

PROYECTO DE GRADO

**EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE COMUNICACIÓN
DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICA PARA LOS CAMPOS DE
PRODUCCIÓN PETROLERA EN ECOPETROL.**

JAIRO VELASCO GRANADOS

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROPUESTA DE TRABAJO DE PROFUNDIZACIÓN**

BOGOTÁ

2013

PROYECTO DE GRADO
EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE COMUNICACIÓN
DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICA PARA LOS CAMPOS DE
PRODUCCIÓN PETROLERA EN ECOPETROL.

JAIRO VELASCO GRANADOS

INFORME FINAL DE PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO
DE
MÁSTER EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DIRECTOR
ING. CARLOS EDUARDO COTRINO BADILLO, M.SC.

ASESOR
ING. IVAN ALEXANDER NUÑEZ PORTELA, M.SC.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROPUESTA DE TRABAJO DE PROFUNDIZACIÓN

BOGOTÁ

2013

TABLA DE CONTENIDO

1.	OBJETIVOS	13
1.1.	OBJETIVO GENERAL	13
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2.	MARCO TEORICO	14
2.1.	RED DE SENSORES DE CAMPO INALÁMBRICA	14
2.2.	ARQUITECTURAS	14
2.3.	POTENCIA.....	15
2.4.	DETERMINISMO	16
2.5.	TRANSMISIÓN EN TIEMPO REAL	16
2.6.	EFFECTOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS	17
2.7.	FRECUENCIA DE 900 MHZ Y 2,4GHZ	20
2.8.	LA ZONA DE FRESNEL	23
2.9.	DESVENTAJAS DE LA RED INALÁMBRICA	24
2.9.1.	ASPECTOS DEL SISTEMA	24
2.10.	VENTAJAS DE LA RED INALÁMBRICA.....	25
2.10.1.	REDUCCIÓN EN TIEMPO Y COSTO DE INSTALACIÓN	27
2.10.2.	REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE CONFIGURACIÓN	28
2.10.3.	MANTENIMIENTO.....	29

2.10.4.	OPERACIÓN.....	29
2.10.5.	MEJORAS EN EL PROCESO	30
2.10.6.	INTEGRACIÓN DE LAS WFN Y SISTEMAS HÍBRIDOS.....	30
2.10.7.	APOYO A LA MOVILIDAD	31
2.10.8.	SEGURIDAD	32
2.11.	TOPOLOGÍAS DE RED	32
2.11.1.	TOPOLOGÍA EN STAR.....	33
2.11.2.	TOPOLOGÍA CLUSTER / TREE	33
2.11.3.	TOPOLOGÍA MESH	33
2.12.	DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA	36
2.13.	TECNOLOGÍAS A SER ANALIZADAS	37
2.13.1.	TECNOLOGÍA SOPORTADA EN EL ESTÁNDAR ISA100.11A.....	38
2.13.2.	TECNOLOGÍA SOPORTADA EN EL ESTÁNDAR WIRELESSHART 42	
2.13.3.	TECNOLOGÍA SOPORTADA EN EL ESTÁNDAR ZIGBEE.....	47
2.13.4.	TECNOLOGÍA ACCUTECH™ WIRELESS INDUSTRIAL.....	51
3.	DESARROLLO.....	53
3.1.	PARÁMETROS DE COMPARACIÓN	53
3.1.1.	FASE: PRESENTACIÓN DE DISEÑO	55
3.1.2.	FASE: MONTAJE.....	55

3.1.3. FASE: CONFIGURACIÓN Y COMISIONAMIENTO DEL SISTEMA .	56
3.1.4. FASE: OPERACIÓN	57
3.1.5. FASE: DESEMPEÑO	61
3.1.6. FASE: MANTENIMIENTO.....	63
3.2. PRUEBAS DE INSTRUMENTACIÓN INALÁMBRICA	64
3.2.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS	66
3.2.2. PUNTOS DE MONITOREO	66
3.2.3. LOCALIZACIÓN DE “GATEWAY”	69
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	71
4.1. COMPARACIÓN DE STACK DE PROTOCOLOS	71
4.2. COMPARACIÓN EN TOPOLOGÍAS.....	74
4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PRUEBA PILOTO	76
4.4. FASE: PRESENTACIÓN DE DISEÑO	76
4.5. FASE: MONTAJE.....	77
4.6. FASE: CONFIGURACIÓN Y COMISIONAMIENTO DEL SISTEMA .	79
4.7. FASE: OPERACIÓN	80
4.8. FASE: DESEMPEÑO	92
4.9. FASE: MANTENIMIENTO.....	98
5. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS	100

5.1.	PLANEACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA.....	100
5.2.	UBICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE LA RED INALÁMBRICA	100
5.3.	CONECTIVIDAD	101
5.4.	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE COMUNICACIÓN	102
5.5.	INSTALACIONES E INTEGRACIÓN DE DATOS EN LA RED INALÁMBRICA.....	104
5.6.	CONSIDERACIONES PARA LA PUESTA EN MARCHA	105
5.7.	ESPECIFICACIONES DE LA RED INALÁMBRICA.....	106
6.	CONCLUSIONES	111
7.	BIBLIOGRAFÍA	114

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ARQUITECTURA COMÚN DE RED INALÁMBRICA DE SENSORES	15
FIGURA 2: RELACIÓN ENTRE LOS CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS EN UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA.....	18
FIGURA 3: LA RELACIÓN ENTRE FRECUENCIA, LONGITUD DE ONDA, AMPLITUD Y PERIODO.....	19
FIGURA 4: DISTINTOS SISTEMAS UTILIZANDO LA BANDA ISM DE 2,40 GHZ.....	20
FIGURA 5: PENETRACIÓN DE OBSTÁCULOS.....	22
FIGURA 6: LA ZONA DE FRESNEL.....	23
FIGURA 7: TOPOLOGÍAS DE RED WFN.....	34
FIGURA 8: EJEMPLO DE UNA RED ISA100.11 ^a TÍPICA	40
FIGURA 9: EJEMPLO DE UNA RED WIRELESSHART TÍPICA	44
FIGURA 10: ESQUEMA DE LA LOCACIÓN ORIENTACIÓN NORTE.....	54
FIGURA 11: ESTACIÓN DE RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO NO 4 DEL CAMPO CASABE.....	65
FIGURA 12: LOCALIZACIÓN FÍSICA DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN EN LA DESCARGA DE LA BOMBA DE LAS PISCINAS API.	66
FIGURA 13: INSTRUMENTOS DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICA INSTALADOS EN LA DESCARGA DE LA BOMBA DE LAS PISCINAS API.	67
FIGURA 14: INSTRUMENTOS DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICA INSTALADOS PARA EL MONITOREO DE TEMPERATURA AMBIENTE.	68

FIGURA 15: INSTRUMENTOS DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICA INSTALADOS EN LA DESCARGA DE LA BOMBA DEL SISTEMA CONTRA INCENDIOS.	69
FIGURA 16: ANTENAS DE “GATEWAY’S” INSTALADOS EN EL CUARTO DE CONTROL.	70
FIGURA 17: CONSUMO DE ENERGÍA EN TRANSMISORES INALÁMBRICOS.	83
FIGURA 18: CONSUMO DE ENERGÍA PROMEDIO DURANTE LA PRUEBA.....	84
FIGURA 19: PRIMER DESPLAZAMIENTO DE INSTRUMENTOS CON EL FIN DE MEDIR LA DISTANCIA DE COMUNICACIÓN.	90
FIGURA 20: SEGUNDO DESPLAZAMIENTO DE INSTRUMENTOS CON EL FIN DE MEDIR LA DISTANCIA DE COMUNICACIÓN.....	91
FIGURA 21: DISTANTICA DE COMUNICACIÓN ENTRE INSTRUMENTOS Y GATEWAY.....	92
FIGURA 22: MÓDULOS DE ALIMENTACIÓN DE SEGURIDAD INTRÍNSECA DE TIPO “HOT-SWAPPABLE”	99
FIGURA 23: POSICIÓN DE ANTENAS.....	106
FIGURA 24: ALTURA DE ANTENAS.	107

LISTA DE TABLAS

TABLA 1: COMPARACIÓN DE TOPOLOGÍAS DE RED INALÁMBRICA...	36
TABLA 2: MODELO OSI.....	38
TABLA 3: MODELO OSI Y MODELO ISA-100.11A.11 ^a	41
TABLA 4: MODELO OSI Y MODELO WIRELESSHART.....	45
TABLA 5: MODELO OSI Y MODELO ZIGBEE.....	50
TABLA 6: COMPARACIÓN TÉCNICA DE PROTOCOLOS.....	75
TABLA 7: TIEMPOS DE INSTALACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA Y UNA RED ALAMBRADA.	79
TABLA 8: RESULTADOS INTEROPERABILIDAD MULTI-FABRICANTE....	82
TABLA 9: TABLA DE CÁLCULO DE VIDA ÚTIL DEL FABRICANTE ZIGBEE (REPORT FREQUENCY 1 SEG)	85
TABLA 10: TABLA DE CÁLCULO DE VIDA ÚTIL DEL FABRICANTE ZIGBEE (REPORT FREQUENCY 3 MIN).	86
TABLA 11: PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DE PROTOCOLOS	104

INTRODUCCION

Ecopetrol S.A. es la empresa más grande del país y la principal compañía petrolera en Colombia. Por su tamaño, Ecopetrol S.A. pertenece al grupo de las 35 petroleras más grandes del mundo y es una de las cuatro principales de Latinoamérica.

Actualmente cuenta con campos de extracción de hidrocarburos en el centro, el sur, el oriente y el norte de Colombia, dos refinerías, puertos para exportación e importación de combustibles y crudos en ambas costas y una red de transporte de 8.124 kilómetros de oleoductos y poliductos a lo largo de toda la geografía nacional, que intercomunican los sistemas de producción con los grandes centros de consumo y los terminales marítimos.

La producción petrolera es la actividad de la industria que se encarga de todas las etapas necesarias para manejar los hidrocarburos (petróleo y gas) desde el yacimiento hasta el pozo.

Los fluidos producidos por el pozo son recibidos en la superficie en un "puente de producción", que constituye el primer punto elemental del control de la misma. Este puente no sólo está equipado con los elementos necesarios para la producción de petróleo, junto con el gas y el agua asociados, sino también para el almacenamiento del petróleo y gas. El almacenamiento constituye un elemento de sumo valor en la explotación de los servicios de hidrocarburos ya que actúa como un pulmón entre producción y/o transporte para absorber las variaciones de consumo.

La necesidad de supervisar y controlar remotamente estas operaciones, así como la integración de gran cantidad de procesos individuales en una única plataforma que permita visualizar y controlar plantas y sistemas completos,

han impulsado el desarrollo de redes de supervisión y control que enlazan los equipos que se encuentran en el campo, con los equipos en los centros de control.

Una de las mejores prácticas en el área de instrumentación de producción petrolera es la optimización de la instalación de instrumentos usados para la adquisición de datos.

La instrumentación inalámbrica (Wireless) industrial plantea otra alternativa para la adquisición de datos en ambientes industriales ofreciendo beneficios en costo y facilidad de instalación con atractivas alternativas a la tradicional instalación de sensores cableados en sitio. Ya que, al no requerir un medio cableado facilitan una rápida instalación e incluso ofrecen la posibilidad de obtener medidas en lugares de difícil acceso, donde las instalaciones cableadas son imposibles.

Sin embargo, estas redes de transmisores inalámbricas tienen restricciones de uso (potencia, ruido, seguridad, cobertura), al igual que aspectos que influyen en el comportamiento en el tiempo y la fiabilidad de la transmisión inalámbrica; por lo que se debe realizar un balance entre los recursos y el comportamiento de la red, según los requerimientos de la aplicación particular.

Al ser una nueva tecnología no se tiene información técnica relevante y debido a que han desarrollado diferentes tecnologías inalámbricas cada una afirma ser la mejor y ofrecer diferentes características que dependiendo de la aplicación pueden ser muy importantes, por lo cual fue de gran beneficio para el desarrollo de este proyecto la ejecución de pruebas piloto con los protocolos o tecnologías que se están empleando para las comunicaciones inalámbricas industriales, tales como ZigBee, Wireless-Hart, ISA100 y

ACCUTECH ® los cuales se probaron simultáneamente en un ambiente de producción petrolera para establecer indicadores de comportamiento y calidad que permitieran medir el desempeño de la instrumentación inalámbrica teniendo en cuenta requerimientos técnicos, de confiabilidad, seguridad y rendimiento.

En este trabajo de grado se examinarán temas relacionados con el diseño y evaluación de los protocolos de transmisión inalámbrica industrial proporcionando una visión general del estado del arte.

Las pruebas realizadas y los resultados obtenidos en este trabajo de grado son totalmente novedosa y sin antecedentes en Ecopetrol, Colombia y son las primeras reportadas a ISA (International Society of Automation) en sur América; representado un gran beneficio para la industria con requerimientos tecnológicos; llevando a esta investigación a servir como una fuente de información y proporcionando una cobertura equilibrada de temas de la aplicación inalámbrica y de sus diferente protocolos.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

- Desarrollar un procedimiento de selección por medio de una metodología que permita evaluar y definir la mejor alternativa de transmisión inalámbrica entre los diferentes protocolos y tecnologías de comunicación existentes, para ser implementados en campos de producción petrolera de Ecopetrol teniendo en cuenta requerimientos técnicos, económicos, de confiabilidad y seguridad.

1.2. Objetivos específicos

- Comparar las características de los diferentes protocolos y tecnologías de transmisión inalámbrica industrial, para definir las diferencias entre ellos y establecer criterios técnicos de selección.
- Establecer los requisitos para las diferentes aplicaciones de monitoreo de variables de proceso que se pueden implementar utilizando tecnologías de comunicaciones inalámbricas.
- Establecer criterios económicos para la comparación de alternativas.
- Validar el procedimiento de selección propuesto en una implementación existente y/o con los resultados obtenidos en una prueba piloto que contemple pruebas del desempeño de instrumentación inalámbrica, utilizando protocolos o tecnologías que se están empleando para las comunicaciones inalámbricas industriales, Acutech® ,ZigBee, Wireless-Hart e ISA100.

2. MARCO TEORICO

2.1. Red de sensores de campo inalámbrica

Una red de sensores de campo inalámbrica WFN (Wireless Field Network) es una red que consiste de dispositivos distribuidos de forma espacial que utilizan sensores para monitorear Variables de Proceso (PV). Estos dispositivos autónomos, o nodos, se combinan con “Routers” y un “Gateway” para crear un sistema WFN típico. Los nodos de medida distribuidos se comunican de manera inalámbrica a un “Gateway” central, el cual proporciona una conexión al entorno cableado donde se puedan adquirir, procesar, analizar y presentar sus datos de medida. Para incrementar la distancia y la fiabilidad en una red de sensores inalámbrica, se pueden usar “Routers” como enlace de comunicación adicional entre los nodos finales y el “Gateway”.

2.2. Arquitecturas

En una arquitectura WFN común, los nodos de medida se diseñan para adquirir variables de proceso (PV) como temperatura, presión, flujo, nivel, posición etc. Estos nodos son parte de una red inalámbrica administrada por el “Gateway”, el cual gobierna los aspectos de la red como autenticación de cliente y seguridad de datos. El “Gateway” recolecta los datos de medida desde cada nodo y los envía por medio de una conexión cableada, generalmente protocolos de comunicación Ethernet ó Modbus, al sistema de control central. Acá el software puede realizar procesamiento y análisis avanzados y presentar sus datos en un formato que cumpla con la necesidad del usuario. (Ver figura 1). [1]

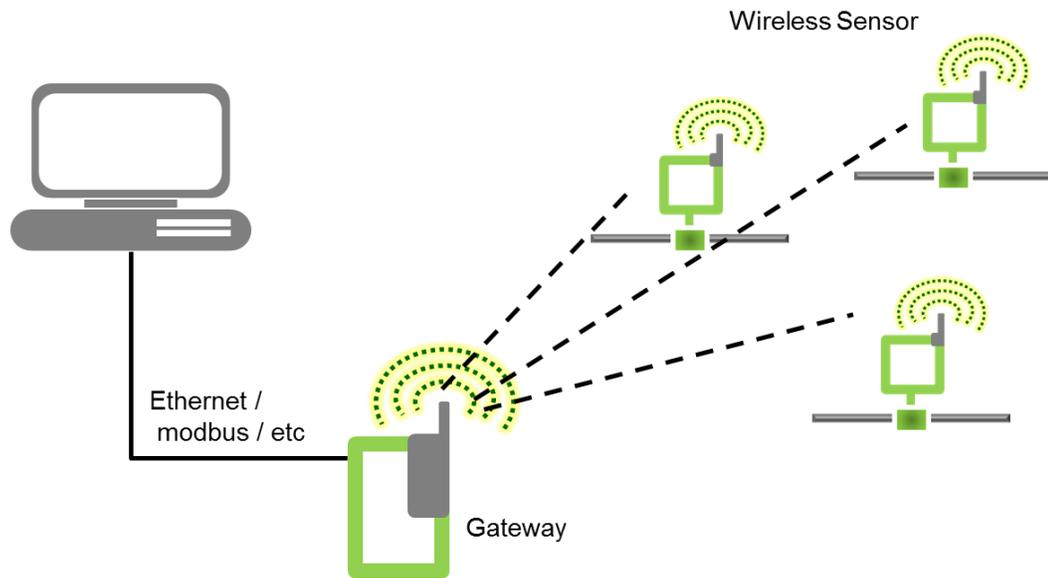


Figura 1: Arquitectura Común de Red Inalámbrica de Sensores

2.3. Potencia

Un nodo de medida WFN contiene varios componentes incluyendo el radio, batería, micro-controlador, circuito analógico e interfaz de sensor. En sistemas energizados por baterías, se deben crear limitantes para optimizar el uso de la energía ya que altas tasas de información de datos y más uso de la comunicación por radio frecuencia consumen más potencia afectando la duración de la batería. [2]

Además de los requerimientos de larga duración, se debe considerar el tipo de encerramiento para aéreas clasificadas, el tamaño, peso y disponibilidad de las baterías, así como las normas internacionales para el transporte y disposición de las mismas. El bajo costo y la amplia disponibilidad de las baterías de zinc-carbono y alcalinas las hace una opción muy común. Las técnicas para recolección de energía también se están volviendo más frecuentes en redes de sensores inalámbricas y generalmente pasan mucho

tiempo en modo 'durmiente' (sleep) de bajo consumo de potencia. Con dispositivos que utilizan celdas solares o que recogen calor del ambiente se puede reducir o hasta eliminar la necesidad de usar baterías. [1]

2.4. Determinismo

El determinismo es un concepto clave en muchas redes industriales, por la sencilla razón de que con una red determinista se puede afirmar sin lugar a dudas que un evento determinado se ha producido en una ventana de tiempo concreta.

2.5. Transmisión en tiempo real

Las aplicaciones de control industrial requieren información en tiempo real. Las siguientes características son importantes para lograr comunicaciones en tiempo real:

- Los mensajes definidos como críticos deben ser transmitidos dentro de un tiempo determinado.
- Debe haber asignación de prioridades para distinguir entre mensajes críticos, mensajes secundarios y sin importancia.
- Mensajes con estrictas limitaciones de tiempo suelen tener un tamaño pequeño.
- Tanto para el tráfico síncrono como el asíncrono en sistemas de bus de campo puede ser objeto de restricciones de tiempo real.

Los medios de comunicación inalámbricos tienden a mostrar tasas de error de tiempo variable y varias veces crean un problema para el cumplimiento de los requisitos de tiempo real.

Un ejemplo podría ser el porcentaje de mensajes “safety-critical” que se puede transmitir con seguridad dentro de un tiempo preestablecido, este debe ser al menos 99.9%. Por supuesto, el comportamiento de error limita las áreas de aplicación de la red inalámbrica industrial: cuando es necesario garantizar una respuesta determinística en el intervalo de 10 a 100 ms, la transmisión inalámbrica se descarta (al menos en el estado del arte). Sin embargo, si las condiciones ocasionales de parada de emergencia debido a la pérdida de mensajes que faltan son tolerables, las tecnologías inalámbricas pueden ofrecer su potencial. El objetivo es reducir la frecuencia de las pérdidas y errores de mensajes transmitidos.

2.6. Efectos de propagación de ondas

En las redes inalámbricas las señales se transmiten a través de las ondas electromagnéticas, siendo el espacio libre el medio de propagación de las mismas, a diferencia de las comunicaciones cableadas donde las ondas viajan a través de un cable como pueden ser el par trenzado, el cable coaxial o la fibra óptica, entre otros. Los cables confinan las señales dentro de sí, a diferencia de las ondas emanadas de un dispositivo inalámbrica, que está sometida a fenómenos como la pérdida en el camino, la atenuación, la reflexión, la difracción, la dispersión, la interferencia, el ruido térmico o de origen humano, y las imperfecciones en el transmisor y el receptor. Las ondas electromagnéticas difieren de las mecánicas en que no necesitan de un medio para propagarse. Las mismas se propagan incluso en el espacio vacío. [3]

La velocidad de propagación, longitud de onda y frecuencia de las ondas electromagnéticas están relacionadas por la siguiente expresión. (Ver figura 2).

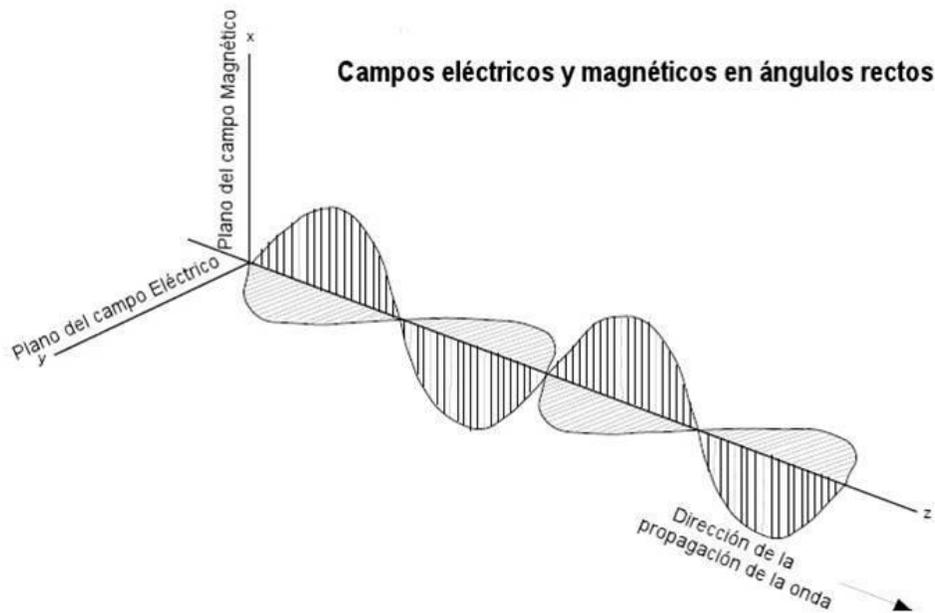


Figura 2: Relación entre los campos eléctricos y magnéticos en una onda electromagnética

Velocidad (v) = Frecuencia (f) * Longitud de Onda (λ). (Ver figura 3).

Donde:

- λ (m/seg): longitud de onda es la distancia medida desde un punto en una onda hasta la parte equivalente de la siguiente, por ejemplo desde la cima de un pico hasta el siguiente.
- f (Hz): frecuencia es el número de ondas enteras que pasan por un punto fijo en un segundo

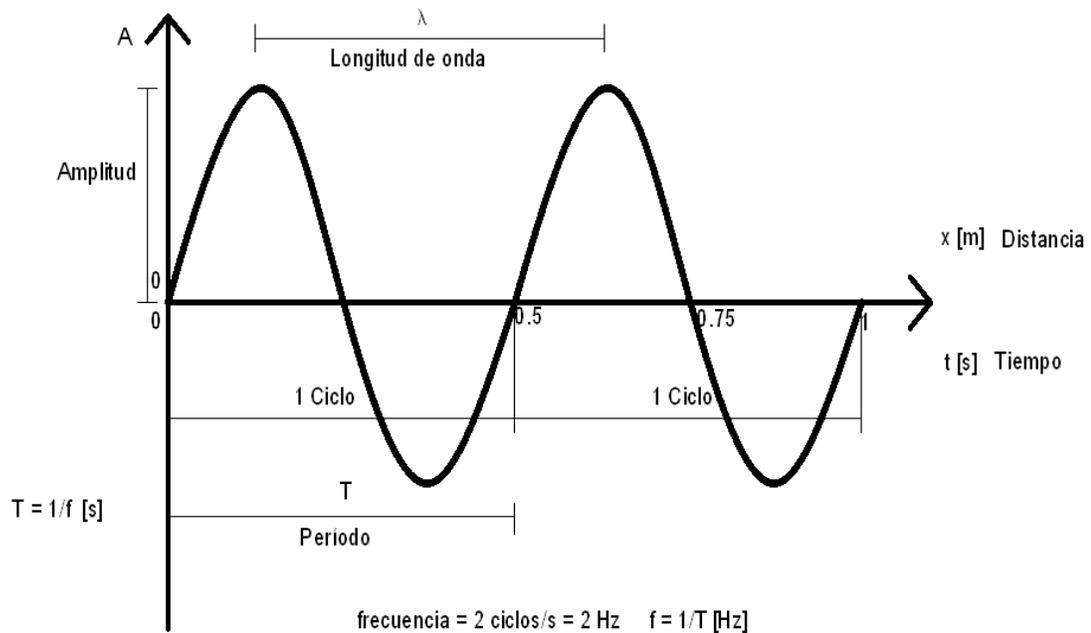


Figura 3: La relación entre frecuencia, longitud de onda, amplitud y periodo

En el caso de las ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio, la velocidad v es la velocidad de propagación de la luz $c = 300.000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ quedando $c = f \cdot \lambda$, ahora la longitud de onda para las frecuencias de 2,4 GHz y 900MHz que es la frecuencia para redes inalámbricas que analizaremos en este proyecto será:

$$\lambda = c / f = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} / 2,4 \cdot 10^9 \text{ 1/s} = 0,125 \text{ m} = 12,5 \text{ cm}$$

$$\lambda = c / f = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} / 900 \cdot 10^6 \text{ 1/s} = 0,33 \text{ m} = 33.3 \text{ cm}$$

La banda de frecuencia de 2,40 GHz está dentro de las bandas que se mantienen abiertas para el uso general, o sea sin requerir licencia. Esta región es llamada banda ISM (ISM Band: Industrial, Scientific and Medical Band). (Ver figura 4).

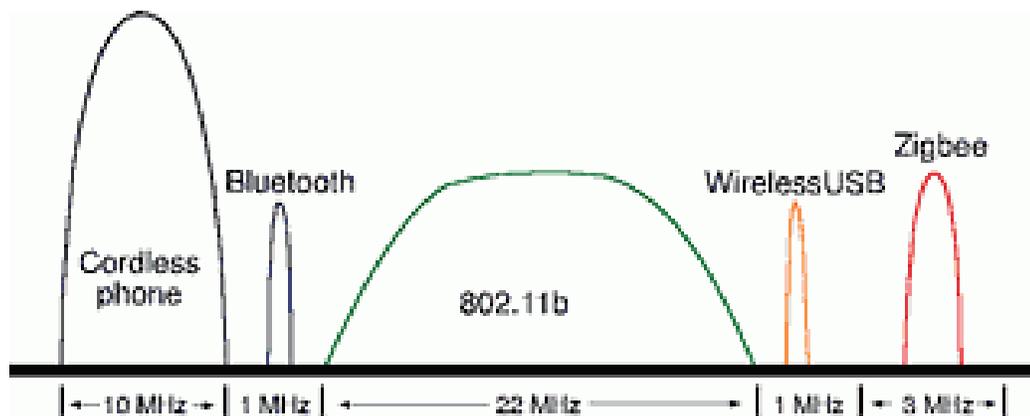


Figura 4: Distintos sistemas utilizando la banda ISM de 2,40 GHz

Las bandas ISM son de uso libre, pero las otras regiones del espectro electromagnético están altamente controladas por la legislación, mediante licencias. El pago de las licencias para el uso de un determinado rango de frecuencias es un factor económico muy significativo al momento de elegir las bandas de frecuencia de operación. Esto se da mucho en el caso de aquellas partes del espectro que son muy útiles para la difusión masiva como por ejemplo 900Mhz.

2.7. Frecuencia de 900 MHz y 2,4GHz

La diferencia fundamental en la propagación de ondas de 900 MHz y 2.4 GHz, es la atenuación de la señal debido a las propiedades del medio (aire en la mayoría de los casos). Esta atenuación se describe en función de la longitud de onda de la frecuencia de operación y la distancia entre el transmisor y el receptor.

$$\text{Path Loss} = 20 \log (4 * p * r / \lambda) \text{ dB}$$

Donde r es la distancia entre el transmisor y el receptor, y λ es la longitud de onda. La tabla siguiente muestra cómo “Path Loss” varía entre transmisores de 900 MHz ($\lambda = 0,33$ metros) y los transmisores de 2.4 GHz ($\lambda = 0,125$ metros).

NOTA: El análisis de pérdidas por trayectoria no tiene en cuenta efectos tales como las diferentes salidas de potencia de transmisión y la sensibilidad de RX.

Diferencias en las características de ambas bandas son:

•900MHz permite:

Mayor potencia.

Mayor distancia.

•2.4GHz band:

Ancho de banda más amplio

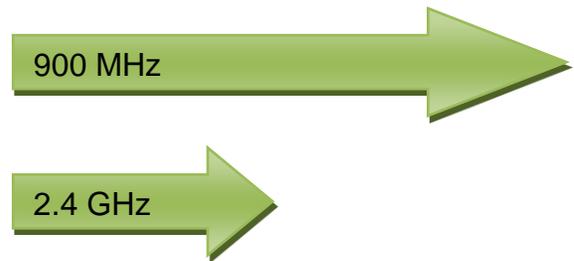
Más datos.

Distancias más cortas.

Gran escalabilidad.

Alta inmunidad a las interferencias

Actualmente hay mayor variedad de equipos y marcas en esta banda



Penetración de obstáculos

Las ondas de radio decrecen en amplitud a medida que pasan a través de obstáculos, cuando la frecuencia es más alta la tasa de atenuación se incrementa, la señal del radio se debilita más rápido y por lo tanto el efecto al pasar por obstáculos es mas grande. (Ver figura 5)

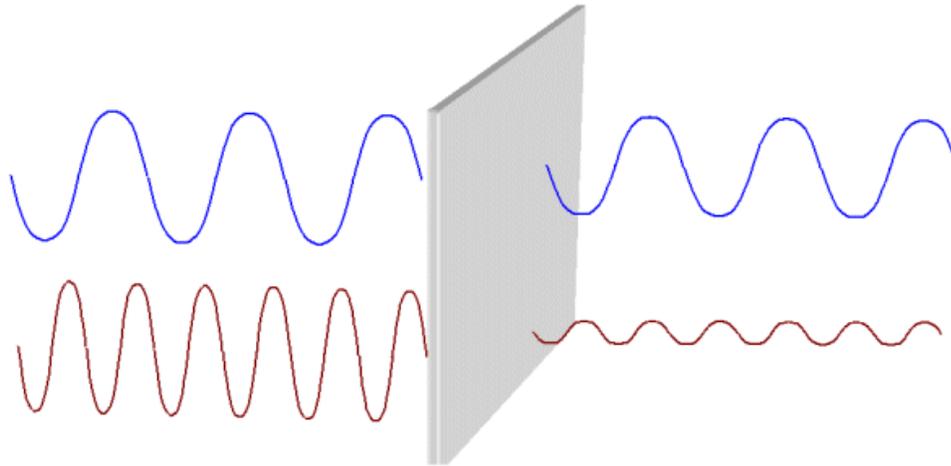


Figura 5: Penetración de obstáculos

El Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia determinó que la banda de 900Mhz puede ser utilizada para servicios fijos inalámbricos. La banda de 900Mhz era un candidato obvio para liberar espectro, ya que gran parte de esta estaba destinada a servicios de buscapersonas y trunking digital, los cuales no tienen una gran demanda, de acuerdo con la autoridad. [4]

En el año 2004 el Ministerio de Tecnologías de Información y Comunicaciones expidió la Resolución 689 “Por la cual se atribuyen unas bandas de frecuencias para su libre utilización dentro del territorio nacional, mediante sistemas de acceso inalámbrico y redes inalámbricas de área local, que utilicen tecnologías de espectro ensanchado y modulación digital, de banda ancha y baja potencia”. El artículo 5º de la norma atribuyó las bandas de frecuencias para la operación de dichos sistemas inalámbricos, donde la banda de 2400 a 2483,5 MHz, incluida, es la reconocida internacionalmente para la operación del estándar tecnológico IEEE 802.11b conocido como Wi-Fi.

2.8. La Zona de Fresnel

La frecuencia y la longitud de onda determinan la mayor parte del comportamiento de una onda electromagnética, desde las antenas hasta el tamaño de los objetos que están en el camino de las redes, y son responsables de muchas de las diferencias entre los estándares disponibles.

La pérdida de potencia de la señal aumenta al aumentar la distancia entre un transmisor T y un receptor R.

Uno de los factores que influyen en la distancia que una señal de radio puede sortear es las zonas Fresnel. La Zona de Fresnel (ver figura 6) es la altura ideal en la cual se deben ubicar el transmisor y “Gateway” para poder realizar un enlace confiable dependiendo de la frecuencia y la distancia [5]

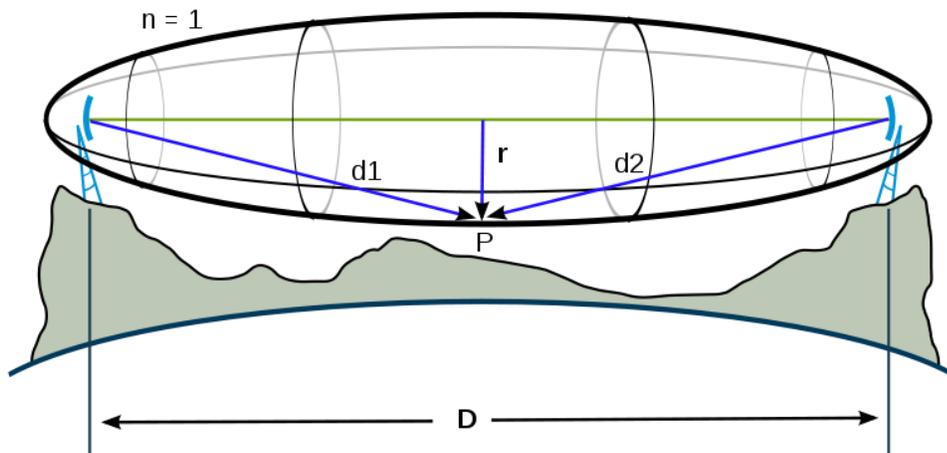


Figura 6: La Zona de Fresnel

D es la distancia entre el emisor y el receptor;

r es el radio de la zona Fresnel

La fórmula genérica de cálculo de las zonas de Fresnel es:

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

Donde:

- r_n = radio de la n ésima zona de Fresnel en metros ($n=1,2,3\dots$).
- d_1 = distancia desde el transmisor al objeto en metros.
- d_2 = distancia desde el objeto al receptor en metros.
- λ = longitud de onda de la señal transmitida en metros.

2.9. Desventajas de la red inalámbrica

La implementación de tecnologías inalámbricas para las plantas de producción petrolera presenta algunos problemas. El primer problema es la comparación entre la fiabilidad de la red alamburada y los requisitos de tiempo real que existen para las aplicaciones industriales, y el rendimiento de canales inalámbricos que tienen tasas de error variables en el tiempo y, a veces muy alta. Una segunda fuente importante de problemas es la necesidad de integrar las redes inalámbricas y alambradas en una única red (sistema híbrido o una red híbrida). Esta integración requiere el diseño de protocolos interoperables para los dominios con cable e inalámbricas. Por otra parte, la utilización de la tecnología inalámbrica impone problemas no previstos en el diseño original de los protocolos de bus de campo alambrados: los problemas de seguridad, la interferencia y la gestión de la movilidad.

2.9.1. Aspectos del sistema

En primer lugar, los sistemas inalámbricos de bus de campo pueden trabajar

en ambientes similares a los de cable. El cable de bus de campo garantiza tasas de transmisión que van desde cientos de megabits por segundo, y sistemas inalámbricos de bus de campo debe tener un índice comparable de velocidad de transmisión de datos. Los transceptores inalámbricos tienen que cumplir con la compatibilidad electromagnética, lo que significa que no sólo tienen que limitar su potencia radiada y las frecuencias, sino que también deben estar debidamente protegidos de campos magnéticos y el ruido electromagnético emanadas por motores de alto voltaje y descargas eléctricas. Esto puede plantear un problema serio cuando fuera de la plataforma de transmisores-receptores inalámbricos se usan (por ejemplo, hardware comercial IEEE 802.11), ya que éstas suelen estar diseñados para entornos de oficina y no tienen protección para aplicación industrial.

Otro problema es que muchos dispositivos de bus de campo alambrado obtienen su suministro de energía desde el mismo cable que se utiliza para la transmisión de datos. Si el cableado debe ser eliminado de estos dispositivos, no sólo existe el problema de la transmisión inalámbrica de datos, sino también el suministro de la energía por lo cual requieren un almacenamiento de energía por medio de baterías. [6]

2.10. Ventajas de la red Inalámbrica

Los sistemas inalámbricos de comunicación tienen un número cada vez mayor de áreas de aplicación y han logrado una gran popularidad. La telefonía móvil y los sistemas celulares son ahora una parte importante de nuestra vida cotidiana. Dos importantes beneficios de la tecnología inalámbrica son la clave para este éxito: la necesidad de cableado se reduce considerablemente, y los dispositivos de monitoreo pueden ser verdaderamente móviles. Esto ahorra costos y permite nuevas aplicaciones.

En las plantas industriales, la tecnología inalámbrica puede utilizarse de muchas maneras interesantes pero es claro que no sustituyen a las redes tradicionales alambradas (4 a 20 mA o de bus de campo), las instalaciones, en muchos sentidos, se complementan ofreciendo una solución económica para aplicaciones difíciles.

Los estándares actuales como IEC 62591; WirelessHART®. Revision 3.0 e ISA100.11^a Wireless Systems for Industrial Automation: Process Control and Related Applications, recomiendan el uso de instrumentación inalámbrica para los procesos de monitoreo y/o gestión de activos. En algún momento futuro la instrumentación inalámbrica podrá ser utilizada en aplicaciones de control, pero esto requerirá la modificación de los algoritmos PID, el análisis de riesgos, alarmas y prácticas de diseño a pruebas de fallas.

Actualmente se puede implementar instrumentación inalámbrica para:

- Actualización de los indicadores para automatizar la recolección de los datos del campo con el fin de aumentar la productividad de los trabajadores y reducir la exposición a ambientes peligrosos. [7]
- Nuevas regulaciones empresariales a menudo requieren de sistemas redundantes de monitoreo para los bienes activos tales como tanques, bombas etc, las cuales no eran necesarias en el pasado. [7]
- Cambios en la configuración de la instrumentación de forma remota.
- Monitorear datos de proceso que han sido poco rentables para medir en el pasado y que son útiles.
- Monitorear datos de proceso por un corto tiempo para resolver los problemas de proceso.
- Instalaciones temporales.

La autoridad técnica tomará la decisión de utilizar una red inalámbrica considerando los siguientes criterios:

- Evaluación Tecnológica y Económica
- Las aplicaciones potenciales.
- Los ahorros operativos potenciales.
- Los beneficios de la adición de la medición que antes no se consideraba factible para su inclusión en el sistema de automatización, debido a la economía o la practicidad.
- Beneficios de la flexibilidad en la ejecución del proyecto - por ejemplo: la facilidad de mover o agregar puntos E / S durante la construcción a un costo razonable considerando la gestión de los cambios en sitio. [7]

2.10.1. Reducción en tiempo y costo de instalación

Con un instrumento inalámbrico con alimentación propia, no hay cables desde el cuarto de control hasta el instrumento final. El ahorro no es sólo en los costos de cable, sino también en todos los esfuerzos necesarios asociados (verificación de conexionado, bancos de ductos, permisos de trabajo etc.).

Geográficamente las instalaciones típicas de producción petrolera de Ecopetrol se encuentran localizadas cerca de los pozos de producción, en aéreas rurales, de difícil acceso y condiciones ambientales agrestes; estas razones elevan el costo de traslado de personal especializado.

Al tener un proyecto nuevo, ganar algunos días o semanas en la construcción podría significar ahorros económicos gracias al arranque temprano del proyecto. La tecnología inalámbrica, por ser más rápida de

implementar, puede reducir considerablemente el tiempo de cableado y comisionamiento del sistema de automatización.

Para la optimización ó expansión de una planta existente, la tecnología inalámbrica reduce el tiempo de implementación de monitoreo de PV y sus beneficios podrán hacerse presentes mucho antes de lo esperado. Unas de las aplicaciones donde se lograrían ver reflejada la reducción de tiempo y costo son:

- Problemas de proceso (por ejemplo, los bloqueos en los intercambiadores de calor), por medio de la adición de mediciones temporales de bajo costo.
- Reducir los costos de instalación de zonas remotas de la planta (por ejemplo, en los Tanques o PV de pozos.
- Automatizar rutinas de registro manual de datos mediante la adición de acceso inalámbrico.

2.10.2. Reducción del tiempo de configuración

La implementación de instrumentos inalámbricos permite el acceso a los parámetros de configuración del dispositivo, a diferencia de una implementación alambrada convencional, que requiere que el personal técnico vaya a un circuito cableado para hacer los cambios. La instrumentación Inalámbrica proporciona un único punto de conexión, a través de una puerta de enlace, que permite acceder a una gestión de configuración de dispositivos inalámbricos. Situaciones como reconfigurar el rango de dispositivos múltiples para adaptarse a los nuevos requisitos de proceso, correspondientes a los cambios de producción, o ajustar los parámetros sin incurrir en el riesgo de dañar los cables; dedicar tiempo a la búsqueda o la instalación de resistencias de bucle.

2.10.3. Mantenimiento

Las facilidades de instalación de la instrumentación inalámbrica permiten realizar mediciones de PV de manera temporal en puntos con dificultades de conexión, donde se han producido problemas que requieren más información para diagnosticar la causa. En las siguientes situaciones se puede ver reflejada esta ventaja

- Dependiendo del comportamiento del pozo, pueden cambiar las condiciones del proceso; el monitoreo de las PV de manera inalámbrica facilita el cambio de instrumentación con el fin de implementar la más adecuada.
- Facilita el monitoreo de PV o configuración de sistema de control las cuales son fundamentales para un periodo corto.

2.10.4. Operación

Actualmente el técnico en confiabilidad debe realizar rondas diarias para chequear el desempeño de la mayor parte de los activos, gastando tiempo sustancial en tomar mediciones, tales como lecturas de vibración de bombas, PV, etc. Para luego ingresar manualmente los resultados en bases de datos, perdiendo tiempo valioso para realizar análisis y proponer soluciones que mejoren la confiabilidad de los activos.

Con la implementación de la tecnología inalámbrica en puntos de difícil acceso, las rondas serán menos frecuentes ya que la instrumentación inalámbrica podrá capturar y enviar de inmediato los datos pertinentes de vuelta al sistema de control sin necesidad de ingresarlos en forma manual.

2.10.5. Mejoras en el proceso

En el proceso de producción se requiere muchas veces la instalación de instrumentos para el monitoreo de PV necesarios. Con la instrumentación inalámbrica se podrá de forma rápida y muy económica desplegar nuevos puntos de medición que permitan resolver problemas y mejorar la eficiencia del sistema.

Un buen lugar para comenzar a optimizar el proceso es la identificación de PV que han sido difíciles de obtener por su ubicación física tales como aquellas que se encuentran cruzando obstáculos, no tienen facilidades de accesos, existen presencia de gases tóxicos, entre otros y podrían ser valiosos para mejorar la productividad del operador.

2.10.6. Integración de las WFN y sistemas híbridos.

Hay un gran número de instalaciones de bus de campo alambradas existentes y lo mejor es que las estaciones inalámbricas se pueden integrar en ellos. Este tipo de red inalámbrica (estaciones con un transmisor inalámbrico) y estaciones de cable se denominan sistemas híbridos. Los requisitos más importantes para los sistemas híbridos son los siguientes:

- **Transparencia:** No debería haber ninguna necesidad de modificar la “stacks” de los protocolos usados en el bus de campo alambrado.
- **El uso de protocolos específicamente adaptados:** La mayoría de los sistemas de bus de campo se especifican en las capas 1 (capa física), 2 (control de acceso al medio y la capa de enlace), y 7 (capa de aplicación). La introducción de una capa física inalámbrica afecta a la conducta y el desempeño tanto del control de acceso al medio y la capa de enlace. Los protocolos existentes para los sistemas de bus de campo alambrado no

están diseñados para un entorno móvil y debe ser reemplazado por protocolos específicamente diseñados para la conexión inalámbrica. Sin embargo, esto aumenta costo de la conversión de protocolo entre los protocolos de cable e inalámbricas.

La red se compone es equipos fijos y móviles, pero la integración ocurre exclusivamente en la capa física. Un dispositivo traduce las reglas que enmarcan entre los medios de comunicación alámbricos e inalámbricos. Las estaciones inalámbricas utilizan sólo una capa de alternativa física (PHY), pero los protocolos de control de acceso al medio (MAC).

2.10.7. Apoyo a la Movilidad

La movilidad es una de las principales ventajas de los sistemas inalámbricos. Las redes de bus de campo alambradas serán en su mayoría instaladas en infraestructuras fijas.

Una de las aplicaciones industriales petroleras en la que la movilidad es importante, es por lo general en skid móviles, o en movimiento subsistemas de plantas que son móviles.

Los sistemas de bus de campo y sus aplicaciones a menudo están diseñados con la suposición de que la red se configura una vez y no cambia después. En consecuencia, algunos sistemas de bus de campo no son compatibles con los cambios en la configuración.

2.10.8. Seguridad

La seguridad de datos no jugó ningún papel importante en el diseño inicial de las normas de bus de campo. Esto era razonable, ya que el acceso físico es por medio de un cable. Sin embargo, los medios de comunicación inalámbrica son vulnerables a interferencias en la frecuencia de operación y podrían distorsionar todas las transmisiones. Un atacante también podría intentar inyectar paquetes maliciosos en la red, por ejemplo, los comandos falsos de la válvula.

Por lo tanto, las medidas de seguridad (integridad, autenticación, autorización) son contempladas en los sistemas de bus de campo inalámbrica.

El ruido y la interferencia no sólo son generados a propósito por algunos atacantes, pero también puede provenir de los sistemas inalámbricos que trabajan en la misma banda de frecuencia.

2.11. Topologías de Red

Se pueden usar varias topologías de red para coordinar el “Gateway” WFN, nodos finales u otros “Routers”. Los nodos “Routers” son similares a los nodos finales, en los que se puede adquirir datos de medida, pero también se pueden usar para pasar datos de medida desde otros nodos. La principal y más básica, es la topología en Star (ver figura 7a)

2.11.1. Topología en Star

En la topología star cada nodo mantiene una sola trayectoria de comunicación directa con el “Gateway”. Esta topología es simple pero restringe la distancia total que la red puede alcanzar.

En una topología de estrella todos los datos pasan a través del concentrador antes de alcanzar su destino. Los dispositivos no están directamente conectados entre sí.

2.11.2. Topología Cluster / Tree

Para aumentar la distancia que una red puede cubrir, se puede implementar una topología de Cluster / Tree (ver figura 7b). En esta arquitectura más compleja, cada nodo mantiene una sola trayectoria de comunicación directa al “Gateway” pero puede usar otros nodos para enrutar los datos a esa trayectoria. En esta topología un conjunto de nodos configurados como estrella se conectan a un nodo.

Esta topología tiene un problema. Si el nodo “Route” falla, todos los nodos que dependen de ese “Router” también pierden sus trayectorias de comunicación con el “Gateway”. La topología “Tree” puede verse como una combinación de varias topologías en estrella. [8]

2.11.3. Topología Mesh

La topología de red Mesh (ver figura 7c) soluciona el problema de dependencia de “Router” al usar trayectorias de comunicación redundante para aumentar la fiabilidad del sistema. En una red Mesh, los nodos mantienen múltiples trayectorias de comunicación al “Gateway”, así si el

nodo “Routers” falla, la red automáticamente enruta los datos a través de una trayectoria diferente, de esta manera es posible llevar los mensajes de un nodo a otro por diferentes caminos. La topología de Mesh, aunque es muy confiable, sufre de incremento de latencia de red ya que los datos deben hacer múltiples saltos antes de llegar al “Gateway”.

Las redes de malla son auto organizables. La red puede funcionar, incluso cuando un nodo desaparece o la conexión falla, ya que el resto de los nodos evitan el paso por ese punto. En consecuencia, la red malla, se transforma en una red muy confiable.

La figura 7 ilustra los tres tipos de topología descritas.

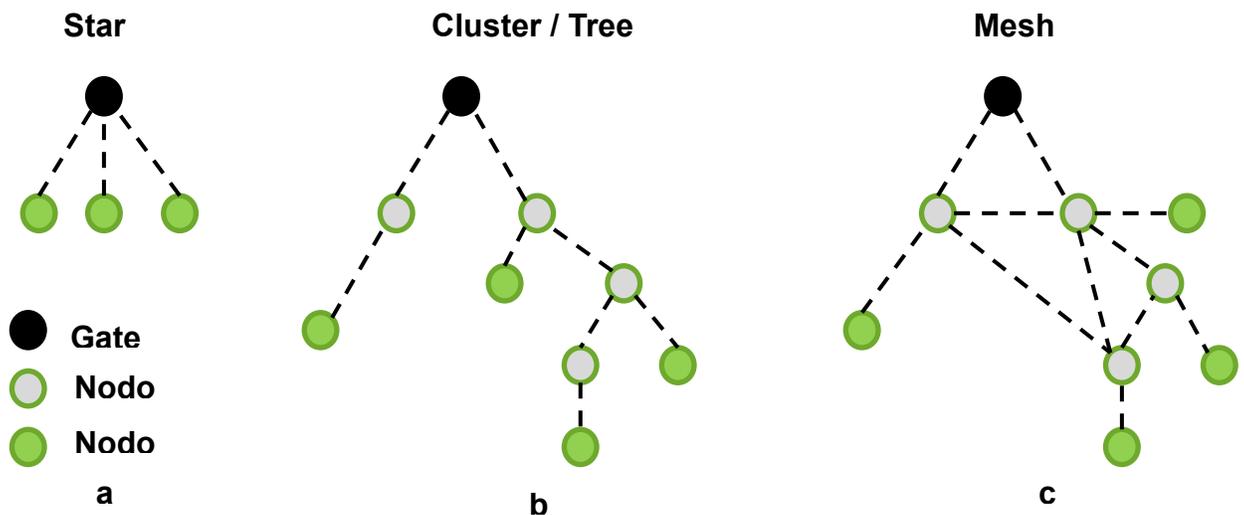


Figura 7. Topologías de Red WFN

	Topología Star	Topología Cluster/Tree	Topología Mesh
Ventajas	<p>Cada nodo es independiente de los demás.</p> <p>Facilidad para detectar nodos que estén causando problema en la red.</p> <p>Si alguno de los nodos falla el comportamiento de la red sigue sin problemas.</p> <p>Las topologías Star o punto a punto no son capaces de mantener la confiabilidad de la red en entornos densos donde los campos electromagnéticos cambian regularmente.</p>	<p>Comunicación punto a punto para segmentos individuales.</p>	<p>Caminos alternativos para la transmisión de datos y en consecuencia aumento de la confiabilidad de la red.</p> <p>Si un nodo desaparece o falla no afecta en absoluto a los demás nodos.</p> <p>La topología tipo "Mesh" tiene la facilidad de que la red sea auto-organizada. Son auto-organizadas, porque los dispositivos que la componen son capaces de buscar automáticamente, el mejor camino disponible para enviar la información cada vez que se transmite la información</p>

Desventajas	<p>Su funcionamiento depende del Gateway.</p> <p>Su crecimiento depende de la capacidad del Gateway</p>	<p>Si el nodo "Router" falla, todos los nodos que dependen de ese "Router" también pierden sus trayectorias de comunicación con el "Gateway</p>	<p>Poco económica debido a que todos los nodos serán transmisores receptores.</p> <p>Aumento en el consumo de energía de baterías debido a la existencia de enlaces redundantes</p>
-------------	---	---	---

Tabla 1: Comparación de topologías de red Inalámbrica [9]

2.12. Diseño de una red inalámbrica

La clave en la fase de diseño es la evaluación de los diferentes protocolos de comunicación industrial, así como la selección para la aplicación correcta teniendo en cuenta las consideraciones de uso en campo y a los usuarios finales.

Durante la fase de pre-diseño, se debe prestar atención a las tecnologías disponibles y una evaluación en cuanto a la aplicabilidad al proyecto específico. Es durante esta fase de pre-diseño que la tecnología inalámbrica debe ser considerada como una tecnología candidata, junto con otros protocolos como 4-20 mA, HART, Foundation Fieldbus, Profibus, etc. Los mas usados de las industria petrolera en este caso en Ecopetrol.

En este informe se examinan temas relacionados con el diseño y evaluación de los protocolos de transmisión inalámbrica industrial proporcionando una visión general del estado de la técnica.

Hay un énfasis en los aspectos que influyen en el comportamiento en el tiempo y la fiabilidad de la transmisión inalámbrica.

2.13. Tecnologías a ser analizadas

Se han desarrollado diferentes protocolos de transmisión para combatir las alteraciones del canal inalámbrico y para aumentar la fiabilidad de la transmisión de datos.

Existen muchos tipos de redes inalámbricas (incluyendo IEEE 802.11) que se basan en técnicas de “spread-spectrum” donde una señal de información de banda estrecha se extiende a una señal de banda ancha en el transmisor y de nuevo a una señal de banda estrecha en el receptor. Mediante el uso de una señal de banda ancha, los efectos de interferencia de banda estrecha se reducen.

Los protocolos y normas de comunicación inalámbrica, utilizan las “Stacks” como una descripción abstracta de capas y el diseño del protocolo de red. Una “Stack” consta de varias capas, donde cada capa es una colección de funciones relacionadas con la tarea específica de la capa. Una capa es responsable de proporcionar información y servicios a la capa por encima de ella, y recibe información y servicios de la capa inferior. Esta información y el intercambio de servicios se llevan a cabo en un lugar bien definido y normalizado de intercambio de mensajes. Las tecnologías que analizaron se encuentran soportada en los protocolos y normas que se utilizan una versión

simplificada del modelo OSI (open system interconnection) como se ilustra en la Tabla 2 [10]

Modelo OSI
Nivel de Aplicación
Nivel de presentación
Nivel de sesión
Nivel de transporte
Nivel de red
Nivel de enlace de datos
Nivel físico

Tabla 2: Modelo OSI

2.13.1. Tecnología soportada en el estándar ISA100.11a

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 control. [11]

El alcance del estándar ISA100.11a incluye la definición de la tecnología inalámbrica, las frecuencias de radio (punto de partida), las vibraciones, temperatura, humedad, la interoperabilidad, la convivencia con los sistemas existentes, y la ubicación física del equipo para lo cual se enfoca en los siguientes temas:

- Bajo consumo de energía de los dispositivos, con la capacidad de escalar para hacer frente a las grandes instalaciones.
- La infraestructura inalámbrica, interfaces con la infraestructura existente y aplicaciones, seguridad y gestión de redes de una manera escalable.
- Robustez ante la presencia de interferencias que se encuentran en entornos industriales y con los demás sistemas.
- La convivencia con otros dispositivos inalámbricos en el espacio de trabajo industrial.
- La interoperabilidad de los dispositivos de ISA100. [12]

El enfoque de la comisión es mejorar la confianza, integridad y disponibilidad de componentes o sistemas utilizados para la fabricación o control, y establecer criterios para la adquisición e implementación de la tecnología inalámbrica en el entorno del sistema de control

Características de la WFN ISA100.11a

En ISA100.11a, se define un conjunto de funciones para describir las características de un dispositivo. Un dispositivo ISA100.11A deberá contener una o más de estas funciones:[13]

- 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 / 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.

Para ISA100.11a, las funciones del sensor y un actuador (I / O) son diferentes al papel del “Router”. Esto permite a los instrumentos ISA100.11a de campo se definen ya sea como nodos finales, sin capacidad de enrutamiento y / o como nodos router con capacidad de enrutamiento. Como resultado, una red ISA100.11a puede emplear topología tipo estrella, o malla dependiendo de las funciones de los dispositivos presentes en la red. Una red ISA100.11a típica con una topología de malla se ilustra en la Figura 8.

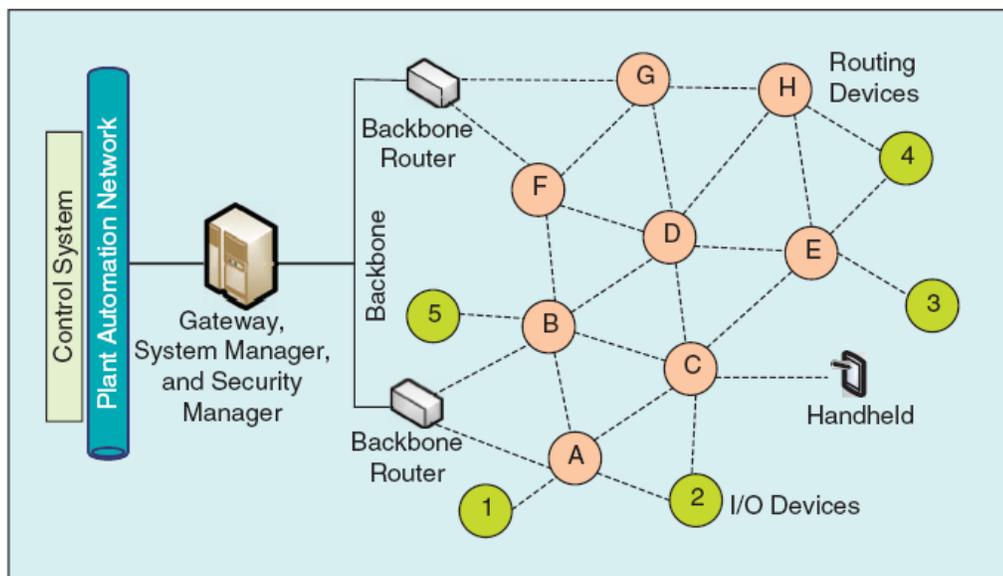


Figura 8: Ejemplo de una red ISA100.11^a típica [13]

La siguiente sección ofrece una descripción de las capas de protocolo de ISA100.11^a basadas en el modelo OSI. Ver tabla 3

Modelo OSI	ISA-100.11A
Nivel de Aplicación	Alto nivel de aplicación
	Sub capa de Aplicación
Nivel de presentación	No definido
Nivel de sesión	No definido
Nivel de transporte	Nivel de transporte
Nivel de red	Nivel de red
Nivel de enlace de datos	Alto Nivel de enlace de datos
	MAC Extension
	MAC Sublayer
Nivel físico	Nivel físico

Tabla 3: Modelo OSI y Modelo ISA-100.11A.11^a

Nivel Físico: ISA100.11a implementa el estándar IEEE 802.15.4 como interfaz con el medio físico donde se efectúa la comunicación.

Nivel de Enlace: ISA100.11a divide el archivo de nivel de enlace en una subcapa de control de acceso con la principal responsabilidad de enviar y recibir tramas de datos individuales, lo que significa que el enrutamiento de malla se realiza en este nivel.

Nivel de Red: El enrutamiento de malla de nivel dentro de una subred se realiza en el nivel de enlace, los detalles de cómo dirigir el tráfico en una red troncal o red de la planta no se especifican. Este nivel de red esta soportada en al IETF (Internet Engineering Task Force) con el objetivo de facilitar la compatibilidad en el futuro.

Nivel de transporte: El servicio de conexión se extiende mediante el UDP (User Datagram Protocol) lo cual permite mejores controles de integridad de datos y la autenticación adicionales y mecanismos de cifrado

Nivel de aplicación: ISA100.11a define los objetos de software para modelar objetos del mundo real. Se divide en dos sub-capas: la superior AL (UAL) y la subcapa de aplicación (ASL). La UAL contiene los procesos de aplicación para el dispositivo y puede ser usado para manejar la entrada y / o salida de hardware o realizar una función de cálculo. El ASL proporciona los servicios necesarios para la UAL para llevar a cabo sus funciones, tales como la comunicación orientada a objetos y el enrutamiento de los objetos dentro de un proceso aplicación de usuario (UAP) a través de la red.

2.13.2. Tecnología soportada en el estándar WirelessHART

En septiembre de 2007, HART Communication Foundation (HCF) dio a conocer la comunicación de campo HART Protocol Specification, Revision 7.0, que incluye la definición de una interfaz inalámbrica a dispositivos de campo, conocido como Wireless-HART. [14]

WirelessHART es una estándar global aprobado por la norma IEC 62 591 que especifica una tecnología interoperable de topología Mesh auto-organizable en la que los dispositivos de campo forman las redes inalámbricas de forma dinámica con el fin de mitigar el impacto de los obstáculos en el entorno del proceso.

La tecnología WirelessHART proporciona un protocolo inalámbrico robusto para la gama completa de los procesos de medición y aplicaciones de gestión de activos y está basada en el Protocolo HART Communication.

Con aproximadamente 30 millones de dispositivos HART instalados y en servicio en todo el mundo, la tecnología HART es el protocolo de campo de la comunicación más utilizado para la instrumentación de procesos inteligentes.

Características

Los siguientes dispositivos y componentes están asociados con una red WirelessHART [15]:

- Dispositivos de campo: un instrumento de campo con comunicación inalámbrica integrada.
- Adaptador: Un módulo de comunicación inalámbrica que se conecta a dispositivos de campo HART conectados, proporcionándoles las capacidades de WirelessHART.
- Handheld: Un ordenador portátil de WirelessHART utilizado para la configuración, diagnóstico, y la calibración de los dispositivos de campo.
- Gateway: Un punto de acceso a la red que conecta la red WirelessHART a una red de automatización de la planta, permitiendo que los datos fluyan entre los dos.
- Network Manager: Una aplicación que gestiona la red WirelessHART y sus dispositivos.
- Security Manager: Una aplicación que se encarga de generar, almacenar y gestionar la red y las claves de sesión.

Características automáticas de la WFN WirelessHART

En WirelessHART, todos los dispositivos de campo y los adaptadores son routers capaces de reenviar los paquetes hacia y desde otros dispositivos en la red, lo que permite una topología de red en malla. La figura 9 muestra una red WirelessHART típica y la topología de malla creada por los dispositivos de campo y adaptadores. Además, todos los dispositivos son capaces de abastecer a otros dispositivos para conectarse a la red. Otras características de una WFN WirelessHART son [14]:

- Auto-organizable
- 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

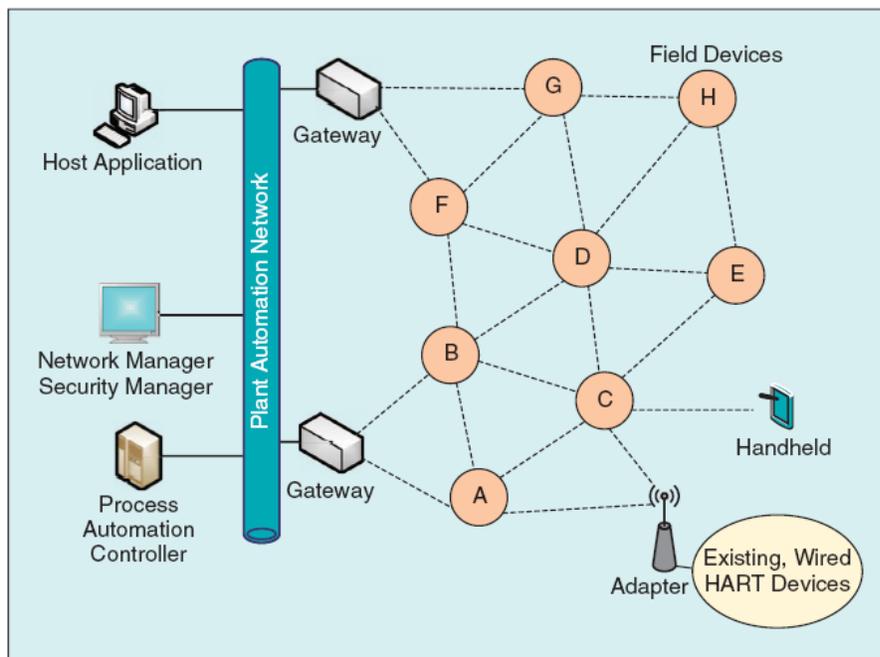


Figura 9: Ejemplo de una red WirelessHART típica [15]

La siguiente sección ofrece una descripción de las capas de protocolo de WirelessHART basadas en el modelo OSI [16]. Ver tabla 4.

Modelo OSI	WirelessHART
Nivel de Aplicación	Nivel de Aplicación
Nivel de presentación	No definido
Nivel de sesión	No definido
Nivel de transporte	Nivel de transporte
Nivel de red	Nivel de red de servicios
	Nivel de red
Nivel de enlace de datos	Control de enlace lógico
	MAC Sublayer
Nivel físico	Nivel físico

Tabla 4: Modelo OSI y Modelo WirelessHART

Nivel Físico: WirelessHART implementa el estándar IEEE 802.15.4 como interfaz con el medio físico donde se efectúa la comunicación.

Nivel de Enlace: En WirelessHART el archivo se divide en un control de enlace lógico (LLC) de la capa y una subcapa de control de acceso al medio (MAC). El alcance del nivel de enlace WirelessHART es la comunicación a nivel de un salto, y cualquier responsabilidad a la red más allá de los vecinos del dispositivo se asignan a la capa de red

Nivel de Red: WirelessHART especifica la comunicación de paquetes entre los dispositivos vecinos, el nivel de enlace es responsable de encaminar los paquetes hasta su destino final. Todos los dispositivos en una red WirelessHART mantiene una serie de tablas de enrutamiento que controlan las comunicaciones realizadas por el dispositivo.

La asignación de las tablas de enrutamiento es manejado por el Network Manager.

Nivel de transporte: WirelessHART soporta transmisiones reconocidas y no reconocidas. El servicio de reconocimiento permite que los dispositivos envíen paquetes y obtengan una confirmación de la entrega, mientras que los servicios no reconocidos permiten a los dispositivos enviar los paquetes sin necesidad de reconocimiento de “end”, por lo tanto sin ninguna garantía de éxito la transmisión de paquetes

Nivel de aplicación: WirelessHART hereda su nivel de aplicación del protocolo HART. El nivel de aplicación de HART define los comandos, respuestas, tipos de datos e informes de estado soportado en la especificación del protocolo de comunicación HART. Todas las comunicaciones entre dispositivos en el nivel de aplicaciones es a través de un conjunto de comandos definidos y se divide en los siguientes cuatro grupos.

Comandos universales: son definidos en la Comisión Electrotécnica Internacional Commission (IEC) IEC 61158-5-20 las normas y la norma IEC 61158-6-20.

Comandos de uso común: Son un conjunto de comandos estandarizados, independiente del dispositivo utilizado para mejorar la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes. Los comandos son opcionales, y algunos, todos o ninguno pueden ser ejecutados por un dispositivo de campo.

Familias comandos del dispositivo: Son un conjunto de comandos para dispositivos de campo basado en el tipo de conexión que apoyan el proceso

(por ejemplo, temperatura, presión, flujo y vibraciones). Se utilizan para ampliar aún más la interoperabilidad.

Los comandos específicos: Son los comandos desarrollados por los fabricantes que están fuera del ámbito de aplicación del protocolo de comunicación HART. Sin embargo, los comandos deben cumplir con los requisitos de la especificación

2.13.3. Tecnología soportada en el estándar ZigBee

ZigBee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (wireless personal area network, WPAN). Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. ZigBee se puede utilizar en casi cualquier lugar, es fácil de implementar y requiere poca energía para funcionar.

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 mundo. Sin embargo, a la hora de diseñar dispositivos, las empresas optaron prácticamente siempre por la banda de 2,4 GHz, por ser libre en todo el mundo.

ZigBee es un sistema ideal para redes domóticas (automatización hogareña), específicamente diseñado para reemplazar la proliferación de sensores/actuadores individuales. ZigBee fue creado para cubrir la necesidad del mercado de un sistema a bajo costo, un estándar para redes

Wireless de pequeños paquetes de información, bajo consumo, seguro y fiable.

Estándar IEEE 802.15.4

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 tasas bajas de transmisión de datos (low-rate wireless personal area network, LR-WPAN). También es la base sobre la que se define la especificación de ZigBee, cuyo propósito es ofrecer una solución completa para este tipo de redes construyendo los niveles superiores de la "Stack" de protocolos que el estándar no cubre.

Características

Se definen tres tipos distintos de dispositivo ZigBee según su papel en la red:

Coordinador ZigBee (ZigBee Coordinator, ZC): El tipo de dispositivo más completo. Debe existir uno por red. Se encarga de controlar la red y los caminos que deben seguir los dispositivos para conectarse entre ellos, requiere memoria y capacidad de computación.

Router ZigBee (ZigBee Router, ZR): Interconecta dispositivos separados en la topología de la red, además de ofrecer un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario.

Dispositivo final (ZigBee End Device, 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. De esta forma, este tipo de nodo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus baterías. Un ZED tiene requerimientos mínimos de memoria y es por tanto significativamente más barato.

Características automáticas de la WFN ZigBee

Las redes ZigBee han sido diseñadas para conservar la potencia en los nodos esclavos. De esta forma se consigue el bajo consumo de potencia. La estrategia consiste en que, durante mucho tiempo, un dispositivo esclavo está en modo dormido, de tal forma que solo se despierta por una fracción de segundo para confirmar que está vivo en la red de dispositivos de la que forma parte. Esta transición del modo dormido al modo despierto (modo en el que realmente transmite), dura unos 15ms, y la enumeración de "esclavos" dura alrededor de 30ms. Otras características de una WFN ZigBee son [17]:

- 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.

La siguiente sección ofrece una descripción de las capas de protocolo de WirelessHART basadas en el modelo OSI. [18] ver tabla 5.

Modelo OSI	ZigBee
Nivel de Aplicación	Nivel de Aplicación
Nivel de presentación	No definido
Nivel de sesión	No definido

Nivel de transporte	Nivel de transporte
	Nivel de red
Nivel de enlace de datos	MAC (IEEE 802.15.4)
Nivel físico	Nivel físico (IEEE 802.15.4)

Tabla 5: Modelo OSI y Modelo ZigBee

Siguiendo el estándar del modelo de referencia OSI, en el gráfico, aparece la estructura de la arquitectura en capas. Las primeras dos capas, la física y la de acceso al medio MAC, son definidas por el estándar IEEE 802.15.4. Las capas superiores son definidas por la Alianza ZigBee y corresponden a las capas de red y de aplicación las cuales contienen los perfiles del uso, ajustes de la seguridad y la mensajería [19] [18].

Los cometidos principales de la capa de red son permitir el correcto uso del subnivel MAC y ofrecer un interfaz adecuado para su uso por parte del nivel inmediatamente superior. Sus capacidades, incluyendo el ruteo, son las típicas de un nivel de red clásico.

Por una parte, la entidad de datos crea y gestiona las unidades de datos del nivel de red a partir del payload del nivel de aplicación y realiza el ruteo con base en la topología de la red en la que el dispositivo se encuentra. Por otra, las funciones de control del nivel controlan la configuración de nuevos dispositivos y el establecimiento de nuevas redes; puede decidir si un dispositivo colindante pertenece a la red e identifica nuevos routers y vecinos. El control puede detectar así mismo la presencia de receptores, lo que posibilita la comunicación directa y la sincronización a nivel MAC.

La trama general de operaciones (GOF) es una capa que existe entre la de aplicaciones y el resto de capas. La GOF suele cubrir varios elementos que

son comunes a todos los dispositivos, como el su direccionamiento, los modos de direccionamientos y la descripción de dispositivos, como el tipo de dispositivo, potencia, modos de dormir y coordinadores de cada uno. Utilizando un modelo, la GOF especifica métodos, eventos, y formatos de datos que son utilizados para constituir comandos y las respuestas a los mismos.

La capa de aplicación es el nivel más alto definido por la especificación y, por tanto, la interfaz efectiva entre el nodo ZigBee y sus usuarios. En él se ubican la mayor parte de los componentes definidos por la especificación: tanto los objetos de dispositivo ZigBee (ZigBee device objects, ZDO) como sus procedimientos de control y los objetos de aplicación que se encuentran aquí.

2.13.4. Tecnología Accutech™ Wireless Industrial

La instrumentación inalámbrica Accutech esta soportada en un protocolo propietario “ Accutech™ Wireless Industrial”. Al ser un protocolo propietario cuenta con pocas fuentes de información por tal razón la información teórica considerada en este informe fue tomada directamente de información técnica del fabricante.

Esta tecnología fue diseñadas para controlar los parámetros críticos y enviar la información de forma inalámbrica a una base de radio que puede estar integrado con un sistema host PLC / RTU o SCADA a través de Modbus RTU, a través de una banda sin licencia de “spread spectrum”, con salto de frecuencia de conexión inalámbrica (900 MHz). La WFN puede llegar a ser hasta 100 nodos de campo que pueden ser consultados por el “Gateway”. Con la capacidad de escalar hasta 256 redes de área local inalámbrica.[20]

Físicamente los dispositivos cuentan con una batería integrada, que ofrece 3 años de servicio libre de mantenimiento (dependiendo de las velocidades de datos y las opciones de la batería).

Características dadas por el fabricante

- Banda 900 MHz license Free (ISM band 902-928MHz)
- FHSS –(Frequency Hopping Spread Spectrum)
- Hasta kilómetro y medio entre base e instrumento
- Protocolo wireless industrial (encriptado, inmune al ruido, amplia dispersión y no necesita de línea de vista)
- Funcionamiento con Batería de larga duración
- Diseñado para entornos industriales
- Herramientas de diagnostico de sensores y comunicaciones locales (en pantalla instrumento y remotas (Accutech Manager)
- Diseño integrado, batería, sensor y radio
- Topología tipo Estrella
- Paquete de datos solo con la información de la PV y estado de batería para optimización de batería.

3. DESARROLLO

3.1. Parámetros de comparación

Con el fin de evaluar el comportamiento de las diferentes tecnologías de instrumentación inalámbrica, se evaluaron en una prueba de campo los parámetros principales de 4 tecnologías, soportadas en estándares, que se están empleando para las comunicaciones inalámbricas industriales y disponibles en Colombia

- ZigBee
- Wireless-Hart
- ISA100
- ACCUTECH (propietario)

Metodología de la prueba

Los resultados de las pruebas realizadas en ambientes industriales fueron analizados e incluidos en la evaluación de los criterios de selección determinando las variantes tecnológicas que garantizan el mejor cumplimiento de las características generales establecidas para una WFN.

Esta prueba se desarrollo durante un periodo de treinta (30) días, después de montados y configurados los instrumentos; se realizó en la estación de recolección y tratamiento No 4 del campo Casabe perteneciente a la Superintendencia Operaciones del Rio (SOR) - Gerencia Regional Magdalena (GRM) la cual se encuentra localizada en zona rural del municipio de Yondó, departamento de Antioquia.

Durante este periodo se localizaron instrumentos en tres diferentes puntos de la estación (ver figura 10) con el fin de monitorear el comportamiento de la señal de la PV y del instrumento ante los diferentes factores industriales y ambientales.

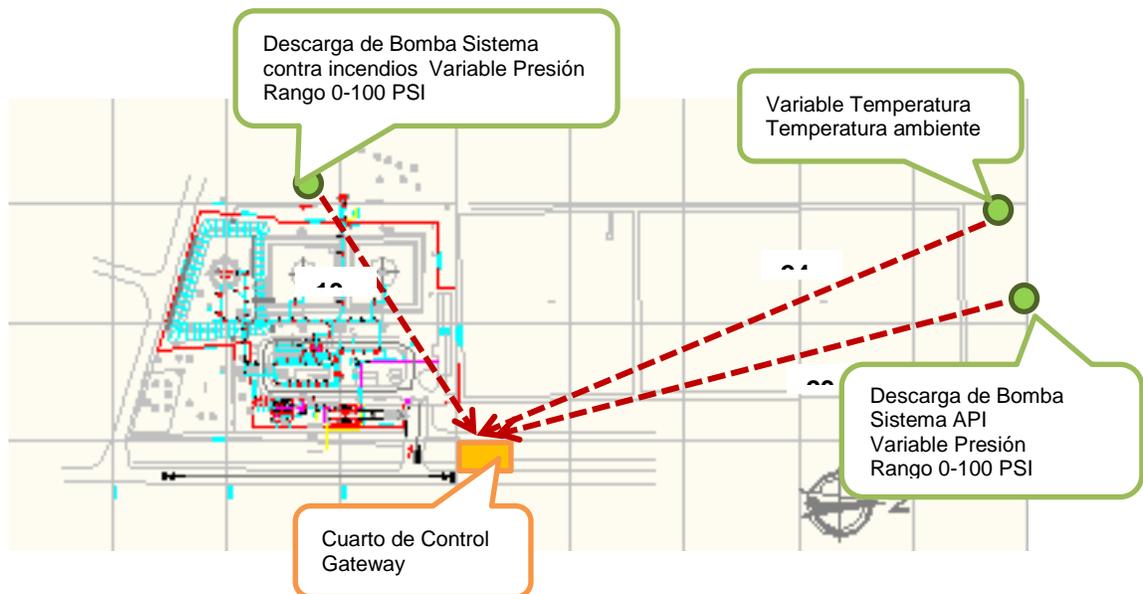


Figura 10: Esquema de ubicación de puntos de monitoreo, orientación Norte

Para el desarrollo de estas pruebas se elaboró el documento “*PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA INSTRUMENTOS CON COMUNICACIÓN DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICA PARA LOS CAMPOS DE PRODUCCIÓN PETROLERA EN ECOPEPETROL*” (ver Anexo 1)

Considerando factores de diseño de topología, seguridad de información, consumo de energía, distancias de comunicación y potencia de la señal, Montaje, Comisionamiento del sistema, Operación, Desempeño, Mantenimiento, etc. Se plantearon las siguientes fases de la prueba.

3.1.1. Fase: Presentación de diseño

Después de realizar una visita de levantamiento de información en la estación Casabe IV los proveedores de las diferentes tecnologías inalámbricas proponen la topología más adecuada según los requerimientos técnicos y las condiciones del lugar.

- **Planificación de Red**

En esta fase se diseñó la topología más apropiada para cumplir con requerimientos técnicos de la prueba, hoja de datos de los dispositivos a implementar, especificaciones técnicas del software de configuración.

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Evaluar la calidad de transmisión para los diferentes protocolos y sus mecanismo de seguridad de información ante la presencia de ruido, impacto del medio ambiente en el área industrial y estadísticas de tráfico, tiempos de transmisión; latencia, numero de retransmisiones.
- Robustez y complejidad de la topología de WFN implementada.

3.1.2. Fase: Montaje

Una de las principales características de la instrumentación inalámbrica es la rápida implementación de la WFN comparada con una red alamburada. Pero adicional a la disminución del tiempo esperada hay que considerar aspectos como competencias técnicas del personal y grado de dificultad de la instalación.

- **Tiempo de implementación de una WFN.**

En la fase de montaje fueron considerados los tiempos de implementación y puesta en funcionamiento de la WFN considerando el cronograma y procedimiento de implementación propuesto inicialmente, accesorio y software requeridos para el montaje y configuración; al igual que las competencias técnicas y grado de dificultad de la instalación.

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Justificar la reducción del tiempo de instalación, comparado con la instrumentación alambrada.
- Estimar los tiempos de instalación de instrumentación inalámbrica en ambiente industriales para futuras implementaciones.
- Lograr aportes para el desarrollo de la metodología de instalación de instrumentación inalámbrica en ambientes industriales.

3.1.3. Fase: Configuración y comisionamiento del sistema

La configuración y el comisionamiento del cableado de una red alambrada son dispendiosas y requiere de personal calificado si se trata de buses de campo.

- **Configuración y comisionamiento de la WFN**

Los dispositivos de la WFN no fueron pre- configurados con la finalidad de que esta configuración se realizara durante la prueba.

Para la implantación de futuros proyectos estos dispositivos vendrán pre-configurados según las especificaciones de las hojas de datos.

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Evaluar la posibilidad y complejidad de la configuración de los dispositivos de una WFN de forma remota.
- Lograr aportes para el desarrollo de la metodología de configuración y comisionamiento de la WFN en ambientes industriales.

3.1.4. Fase: Operación

En la fase de operación se consideran aspectos fundamentales para que el área de operación obtenga una información de las PV confiable y aspectos relevantes del comportamiento de la WFN que permita solucionar rápidamente inconvenientes presentados durante la operación y características que permitan visualizar futuras aplicaciones para la optimización de los procesos.

- **Interoperable con dispositivos multi-fabricante**

Dependiendo de las características del proyecto, para las áreas de compras y mantenimiento se evaluará la necesidad de contar con una WFN con dispositivos multi-fabricante.

Para aquella tecnología que utilizan protocolos abiertos se comprobará la habilidad que instrumentos de diferente fabricantes intercambien información con el Gateway y que esta información sea utilizada adecuadamente por el sistema.

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Corroborar las normativas planteadas por los protocolos abiertos los cuales garantizan interoperabilidad.

- **Consumo de energía de batería**

Es razonable considerar la vida de la batería como el factor que más limita la posibilidad de utilizar la tecnología inalámbrica.

En el desarrollo de las pruebas y con el fin de generar un aumento significativo en el consumo de energía de los instrumentos, en la prueba los instrumentos transmisores se configuraron con un periodo de adquisición de información y transmisión de un segundo el cual es el tiempo mínimo actual dado por los fabricantes.

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Lograr aportes en la metodología de diseño de topologías inalámbricas y configuración de instrumentación inalámbrica que permitan disminuir el consumo de energía de los instrumentos que componen la WFN.
- Comparar los tiempos de desgaste de las baterías de las diferentes tecnologías de instrumentación inalámbrica en ambiente industriales.

- **Calidad de la transmisión**

Con la información sobre las WFN obtenida en el “Gateway” se podrán monitorear la pérdida de información en condiciones normales la cual requerirá de modificaciones en el diseño.

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Comparar el reporte de fallas de comunicación de la red planteadas por las diferentes tecnologías al evaluar mensajes enviados vs mensajes recibidos.

- **Pérdida de energía**

Los transmisores o Routers de la WFN pueden perder la energía debido al desgaste en el consumo de energía de las baterías, la desconexión de las mismas para realizar un cambio por una batería recargada o factores ambientales.

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Analizar el comportamiento de las WFN implementadas por los diferentes representantes de las tecnologías ante pérdida de energía de uno de los transmisores.
- Facilidad de recuperación del sistema al restablecer el suministro de energía de los transmisores.
- Información obtenida del estado de la WFN.

- **Reconfiguración**

Los trasmisores o Routers de la WFN pueden requerir de reconfiguración tanto de los parámetros de trasmisión como de los parámetros de medición.

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Evaluar la posibilidad y complejidad de reconfiguración en los dispositivos de una WFN de forma remota.

- **Distancia de comunicación entre instrumentos y Gateway**

Los transmisores inalámbricos que trabajan en la frecuencia de 2.4 GHz, tiene una longitud de onda de 0.1249 m.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{299792458 \text{ m s}^{-1}}{2.4 \times 10^9 \text{ s}^{-1}}$$

$$\lambda = 0.1249 \text{ m}$$

Considerando la formula de la Zona de Fresnel; para lograr una distancia máxima de comunicación de 250 mts las antenas tienen que estar como mínimo a 2.79 metros de altura respecto al suelo.

$$r = \sqrt{\frac{0.129m * 125m * 125m}{250m}}$$
$$r = 2.79 \text{ m}$$

Los transmisores inalámbricos que trabajan en la 900 GHz tienen una mayor longitud de onda de enlace 0,333 m ya que la atenuación sufrida por las ondas de radio aumenta con la frecuencia de operación, ofreciendo mayor alcance.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{299792458 \text{ m s}^{-1}}{9 \times 10^8 \text{ s}^{-1}}$$

$$\lambda = 0.333 \text{ m}$$

Para lograr una distancia máxima de comunicación de 1000 mts las antenas tienen que estar como mínimo a 9.1 metros de altura respecto al suelo.

$$r = \sqrt{\frac{0.333m * 500m * 500m}{1000m}}$$
$$r = 9.1 \text{ m}$$

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Corroborar las distancias en línea de vista estipuladas por las tecnologías.
- Analizar el comportamiento de comunicación entre los instrumentos y el Gateway; ante distancias exigentes, alturas de antenas de 1.5 metros y presencia de obstáculos

3.1.5. Fase: Desempeño

En la fase de desempeño de la WFN es necesario garantizar que no se presenten pérdidas de paquetes de información, protección ante el ingreso de paquetes maliciosos en la red, por ejemplo, los comandos falsos de la válvula.

Las estadísticas de tráfico que permitan monitorear el desempeño de la WFN y los niveles de recepción ante el impacto del medio ambiente y condiciones ambientales.

- **Seguridad de la información**

La seguridad es ahora un requerimiento esencial en los sistemas de automatización de procesos, sin importar cuál es la capa física para el enlace de comunicación (cableado o Inalámbrica).

En el caso de una infraestructura inalámbrica, se necesitan medidas específicas de seguridad para garantizar confidencialidad (privacidad), autenticación (verificación de ID), integridad de mensajes (a prueba de alteraciones), ausencia de rechazos (seguridad de transacción) y disponibilidad.

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Corroborar los niveles de seguridad de transmisión inalámbrica de la información ante la presencia de ruidos e intrusos; planteados los estándares industriales contemplados en esta prueba.
- Compatibilidad de las diferentes tecnologías para transmitir en la misma frecuencia.

- **Medición y análisis de rendimiento**

Al tener información sobre el desempeño de la WFN se logra monitorear y realizar correcciones para optimizar el desempeño de la misma.

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Comparar el comportamiento de la red planteadas por las diferentes tecnologías al implementarse en estas pruebas en ambientes industriales.

- **Impacto del medio ambiente y condiciones industriales**

Típicamente las estaciones de producción petrolera se encuentran geográficamente localizadas en regiones con condiciones climáticas exigentes como lluvias, altos niveles de humedad y tormentas eléctricas las cuales podrían afectar la comunicación inalámbrica.

La localización de los puntos donde típicamente se monitorean las PV presentan ruidos industriales y vibración de equipos y tubería que podrían afectar la comunicación inalámbrica.

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Comparar el comportamiento de la WFN planteadas por las diferentes tecnologías ante condiciones ambientales agrestes y condiciones industriales.

- **Niveles de potencia de recepción.**

Como criterio de diseño se contemplo una potencia de la señal de -90dBm para las frecuencias de 2.4GHz y -100dBm para las frecuencias de 900MHz con el fin garantizar una buena comunicación entre el Gateway y el transmisor

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Comparar el comportamiento del nivel de potencia de recepción entre el Gateway y el transmisor para las diferentes tecnologías ante condiciones ambientales e industriales.

3.1.6. Fase: Mantenimiento

En la fase de mantenimiento los aspectos que fueron considerados son la necesidad de realizar labores de mantenimientos predicativos y seguros dependiendo el area de clasificación y filosofía de mantenimiento.

- **Reporte de diagnostico de los dispositivos**

Dependiendo de las características del proyecto y los requerimientos de las áreas de mantenimiento se evaluará la necesidad de contar con reporte de diagnostico de los dispositivos.

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Identificar que tecnologías suministran información del dispositivo tanto básica como adicional la cual será valorada en el proceso de selección dependiendo de la aplicación del proyecto y los labores de mantenimiento.

- **Cambio de Batería**

Las estaciones de producción petrolera cuentan con una clasificación de aéreas que junto con la evolución de filosofía de mantenimientos exigen módulos de alimentación de seguridad intrínseca de tipo hot-swappable, que permiten reemplazar la batería en el campo.

Los resultados de este parámetro de comparación permitirán:

- Verificar en campo que tecnologías de transmisores Inalámbrica usan módulos de alimentación de seguridad intrínseca de tipo “hot-swappable”, que permiten reemplazar la batería en el campo.
- Evaluar la complejidad en el procedimiento para realizar cambios de batería en ambientes industriales, teniendo en cuenta los requerimientos de seguridad.
- Comportamiento de los componentes del sistema frente a la pérdida de energía.

3.2. Pruebas de instrumentación Inalámbrica

Las pruebas de instrumentación con comunicación de transmisión inalámbrica utilizando protocolos o tecnologías inalámbricas industriales, ZigBee, Wireless-Hart, ISA100 y ACCUTECH (propietario) iniciaron en el mes de Noviembre de 2011 en la estación de recolección y tratamiento No 4 del campo Casabe (ver figura 11) perteneciente a la Superintendencia

Operaciones del Rio (SOR) - Gerencia Regional Magdalena (GRM) la cual se encuentra localizada en zona rural del municipio de Yondó, departamento de Antioquia.



Figura 11: Estación de recolección y tratamiento No 4 del campo Casabe

El desarrollo de estas pruebas permitió validar el uso de instrumentación inalámbrica en ambientes industriales de producción Petrolera para monitoreo de variables de proceso en pozos, plantas y estaciones de producción comprobando el desempeño de la instrumentación inalámbrica y teniendo en cuenta requerimientos técnicos, económicos, de confiabilidad, seguridad y rendimiento.

En estas pruebas no se estaba definiendo ni evaluando marcas, ni proveedores.

3.2.1. Condiciones climáticas

Durante el tiempo de la prueba se presentaron condiciones climáticas exigentes como lluvias y tormentas eléctricas una temperatura ambiente Máxima: 42 °C y Mínima: 26 °C.

3.2.2. Puntos de Monitoreo

Para el desarrollo de la prueba se consideraron tres puntos de monitoreo de PV con características especiales de transmisión; la figura 12 permite apreciar la localización de estos puntos.

- Descarga de Bomba Sistema API, Variable Presión, Rango 0-100 PSI

Este punto de monitoreo estaba localizado a una distancia de 234 mts con dificultades de transmisión por qué su ubicación en la descarga de las bombas se generan vibración y ruidos industriales, al encontrarse por debajo del nivel de las piscinas API no se tenía línea de vista de transmisión con el “Gateway” (ver figura 12), adicionalmente todos los transmisores de las diferentes tecnologías se localizaron en el mismo punto para generar interferencias en la misma frecuencia (ver figura 13).

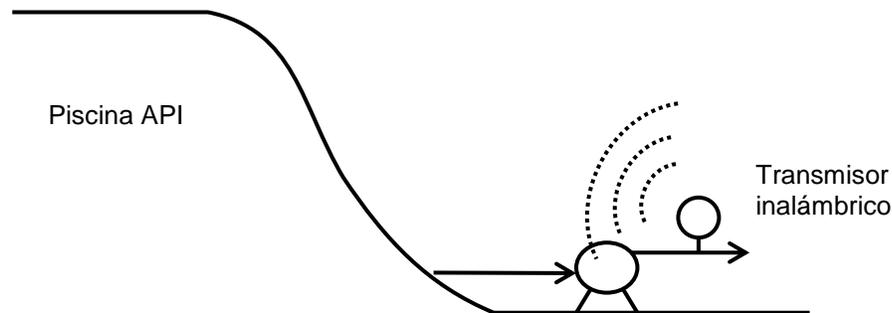


Figura 12: localización física del transmisor de presión en la descarga de la bomba de las piscinas API.

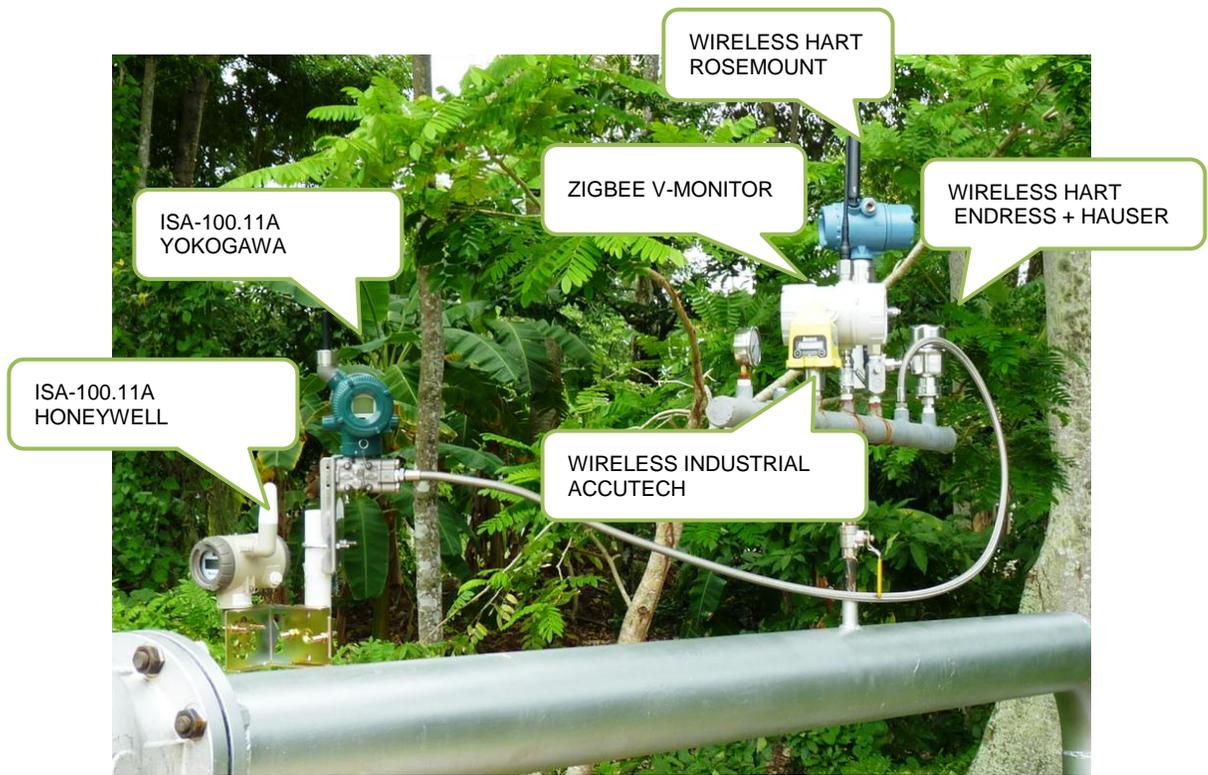


Figura 13: Instrumentos de transmisión inalámbrica instalados en la descarga de la bomba de las piscinas API.

- Temperatura ambiente, Variable temperatura, Rango 0-100 C

Para las frecuencias de 2.4 GHz la distancia máxima de comunicación contemplada entre un nodo transmisor y el Gateway es de 250 mts; este punto de monitoreo estaba localizado a una distancia de 246 mts siendo esta la distancia máxima encontrada dentro de la estación con línea de vista entre el Gateway localizado en el cuadro de control y los nodos transmisores permitiría corroborar esta teoría. Debido a que en este punto no se encontraba puntos de proceso se optó por monitorear la temperatura ambiente en este lugar; adicionalmente todos los transmisores de las diferentes tecnologías se localizaron en el mismo punto para generar interferencias en la misma frecuencia (ver figura 14).



Figura 14: Instrumentos de transmisión inalámbrica instalados para el monitoreo de temperatura ambiente

- Descarga de Bomba Sistema contra incendios, Variable Presión, Rango 0-100 PSI

Este punto de monitoreo estaba localizado a una distancia de 134mts con dificultades de transmisión por qué su ubicación en la descarga de las bombas se generan vibración y ruidos industriales, al encontrarse fuera del área de producción no se tenía línea de vista de trasmisión con el “Gateway” porque existen varios recipientes de producción que obstaculizan la comunicación, adicionalmente todos los transmisores de las diferentes tecnologías se localizaron en el mismo punto para generar interferencias en la misma frecuencia (ver figura 15)

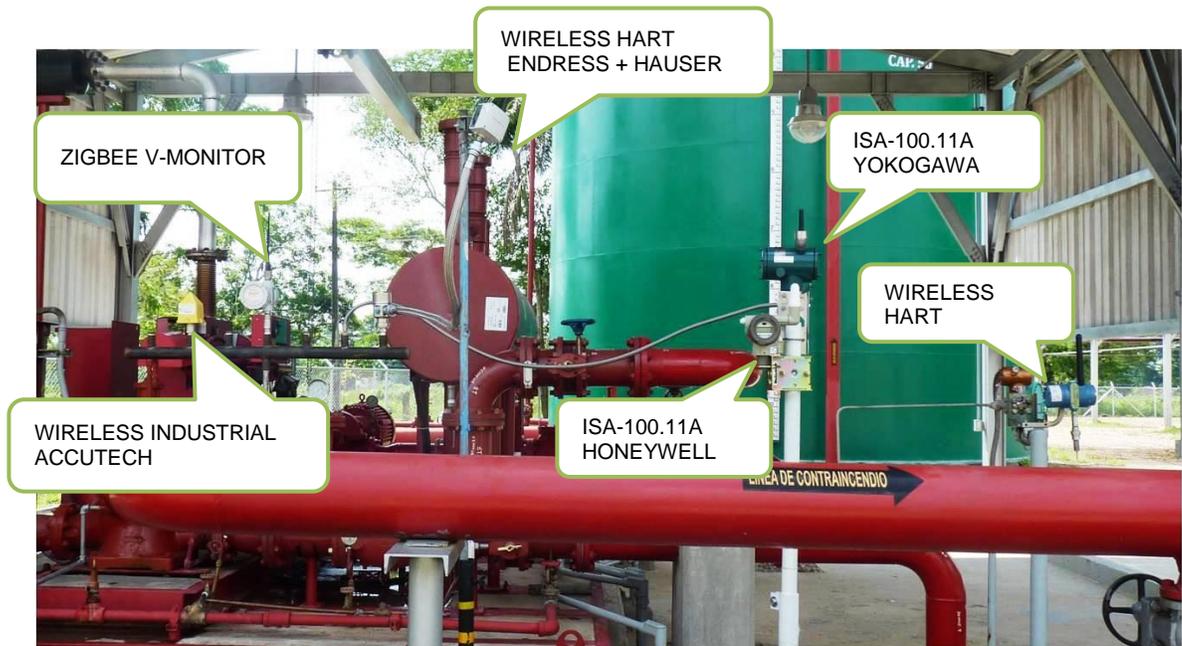


Figura 15: Instrumentos de transmisión inalámbrica instalados en la descarga de la bomba del sistema contra incendios.

3.2.3. Localización de “Gateway”

Los dispositivos Gateway´s de las diferentes tecnologías se instalaron en el cuarto de control de la estación.

Todas las tecnologías que participaron en esta prueba permiten localizar la antena de manera remota. Las mejores prácticas de instalación recomiendan localizar estas antenas en los puntos altos y sin obstrucciones que faciliten las comunicaciones con los dispositivos transmisores, pero debido a la rigurosidad de la prueba y evitar los riesgos de trabajos en altura se consideró como altura máxima de localización de estas antenas, la terraza del cuarto de control (2,50 mts); adicionalmente todos los “Gateway´s” de las diferentes tecnologías se localizaron en el mismo punto para generar interferencias en la misma frecuencia (ver figura 16).

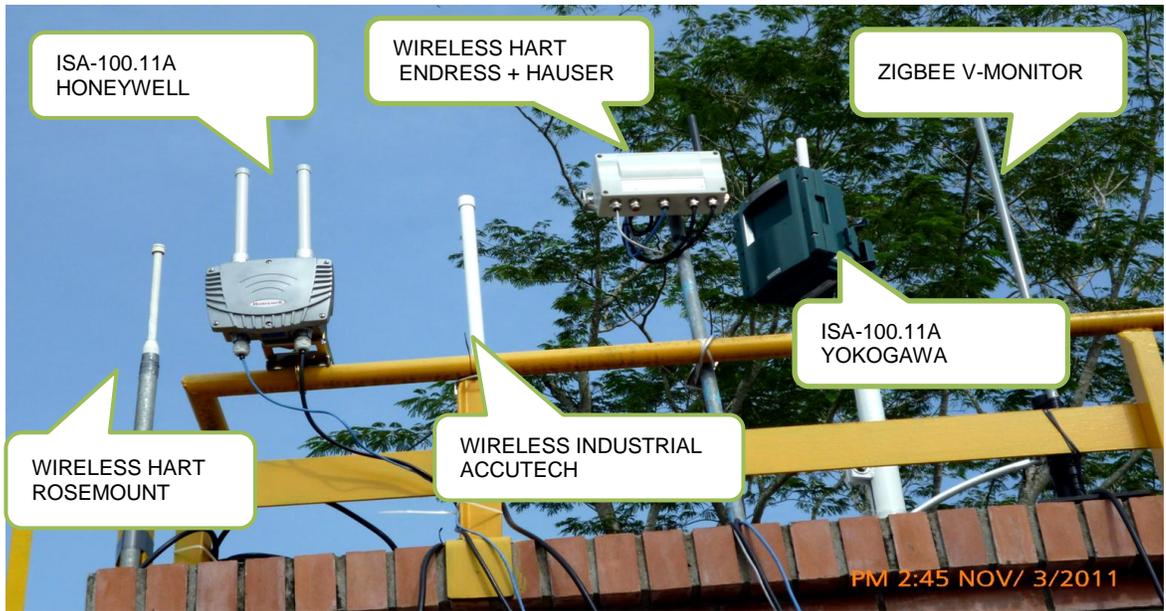


Figura 16: antenas de “Gateway´s” instalados en el cuarto de control.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el mercado existen varias soluciones (propietario o no) para los problemas con el uso de la transmisión inalámbrica en un entorno industrial. ISA-100.11A.11a, ZigBee, ACCUTECH (propietario) y WirelessHART son cuatro de los estándares disponibles más importantes se centraron en las aplicaciones de redes inalámbricas en la automatización de procesos. ACCUTECH al ser un protocolo propietario cuenta con pocas fuentes de información por tal razón la información teórica considerada en este informe fue tomada directamente de información técnica del fabricante.

4.1. Comparación de stack de protocolos

La capa física define las interfaces mecánicas y eléctricas y los procedimientos para establecer y desestabilizar la conexión física para transmitir la información codificada en bits. ISA-100.11A.11^a, ZigBee y WirelessHART utilizan la interfaz de radio se describe en el estándar IEEE 802.15.4. Estas radios operan en la banda de 2,4 GHz sin licencia (ISM- industrial, científica y médica). Esta banda se divide en 16 canales, usa DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) y 250-Kbps tasa de transmisión de datos en bruto.

En ISA-100.11a, la capa física y la capa inferior de enlace de datos utiliza el IEEE 802.15.4, mientras que la capa superior de enlace de datos implementa TDMA (time division multiple access). Se trata de un método de control de acceso medio que ofrece diversidad en el tiempo (es decir, la comunicación entre los dispositivos sólo puede ocurrir en un intervalo de tiempo específico). La duración de la ranura de tiempo puede ser configurado (10 a 14 ms) para adaptarse mejor a las necesidades de la aplicación. Todos los

intervalos de tiempo necesarios para permitir la comunicación de la red forman lo que se llama una supertrama. Dependiendo del tipo de comunicación, las ranuras de tiempo puede ser dedicada-sólo un dispositivo de fuente (para garantizar los requisitos de tiempo), compartidos múltiples dispositivos de acceso al medio que utiliza CSMA / CA (Carrier Sense Multiple Access / evitación de colisiones) para acomodar el tráfico ocupado y alarmas.

La fiabilidad de la comunicación se incrementa a través de la diversidad de frecuencia. ISA-100.11A.11a presenta tres diferentes esquemas de canal de salto. En salto de canal, la comunicación entre dispositivos utiliza un canal diferente en cada transmisión. La elección del canal sigue una secuencia pseudo-aleatoria de los canales disponibles (secuencia de salto). Aumenta la fiabilidad de los datos de comunicación, ya que aumenta la inmunidad contra interferencias. Otra estrategia usada para mejorar la fiabilidad es la ARQ (automatic repeat request). Los mensajes transmitidos deben ser reconocidos por el dispositivo de destino. Si esto no ocurre, entonces el mensaje se retransmite automáticamente en otro canal.

A favor de reducir al mínimo las posibles interferencias causadas por otras redes inalámbricas (WirelessHART, ZigBee, IEEE 802.11, Bluetooth, microondas, etc), ISA-100.11A.11a utiliza técnicas de gestión del espectro, como el canal blacklisting and adaptativa hopping.

Sobre la base de los datos recibidos desde el dispositivo de campo, en relación con el espectro de RF, el gestor del sistema puede interceptar (prohibir) el uso de uno o más canales durante un determinado período de tiempo. Estos canales prohibidos ir a una "lista negra canal" y no se utilizan en la secuencia de salto. El salto adaptable es similar a las listas negras canal, con la excepción de que la decisión es tomada por el dispositivo de

campo sobre la base de los datos estadísticos de algunos parámetros inalámbricos.

El protocolo HART utiliza de paso de testigo como el control de acceso al medio. Cuando el WirelessHART se añadió a la especificación HART, el stack de protocolo se modificó para acomodar la transmisión inalámbrica. Como se dijo antes, la interfaz de radio WirelessHART se toma del estándar IEEE 802.15.4. El control de acceso al medio es también TDMA para asegurar determinismo temporal y para optimizar el uso de la batería del dispositivo. La duración del intervalo de tiempo se fija (10 ms), y las ranuras de tiempo están organizados en una supertrama, que se repite periódicamente para adaptarse a diferentes tipos de tráfico.

La ranura puede ser dedicada con el fin de obtener mínimo la latencia o puede ser compartida para permitir una mejor utilización del ancho de banda.

El protocolo es capaz de soportar varios tipos de mensajes, como la edición de un solo sentido de los valores de proceso y control, notificación espontánea de excepción; ad-hoc de solicitud / respuesta, las transferencias en bloques y auto-segmentación de grandes conjuntos de datos.

Para evitar interferencias, perturbaciones, y las colisiones con otros sistemas de comunicación, WirelessHART también utiliza salto de canal, pero sólo un esquema definido se. En cuanto a la gestión del espectro, las listas negras del canal también se utiliza.

La pila de arquitectura ZigBee consta de varios componentes en capas como IEEE 802.15.4 2003 en la capa de Control de Acceso al Medio (MAC), la capa física (PHY) y la capa de red Zigbee (NWK). La capa de aplicación de ZigBee se subdivide en la subcapa APS, la capa ZDO (Zigbee Device

Objects) y los objetos de aplicación definidos por cada uno de los fabricantes.

4.2. Comparación en Topologías

ZigBee y ACCUTECH (propietario) usa una topología tipo estrella los nodos están conectadas directamente al Gateway y todas las comunicaciones se han de hacer necesariamente a través de este. Los dispositivos no están directamente conectados entre sí, además de que no se permite tanto tráfico de información. Dada su transmisión, una red en estrella activa tiene un nodo central activo que normalmente tiene los medios para prevenir problemas relacionados con el eco.

Tanto WirelessHART e ISA-100.11A.11a usan una topología tipo malla. En esta topología, un dispositivo de campo se puede utilizar para enrutar los mensajes desde los otros dispositivos a su destino final. Aumenta el alcance de la red y también crea rutas redundantes, mitiga los problemas de interferencias y obstáculos, sin intervención del usuario, y ayuda a aumentar la confiabilidad de la red.

Las rutas son configuradas por el administrador de la red basándose en la información recibida de los dispositivos. Por lo tanto, las rutas redundantes se actualizan continuamente sobre la base de la condición de espectro.

En WirelessHART y en ISA-100.11a, la capa de red es responsable de encaminamiento y direccionamiento. Sin embargo, en WirelessHART, el direccionamiento se realiza a nivel local con una dirección de 8-byte (EUI-64) o una dirección de 2 bytes (apodo), similar a lo que ocurre a nivel de subred en ISA-100.11A.11a. En cuanto a ISA-100.11A.11a, el direccionamiento y

enrutamiento se lleva a cabo a nivel de subred y también a nivel de la columna vertebral. Su capa de red se basa en IETF RFC 4944 (6LoWPAN), que especifica la transmisión de paquetes IPv6 en una red IEEE 802.15.4, lo que permite la conectividad IP dentro de los dispositivos de campo.

En esta topología WirelessHART y ISA-100.11a, los paquetes de datos transmitidos entre los nodos de la misma pueden utilizar rutas diferentes, lo que significa que pueden presentar diferentes retardos. Ambas normas no describen los mecanismos necesarios para garantizar la calidad de servicio en esta situación.

La tabla 6 de comparación resume algunas de las características

	WirelessHART	ISA 100 Wireless	ZigBee	ACCUTECH
<i>Arquitectura</i>	<i>Puntos de acceso Los dispositivos de campo (E / S y router, router)</i>	<i>Backbone dispositivos router de campo (sólo E / S, router, router y I / O)</i>	<i>Coordinador y route</i>	<i>Coordinador y route</i>
<i>Nivel físico</i>	<i>IEEE 802.15.4</i>	<i>IEEE 802.15.4</i>	<i>IEEE 802.15.4</i>	<i>Sin información</i>
<i>Banda</i>	<i>2.4Ghz</i>	<i>2.4Ghz</i>	<i>2.4Ghz</i>	<i>900 MHz</i>
<i>Soporte Real-time</i>	<i>TDMA</i>	<i>TDMA</i>	<i>TDMA</i>	<i>Sin información</i>
<i>Topología</i>	<i>Topología malla</i>	<i>Topología malla</i>	<i>Topología Estrella</i>	<i>Topología Estrella</i>
<i>Seguridad</i>	<i>Cifrado AES-128 Los mecanismos de seguridad en las diferentes capas Las Keys tienen una fecha de caducidad Interferencia de protección (lista negra, salto de canal)</i>	<i>Cifrado AES-128 Mecanismos de seguridad en las diferentes capas Las Keys tienen una fecha de caducidad Interferencia de protección (lista negra, salto de canal)</i>	<i>encriptación AES de 128bits Trust Center (Centro de validación) que proporciona un mecanismo de seguridad en el que se utilizan dos tipos de claves de seguridad</i>	

Tabla 6: Comparación técnica de protocolos

4.3. Análisis de resultados de prueba piloto

Después de concluidas las pruebas se elaboró el documento “*INFORME DE PRUEBAS PARA INSTRUMENTOS CON COMUNICACIÓN DE TRANSMISIÓN INALÁMBRICA PARA LOS CAMPOS DE PRODUCCIÓN PETROLERA EN ECOPETROL*”(ver Anexo 2) el cual plasma los resultados obtenidos durante el tiempo de la prueba el cual fue de un periodo de treinta (30) días después del montaje y configuración de los instrumentos, donde se monitorearan variables de proceso en tres localizaciones diferentes.

4.4. Fase: Presentación de diseño

El documento *Anexo 2* muestra las topologías planteadas por las diferentes tecnologías tomando como base la visita realizada inicialmente. De los resultados de esta fase se puede decir que:

- **Planificación de Red**

La planificación de una red no necesariamente tiene que ser costosa o consumir mucho tiempo y es de suma importancia para conseguir una red robusta.

Se debe determinar qué aplicaciones actuales serán inalámbricas y también considerar los posibles proyectos futuros. El punto de acceso o el “Gateway” debe estar ubicado en un área que le permita al usuario satisfacer su requerimiento presente y futuro sin tener que recurrir a repetidores innecesarios o nuevos puntos de acceso.

En futuros proyectos la fase de diseño evaluará la posibilidad de instalar una infraestructura inalámbrica en todo el sitio para poder implementar la red de manera rápida y económica sin una inversión adicional en infraestructura.

Los estudios de Radio Frecuencia (RF) de la planta a la hora de planificar una red robusta serán realizados por los representantes de la respectiva tecnología. Bombas, motores, vehículos y el clima pueden modificar los patrones de RF y variar de manera impredecible. Dependiendo de los requerimientos del proyecto, los niveles de robustez de red, condiciones de RF cambiantes y de la distribución de los instrumento se evaluará que tipo de topología es recomendable.

Todas las topologías de red implementadas en las pruebas por las diferentes tecnologías presentaron un rango de potencia de -80 dBm a -90 dBm para las frecuencias de 2.4GHz y un rango de potencia de -90 dBm a -100 dBm para las frecuencias de 900MHz con el fin garantizar una buena comunicación entre el Gateway y el transmisor. Esta medición fue obtenida por medio del Gateway de cada uno de los fabricantes.

La robustez y flexibilidad obtenida de las topologías implementadas cumplió con los requerimientos de esta prueba permitiendo transmitir la información de las variables de proceso al cuarto de control sin perder información dadas las condiciones del ambiente industrial donde se realizo la prueba. (*Ver Anexo 2*)

4.5. Fase: Montaje

- **Tiempo de implementación de una WFN.**

Debido a la ubicación de los puntos de monitoreo, los cuales se encontraban a largas distancias y la dificultad de acceso de un banco de ductos enterrado, por ser instalaciones existente, el ahorro no es sólo en los tiempos de instalación y costos de cable comparada con una red alambrada, sino

también en todos los esfuerzos necesarios asociados (verificación de conexasión, bancos de ductos, permisos de trabajo etc.).

El equipo de trabajo que realizó las actividades de implementación estaba conformado por un técnico y un ingeniero, los cuales realizaron las siguientes acciones.

Antes de realizar la instalación mecánica de los instrumentos en los puntos a monitorear se realizó la configuración de los mismos, la configuración del “Gateway” y el reconocimiento de comunicación entre diferentes dispositivos; el desarrollo de todas estas actividades tomó aproximadamente 60 min.

La instalación de los tres puntos de monitoreo dentro de una red inalámbrica y el “Gateway” duró aproximadamente 45 min, considerando las siguientes actividades, traslado del personal al punto de monitoreo, instalación mecánica del elemento sensor y verificación del enlaces de comunicación inalámbrico.

La tabla 7 muestra una comparación de los tiempos de implementación de los diferentes puntos de monitoreo y configuración de la red comparadas con una red alambrada.

Los tiempos considerados para la implantación del monitoreo de esos tres puntos dentro de una red alambrada se obtuvieron teniendo en cuenta el juicio de expertos y registros históricos de ejecución de proyectos anteriores para cableado de instrumentos con el siguiente personal.

(2) Personal de obra= banco de ductos para cableado de instrumentación, cajas de alado.

(1) Técnico =cableado de instrumentos.

(1) Ingeniero= configuración de instrumentos, comisionamiento de cableado, configuración de la red alambrada.

Actividades	Red	Red
	Inalámbrica	Alambrada
Banco de ductos para cableado de instrumentación, cajas de halado.	0	120 horas
Instalación mecánica de instrumentos	1,5 horas	1,5 horas
Instalación mecánica de "Gateway"	1,5 horas	0
Cableado	0	24 horas
Comisionamiento de cableado	0	8 horas
Configuración de las red	1,5 horas	1,5 horas

Tabla 7: Tiempos de instalación de una red Inalámbrica y una red alambrada.

Los resultados obtenidos en los tiempos de implementación de una WFN permitieron comprobar la reducción de tiempo de instalación comparados con los registros históricos de instalación de una red alambrada.

Unos de las características determinantes de esta reducción de tiempos es la no necesidad de construir bancos de ductos o conduit aéreo para el cableado de instrumentos. Si las facilidades existentes cuenta con bancos de ductos o conduit aéreo disponibles para el cableados de nuevos puntos de monitoreo los tiempos de reducción sería menor

4.6. Fase: Configuración y comisionamiento del sistema

El procedimiento de configuración y el reconocimiento de comunicación entre diferentes dispositivos se realizó con todos los dispositivos y en el mismo

lugar, con condiciones ergonómicas, de seguridad y comodidad lo que agilizó la configuración de estos dispositivos.

Después de establecida la comunicación de la WFN se instaló el Gateway en el sitio predefinido y se procedió a instalar los instrumentos de monitoreo en los diferentes puntos. Después de instalado cada uno de los instrumentos de monitoreo se verificaba la calidad de la transmisión a través de la información obtenida desde el “Gateway” agilizando de esta manera el comisionamiento de la WFN.

La comunicación bidireccional establecida entre los dispositivos de la WFN permite la configuración remota de los transmisores en los parámetros principales de medición y en las características que tendrá el dispositivo en la WFN; por ejemplo si será configurado como transmisor y /o “Router” (ISA-100.11A y Wireless Hart) , si tendrá definida un camino definido o será auto-organizable (ISA-100.11Ay Wireless Hart) , tiempos de trasmisión , etc.

4.7. Fase: operación

- **Interoperable con dispositivos multi-fabricante**

Hay una gran variedad de tipos de redes Inalámbrica y no todas ellas son interoperables con dispositivos multi-fabricante, de modo que se debe considerar según los requerimientos del proyecto desde la fase de diseño, como criterios de selección, si se requiere una solución inalámbrica basada en un estándar internacional.

Una solución inalámbrica basada en un estándar internacional logra garantizar una amplia selección de productos y tener partes de reemplazo con precios de mercado.

Sin embargo, el hecho de usar una misma norma IEEE 802.15.4 por sí solo no garantiza la interoperabilidad con dispositivos multi-fabricante. En consecuencia, es necesario que todos los transmisores inalámbricos de la planta también usen el mismo “protocolo de aplicación”. Esto garantiza la integración de todos los transmisores con el sistema de la misma manera y que sean fáciles de reemplazar, además de que todos sean puestos en marcha, calibrados y diagnosticados del mismo modo.

También se deberá chequear que la tecnología haya sido probada en un entorno de planta con múltiples proveedores para estar seguro de que cumple con los requerimientos de la industria de procesos.

Los resultados de las pruebas realizadas (*ver Anexo 2*) permitieron confirmar que el protocolo Wireless Hart y ISA-100.11A son protocolos de comunicación abiertos bajo una prueba de interoperabilidad con dispositivos multi- fabricantes.

Las pruebas realizadas permitieron contar con la participación de dos proveedores con protocolos Wireless Hart (Rosemount- Endress +Hauser) e ISA-100.11A(Honey well- Yokogawa) con los cuales se realizó una prueba de interoperabilidad con dispositivos multi- fabricantes.

La prueba consistía en la integración a una WFN de un dispositivo de diferente fabricante. Se verificó la comunicación obtenida con el “Gateway” y se corroboró la comunicación establecida con la modificación de parámetros desde el “Gateway” al instrumento.

La tabla 8 muestra los resultados de interoperabilidad multi-fabricante entre los protocolos de comunicación Wireless Hart y ISA-100.11A.

Fabricantes	Protocolo de transmisión	Interoperable
Rosemount- Endress +Hauser	Wireless Hart	✓ OK
Honey well- Yokogawa	ISA-100.11A	✓ OK

Tabla 8: resultados interoperabilidad multi-fabricante

- **Consumo de energía de batería**

La tasa de reporte y la característica de enrutamiento del transmisor inciden en la vida de la batería. En esta prueba los instrumentos transmisores se configuraron con un tiempo de adquisición de información y transmisión con un periodo de un segundo. Si bien actualmente todos los fabricantes trabajan con periodos de actualización y transmisión de un segundo; los requerimientos del proyecto determinarán estos tiempos de transmisión.

Lo que más afecta la vida de una batería es la adquisición de información de la medición, puesto que se debe alimentar el sensor. Sin embargo, la frecuencia de actualización puede ser considerada si el dispositivo inalámbrico se alimenta externamente, o con un dispositivo de captación de energía, o el mantenimiento de la batería no es una preocupación para la aplicación.

La figura 17 ilustra el consumo de energía de un transmisor en una topología malla con comunicación con dos transmisores y un periodo de transmisión de cuatro segundos. [2]

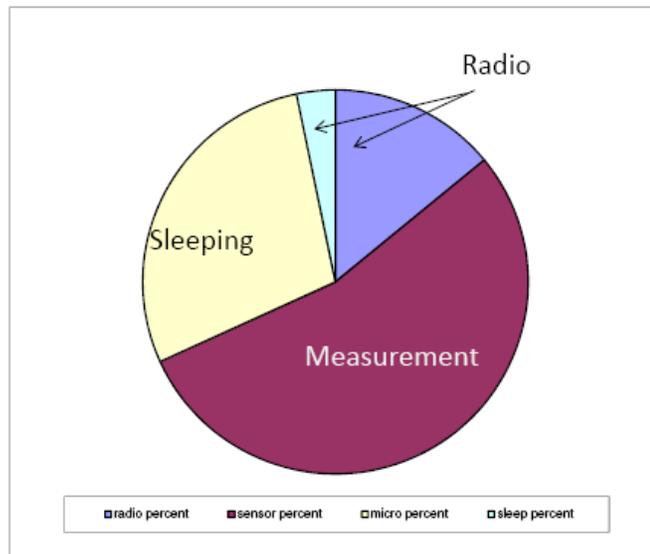


Figura 17. Consumo de energía en transmisores inalámbricos. [2]

El tiempo de carga de energía de la batería varía dependiendo del fabricante; y sus estimaciones obedecen directamente a factores como el tipo de dispositivo, modelo, variable a medir, temperatura ambiente, tiempo de adquisición y transmisión, entre otros. Por esta razón los proveedores y fabricantes cuentan con software propietarios para realizar estas estimaciones.

La figura 18 permite apreciar el consumo promedio de energía de las baterías obtenido durante la prueba las cuales están agrupadas por representantes de tecnologías, mostrando el siguiente comportamiento.

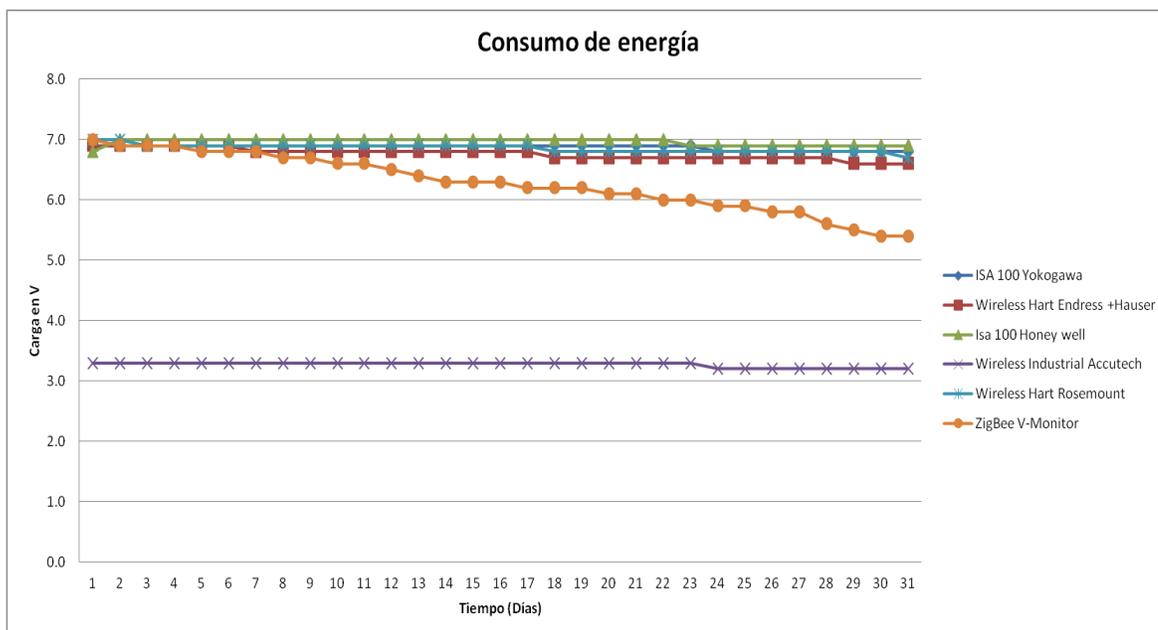


Figura 18: Consumo de energía promedio durante la prueba

El alto consumo de energía presentado por la tecnología soportada en el estándar ZigBee fue causado por el tiempo de adquisición y transmisión de 1seg. La tecnología soportada en el estándar ZigBee tiene un sistema de almacenamiento de energía por medio de un Supercapacitor en paralelo con la celda de batería que maneja los picos de corriente de la transmisión lo cual prolonga la vida útil de la batería, pero al tener un tiempo de transmisión de 1 seg el proceso de almacenamiento de los capacitores no se alcanza a completar lo cual impacta el consumo de energía de las baterías.

La tabla de cálculo de vida útil realizada por el fabricante (ver tabla 9), muestra que bajo estas condiciones se prevé una vida útil de aprox. de 12 Días:

iTrans Battery Power Consumption	
Sleep Power Consumption	20 uA
Sample Power Consumption	52 mA
Transmit Power Consumption	98 mA
Sample Frequency	1 sec
Report Factor (Solo # enteros)	1
Report Frequency	0.016667 min
Total Number of Transmission / hr	3600
Transmission Time	1 sec
Sensor Setting Time	0.05 sec
Number of Sample / hr	3600
Total Trans Time / hr	1
Total Sample Time / hr	0.05
Total Sleep Time / hr	-0.05
Total Transmit Power Consumption / hr	98.000 mA
Total Sample Power Consumption / hr	2.60000 mA
Total Sleep Power Consumption / hr	-.00100 mA
Total Power Consumption / hr	110.65890 mA
Total Battery Power	38 AH
Contingency Factor	
Battery Total Hour Life	343.40 hrs
Battery Life in Days	14.31 days
Efficiency Factor	80%
Battery Safety Factor (temperature factor, etc)	20%
Total Battery Life in Days	11.447 days
Total Battery Life in Years	0.0314 yrs

Tabla 9: Tabla de cálculo de vida útil del fabricante ZigBee
(report frequency 1 seg)

Se recomienda la implementación de esta tecnología para aplicaciones donde se requieran tiempos de muestreo de 30 Segundos y tiempo de Transmisión cada 3 Minutos. (Ver tabla 10)

iTrans Battery Power Consumption	
Sleep Power Consumption	20 uA
Sample Power Consumption	52 mA
Transmit Power Consumption	98 mA

Sample Frequency	30 sec
Report Factor (Solo # enteros)	6
Report Frequency	3 min
Total Number of Transmission / hr	20
Transmission Time	1 sec
Sensor Setting Time	0.05 sec
Number of Sample / hr	120
Total Trans Time / hr	0.006
Total Sample Time / hr	0.001667
Total Sleep Time / hr	0.992778
Total Transmit Power Consumption / hr	0.544 mA
Total Sample Power Consumption / hr	0.08667 mA
Total Sleep Power Consumption / hr	0.01986 mA
Total Power Consumption / hr	0.71606 mA
Total Battery Power	38 AH
Contingency Factor	
Battery Total Hour Life	53067.93 hrs
Battery Life in Days	2211.16 days
Efficiency Factor	80%
Battery Safety Factor (temperature factor, etc)	20%
Total Battery Life in Days	1764.931 days
Total Battery Life in Years	4.8464 yrs

Tabla 10: Tabla de cálculo de vida útil del fabricante ZigBee
(report frequency 3 min).

Es necesario analizar el proceso que se monitoreará antes de definir qué tasa de actualización se necesita realmente. De acuerdo a la aplicación, un chequeo de temperatura una vez cada minuto suele ser suficiente dependiendo de las condiciones del proceso.

Ninguno de los protocolos de comunicación es capaz de satisfacer los requisitos de tiempo real (latencia en 1 a 10 ms de rango). Esto requeriría el desarrollo de nuevas tecnologías para ser usadas en la capa física.

La extensión de la vida de la batería que haga posible el uso de transmisores inalámbricos se puede lograr por distintas vías:

- Menores tasas de reporte de la medición o transmisión solo cuando la tasa de cambio del valor medido supere cierto umbral. Esta técnica de muestreo con reporte por excepción extiende la vida de la batería pero solo en el caso de aplicaciones tolerantes a latencia, donde si es posible reducir eficazmente la tasa de reporte.
- Uso de transmisores sin enrutamiento en una red estrella, que es en la mayoría de las aplicaciones la única manera posible de extender la vida de la batería.
- Los transmisores inalámbricos con alimentación externa mitigan este problema. En este caso, solo la comunicación del dispositivo es inalámbrica, mientras la fuente de alimentación sigue todavía con cables.

- **Calidad de la transmisión**

A través de la información obtenida desde el “Gateway” durante la prueba no se presentó pérdida de información en la WFN de las diferentes tecnologías. Las topologías planteadas y la robustez de los protocolos garantizaron que no existiera pérdida de información al evaluar los mensajes enviados vs mensajes recibidos.

- **Pérdida de energía**

En el desarrollo de la prueba se indujo la pérdida de energía en uno de los elementos de la WFN en el momento que se realizó el procedimiento de cambio de batería

En este instante el sistema de monitoreo de cada una de las WFN de las diferentes tecnologías no detectó la presencia de este nodo y la señal de la PV monitoreada se perdió. El sistema no generó alarma por disminución de energía debido a que la pérdida de energía fue inmediata.

Finalizado el cambio de batería y energizado nuevamente, el nodo de la WFN de cada una de las tecnologías fue reconocido instantemente manteniendo los parámetros de la configuración anterior.

- **Reconfiguración**

Las tecnologías analizadas en esta prueba permitieron una comunicación bidireccional, de esta forma se logró hacer la reconfiguración de parámetros de monitoreo en los dispositivos de una WFN de forma remota.

Tecnologías soportadas en protocolos como ISA-100.11A y Wireless Hart permiten adicionalmente la reconfiguración del dispositivo como transmisor o Routers.

- **Distancia de comunicación entre instrumentos y Gateway**

Los transmisores inalámbricos pueden establecer una comunicación hasta de 250 metros en frecuencias de 2.4GHz y 1000 metros en frecuencias de 900MHz considerando una línea de vista y las alturas de las antenas según los cálculos de la Zona de Fresnel (sección 5.5 Fase: Operación / Distancia de comunicación entre instrumentos y Gateway) sin embargo en esta prueba existían obstáculos metálicos en la planta como tanques de almacenamiento, tuberías, recipientes de proceso tales como separadores, tratadores electrostáticos que pueden reducir el alcance máximo dependiendo de la densidad.

Los resultados de las pruebas realizadas (*ver Anexo 2*) mostraron los siguientes resultados.

Con el fin de estimar la distancia máxima entre el Gateway y el transmisor manteniendo una potencia de la señal de -90dBm para las frecuencias de 2.4GHz y -100dBm para las frecuencias de 900MHz se desplazaron los instrumentos a los alrededores de la estación de producción Casabe IV.

El primer desplazamiento se realizó a lo largo de la vía sentido sur norte a las afueras de la estación la cual mostro los siguientes resultados considerando el punto AAA como el punto inicial donde se encontraba ubicado el Gateway. (Ver figura 19)

ISA-100.11a, Wireless Hart y ZigBee mantuvieron una potencia de señal de -90dBm hasta 423 metros.

Wireless Industrial Accutech logró una potencia de señal de -100dBm hasta 578 metros.

Una de las razones por la cual no se logró una mayor distancia fue porque existían obstáculos producto de la espesa vegetación que impedían tener una línea de vista.

Para enlaces de larga distancia ambas frecuencias necesitan línea de vista para un correcto funcionamiento. Sin embargo ciertos tipos de obstrucciones son más perjudiciales para un enlace de 2.4GHz en comparación con uno de 900MHz. Por ejemplo, los árboles que tienen hojas de dimensiones cercanas a la longitud de onda de los 2.4GHz (pero generalmente más cortas que la longitud de onda de los 900MHz) son causa de una mayor atenuación.

Es difícil cuantificar la atenuación debido a los árboles que se nos hagan presentes en el camino del radioenlace.

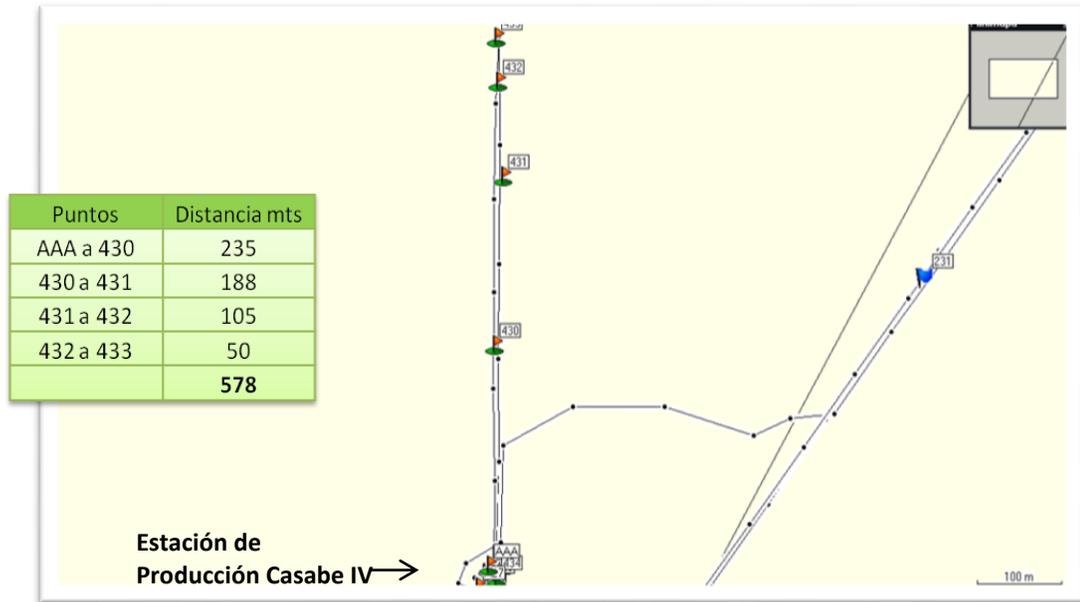


Figura 19: Primer desplazamiento de instrumentos con el fin de medir la distancia de comunicación.

El segundo desplazamiento se realizó a lo largo de la vía oriente-occidente a las afueras de la estación la cual mostro los siguientes resultados considerando el punto AAA como el punto inicial donde se encontraba ubicado el Gateway. (Ver figura 20)

ISA-100.11a, Wireless Hart y ZigBee mostraron una excelente comunicación hasta 340 metros.

Wireless Industrial Accutech mostro una excelente comunicación a los 716 metros y ISA-100.11a, Wireless Hart y ZigBee una comunicación débil a 716 metros. Debido a los límites de la estación no se logró extender la distancia

de los instrumentos de Wireless Industrial Accutech y corroborar los 1000 metros que propone esta tecnología

Una de las razones por la cual se logró una mayor distancia de comunicación en el segundo desplazamiento fue porque los obstáculos que se encontraban en este trayecto solo correspondían a recipientes para tratamientos de crudo y no a obstáculos de espesa vegetación.

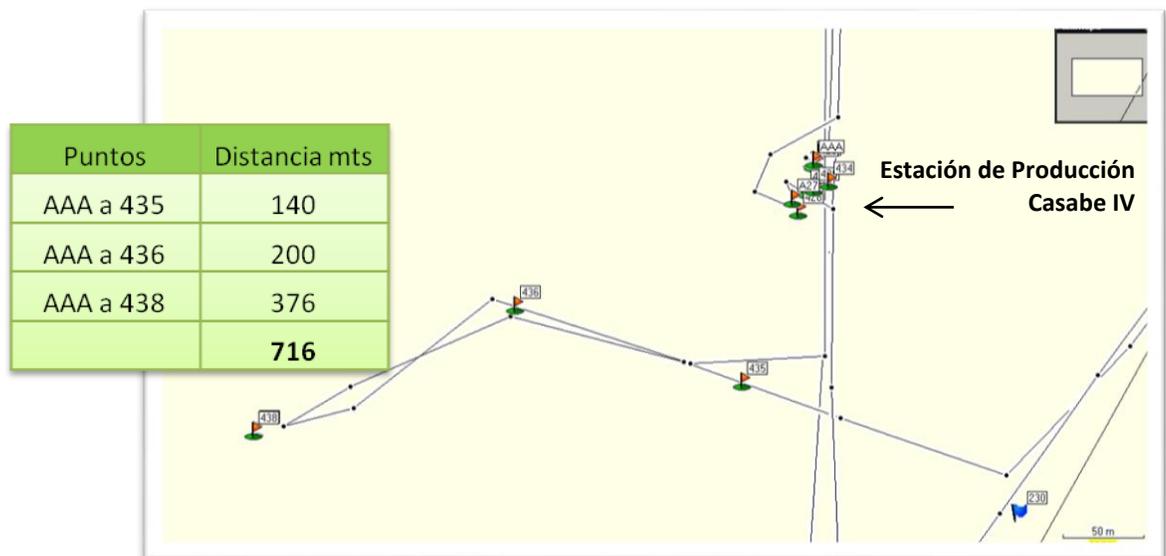


Figura 20: Segundo desplazamiento de instrumentos con el fin de medir la distancia de comunicación

En los criterios de selección las distancias máximas de comunicación que serán consideradas serán las propuestas por las tecnologías, en caso de requerirse distancias mayores se optará por la implementación de máximo 4 repetidores.

En la implementación se validará la potencia de la señal con el fin de garantizar una potencia de señal entre -60 dBm y -90dBm para 2.4GHz y -

100 dBm y -95 dBm para 900MHz la cual puede llevar a la instalación o no de repetidores.

La figura 21 ilustra los resultados obtenidos en estas pruebas.

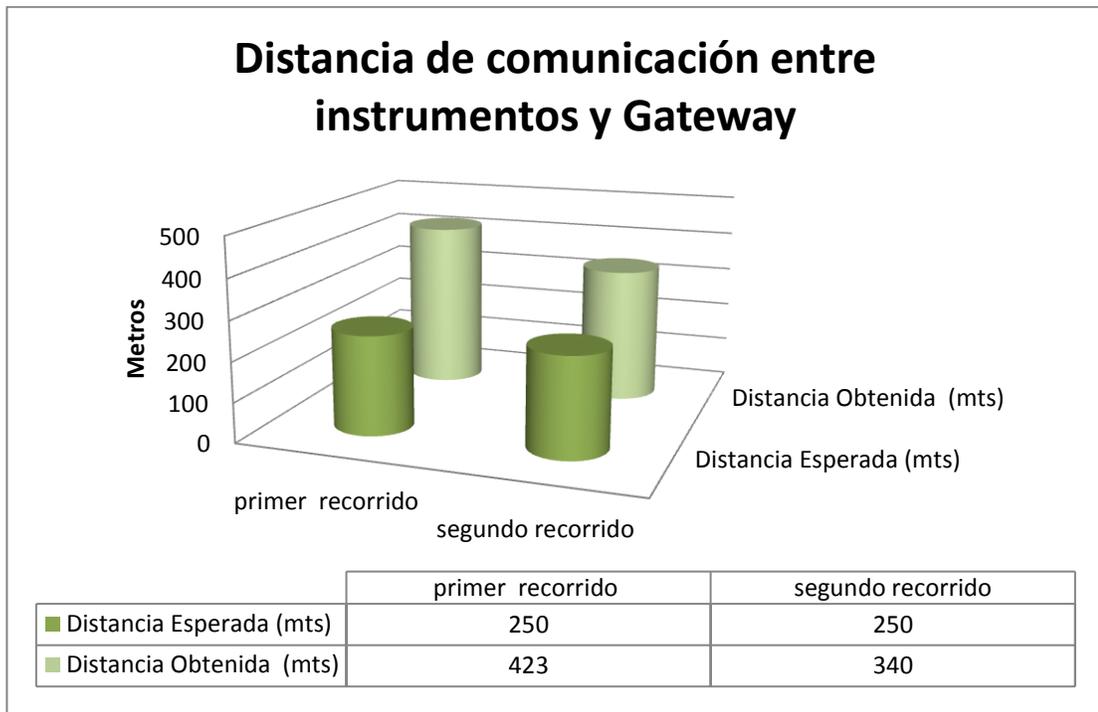


Figura 21: Distancia de comunicación entre instrumentos y Gateway

4.8. Fase: Desempeño

- **Seguridad de la información**

Incluso en una comunicación inalámbrica fija, surgen algunos problemas, tales como interferencia y diafonía, provenientes de alguna otra comunicación inalámbrica, y jamming, que usa la misma frecuencia con fines maliciosos.

Además, las señales de una comunicación inalámbrica atraviesan el aire y llegan a áreas circundantes, de modo que puede haber problemas como

intercepción y escuchas ocultas por un tercero, o una penetración en la red inalámbrica desde afuera.

Los mecanismos de seguridad deben ser evaluados utilizando los siguientes criterios: confidencialidad de la información, la integridad de la información, la autenticación de dispositivos de comunicación, y la disponibilidad de la información.

La confidencialidad de la información garantiza que sólo los miembros de la red autorizados tendrán acceso a la información. En ISA-100.11a, la confidencialidad se establece a través del uso de codificación del estado de la técnica basada en AES-128, junto con diferentes claves en la capa de enlace de datos (hop-a-hop seguridad) y en la capa de transporte (de extremo a extremo de seguridad).

La integridad de la información está garantizada a través de los mecanismos heredados de 802.15.4.

El estándar ISA-100.11a presenta características adicionales para mejorar la seguridad. El proceso de combinación también puede hacer uso de claves asimétricas, que no requiere un intercambio seguro inicial con un dispositivo de unión.

WirelessHART también utiliza el cifrado AES-128-base y un MIC (message integrity code) para autenticar y verificar la integridad de la información en diferentes capas con claves dinámicas (es decir, una clave de red y la clave de sesión). El proceso de unión es similar a la descrita anteriormente. El dispositivo que está dispuesto a unirse a la red envía una solicitud de combinación, y si todo va bien, que recibe una respuesta de unión desde el

administrador de la red. Sin embargo, WirelessHART utiliza una clave de combinación separada para autenticar el dispositivo en el proceso de unión.

La disponibilidad de la información puede ser amenazada por la interferencia (continuo o intermitente) en los canales de comunicación. En el caso de interferencia continua en varios canales, la lista negra canal proporciona una solución eficiente. Si la interferencia es intermitente, entonces el canal de salto es una solución adecuada. Además, para evitar este tipo de problemas, el espectro de transmisión se controla continuamente.

En cuanto a seguridad, ZigBee puede utilizar la encriptación AES de 128bits, que permite la autenticación y encriptación en las comunicaciones. Además, existe un elemento en la red llamado Trust Center (Centro de validación) que proporciona un mecanismo de seguridad en el que se utilizan dos tipos de claves de seguridad, la clave de enlace y la clave de red.

Ninguna de las normas presenta un mecanismo para evitar los ataques de colisión o contra gran número de peticiones de unión. Sin embargo, los dispositivos de campo reportan datos estadísticos relacionados con la comunicación inalámbrica, tales como el número de retransmisiones intentados y el número de transmisiones sin acuse de recibo que podrían ser usados para detectar anomalías.

Durante la prueba se contaban con cinco tecnologías trabajando en la misma frecuencia 2.4GHz y una red inalámbrica Wi-Fi Esto permitió generar una condición de interferencia.

A través de la información obtenida desde el "Gateway" durante la prueba no se presentaron pérdidas de paquetes de información.

En los resultados de esta prueba fue no se presentaron interferencias de los protocolos ISA-100.11a, Wireless Hart y ZigBee los cuales se encontraban trabajando en la misma frecuencia 2.4GHz; los resultados de esta prueba no permite comprobar que estas tecnologías han sido diseñadas específicamente para no interferir una con otra y la convivencia de estos protocolos debido a que no se contaban con suficientes nodos de transmisión para generar una condición extrema de interferencia.

Adicionalmente los Gateway's rotaban las claves de encriptación de manera automática para dificultar el ingreso de paquetes maliciosos en la red.

- **Medición y análisis de rendimiento**

Las tecnologías analizadas en esta prueba permitieron monitorear el desempeño de la WFN y el nivel de carga de energía en las baterías de los dispositivos.

Basados en el nivel de potencia de la comunicación reportados en el sistema de monitoreo de la WFN se pueden realizar ajustes con el propósito de tener un nivel de interinidad de comunicación y diseño robusto.

- **Impacto del medio ambiente y condiciones industriales**

Suele haber algunos conceptos acerca de los problemas provocados por las condiciones ambientales en una comunicación inalámbrica.

Durante el tiempo de la prueba se presentaron condiciones climáticas como lluvias y tormentas eléctricas las cuales no afectaron la comunicación en ninguno de los protocolos o tecnologías.

Los resultados obtenidos en las pruebas piloto no son suficientes para comprobar que la comunicación inalámbrica no sea afectada por el impacto del medio ambiente y condiciones industriales; esto requiere de más estudios.

Considerando las condiciones climáticas donde se encuentran localizadas las estaciones de producción de Ecopetrol en Colombia; se valida para aplicaciones en estaciones de producción en Ecopetrol que la comunicación inalámbrica industrial no es vulnerable a campos magnéticos o que la comunicación se vea interrumpida por lluvia. En algunos casos, la comunicación inalámbrica incluso es más ventajosa que la comunicación cableada.

A continuación se resumen las relaciones entre las condiciones ambientales presentadas durante las pruebas y una comunicación Inalámbrica.

- Daños por caídas de relámpagos

En una red alamburada la descarga eléctrica de un relámpago produce una corriente generada que viaja por el cable de la fuente de alimentación y los cables de comunicación, dañando así los dispositivos electrónicos conectados.

En consecuencia, el riesgo de una descarga eléctrica a causa de la caída de un relámpago en el caso de transmisores inalámbricos es bastante pequeño, ya que no hay cables de conexión. No obstante, se requiere alguna medida de protección contra relámpagos locales para prevenir un posible golpe directo de la descarga, como puestas a tierra.

- Interferencia de la comunicación a causa de un relámpago.

La frecuencia de las ondas electromagnéticas generadas por la descarga eléctrica producida por un relámpago va desde un par de Hz hasta 1 GHz. Sin embargo, cuanto mayor es la frecuencia, menor es la potencia, y el problema ocurre solo cuando se dan al mismo tiempo una descarga eléctrica y una comunicación intermitente. Y aun cuando pudiera ocurrir, el problema se resuelve con control de retransmisión.

- Lluvia y sus consecuencias

El rango de 2,4 GHz y 900 MHz que se usa para la comunicación inalámbrico de campo no se vio afectado por lluvia, lo cual se comprobó durante el periodo de las pruebas en el que se presentaron fuertes lluvias.

- Riesgos de Desconexión

La geografía típica donde se encuentra las estaciones de producción son áreas rurales donde se puede presentar deterioro del terrero o presencias de roedores que dañan el cableado físico.

Se corroboró que la comunicación inalámbrica no tiene el problema de desconexión del cable típico de una comunicación cableada, que ocurre cuando se rompe un cable como resultado de un desastre o se deteriore en un entorno adverso, donde el cable puede ser dañado por animales salvajes o cortados intencionalmente con fines maliciosos.

- Consecuencias de un campo magnético fuerte

Dos de los puntos en los cuales se realizaron monitoreo de variables se encontraban en las descarga de las bombas donde se generaba vibración y ruidos industriales adicionales, las cuales no afectaron la comunicación en ninguna de las tecnologías.

Por lo general, un campo magnético que pueda causar un problema no está en el rango de alta frecuencia de una comunicación inalámbrica sino en el rango de baja frecuencia. En consecuencia, la comunicación inalámbrica tiene ventajas con respecto al cableado cuando se produce una corriente de inducción generada por un campo magnético.

- **Niveles de potencia de recepción.**

Las tecnologías soportadas en los protocolos de comunicación ISA-100.11a, Wireless Hart y ZigBee las cuales trabajan en la frecuencias de 2.4Ghz lograron durante toda la prueba una potencia de señal entre -100dBm y -90dBm y la tecnología soportada en el protocolo ACCUTECH (propietario) la cual trabaja en la frecuencias de 900Mhz lograron una potencia de señal entre -110dBm y -100dBm. Garantizando de esta manera una buena comunicación entre el Gateway y el transmisor en todas las tecnologías evaluadas.

4.9. Fase: Mantenimiento

- **Reporte de diagnostico de los dispositivos**

Las tecnologías soportadas en los protocolos de comunicación ISA-100.11a, Wireless Hart permiten suministrar información tanto básica como adicional y estará disponible para el análisis de gestión de activos , haciendo más productivo el tiempo del técnico, lo que significa menos tiempo de parada, menores costos de mantenimiento y mayor producción.

- **Cambio de Batería**

Todas las tecnologías presentaron propuestas con encapsulado intrínsecamente seguro. Pero unas tecnologías de transmisores Inalámbrica

usan módulos de alimentación de seguridad intrínseca de tipo “hot-swappable” (Intercambiable en sitio), que permiten reemplazar la batería en el campo.

El criterio de selección de poder realizar un cambio de batería en área clasificada es propio de las necesidades del proyecto, las consideraciones en el diseño, frecuencia del cambio de batería y requerimientos de seguridad

Las propuestas de los tecnologías soportadas en los estándar WirelessHart e ISA-100.11A tienen encapsulamiento que permite realizar cambios de baterías en áreas clasificadas. La figura 22 muestra el encapsulamiento apropiado el cual permite realizar cambios de baterías en áreas clasificadas.

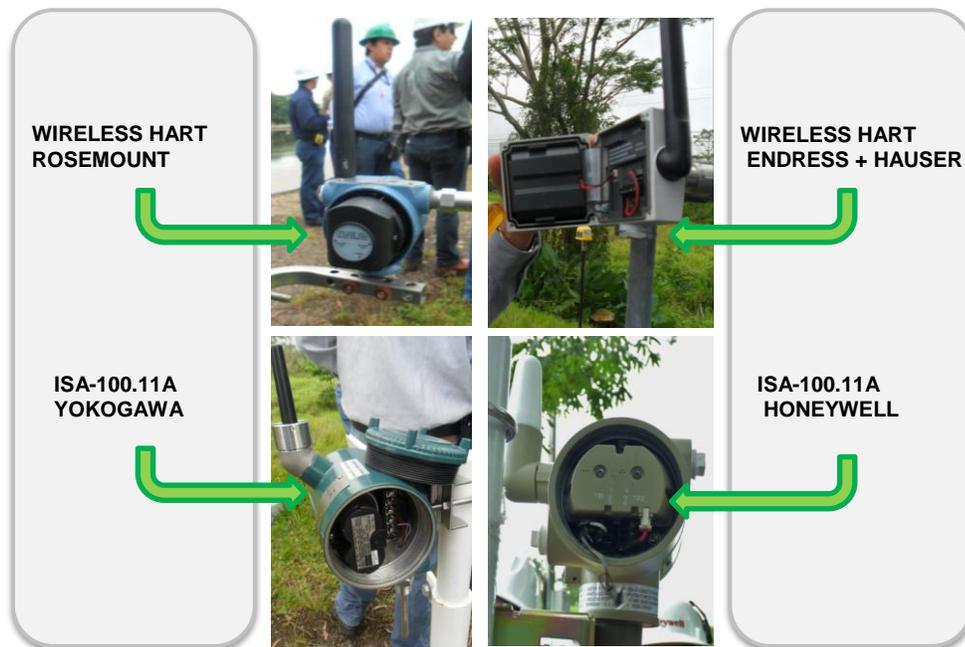


Figura 22: Módulos de alimentación de seguridad intrínseca de tipo “hot-swappable”

5. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS

5.1. Planeación de una red Inalámbrica

El primer paso es responder una pregunta fundamental: ¿donde están los datos?, tomando como información la ubicación física en el plano de la planta. Basado en esta pregunta, se puede ahondar más y definir, ¿cuáles aplicaciones en la planta son de monitoreo?, ¿de estas aplicaciones de monitoreo, dónde se encuentran estos puntos de medición?

Si la planta es de gran tamaño (físico) y además consiste de varios puntos de medición, visualizar primero el proyecto, asumiendo que existirá únicamente una unidad de procesamiento. Esto permite reducir la cantidad de dispositivos requeridos, así como asuntos relacionados a la posesión de la información, y en general le da un sentido general de dirección al flujo de la información.

Si la planta es pequeña en tamaño, se considera el diseño de la red inalámbrica, como si fuera un elemento que pertenece una planta de mayor tamaño.

5.2. Ubicación de los dispositivos de la red Inalámbrica

Identificar los puntos de medición que van a satisfacer la aplicación. Considerar otras aplicaciones que están dentro del plan actual, así como futuros puntos que se puedan incorporar a la red.

Primero considerar la adquisición de los datos, y luego la conexión de la información. Si el dispositivo está ubicado en una zona de clasificación explosiva, se debe tener en cuenta las aprobaciones respectivas.

Marcar la ubicación de todos los dispositivos inalámbricos en el plano o diagrama a escala.

5.3. Conectividad

Existen tres causas posibles sobre problemas de conectividad cuando se diseñan redes inalámbricas.

- Los dispositivos de campo están fuera de rango entre ellos
- La ruta de conectividad esté bloqueada por una obstrucción mayor
- Los dispositivos inalámbricos estén confinados en un área cerrada

En el plano de la planta, con la ubicación de los dispositivos de campo, dibujar líneas de conexión entre todos los dispositivos de campo inalámbricos, que satisfagan cualquiera de los siguientes criterios:

La distancia entre los dispositivos inalámbricos con línea vista debe ser menor de 250 metros para las frecuencias de 2.4GHz y 1000 metros para las frecuencias de 900 MHz, utilizando el análisis de la zona de Fresnel y aplicando la correcta escala del plano.

La distancia entre los dispositivos inalámbricos con infraestructura pesada de por medio, como recipientes de proceso (tanques, separadores) debe ser

menor a 200 metros y 800 metros respectivamente, aplicando la correcta escala del plano.

Bajo las siguientes condiciones, no deberán existir comunicación entre los dispositivos:

- Si el camino entre los dispositivos inalámbricos cruza una obstrucción, como un edificio grande o una unidad de proceso entera.
- Si un dispositivo está confinado en un área cerrada, como un cuarto de concreto, que lo aísla totalmente de otros dispositivos inalámbricos.

Dependiendo de los requerimientos de los proyectos y la robustez requerida se contemplará una topología tipo “Mesh” y para cada dispositivo inalámbrico al menos dos líneas de conexión con dispositivos inalámbricos adyacentes.

El Gateway debe ubicarse en un punto central de la red inalámbrica, y ser capaz de comunicarse con dos o más dispositivos de la red y se evaluará los requerimientos técnicos con antena local o con antena remota del Gateway. En caso que se requiera, la antena del Gateway se debe ubicar en un mástil, sobre la infraestructura de los edificios. El análisis de la zona de Fresnel permitirá determinar la altura adecuada de esa antena.

5.4. Selección de alternativas de comunicación

Una única opción en la toma de decisión puede tornarse insuficiente cuando se analizan proyectos complejos, sobre todo cuando las decisiones pueden afectar a muchas personas.

El método de evaluación y decisión multicriterio empleada para esta selección comprende un conjunto de alternativas factibles soportadas en el análisis teórico y los resultados prácticos obtenidos en las pruebas realizadas sobre estas alternativas de comunicación.

Esta matriz de decisión resume la evaluación de cada alternativa en el cual se consideraron criterios diferenciadores. Para una valoración (precisa o subjetiva) de cada uno de los criterios se requiere la participación de los interesados en el desarrollo del proyecto ya que esta escala de medida puede ser cuantitativa o cualitativa.

En la tabla 11 se muestran los parámetros diferenciadores de evaluación que se consideraron para la selección de estas tecnologías.

En el documento “CALIFICACIÓN CUANTITATIVA DE ALTERNATIVAS DE WIRELESS NETWORK “ (*Anexo 3*) se pueden apreciar los pesos dados a cada uno de estos parámetros según la alternativa de comunicación. (*Ver Anexo 3*). Dependiendo de los avances tecnológicos de estas tecnologías estos pesos deben ser modificados.

PARÁMETROS DE EVALUACIÓN				
CRITERIO	Peso (%)	Atributo	Peso (%)	Sub Atributo
Topología (única selección)	0%	Estrella	0%	
		Malla	0%	
		Sub-total	0	
Software	0%	Facilidad de configuración de instrumentos remotamente	0%	
		Gestión de activos (única selección)	0%	No requiere
			0%	Independiente
			0%	Integración con el sistema existente
Sub-total	0			
Transmisión de información	0%	Intensidad de la comunicación	0%	
		Distancia de comunicación (única selección)	0%	<= 250mts
			0%	> 300 mts con repetidor
			0%	> 300 mts sin repetidor
		Autoconfiguración de la red ante presencia de obstáculos	0%	
		Frecuencia de transmisión (única selección)	0%	<= 1 seg
0%	>= 1 seg; <= 1min			
Sub-total	0			
Hardware	0%	Interoperabilidad con otros fabricantes entre Instrumentos	0%	
		Peso del instrumento	0%	
		Adaptador inalámbrico (única selección)	0%	No requiere
			0%	4-20 mA
			0%	4-20mA + Hart
Sub-total	0%			
Mantenimiento	0%	Facilidad para realizar cambio de batería en ambientes que requieran seguridad intrínseca.	0%	
		Diagnostico de Batería	0%	Local
			0%	Con Facilidad de Transmisión
Sub-total	0%			

Tabla 11: Parámetros de evaluación de protocolos

5.5. Instalaciones e integración de datos en la red inalámbrica

- **Secuencia de Instalación**

Se recomienda siempre instalar primero el Gateway y luego los dispositivos de campo. De esta forma, los dispositivos de campo se pueden arrancar tan pronto como se van instalando, y al mismo tiempo, se tiene la integración del Gateway con el sistema de información [21].

- **Recursos de Instalación**

El personal que normalmente instala y da mantenimiento a la instrumentación cableada puede proveer servicios por la red inalámbrica. Se recomienda que el personal técnico que utilice la guía rápida de Instalación, que viene con cada uno de los dispositivos.

5.6. Consideraciones para la Puesta en Marcha

- **Secuencia en la Puesta en Marcha**

Como se indicó anteriormente, se inicia la puesta en marcha con el Gateway, seguido luego del dispositivo de campo inalámbrico más cercano. Esto permite al usuario verificar la conectividad del Gateway con la red a medida que esta crece.

- **Puesta en marcha de los dispositivos**

Los dispositivos inalámbricos se deben pre configurar en la fábrica, basados en la configuración deseada por el usuario, al llenar la Hoja de datos.

De forma manual se realizaran los cambios que incluyen: Network ID, Join Key, la velocidad de transmisión, entre otros. La velocidad de transmisión se refiere a qué tan frecuente el dispositivo tomará lecturas del proceso y transmitirá esa nueva información al Gateway. A medida que esta frecuencia aumenta, la vida de la batería se disminuye (ver figura 13). Si no es requerido que la transmisión sea frecuente, configure el dispositivo de campo con una baja velocidad de transmisión, así prolongar la vida útil de la batería.

- **Puesta en marcha de la Red Inalámbrica**

Una vez que los dispositivos están en línea y la información se puede ver a través del Gateway, el usuario podrá ver realmente las conexiones entre los dispositivos inalámbricos. Revisar el diseño realizado en MAPEO Y CONECTIVIDAD e identificar si hay conexiones débiles que requieran solución.

5.7. Especificaciones de la red Inalámbrica

- **Dispositivos de Campo**

Dependiendo de la localización física de los dispositivos de campo, estos deben contar con una antena omnidireccional que se pueda ajustar su posición en el campo. (Ver figura 23) [22]

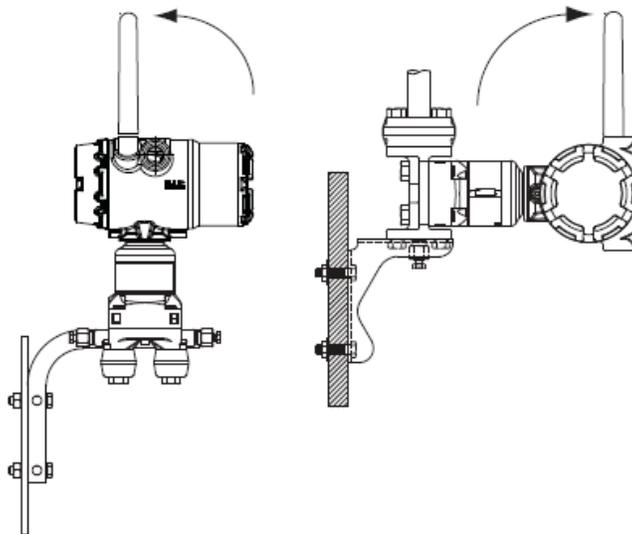


Figura 23: Posición de antenas.

Ajustar la dirección de la antena para estar en la posición vertical, independientemente de la orientación de este transmisor. Instalar el

transmisor por lo menos 1,5 metros por encima del suelo o el piso ó realizando el análisis de la zona de Fresnel (ver figura 24) [23]. Verificar la ocurrencia de obstáculos, como paredes o tuberías dentro de un radio de 30 cm de cada antena

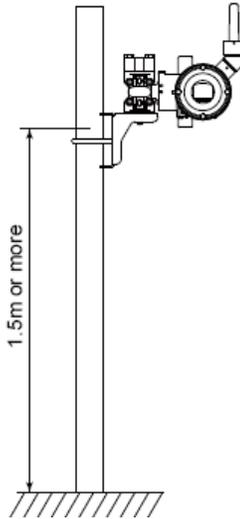


Figura 24: altura de antenas.

La antena debe ser del tipo intrínsecamente segura siendo la resistividad superficial de la antena mayor que un gigaohmio, tal que permita al dispositivo operar en una zona de clasificación peligrosa (explosiva). Cumpliendo con las normativas ATEX Intrinsic Safety ó IECEx Intrinsic Safety.

No deben existir restricciones en cuanto a la orientación de la antena. Se recomienda la instalación de la antena aproximadamente un metro sobre el nivel del piso o tubería de proceso, esto facilita una comunicación a otros dispositivos.

Según el MINISTERIO DE COMUNICACIONES DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA RESOLUCIÓN NÚMERO 000689 DE 21 ABR. 2004 los sistemas que operen en la banda de 2 400 a 2 483,5 MHz que sean utilizados exclusivamente para operaciones fijas punto a punto, pueden emplear antenas de transmisión con ganancia direccional mayor a 6 dBi siempre y cuando la máxima potencia pico de salida del transmisor sea reducida en un 1 dB por cada 3 dB que la ganancia direccional de la antena exceda los 6 dBi.[24]

Dependiendo de los requerimientos del proyecto los dispositivos pueden contar con una batería del tipo intrínsecamente segura, tal que permita su reemplazo en el campo mientras el dispositivo se encuentra instalado en el proceso, aún abriendo los compartimentos del transmisor en la atmósfera clasificada como explosiva. Esta batería debe ser de Litium-Thionil Chloride.

Todos los dispositivos de campo deben ser capaces de operar en zonas clasificadas como explosivas y con aprobaciones FM (Factory Mutual), como Intrínsecamente Segura y Non-incendive. Intrinsically Safe que satisfaga zonas clasificadas como Clase I/II/III, División 1, Grupos A, B, C, D, E, F, y G. O bien establecida por Zonas: Clase I, Zona 0, AEx ia IIC Temperature Codes T4 ($T_{amb} = -50 \text{ to } 70^{\circ} \text{ C}$) y T5 ($T_{amb} = -50 \text{ to } 40^{\circ} \text{ C}$). Non-incendive para zonas Clase I, División 2, Grupos A, B, C, y D. Basado en los lineamientos del fabricante con respecto a los requisitos de instalación.

- **Gateway**

Debe suministrar múltiples niveles de seguridad en la red, con el objeto de prevenir ataques por terceros a la misma.

Al menos deberá contemplar, los siguientes niveles de seguridad:

- Autenticación - Que el receptor y la fuente sean autenticados y válidos en la red
- Verificación - Que el dato recibido/transmitido sea válido
- Encriptación - Que el dato sea encriptado
- Administración de llave: El dispositivo Gateway debe cambiar automáticamente y en forma periódica las claves de encriptación.
- Anti-jamming - Anti bloqueo. Evitar la interferencia y el bloqueo de los espacios de comunicación.

El Gateway debe ser alimentado en forma permanente con una fuente de poder de 24 VCD.

El Gateway debe contar con una antena omnidireccional montada integralmente al equipo. Dependiendo del diseño de la red inalámbrica, puede ser necesario utilizar una antena remota. En caso de ser requerida, esta antena debe poder colocarse hasta 15 metros (50 ft) del Gateway.

Es deseable ubicar el Gateway en una zona cerca del cuarto de control. Aún así, el Gateway debe contar con aprobación FM (Factory Mutual) para áreas Non-Incendive con clasificación Clase I, División 2, Grupos A,B,C, y D; Dust Ignitionproof para zonas Clase II,III, División 1, Grupos E,F, y G; Temperature Code: T4 (Tamb=-40°C hasta +60°C).

Para entregar la información del campo por el “Gateway” al sistema huésped (DCS, PLC o computadora), este debe tener la facilidad de usar alguno de los siguientes protocolos Modbus/TCP - Profibus – Ethernet, siendo estos los más utilizados en comunicación de planta por Ecopetrol.

6. CONCLUSIONES

- Después de la evaluación de protocolos y tecnologías, se puede ver que presentan varias características comunes. Sin embargo, la definición de la tecnología más apropiada para la aplicación de usuario siempre será una decisión difícil de hacer, ya que los protocolos y tecnologías analizadas se basan en conceptos ampliamente aceptados y probados. Al desarrollar este procedimiento de selección por medio de una metodología multicriterio se logró emitir un juicio comparativo entre la mejor alternativa de transmisión inalámbrica entre los diferentes protocolos y tecnologías de comunicación existentes dependiendo los requerimientos del proyecto.
- La metodología de diseño y selección seguirá evolucionando a medida que se adquiera experiencia en el campo y en otras instalaciones exitosas implementadas y surjan nuevos avances tecnológicos en este tema.
- Con la plataforma WFN, se puede personalizar y mejorar una arquitectura típica para crear un sistema completo cableado e inalámbrico para su aplicación.
- El uso de WFN está teniendo un importante auge en las aplicaciones industriales. La disminución de costes de instalación y mantenimiento es inminente. Dicha disminución es solo alcanzable si se desarrollan equipos de medición económicos, poco especializados y en general sencillos.

- Al realizar la evaluación de viabilidad de un proyecto con aplicación inalámbrica debe considerar el costo de implementación de toda la solución y no considerar solamente el valor del instrumento inalámbrico.
- Hasta ahora, los sensores inalámbricos eran diferentes a los demás sensores (cableados) de una planta y requerían un tratamiento diferente. Pero hoy en día ya es posible contemplar el enlace inalámbrico en las alternativas de selección tecnológica como si fuera otro medio de comunicación, tal como 4-20 mA, redes PROFIBUS, HART y fieldbus Foundation.
- Al realizar la evolución de viabilidad de un proyecto con aplicación inalámbrica se debe considerar el tiempo de implementación.
- Las mejoras en la prestación de la batería, junto con el uso de celdas de combustible y técnicas de recolección de energía, puedan eliminar ese costo, justificando el uso de instrumentación Inalámbrica en los puntos de monitoreo en una planta.
- La tecnología inalámbrica promete un impacto aún mayor a largo plazo. Las plantas, de producción en unas pocas décadas, incluirán tres veces más puntos de monitoreo, un mayor nivel de colaboración global mediante gestión remota. Pero no tendrán salas centrales de control, racks de E/S o remplazo de baterías. Al desaparecer las limitaciones de cableado y aprovechar los avances en la tecnología de monitoreo, clúster de control masivamente redundantes sustituirán los sistemas de control monolíticos de hoy en día.

- Desde el punto de vista del mercado, la convergencia de estándares es importante ya que se traduce en un crecimiento más rápido del mercado. “desde un punto de vista técnico, los desafíos para lograr la convergencia de incluso dos estándares son muy difíciles, y tratar de combinar mas estándares es todavía más difícil. El desafío se complica aún más, ya que la voz del usuario tampoco es una sola voz. Pero lo más importante es que los usuarios han demostrado que su prioridad es tener un solo estándar para minimizar así el costo total de propiedad.
- El conocimiento del proceso es valioso, pero sin medición no hay conocimiento. Ecopetrol actualmente tiene que medir variables de proceso en lugares que son difíciles de alcanzar a distancia, entornos peligrosos y la ausencia de energía; estos son sólo algunos de los obstáculos que enfrentan y donde las plataformas WFN son una buena solución.
- Con la adopción de la tecnología inalámbrica, muchos requisitos importantes deben ser considerados en relación con las soluciones presentadas por los nuevos estándares, protocolos, metodologías y herramientas de apoyo. Los requisitos más importantes son: fiabilidad, seguridad, robustez, el determinismo, la calidad de servicio, la interoperabilidad, la integración con los sistemas existentes, las redes con gran cantidad de dispositivos (escalabilidad), y herramientas de apoyo para el diseño de la disposición de la red, procesar información, y seguimiento.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Niels Aakvaag, Jan-Erik Frey, Redes de sensores inalámbricos, Nuevas soluciones de interconexión para la automatización industrial
- [2] Marcos Peluso, “Myths and Realities on Wireless Networks, Distinguished TechnologistW” ,Emerson Process Management, Eden Prairie, MN – USA.
- [3] Redes Inalámbricas en los Países en Desarrollo (Wireless Networking in the Developing World: WNDW). <http://wndw.net/>
- [4]http://www.bnamericas.com/news/telecomunicaciones/Ministerio_abre_banda_de_900Mhz_para_acceso_fijo_inalambrico_y_evalua_450Mhz
- [5] Karen Solís Trapala, Análisis y diseño de enlaces punto a punto vía microondas terrestres,.
- [6] Zurawski, Richard, The industrial communication technology handbook, 1952- Ed.
- [7] WirelessHART® System Engineering Guide. Revisión 3.0, IEC 62591
- [8] Sebastian Buettrich wire.less.dk , Alberto Escudero Pascual, Topología e Infraestructura Básicade Redes Inalámbricas /
- [9] Martínez, Lluís; Yuste, Ramon ; Guerrero, Vicen Comunicaciones industriales
- [10]Information Technology—Open Systems Interconnection—Basic Reference Model: The Basic Model, ITU-T X.200 (07/94), 1994
- [11] ISA-SP100, <http://www.isa.org>
- [12] The ISA100 StandardsOverview & Status, presentación ISA 100
- [13]ISA100.11^a Wireless Systems for Industrial Automation: Process Control and Related Applications , ISA-100.11a-2009 Standard, 2009.

- [14] HART Communication Foundation, <http://www.hartcomm.org>
- [15] HART Field Communication Protocol Specification, Revision 7.0, HART Communication Foundation, Sept. 2007
- [16] Stig Petersen and Simon Carlse, WirelessHART Versus ISA 100.11^a,
- [17] ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org>
- [18] ZigBee PRO Specification, ZigBee Alliance, Oct. 2007
- [19] ZigBee (especificación).
[http://es.wikipedia.org/wiki/ZigBee_\(especificaci%C3%B3n\)](http://es.wikipedia.org/wiki/ZigBee_(especificaci%C3%B3n)).
- [20] <http://www.accutechinstruments.com/>
- [21] Memorias 1^{ra} Jornadas de Soluciones en Instrumentación Wireless
- [22] Rosemount, Rosemount 3051S WirelessHART,
- [23] Yokogawa, EJX110B, EJX310B and EJX430B,
- [24] Ministerio de comunicaciones de la republica de Colombia resolución numero 000689 de 21 abr. 2004