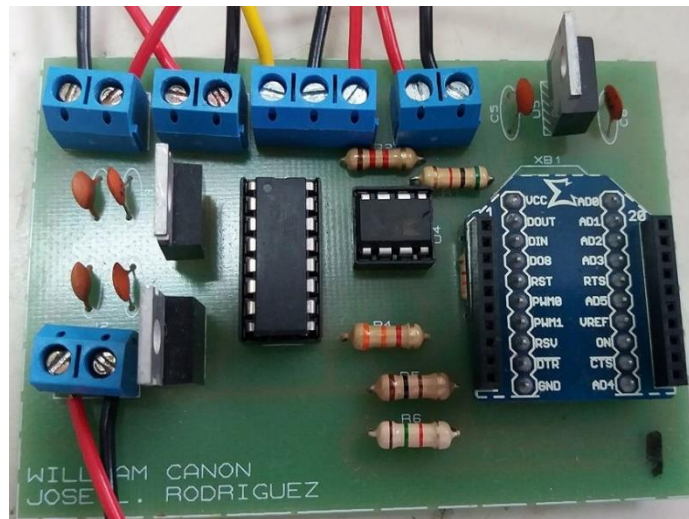
```
mysql> select * from profundidad;
```

Dato	FT	Fecha	Hora
1	1.3123	2016-10-27	15:45:55
2	2.6246	2016-10-27	15:46:00
3	3.9369	2016-10-27	15:46:01
4	5.2492	2016-10-27	15:46:02
5	6.5615	2016-10-27	15:46:03
6	7.8738	2016-10-27	15:47:45
7	9.1861	2016-10-27	15:48:50
8	10.4984	2016-10-27	15:49:05
9	11.8107	2016-10-27	15:49:05
10	13.123	2016-10-27	15:49:56
11	14.4353	2016-10-27	15:51:17
12	15.7476	2016-10-27	15:53:02
13	17.0599	2016-10-27	15:53:04
14	18.3722	2016-10-27	15:56:00
15	19.6845	2016-10-27	15:58:45
16	20.9968	2016-10-27	15:58:49
17	22.3091	2016-10-27	15:59:01
18	23.6214	2016-10-27	15:59:10
19	24.9337	2016-10-27	15:59:12
20	26.246	2016-10-27	15:59:14

Fuente: Autores

4.4. Estructura física del prototipo. Como se había mencionado anteriormente, el prototipo cuenta con 5 módulos (tarjetas), cuya función es la de establecer las conexiones necesarias para el envío de los datos a través de la red, a la vez que hace la adquisición de los mismos; cabe destacar que cada uno de las tarjetas trabaja de manera independiente, y distribuida en el espacio provisto para cada sensor como se muestra en la figura 49.

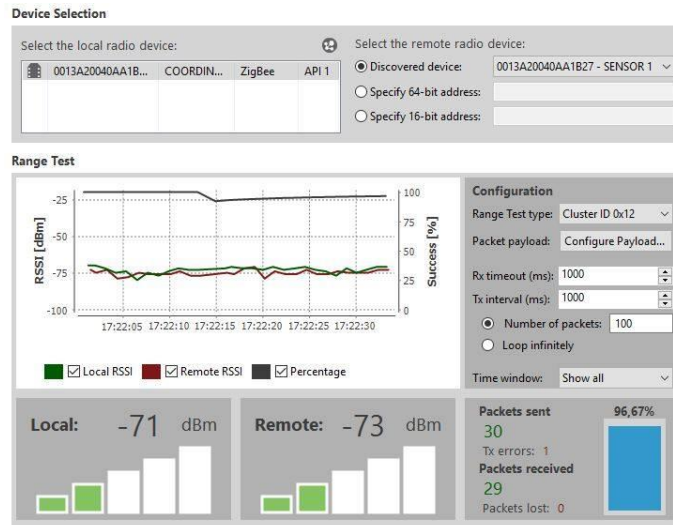
Figura 49. Hardware del prototipo



Fuente: Autores

4.5 Prueba de conexión del sistema. En las siguientes figuras se puede observar el comportamiento que posee la red en cuanto a conexión.

Figura 50. Nivel de conexión entre el sensor 1 y el coordinador de la red



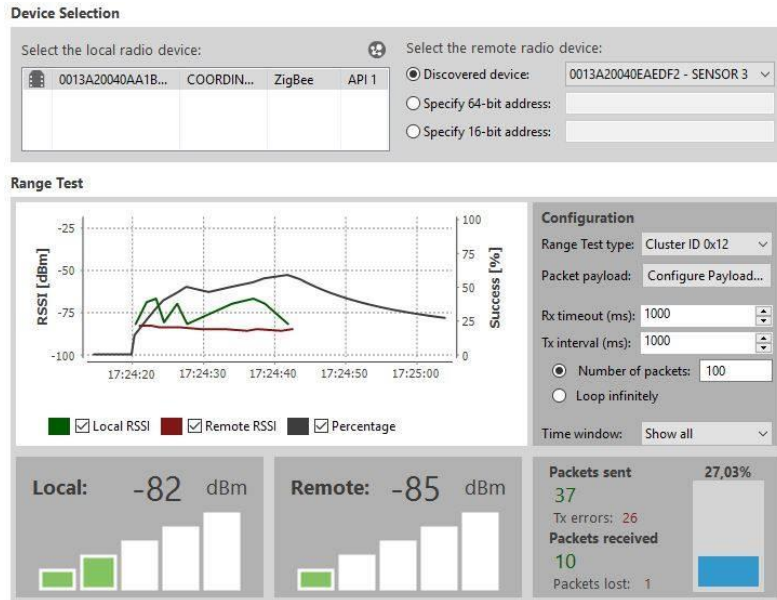
Fuente: Autores

Figura 51. Nivel de conexión entre el sensor 2 y el coordinador de la red



Fuente: Autores

Figura 52. Nivel de conexión entre el sensor 3 y el coordinador de la red



Fuente: Autores

Es de resaltar que la prueba de conexión se efectúa en el momento en que se emula el proceso de perforación visualizado en la figura 39; donde se aprecia que a pesar de que el dispositivo conectado al sensor 3, aunque no tenga un nivel de conexión aceptable entre el coordinador, el dato es enviado al módulo principal mediante la creación automática de una red redundante, es decir el frame o trama es enviado a cualquiera de los otros dispositivos de la red que se encuentran configurados como Router, los cuales se encargaran de llevar al coordinador el dato que en ese momento es requerido por el sistema.

5. CONCLUSIONES

A la hora de conocer el comportamiento que se tiene dentro de un proceso de tipo industrial, es de vital importancia conocer las diferentes características que poseen los dispositivos involucrados en el proceso de sensado de las variables; para garantizar así el óptimo funcionamiento del sistema.

La protección con la que cuenta el dispositivo se acerca a los estándares básicos para que este opere en ambientes considerados como explosivos; haciéndolo versátil y con capacidad de ser implementado en un ambiente de tipo industrial bajo las consideraciones pertinentes.

Gracias al gran avance que se ha tenido en los distintos lenguajes de programación, más exactamente Python, se logra crear una interfaz amigable y fácil de usar, capaz de mostrar al operador el comportamiento en tiempo real del proceso de Mud Logging y conocer de primera mano el comportamiento en cuanto a productividad y seguridad del pozo.

Al aprovechar de manera eficiente el microcontrolador que posee el mismo módulo de adquisición de datos (Xbee S2) hace que el prototipo diseñado sea a la vez más eficiente en cuanto al proceso de muestreo de la señal, pues no es necesario pasar por un microcontrolador externo que adicione retardos a la señal

El uso de estándares abiertos de comunicación es la base para el desarrollo de proyectos tipo educativos, económicos y rentables, pues abren un sinnúmero de posibilidades para diferentes áreas de aplicación como se pudo observar al momento de la creación de redes WSN de tipo industrial.

El prototipo fue diseñado para que la comunicación entre el nodo central (coordinador) y los dispositivos finales o Router se efectuara con una distancia de hasta 120 m con línea de vista entre los dispositivos y 40 m si se encuentran obstáculos entre la propagación de la señal.

6. RECOMENDACIONES

Para una mejor integración de todo el sistema junto con los actuales sistemas de comunicaciones; se puede implementar el prototipo para que trabaje en línea con el usuario, es decir crear una plataforma de fácil acceso a través de la red.

El dispositivo en algunos aspectos a nivel estructural de red, puede mejorarse para que los datos procesados y adquiridos puedan visualizarse a través de una aplicación móvil

Es recomendable utilizar sensores que sean más robustos en cuanto a su aplicación.

Es recomendable, ya que se hicieron pruebas de laboratorio, que el prototipo sea validado en campo.

Formar una red más compleja, donde se puedan monitorear otros parámetros involucrados en el proceso de perforación.

BIBLIOGRAFÍA

- Aakvaag, N., Frey J.E.,2006. Redes de Sensores Inalámbricos, Nuevas soluciones de Interconexión Para la Automatización Industrial. Revista ABB, Vol. 2, pp.1-4.
- Avilés, J.F., 2010. Desarrollo de un Sistema de Adquisición de Datos LAN (Zigbee) con Interfaz WAN (GPRS/EDGE). Universidad Simón Bolívar .114p
- Almansa, J.J.,2013. Desarrollo e Implementación Utilizando Arduino y Zigbee con un Sensor Ultrasónico Para Control de Nivel de Llenado. 109p
- Barneda, I., 2008. Zigbee Aplicado A La Transmisión de Datos de Sensores Biomédicos. Universidad Autónoma de Barcelona. 106p
- Becerra, E. A., 2010. Diseño e Implementación de una Red Zigbee Mediante Módulos Xbee-z Para el monitoreo de Sensores de Temperatura. Universidad Pontificia Bolivariana. 137p
- Cázarez, G., López, C., López, A., Morales, J., Montoya, A., Catillo, H. y Fonseca, J. 2011. Diseño de Un Prototipo Didáctico Para la Implementación de Redes de Sensores Inalámbricos Basados en el Protocolo Zigbee. Ra Ximhai, Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable, México. Vol. 7, pp 315-324
- Chaparro, M., 2011. Red Inalámbrica de Fibra Óptica de Plástico con Tecnología Zigbee. Universidad Carlos III de Madrid. 179p
- Dignani, J., 2011. Análisis del Protocolo Zigbee. Universidad Nacional de La Plata. 42p
- Digi International Inc. 1996-2016. Consultado el 30 de marzo de 2016. <http://www.digi.com/lp/xbee>
- Franconi, N.G., Bunger, P.A., Sejdić, E. y Mickle, M. H., 2014. Wireless Communication in Oil and Gas Wells, vol. 2, 996-1005pp
- Girod, A., 2012. Desarrollo e Implementación de una Red de Sensores Zigbee Mediante el Dispositivo Xbee de Digi. Escuela Técnica Superior De Ingeniería. 103p
- Herrera. J., Barrios, M. y Pérez, S., 2014. Diseño e Implementación de Un Sistema Scada Inalámbrico Mediante La Tecnología Zigbee y Arduino. Universidad Autónoma del Caribe. Pospect. Vol. 12, pp 65-72
- Lennvall, T., Svensson, S. y Hekland, F., 2008. A Comparison of WirelessHART and ZigBee for Industrial Applications. Journal IEEE, pp 85-88.

- Liang, N.C., Chen, P.C., Sun, T., Yang, G., Chen, L.J. y Gerla., M., 2014. Impact of Node Heterogeneity in ZigBee Mesh Network Routing. Computer Science Department, University of California, Los Ángeles. pp 1-5
- López, D. y Gala, S. 2012. Red Inalámbrica para Instrumentación de Procesos. Universidad Politécnica de Catalunya, Vol. 1, 254p
- Mateus, T., Pardo, C.E. y Rodríguez, M. F., 2011. Sistema de Monitoreo y Control Remoto con Acceso Inalámbrico Bidireccional a Procesos Industriales. Revista Colombiana de tecnología Avanzada. vol. 1, pp 56-61
- Meng, K., Cao, Q., 2015. Research and Realization of HART Protocol Based on Wireless Short Range Network Technology, 2nd International Conference on Electrical, Computer Engineering and Electronics (ICECEE 2015). Xi'an Shiyou University, China. Pp 517-522
- Moreno, P.C., 2009. Construcción de Una Red Zigbee Prototipo Para la Adquisición de Datos desde Transmisores de corriente de Dos Hilos. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. 65pp
- Muñoz, R., 2011. Interconexión de Redes de Sensores Inalámbricos 802.15.4 en Localizaciones Remotas. Universidad Carlos III de Madrid. 97p
- Navarro, J., 2013. Control Inalámbrico Basado en Redes Inalámbricas de Sensores Mediante Módulos Xbee. 198p
- Pan, Q., Wu, J., Wang, Y. y Ni, J., 2011. An Implementation Method for ZigBee Network Layer. Int. J. Communications, Network and System Sciences, China. Vol. 4, pp 626-629
- Paz, J.S., 2008. Diseño y Construcción de Un Módulo Transmisor Receptor Inalámbrico Para el Manejo de Sensores Con el Protocolo Estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee). Universidad Tecnológica de la Mixteca .116p
- Peñaloza, P.A., 2008, Metodología Para El Diseño Del Sistema De Monitoreo Aplicado Al Campo Petrolero La Cira-Infantas, Colombia. 56p
- Python Software Foundation, 2011. Consultado el 14 de marzo de 2016. <https://www.python.org/downloads/>
- Radmand, P., Talevski, A., Petersen, S. y Carlsen, S., 2010, Comparison of Industrial WSN Standards. 4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies. pp 632-637

- Rohitha, P., Ranjeet, P.K., Adinarayana, N. y Narayana, V., 2012. Wireless Networking Through ZigBee Technology. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, Vol. 2, pp 50-54
- Sala, F.J., 2014, Redes Wireless industriales. Universidad Abierta de Catalunya. 81pp
- Soto, F. y López., J., 2013. Control Inalámbrico Basado en Redes Inalámbricas de Sensores Mediante Módulos Xbee. Universidad Politécnica de Cartagena. 198p
- Suarez, J. C., 2013. Diseño y Construcción de un Sistema de Monitoreo Para Invernaderos Apoyado con Tecnología Zigbee. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Colombia. 131p
- Velasco, G. J., 2013. Evaluación y Selección de Alternativas de Comunicación de Transmisión Inalámbrica Para Los Campos de Producción Petrolera en Ecopetrol. Universidad Javeriana. 115p
- Xlaoguang, Bao'an, L. y Huiliang, R., 2015. GW-MLE Mud Logging Equipment. Science & Technology Management Department, CNPC. 30p
- ZigBee Alliance, 2016. consultado el 3 de marzo de 2016. <http://www.zigbee.org/what-is-zigbee/>

ANEXOS

ANEXO A: Algoritmo del sistema

```
import sys, serial, MySQLdb, datetime, matplotlib, random
from xbee import ZigBee
from time import time
from threading import Thread
from PyQt5.QtWidgets import QApplication, QMainWindow, QDialog, QWidget,
QVBoxLayout
from PyQt5 import uic, QtGui
```

```
matplotlib.use("Qt5Agg")
from matplotlib import style
from matplotlib.backends.backend_qt5agg import (FigureCanvasQTAgg as
FigureCanvas,
NavigationToolbar2QT as NaviToolbar)
from matplotlib.figure import Figure
```

```
style.use('ggplot')
```

```
class MyMplCanvas(FigureCanvas):
    def __init__(self, parent=None, width=3.125, height=6.916666667, dpi=100):
        fig = Figure(figsize=(width, height), dpi=dpi)
        fig.subplots_adjust(top=0.99, left=0.16, right=0.95, bottom=0)
        self.axes = fig.add_subplot(111)
        self.axes.hold(False)
        self.axes.get_xaxis().set_visible(False)
        self.axes.get_yaxis().set_ticks([])
        self.axes.set_ylabel("Time")
        self.canvas = FigureCanvas(fig)
```

```
class Inicio(QWidget):
    def __init__(self):
        QWidget.__init__(self)
        uic.loadUi("Inicio.ui", self)
        # Imágenes e ícono
        pix_elec = QtGui.QPixmap("Imágenes\electro.jpg")
```

```

pix_usco = QtGui.QPixmap("Imágenes\logusco.jpg")
self.setWindowIcon(QtGui.QIcon("Imágenes\electro.jpg"))
self.ELECTRONICA.setPixmap(pix_elec)
self.USCO.setPixmap(pix_usco)
# Función de los botones
self.Info.clicked.connect(self.AbrirInformacion)
self.Ingresar.clicked.connect(self.AbrirPrincipal)

def AbrirInformacion(self):
    self.informacion = Informacion()
    self.informacion.show()

def AbrirPrincipal(self):
    self.principal = Principal()
    self.principal.show()
    self.close()

class Informacion(QDialog):
    def __init__(self):
        QDialog.__init__(self)
        uic.loadUi("Acerca de.ui", self)
        self.setWindowIcon(QtGui.QIcon("Imágenes\electro.jpg"))

class Principal(QMainWindow):
    def __init__(self):
        QMainWindow.__init__(self)
        uic.loadUi("Principal.ui", self)
        self.setWindowIcon(QtGui.QIcon("Imágenes\electro.jpg"))
        # Función de los botones
        self.START.clicked.connect(self.Thread)
        self.STOP.setEnabled(False)
        self.STOP.clicked.connect(self.Stop)

        # Zona de plot

        self.GRP = QVBoxLayout(self.GRAPH)
        self.GRPCanv = MyMplCanvas(self.GRAPH, width=3.125,
height=6.916666667, dpi=100)
        self.GRP.addWidget(self.GRPCanv.canvas)
        self.GRP.setContentsMargins(0, 0, 0, 0)

```

```
self.toolbar = NaviToolBar(self.GRPCanv.canvas, self, coordinates=False)
self.addToolBar(self.toolbar)
```

```
# Vectores de variables para graficar
```

```
self.data_tprof = []
self.data_tpeso = []
self.data_tcaudal = []
self.data_tnivel = []
self.data_caudal = []
self.data_prof = []
self.data_nivel = []
self.data_peso = []
```

```
def Start(self):
```

```
self.STOP.setEnabled(True)
# Inicia comunicación serial y conecta base de datos
ser = serial.Serial('COM3', 9600)
xbee = ZigBee(ser)
Database = MySQLdb.connect("127.0.0.1", "root", "20101", "Variables")
cursor = Database.cursor()
vueltas = 0
```

```
a = datetime.datetime.now()
```

```
while Run == True:
```

```
response = xbee.wait_read_frame()
src = response['source_addr_long']
count = 0
start = time()
```

```
def get_xbee_data():
```

```
response = xbee.wait_read_frame()
actual = response['samples'][0]['dio-0']
src = response['source_addr_long']
return actual, src
```

```
if src == b"\x00\x13\xa2\x00@\xaa\x1b": # Nivel de la piscina
adc0 = response['samples'][0]['adc-0']
cm = adc0 * (70 / 1023) # El tanque es de 70 cm de altura
barril = (cm * 0.392662) * (3.5714) # Máximo 100 barriles
# Datos de fecha y hora
now = datetime.datetime.now()
```

```

hour = now.strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
fecha = now.date()
hora = now.time()
self.NIVEL.display(barril)
# Almacena los datos en la tabla Nivel de la base de datos
data = "INSERT INTO Nivel (BRL,Fecha,Hora) VALUES
('%s','%s','%s')" % (barril, fecha, hora)
cursor.execute(data)
Database.commit()

b = a + datetime.timedelta(0, 1800)

self.data_nivel.append(barril * 7)
self.data_tnivel.append(now.strftime(hour, "%Y-%m-%d %H:%M:%S"))
self.GRPCanv.axes.plot(self.data_nivel, self.data_tnivel, color='blue')
self.GRPCanv.axes.hold(True)
self.GRPCanv.axes.get_xaxis().set_visible(False)
self.GRPCanv.axes.set_ylabel("Time")
self.GRPCanv.axes.set_ylim([a, b])
self.GRPCanv.canvas.draw()

elif src == b'\x00\x13\xa2\x00@\xd9z\xba': # Peso de la sarta
adc0 = response['samples'][0]['adc-0']
psi = adc0 * (1574.963625 / 1023) # Presion ejercida por la sarta para
calcular el peso
tnft = (psi * 0.072) + 22.670619 # Máximo 140 toneladas
# Datos de fecha y hora
now = datetime.datetime.now()
hour = now.strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
fecha = now.date()
hora = now.time()

self.PESO.display(tnft)
# Almacena los datos en la tabla Peso de la base de datos
data = "INSERT INTO Peso (TON,Fecha,Hora) VALUES
('%s','%s','%s')" % (tnft, fecha, hora)
cursor.execute(data)
Database.commit()

self.data_peso.append(tnft * 5)
self.data_tpeso.append(now.strftime(hour, "%Y-%m-%d %H:%M:%S"))
self.GRPCanv.axes.plot(self.data_peso, self.data_tpeso,

```

```

color='magenta')
    self.GRPCanv.axes.hold(True)
    self.GRPCanv.canvas.draw()

elif src == b'\x00\x13\xa2\x00@\xea\xed\xf2': # Profundidad de la broca
    # Datos de fecha y hora
    now = datetime.datetime.now()
    hour = now.strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
    fecha = now.date()
    hora = now.time()

    adc0 = response['samples'][0]['adc-0']

    if adc0 >= 201:
        vueltas += 1
        pies = vueltas * 1.3123 # Máximo de 4800 pies/dia
        self.PROF.display(pies)
        data = "INSERT INTO Profundidad (FT,Fecha,Hora) VALUES
('%s','%s','%s')" % (
            pies, fecha, hora)
        cursor.execute(data)
        Database.commit()
        #####
        self.data_prof.append(pies * 3.5)
        self.data_tprof.append(now.strptime(hour, "%Y-%m-%d
%H:%M:%S"))
        self.GRPCanv.axes.plot(self.data_prof, self.data_tprof, color='red')
        self.GRPCanv.axes.hold(True)
        self.GRPCanv.canvas.draw()

elif src == b'\x00\x13\xa2\x00@\xe9\xa3\xd6': # Gas
    adc0 = response['samples'][0]['adc-0']
    ppm = (adc0 * (10000 / 1023)) # Gas detectado
    # Datos de fecha y hora
    now = datetime.datetime.now()
    fecha = now.date()
    hora = now.time()

    self.GAS.display(ppm)
    # Almacena los datos en la tabla Gas de la base de datos
    data = "INSERT INTO Gas (PPM,Fecha,Hora) VALUES
('%s','%s','%s')" % (ppm, fecha, hora)

```

```

cursor.execute(data)
Database.commit()

elif src == b'\x00\x13\xa2\x00@\xe9\xa3\xf5': # Golpes de la bomba

    # Datos de fecha y hora
    now = datetime.datetime.now()
    hour = now.strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
    fecha = now.date()
    hora = now.time()

    while time() - start < 2:

        adc0 = response['samples'][0]['adc-0']

        if adc0:

            r, crc = get_xbee_data()
            if crc == b'\x00\x13\xa2\x00@\xe9\xa3\xf5':
                if adc0 != r:
                    count += 1
                    adc0, src = get_xbee_data()
                else:
                    break

            if (count != 0):
                rpm = count * 30
                kx = 1115.172414
                caudal = (rpm * kx) / 231 # Máximo 700 gal/min
                self.GOLPES.display(int(rpm))
                # Almacena los datos en la tabla Golpes de la base de datos
                data = "INSERT INTO Golpes (GAL,Fecha,Hora) VALUES
                ('%s','%s','%s')" % (caudal, fecha, hora)
                cursor.execute(data)
                Database.commit()

                self.data_caudal.append(caudal)
                self.data_tcaudal.append(now.strptime(hour, "%Y-%m-%d
                %H:%M:%S"))
                self.GRPCanv.axes.plot(self.data_caudal, self.data_tcaudal,
                color='green')
                self.GRPCanv.axes.hold(True)
                self.GRPCanv.canvas.draw()

```

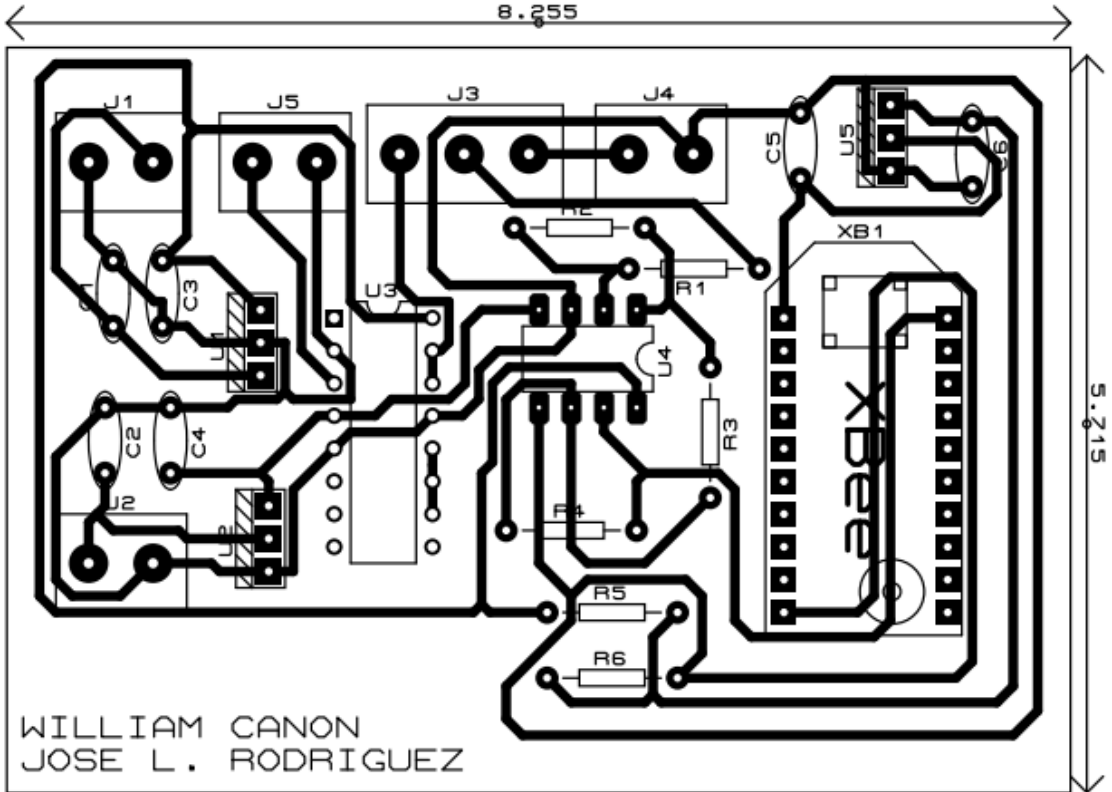
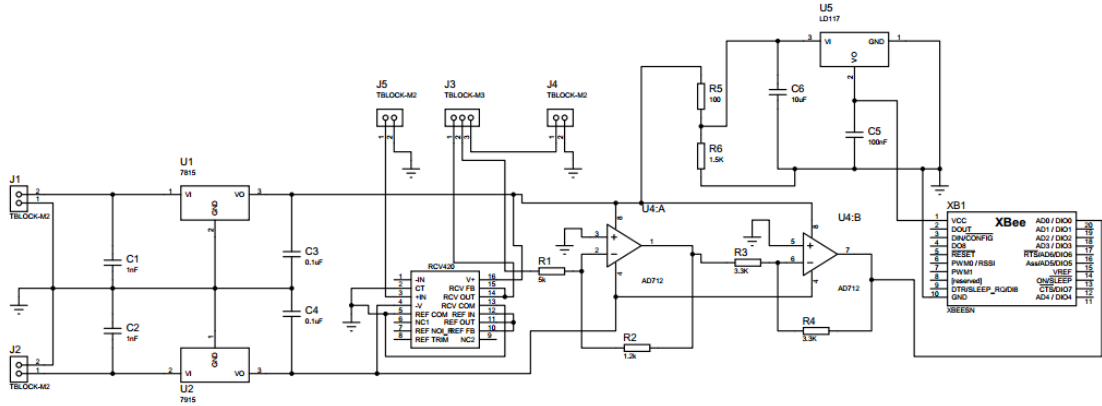
```
while Run == False:  
    self.GAS.display(0)  
    self.NIVEL.display(0)  
    self.GOLPES.display(0)  
    self.PESO.display(0)  
    self.PROF.display(0)  
    ser.close()  
    sys.exit(App.exec_())
```

```
def Stop(self):  
    self.STOP.setEnabled(False)  
    global Run  
    Run = False
```

```
def Thread(self):  
    global Run  
    Run = True  
    Begin = Thread(target=self.Start)  
    Begin.daemon = True  
    Begin.start()
```

```
if __name__ == '__main__':  
    App = QApplication(sys.argv)  
    window = Inicio()  
    window.show()  
    sys.exit(App.exec_())
```

ANEXO B. Circuito del prototipo



ANEXO C. Comandos para el ingreso a la base de datos

show databases; ----> Muestra la lista de la base de datos

create database [x]; ----> Crea una base de datos con nombre [X]

drop database [x]; ----> Borra la base de datos con nombre [X]

use [x]; ----> Se "ingresa" o se hace uso de la base de datos con nombre [X]

show tables; ----> Muestra la lista de tablas almacenadas en la base de datos

describe [x]; ----> Describe la tabla con nombre [x]

insert into [x](columnas tabla) values (datos a añadir); ----> Añade datos en la tabla [X]

select * from [x] ----> Muestra todo el contenido de la tabla [X]

#####

create table Golpes (Dato int(10) unsigned auto_increment primary key, GAL float, Fecha date, Hora time);














create table Nivel (Dato int(10) unsigned auto_increment primary key, BRL float, Fecha date, Hora time);

create table Gas (Dato int(10) unsigned auto_increment primary key, PPM float, Fecha date, Hora time);

create table Peso (Dato int(10) unsigned auto_increment primary key, TON float, Fecha date, Hora time);

create table Profundidad (Dato int(10) unsigned auto_increment primary key, FT float, Fecha date, Hora time);

ANEXO D. Plugins utilizados en Python

-  cycler-0.10.0
-  matplotlib-1.5.1
-  numpy-1.11.1rc1
-  pyparsing-2.1.5
-  python-dateutil-2.5.3
-  pytz-2016.4
-  setuptools-23.1.0
-  XBee-2.2.3
-  mysqlclient-1.3.7-cp35-cp35m-win32.whl
-  pycharm-community-2016.1.3
-  PyQt5-5.6-gpl-Py3.5-Qt5.6.0-x32-2
-  pyserial-3.0.1.win32
-  qt-unified-windows-x86-2.0.3-online