

**DISEÑO Y PLANEACIÓN DE LA ARQUITECTURA DE RED RADIO/WIRELESS  
INDUSTRIAL PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE DOS PLANTAS REMOTAS**



**RUBEN DARIO ESCOBAR LEDEZMA**

**CESAR AUGUSTO GOMEZ SANDOVAL**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN AUTOMÁTICA INDUSTRIAL  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control  
Popayán  
2010**

**DISEÑO Y PLANEACIÓN DE LA ARQUITECTURA DE RED RADIO/WIRELESS  
INDUSTRIAL PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE DOS PLANTAS REMOTAS**



**RUBEN DARIO ESCOBAR LEDEZMA**

**CESAR AUGUSTO GOMEZ SANDOVAL**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en  
Automática Industrial**

**Director**

**ING. ELENA MUÑOZ ESPAÑA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN AUTOMÁTICA INDUSTRIAL  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control  
Popayán  
2010**

*A mis padres por su apoyo infinitamente incondicional  
En los momentos más difíciles de mi vida y de mi carrera.  
A los excelente maestros, amigos y compañeros que conocí durante ella,  
Sin todos ellos el transcurso y trasegar hubieran sido aun más difíciles.  
Al universo por dame sabiduría para descubrir lo correcto,  
La voluntad para elegirlo y la fuerza para hacer que perdure.  
Y a mi hijo por ser la luz que ilumina mi camino.*

*Rubén D. Escobar*

*La vida de arduos e interminables retos, proyectos y metas que  
Continuamente alimentan nuestro proceder, el deseo permanente de  
Erguirse y seguir caminando alimentado de los consejos y los valiosos  
Alientos de mi amada Familia, a ellos debo mis éxitos... ¡Mil Gracias!*

*César A. Gómez*

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. CONCEPTOS DE RADIO FRECUENCIA PARA EL DISEÑO DE WLANS	3
1.1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	3
1.2. FÍSICA DE LAS ONDAS DE RADIO	4
1.2.1. Propagación	4
1.2.2. Interferencia y Difracción	5
1.2.3. Velocidad de transmisión de datos	5
1.3. BANDAS DE FRECUENCIA Y CANALES DE TRANSMISIÓN	6
1.4. TOPOLOGÍAS	8
1.5. REDES DE INFRAESTRUCTURA	9
1.5.1. Redes Independientes	9
1.5.2. Redes Mixtas	10
1.5.3. Configuración de varios canales	11
1.5.4. LANs inalámbricos redundantes	11
1.6. REDES AD – HOC	12
1.7. WDS: SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN INALÁMBRICO	13
1.7.1. Configuraciones avanzadas	14
1.8. REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS (WSN)	16
2. CARACTERIZACIÓN DEL ESCENARIO CASO DE ESTUDIO	18
2.1. ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A.E.S.P.	18
2.1.1. Planta 1: El Tablazo	18
2.1.2. Planta 2: Tulcán	19
2.2. ANÁLISIS DE LA LÍNEA DE VISTA (LOS)	20
2.3. INSTRUMENTACIÓN EXISTENTE	23
3. CRITERIOS TÉCNICOS PARA EL DISEÑO Y PLANEACIÓN DE UNA RED RADIO/WIRELESS INDUSTRIAL	27
3.1. INTEGRACIÓN DE LAS COMUNICACIONES ENTRE NIVELES DE AUTOMATIZACIÓN	27
3.2. SELECCIÓN DE LOS CANALES Y LA FRECUENCIA DE OPERACIÓN	32
3.3. TOPOLOGÍAS DE RED ADECUADAS	35
3.4. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	40

3.5.	SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DE UNA RED	46
3.6.	SEGURIDAD	50
3.7.	MANTENIMIENTO DE LA RED	51
4.	DISEÑO DE LA RED	55
4.1.	ESTUDIO PRELIMINAR	56
4.1.1.	Análisis del entorno	56
4.1.2.	Análisis de interferencia	59
4.2.	FRECUENCIA Y CANALES DE OPERACIÓN	59
4.3.	SELECCIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE RED	62
4.4.	PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	69
4.4.1.	Comunicación Inalámbrica	69
4.4.2.	Comunicación por cable	70
4.5.	COMPONENTES DE LA RED	72
4.6.	CAPACIDAD	76
4.6.1.	Tecnología	76
4.6.2.	Cambio de Velocidades	77
4.6.3.	Ancho de banda por usuario	77
4.7.	COBERTURA	79
4.7.1.	Área de cobertura	79
4.7.2.	Montaje y ubicación de APs y de antenas	80
4.7.3.	Radiación de la antena	82
4.8.	ESTUDIO DEL SITIO (Site Survey)	82
4.8.1.	Utilización del SINEMA E	83
4.8.2.	Informe de la simulación	84
4.9.	SEGURIDAD DE LA RED	88
4.10.	ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO DE LA RED	89
4.11.	PLANEACIÓN DEL DISEÑO DE LA RED	93
4.12.	PLANEACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO	95
	BIBLIOGRAFÍA	101

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento de las ondas de radio cuando golpea objetos sólidos .....	4
Figura 2. Redes independientes (Imagen propia) .....	10
Figura 3. Configuración de una red mixta (Imagen propia).....	10
Figura 4. Topología de una configuración multi-canal (Imagen propia) .....	11
Figura 5. WLAN Redundantes (Imagen propia) .....	12
Figura 6. Configuración esquemática de una red ad hoc (Imagen propia) .....	12
Figura 7. Sistema de Distribución Cableado .....	13
Figura 8. Sistema de Distribución Inalámbrico .....	13
Figura 9. Aprovechamiento de canales en un sistema hibrido .....	14
Figura 10. Configuración en estrella .....	15
Figura 11. Configuración en Cadena .....	15
Figura 12. Configuración en bucle .....	16
Figura 13. Dispositivo autónomo de una red de sensores inalámbricos.....	16
Figura 14. Foto aérea planta El Tablazo. ....	19
Figura 15. Planta de tratamiento de agua Tulcán.....	20
Figura 16. Zona de Fresnel enlace punto a punto.....	20
Figura 17. Foto aérea de la ubicación de las plantas El Tablazo y Tulcán. ....	21
Figura 18. Colorímetro y Turbidímetro.....	24
Figura 19. Eyector de cloro.....	24
Figura 20. Maquina dosificadora de Sulfato de Aluminio.....	25
Figura 21. Red de control de válvulas planta El Tablazo.....	25
Figura 22. Jerarquía Funcional .....	28
Figura 23. Jerarquía en los niveles de comunicación.....	29
Figura 24. Tecnologías de comunicación industrial según su nivel de aplicación.....	32
Figura 25. Canales no traslapables para la banda de 2.4 GHz .....	34
Figura 26. Topologías físicas de red. (Imagen Propia).....	35
Figura 27. Topologías comunes de redes de sensores inalámbricos. ....	39
Figura 28. Modelo de referencia OSI Reducido. ....	42
Figura 29. Información técnica de Buses de Campo marca SIEMENS .....	46
Figura 30. Switch industrial SIEMENS. ....	47
Figura 31. Imagen explicativa red caso de estudio.....	55
Figura 32. Plano arquitectónico - Planta El Tablazo.....	57
Figura 33. Plano arquitectónico - Sala de Dosificación Planta El Tablazo.....	57
Figura 34. Plano arquitectónico - Filtros Planta El Tablazo .....	58
Figura 35. Plano arquitectónico - Planta Tulcán.....	58
Figura 36. Selección de frecuencia y canales de operación.....	62
Figura 37. Topología en estrella simple .....	66
Figura 38. Selección de la topología de red interna de las plantas.....	69
Figura 39. Topología de red caso de estudio – Niveles 0,1 y 2. ....	75
Figura 40. Enlace WDS configuración en cadena entre las plantas remotas.....	76
Figura 41. Ubicación de los APs – Planta El Tablazo.....	81

Figura 42. Ubicación de los APs – Planta Tulcán.....	81
Figura 43. Configuración Antena.....	82
Figura 44. Signal Strength – Leyenda de colores.....	84
Figura 45. Signal Strength del AP 1 IE/WSN-PA LINK (Antena 2) - Floculadores/Sedimentadores planta El Tablazo .....	85
Figura 46. Signal Strength del AP 1 IE/WSN-PA LINK (Antena 1) de la Sala de Dosificación planta El Tablazo .....	86
Figura 47. Signal Strength del AP 3 IWLAN PB Link PN IO- Zona de Filtros planta El Tablazo.....	86
Figura 48. Signal Strength del AP 1 IE/WSN-PA LINK - Planta Tulcán .....	87
Figura 49. Planta El Tablazo.....	91
Figura 50. Planta Tulcán .....	92
Figura 51. Red Caso de estudio a gran escala .....	93

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Asignación de Bandas de Frecuencia .....	3
Tabla 2. Asignación de canales para IEEE 802.11 b/g/n.....	6
Tabla 3. Comparación las enmiendas de la norma IEEE 802.11.....	7
Tabla 4. Asignación de canales para IEEE 802.11 a/h/j/n .....	8
Tabla 5. Coordenadas planta El Tablazo .....	18
Tabla 6. Coordenadas planta Tulcán .....	19
Tabla 7. Comparación bandas de frecuencias no licenciadas .....	33
Tabla 8. Consideraciones para los protocolos de red.....	41
Tabla 9. Comparación de características entre algunos protocolos o tecnologías. ....	44
Tabla 10. Criterios Técnicos .....	53
Tabla 11. Características especificación IEEE 802.15.4 para WSN .....	61
Tabla 12. Tabla resumen selección de frecuencias y canales.....	62
Tabla 13. Características Protocolo PROFIBUS .....	72
Tabla 14. Componentes de Red Nivel 0 (Ver ANEXO D) .....	73
Tabla 15. Componentes de Red Nivel 1 .....	74
Tabla 16. Componentes de Red Nivel 2.....	75
Tabla 17. Área de Cobertura del Proceso .....	79
Tabla 18. Posiciones del IE/WSN-PA LINK (AP1).....	85
Tabla 19. Código de Colores Componentes de Red .....	91
Tabla 20. Tabla resumen propuesta económica del proyecto .....	97

## INTRODUCCIÓN

En el campo de la automatización industrial ha sido siempre un factor importante el transporte de datos y de información de una manera rápida y confiable, el medio por el cual es transportada dicha información ha evolucionando a medida que pasa el tiempo, variando desde soluciones de comunicación cableadas hasta la utilización de tecnologías no cableadas o mejor conocidas como inalámbricas.

El desarrollo de la tecnología inalámbrica está dado en gran medida por la globalización de los mercados, que obliga a las empresas a ser cada día más competitivas y a requerir mayor información de sus procesos productivos para su optimización. En este sentido, las industrias ven en las tecnologías inalámbricas una oportunidad de alcanzar esas metas de forma viable o con un adecuado retorno de la inversión, por sus características técnicas, los costos de su implementación y los servicios que se pueden ofrecer al aplicar dichas tecnologías.

En la actualidad, las tecnologías inalámbricas están haciéndose presente no sólo en las redes industriales empresariales, sino que también están entrando al ámbito de los controladores, sistemas de sensores inteligentes para uso industrial y dispositivos a cargo de la automatización de procesos, es decir, están abarcando los primeros tres niveles de la pirámide CIM (Manufactura Integrada por Computadora) de la automatización (1), buscando con esto la integración total de la empresa desde sus niveles superiores hasta sus niveles inferiores.

Adicionalmente, las tecnologías inalámbricas se perfilan como solución a las necesidades inherentes a un entorno industrial que no se pueden satisfacer con una red cableada, casos tales como, comunicar dos puntos que se encuentren a grandes distancias, con una geografía diversa en los cuales tender un cableado podría salir muy costoso, además de tedioso, demorado y de difícil mantenimiento, o un proceso en el cual se requiera gran cantidad de instrumentación, entonces podría pensarse en una solución no cableada como una mejor opción.

Con el presente proyecto, se busca generar criterios técnicos para la planificación, diseño e implementación de una arquitectura de comunicación industrial con tecnología inalámbrica para proyectos de automatización. Cubriendo conceptos como comunicación entre niveles, protocolos, procedimientos de comunicación, topologías de red entre otros, que ayuden en la integración de los tres primeros niveles de la pirámide de automatización.

Como caso de estudio, se aplican los criterios técnicos para obtener el diseño y planeación de la arquitectura de red inalámbrica para la comunicación de las plantas de

tratamiento de aguas de Tulcán y de El Tablazo de la empresa de servicio público Acueducto y Alcantarillado de Popayán, centrándose en la integración de los tres primeros niveles de automatización de cada planta, además de la interconexión de las mismas que buscando solución a la falta de comunicación interna y entre las sedes remotas.

El trabajo está organizado en cuatro capítulos y varios anexos complementarios. En el primer capítulo se presenta una revisión general de los conceptos que constituyen un sistema de comunicación inalámbrico, con el fin de establecer la base teórica dentro de la que se enmarca el desarrollo del trabajo realizado.

En el segundo capítulo se realiza una descripción general sobre las plantas caso de estudio como paso para el reconocimiento de las zonas en donde se hará el diseño de la red.

En el tercer capítulo, se presentan los criterios técnicos generados en el proyecto que servirán como base para el diseño de la arquitectura de red.

En el capítulo cuatro, se expone el diseño de la arquitectura de red realizado aplicando los criterios técnicos del capítulo tres al caso de estudio a demás del uso de herramientas software para la simulación de la red.

Luego se presenta una exposición de las conclusiones y futuros trabajos que se pueden abordar sobre temas relacionados con el desarrollo presentado que puede ser utilizado como guía para el diseño de este tipo de redes en la industria.

Finalmente se incluyen todas las referencias utilizadas en el presente trabajo.

En el anexo A, se muestra la teoría referente a transmisión y generación de radio frecuencia. En el anexo B, se profundiza un poco más en el tema de redes de sensores inalámbricos. En el anexo C, se dan recomendaciones sobre las ventajas de contar con personal capacitado, recomendaciones de instalación INDOOR – OUTDOOR a demás de los tipos de mantenimiento. En el ANEXO D, se abordan las características de las topologías nombradas en el capítulo tres y se profundiza sobre los componentes de red necesarios para la puesta en marcha de la red. El anexo E, muestra otras características disponibles en el software de simulación. Terminando con el anexo F, el cual se trata sobre el proceso general de tratamiento de agua y los tipos de plantas de tratamiento.

## 1. CONCEPTOS DE RADIO FRECUENCIA PARA EL DISEÑO DE WLANs (2)

En este capítulo se da una revisión general de los conceptos que constituyen un sistema de comunicación inalámbrico, con el fin de establecer la base teórica dentro de la que se enmarca el desarrollo del trabajo realizado (3).

### 1.1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

El Espectro Electromagnético (EM), se extiende desde frecuencias extremadamente bajas, aproximadamente 60Hz de las líneas eléctricas, hasta los  $10^{20}$  Hz de la radiación cósmica y gama. Una parte del espectro es denominada de Radiofrecuencia (RF) y está conformado por ondas electromagnéticas que tienen frecuencias en el intervalo de 3KHz a 300 GHz.

Tabla 1. Asignación de Bandas de Frecuencia

Nombre	Abreviación	Frecuencias	Longitud de onda	Tipo de servicios
Very Low Frequency	VLF	3 KHz – 30 KHz	33 Km – 10 Km	Radio de onda larga y transmisores de VLF.
Low Frequency	LF	30 KHz – 300 KHz	10 Km – 1 Km	Radio de onda larga y transmisores de LF.
Medium Frequency	MF	300 KHz – 3 MHz	1 Km – 100 m	Radio AM, radio navegación.
High Frequency	HF	3 MHz – 30 MHz	100 m – 10 m	Radio banda ciudadana, comunicaciones de radio HF, aficionados.
Very High Frequency	VHF	30 MHz – 300 MHz	10 m – 1 m	Radio FM, TV VHF, servicios de emergencia, aficionados.
Ultra High Frequency	UHF	300 MHz – 3 GHz	1 m – 100 mm	TV UHF, teléfonos celulares, WIFI <sup>1</sup> , WIMAX <sup>2</sup>
Super High Frequency	SHF	3 GHz – 30 GHz	100 mm – 10 mm	Micro-ondas, comunicaciones satelitales, radar, micro-ondas punto a punto, WIFI, WIMAX.
Extremely High Frequency	EHF	30 GHz – 300 GHz	10 mm – 1 mm	Radar, radio astronomía, enlaces micro-ondas cortos.

El espectro se encuentra dividido en regiones limitadas, sea por la tecnología o por los fenómenos físicos que estén bajo consideración. De manera similar a la luz visible, que puede ser dividida en colores de acuerdo a la longitud de onda, el espectro de RF se divide en bandas o rangos de frecuencia, los cuales pueden apreciarse en la Tabla 1 (4).

<sup>1</sup> WIFI: Wireless Fidelity

<sup>2</sup> WIMAX: Worldwide Interoperability Microwave Access

## 1.2. FÍSICA DE LAS ONDAS DE RADIO (3)

### 1.2.1. Propagación

El entendimiento de cómo las ondas de radio se propagan a través del espacio es un aspecto crítico en el diseño de cualquier red inalámbrica. La propagación de las ondas electromagnéticas es afectada por muchas variables, entre ellas se encuentran la frecuencia, distancia, objetos presentes en la trayectoria de la señal, y reflexiones, todas éstas producen variaciones en la potencia de la señal en cualquier punto del espacio, que hacen prácticamente imposible conocer con exactitud la potencia de la señal en un punto específico. En la Tabla 1, las bandas de frecuencia UHF y SHF soportan servicios como WIFI y WIMAX que en otros términos sería la tecnología IEEE 802.11 de WLAN y la IEEE 802.16, que debido a la cantidad del espectro asignado en ellas son adecuadas para soportar sistemas de gran ancho de banda. Las frecuencias por encima de este rango tienden a comportarse como la luz, y por lo tanto no se refractan alrededor de los objetos que pudieran encontrar en su trayecto, haciendo imposible su utilización en ambientes sin línea de vista (NLOS, *Non Line of Sight*), siendo utilizadas por lo general en comunicaciones punto a punto.

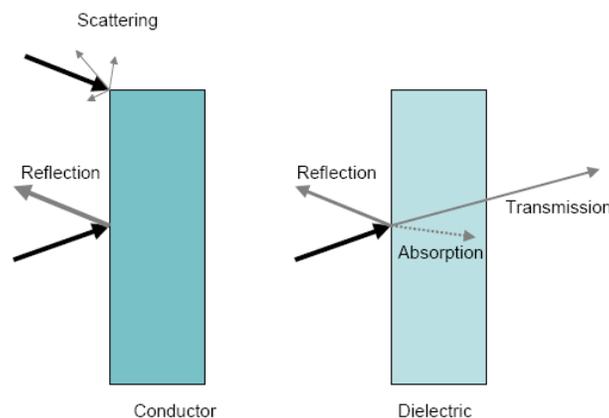


Figura 1. Comportamiento de las ondas de radio cuando golpea objetos sólidos

Las señales de radio se propagan tridimensionalmente en el espacio como ondas electromagnéticas. Cuando las ondas golpean un objeto, ellas prácticamente son reflejadas completamente si el objeto es conductor. Si el objeto no conduce, una parte de la onda es reflejada, otra parte es absorbida en el objeto, y un resto es finalmente reflejada. Cuando golpean bordes, las ondas de radio son dispersadas en prácticamente todas las direcciones, como se ve en la Figura 1 (2). Básicamente existen dos tipos de canales de radio, los denominados con línea de vista (LOS, *Line of Sight*) y los NLOS, haciendo referencia a la existencia o no de obstáculos entre la estación base y el dispositivo cliente. A partir de estos dos conceptos se derivan los diferentes modelos de propagación utilizados para la planeación de cobertura en redes inalámbricas de banda ancha.

### 1.2.2. Interferencia y Difracción

Dos propiedades son importantes para el desarrollo del campo de radio, por un lado, las ondas de radio (a diferencia de la luz) se pueden ampliar o incluso se pueden extinguir entre sí, a este fenómeno se le conoce como interferencia entre ondas. Si un receptor está tanto en la línea de vista directa como en la reflexión de un transmisor, éste no necesariamente detecta el doble de la señal, sino que, posiblemente, no detecta ninguna señal en absoluto. Por otra parte, las propiedades de propagación de las ondas dependen de su longitud de onda, es decir, las ondas de radio de alta frecuencia se comportan de manera diferente a las ondas de radio de baja frecuencia. En particular, las ondas de radio de longitud de onda larga (es decir, de baja frecuencia) puede ser *difractadas* alrededor de objetos. Similar a las ondas de sonido o el agua, es posible recibir señales incluso en la *sombra* de una fuente de radio.

La onda corta se comporta de manera similar a las señales de luz, sólo puede ser propagada en línea recta y son completamente absorbidas o reflejadas por los objetos. Esto se ve reflejado en una disminución considerable de la calidad de la señal, siendo afectada la disponibilidad de la línea de vista entre el transmisor y el receptor. Cada objeto que esté espacialmente situado dentro de una red de radio puede alterar la red si transmite señales en la frecuencia utilizada por los transmisores. En contraste con las líneas cableadas, que pueden ser protegidas de manera fácil y relativamente fiable, las redes de radio son susceptibles a interferencias de cualquier dispositivo que de forma intermitente o continua emita radiación. En un ambiente industrial, esto es de sumo cuidado ya que la información de los procesos es de vital importancia y de extremada confidencialidad para la empresa en la cual se vaya a utilizar la tecnología. Sin embargo, esas inferencias se pueden contrarrestar con una planificación cuidadosa de la red.

### 1.2.3. Velocidad de transmisión de datos

La velocidad de transmisión de datos en un transmisor de radio depende, entre otras cosas, de la frecuencia utilizada para dicha transmisión. Para transmisores de onda corta (mayor frecuencia) el rango de transmisión es inferior a la gama de transmisores de gran longitud de onda. Sin embargo, el rango de transmisión puede incrementarse significativamente mediante el uso de antenas direccionales. La máxima velocidad de datos que pueden transmitirse en un portador de onda es proporcional a su frecuencia, es decir, a mayor frecuencia de los transmisores mayores velocidades de transmisión de datos. La velocidad de transmisión de datos que pueden transmitirse con tecnología inalámbrica en bandas no licenciadas llega a un máximo de 54 Mbps. Este valor está en el rango de la norma y supera las conexiones de Ethernet cableado de algunos sistemas como el MPI<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> MPI: Multi Point Interface (Interfaz Multipunto).

### 1.3. BANDAS DE FRECUENCIA Y CANALES DE TRANSMISIÓN<sup>4</sup>

A continuación se mencionan las normas IEEE que utilizan las bandas de frecuencia no licenciadas para la transmisión y su respectiva asignación de canales.

**IEEE 802.11 b/g/n.** Los estándares 802.11b y 802.11g usan la banda de 2.4 GHz ISM<sup>5</sup> definida por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones). Los límites exactos de esta banda dependen de las regulaciones de cada país, pero el intervalo más comúnmente aceptado es de 2.400 a 2.483,5 MHz. Las tecnologías bajo este estándar pueden ocupar 14 canales sobre la banda, empezando en 2.412 GHz hasta 2.462 GHz en pasos de 5 MHz.

Tabla 2. Asignación de canales para IEEE 802.11 b/g/n

Canal	Frecuencia Inferior (GHz)	Frecuencia Central (GHz)	Frecuencia Superior (GHz)
1	2.4010	2.4120	2.4230
2	2.4060	2.4170	2.4280
3	2.4110	2.4220	2.4330
4	2.4160	2.4270	2.4380
5	2.4210	2.4320	2.4430
6	2.4260	2.4370	2.4480
7	2.4310	2.4420	2.4530
8	2.4360	2.4470	2.4580
9	2.4410	2.4520	2.4630
10	2.4460	2.4570	2.4680
11	2.4510	2.4620	2.4730
12	2.4560	2.4670	2.4780
13	2.4610	2.4720	2.4800
14	2.4730	2.4840	2.4950

Debido a que cada canal ocupa 22 MHz, solo los canales 1, 6 y 11 se consideran libres de interferencia, y son factibles de utilizar en áreas pequeñas o donde sea necesario realizar re-uso de frecuencia, en la Tabla 2 se ilustra ésta asignación de canales y los canales no traslapables están sombreados, hay que tener en cuenta que en la mayoría de los países solo está permitido el uso de los primeros 11 canales. La banda sin licencia de 2.4 GHz se ha vuelto últimamente muy ruidosa en áreas totalmente urbanizadas, debido a la alta penetración de las WLAN y otros dispositivos que utilizan el mismo rango de frecuencia.

La norma 802.11g usa la banda de frecuencias de 2.4 GHz mientras que la 802.11a usa la banda de frecuencia de 5 GHz. Esto hace que las redes que utilizan una u otra

<sup>4</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11](http://es.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11)

<sup>5</sup> ISM: Industrial, Scientific and Medical.

tecnología no sean interoperables a pesar de que utilizan las mismas técnicas de modulación y por ende la misma tasa máxima de transmisión de 54 Mbps.

La norma 802.11b tiene una tasa de transferencia de 11 Mbps y opera también en la banda de 2.4 GHz por lo cual es compatible con la 802.11g, que hace posible la interoperabilidad de dispositivos y redes que los utilicen. En la Tabla 3 se puede ver una comparación de los estándares más característicos de la norma IEEE 802.11.

Tabla 3. Comparación las enmiendas de la norma IEEE 802.11

	802.11 a / h	802.11 b	802.11 g
Banda de Frecuencia	5 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Velocidad de transmisión	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps
Método de Modulación	OFDM	DSSS	OFDM

**IEEE 802.11 a/h/j/n.** Esta versión del estándar 802.11 utiliza la banda ISM de 5.8 GHz o la parte *alta* de la banda U-NII (*Unlicensed National Information Infrastructure*). Esta banda tiene asignados 300 MHz de espectro y está dividida en tres secciones de 100 MHz. Las dos primeras son adyacentes (5.1500 GHz – 5.2500 GHz / 5.2500 – 5.3500) y la tercera está 375 MHz por encima del tope de la segunda (5.7250 GHz – 5.8250 GHz).

El estándar 802.11a utiliza el mismo juego de protocolos de base que el estándar original, opera en la banda de 5 GHz y utiliza modulación digital OFDM, al igual que 802.11g, con 64 sub portadoras de 300 KHz agrupadas en canales de 20 MHz, con una velocidad máxima de 54 Mbps, lo que lo hace un estándar práctico para redes inalámbricas industriales. Estas características la hacen más flexible y resistente a la interferencia multi-trayecto y de otros equipos. Sin embargo, debido a que utiliza casi el doble de la frecuencia de 802.11b/g, presenta mayores pérdidas de espacio libre, alcanzando alrededor del 18% de la señal que se obtendría con 802.11b/g, con la misma configuración de antenas y potencia de transmisión. No puede interoperar con equipos del estándar 802.11b, excepto si se dispone de equipos que implementen ambos estándares. La banda de 5 GHz tiene la ventaja de tener menos interferencia, pero presenta otros problemas debido a su naturaleza. Las ondas de alta frecuencia son más sensibles a la absorción por paredes u objetos que las ondas de baja frecuencia, lo que se traduce en distancias más cortas, sin embargo, en ciertos casos esto se puede compensar utilizando antenas exteriores de mayor ganancia.

Las ondas en el rango de 5 GHz son especialmente sensibles al agua, a los edificios circundantes u otros objetos, debido a la alta absorción en este rango. Esto significa que una red 802.11a es muy restrictiva en cuanto a la línea de la vista y se requieren más puntos de acceso para cubrir la misma área que una red 802.11b. Para la misma potencia de transmisión las celdas resultantes son más pequeñas. En la Tabla 4, se pueden ver los canales utilizables en la banda de 5 GHz permitidos por la UIT, Colombia se rige según la normatividad americana. Los canales sombreados representan la banda U-NII baja (Ch 36 – Ch 48), media (Ch 52 – Ch 64) y alta respectivamente (Ch 149 – Ch 161).

Tabla 4. Asignación de canales para IEEE 802.11 a/h/j/n

Canal	Frecuencia Inferior (GHz)	Frecuencia Central (GHz)	Frecuencia Superior (GHz)
36	5.169	5.180	5.191
40	5.189	5.200	5.211
44	5.209	5.220	5.231
48	5.229	5.240	5.251
52	5.249	5.260	5.271
56	5.269	5.280	5.291
60	5.289	5.300	5.311
64	5.309	5.320	5.331
100	5.489	5.500	5.511
104	5.509	5.520	5.531
108	5.529	5.540	5.551
112	5.549	5.560	5.571
116	5.569	5.580	5.591
120	5.589	5.600	5.611
124	5.609	5.620	5.631
128	5.629	5.640	5.651
132	5.649	5.660	5.671
136	5.669	5.680	5.691
140	5.689	5.700	5.711
149	5.734	5.745	5.756
153	5.754	5.765	5.776
157	5.774	5.785	5.796
161	5.794	5.805	5.816
165	5.814	5.825	5.836

**IEEE 802.11y.** Es una enmienda a la norma IEEE 802.11-2007, que permite alta potencia Wi-Fi de los equipos para operar en co-base principal en el rango de 3650 a 3700 MHz en los Estados Unidos, por lo tanto esta frecuencia de operación es válida sólo si el caso de aplicación se encuentra en E.E.U.U, ésta utiliza 14 canales que van desde 3.6575 GHz hasta 3.690 GHz.

#### 1.4. TOPOLOGÍAS

Cada topología de red lleva asociada una topología física y una topología lógica. La primera, es la que define la estructura física de la red, la segunda es un conjunto de reglas que define el modo en el que se gestiona la transmisión de los datos en la red. Los dos tipos más comunes de topologías lógicas son *broadcast* y transmisión de *tokens* (Token Ring). La topología de *broadcast* simplemente significa que cada *host* envía sus datos hacia todos los demás *hosts* de la red. Las estaciones no siguen ningún orden para utilizar la red, sino que cada máquina accede a la red para transmitir datos en el momento

en que lo necesita. Esta es la forma en que funciona Ethernet. En cambio, la transmisión de *tokens* controla el acceso a la red al transmitir un *token* eléctrico de forma secuencial a cada *host*. Cuando un *host* recibe el *token*, significa que puede enviar datos a través de la red. Si el *host* no tiene ningún dato para enviar, transmite el *token* hacia el siguiente *host* y el proceso se vuelve a repetir (5).

La utilización de una topología influye en el flujo de información (velocidad de transmisión, tiempos de llegada, etc.), en el control de la red y en la forma en la que ésta se puede expandir y actualizar, por ello debe prestarse mucha atención a la hora de seleccionar la topología. Las topologías de red de las redes inalámbricas pueden agruparse en tres categorías fundamentales: punto-a-punto (PTP), punto-a-multipunto (PTM) y redes en malla. Las redes PTP consisten de uno o más enlaces fijos punto a punto empleando antenas altamente directivas en ambos extremos. Por su parte, una topología PTM consiste de un número determinado de estaciones base, cada una de las cuales brinda conectividad a múltiples terminales de usuario. Este tipo de red es mucho más efectiva en algunos entornos desde el punto de vista costo/beneficio, que la utilización de múltiples enlaces punto a punto, debido a que los equipos de radio en una sola estación base pueden ser utilizados para servir a varios usuarios (6).

Las redes inalámbricas actuales a menudo utilizan combinaciones de las diferentes topologías para alcanzar un máximo desempeño y adaptarse mejor a las necesidades dinámicas del mercado. Mayor información sobre topologías de red se puede encontrar en el ANEXO D. TOPOLOGÍAS Y COMPONENTES DE RED.

## **1.5. REDES DE INFRAESTRUCTURA**

El funcionamiento de redes WLAN con la ayuda de la coordinación de puntos de acceso se conoce como *modo de infraestructura*. Este modo es contrario a las redes *ad-hoc* (ver sección 1.6) que no tienen un punto de acceso central (2).

### **1.5.1. Redes Independientes**

Las redes independientes constan de un número de clientes que se encuentran en la radio célula de un único Punto de Acceso (AP). La función del punto de acceso se limita a la coordinación de la comunicación con los clientes.

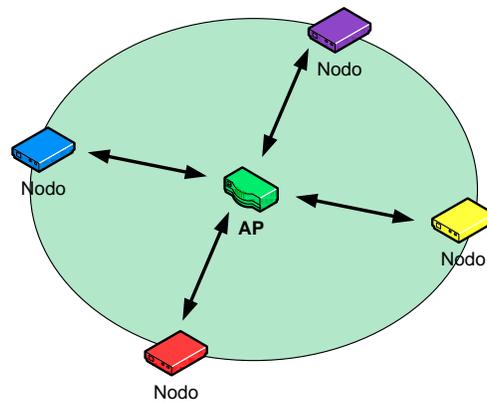


Figura 2. Redes independientes

La Figura 2, muestra un ejemplo de red independiente que incluye un punto de acceso (verde) el cual coordina la comunicación de datos de todos los nodos. El punto de acceso determina el SSID (*Service Set Identifier*) de la red, es decir su "nombre". Sólo un nodo que conoce el SSID del punto de acceso puede conectarse a esa red. No es necesario que todos los nodos de la red tengan contacto directo, pero el problema del nodo oculto puede aparecer. La máxima expansión de dicha red está limitada por la condición de que todos los clientes tienen que estar situados dentro del rango del punto de acceso (círculo verde en la sombra).

### 1.5.2. Redes Mixtas

En las redes mixtas, los puntos de acceso no sólo son usados para la comunicación de los clientes si no que ellos además proporcionan la conexión a una red cableada. (Esta red cableada es normalmente Ethernet). Varios puntos de acceso pueden estar conectados con la red cableada, esto significa que los puntos de acceso generan varias radio células. Si estas células cubren un área específica completamente, los clientes localizados en esta área pueden moverse de radio célula a radio célula, lo cual es comúnmente llamado *roaming*. En la Figura 3 se puede apreciar esta configuración.

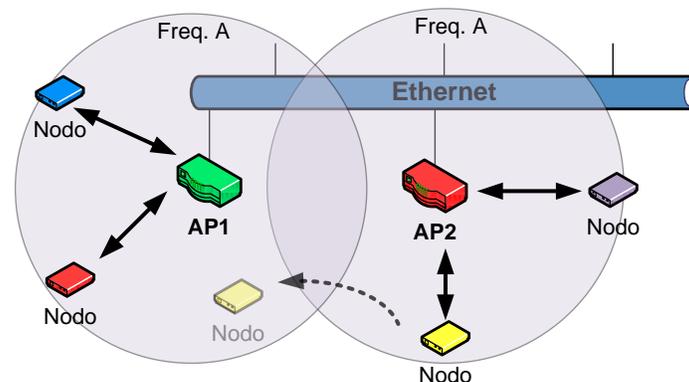


Figura 3. Configuración de una red mixta

Varios nodos conectados a través de WLAN se encuentran dentro del ámbito regulado por el campo radial cubierto por los puntos de acceso. Una de las grandes ventajas de las redes mixtas es que permiten hacer *roaming*, es decir el cambio de un nodo móvil de una radio célula a una célula vecina. Pueden haber interferencias con la recepción dentro de la superposición del rango de las radio células, siempre y cuando los puntos de acceso operen en la misma frecuencia.

### 1.5.3. Configuración de varios canales

La configuración multi-canal corresponde a las redes mixtas, sin embargo, cada uno de los puntos de acceso operan en diferentes canales de radio, asegurando que ya no se produzcan interferencias donde las radio células se superponen, y al mismo tiempo el cambio de un cliente de una célula a otra, se facilita (*roaming*), lo que genera un aumento considerable en el rendimiento de la red. En esta configuración, los puntos de acceso individuales forman una columna vertebral y son conectados el uno con el otro por una red cableada (p.ej. Ethernet). Es posible que los puntos de acceso sean los únicos nodos Ethernet. En la práctica, esta configuración es una de las más usadas y seleccionadas para la construcción de WLANs. La Figura 4, ilustra el principio de operación, las diferentes frecuencias en las que transmiten los puntos de acceso, se indican mediante círculos de diferentes colores.

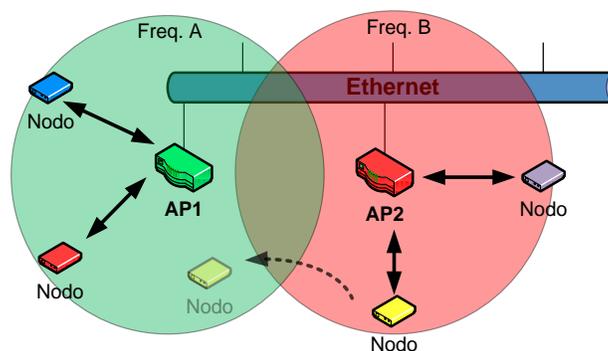


Figura 4. Topología de una configuración multi-canal

### 1.5.4. LANs inalámbricos redundantes

Este modo requiere el uso de puntos de acceso con dos interfaces de radio que puedan transmitir simultáneamente en dos frecuencias. Básicamente, la configuración corresponde a la del Sistema de Distribución Inalámbrico (ver sección 1.7), sin embargo, el punto de acceso no sólo se comunica en la frecuencia primaria sino también en un segundo canal con un segundo juego de antenas. Esto asegura la alta fiabilidad de conexión en combinación con velocidades altas de transferencia de datos, incluso si un canal de frecuencia es temporalmente interrumpido por nodos entrometidos o interferencias, es posible establecer la conexión por medio del otro canal (Figura 5).

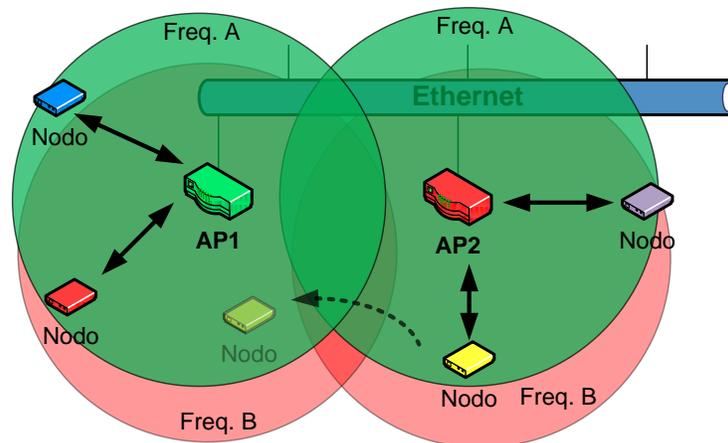


Figura 5. WLAN Redundantes

### 1.6. REDES AD – HOC

Esta forma de red no tiene ningún punto de acceso. Los clientes se comunican con un servidor o el uno con el otro. La Figura 6 muestra un ejemplo de una red *ad-hoc*, en donde los nodos se conectan el uno al otro como se requiera o a un servidor (verde). La extensión física y la seguridad de la WLAN son limitadas por el hecho de que no hay ninguna estructura de administración de nivel más alto.

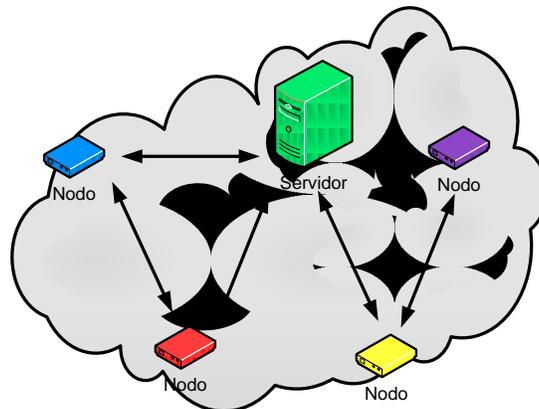


Figura 6. Configuración esquemática de una red ad hoc

Obviamente, la extensión de tal red es limitada por el hecho de que todos los clientes se localizan en el mismo rango de señales de radio. Las redes *ad-hoc* están definidas por el estándar IEEE 802.11b y pueden comunicarse con un máximo de 11 Mbps. Son convenientes para redes con un pequeño número de nodos que no sean sujetos a estrictas exigencias de tiempo real. Además, la falta de opciones de seguridad contra intrusos no autorizados son problemáticas (por ejemplo, sólo el método de Privacidad Equivalente a Cableado o WEP es aprobado como un método de autorización) para las redes *ad-hoc*.

## 1.7. WDS: SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN INALÁMBRICO

En la terminología de IEEE 802.11 *sistema de distribución* es el sistema que interconecta los llamados *Basic Service Set* (BSS). Un BSS se puede comparar con una *Célula*, manejada por un único punto de acceso. Por lo tanto, un sistema de distribución conecta los puntos de acceso de forma inalámbrica a fin de extender una infraestructura de red a los lugares donde el cableado no es posible, es muy costoso o ineficaz de aplicar. Un sistema de distribución puede ser por cable (Ethernet) o de forma inalámbrica. La Figura 7 (7) muestra un sistema de distribución cableado.

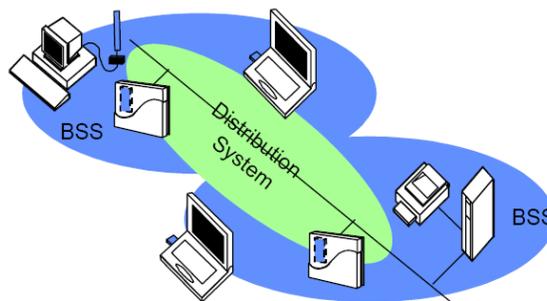


Figura 7. Sistema de Distribución Cableado

Si no se utiliza el cable, pero la conexión entre el AP se establece mediante una tarjeta PC de red, se crea un sistema de distribución inalámbrico como se ve en la Figura 8 (7):

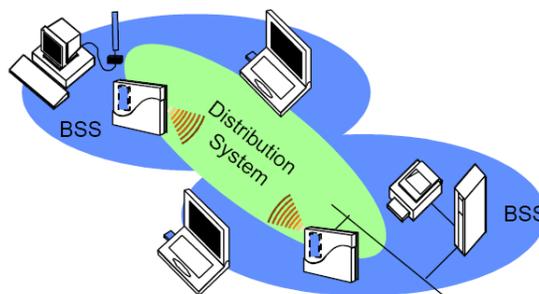


Figura 8. Sistema de Distribución Inalámbrico

En el diagrama de la Figura 9 (7), los tres puntos de acceso en el lado derecho de la imagen están conectados por cable Ethernet y, por tanto, utilizan un sistema de distribución cableado, mientras que los cuatro puntos de acceso en la parte izquierda están conectados inalámbricamente, es decir forman un WDS. Un aspecto importante de WDS es el hecho de que una sólo tarjeta PC en el punto de acceso puede asumir múltiples funciones al mismo tiempo. Puede conducir una célula (Como un AP conectado por cable), y como tal, conectar a los clientes inalámbricos a la infraestructura, y puede mantener varias conexiones inalámbricas con otros puntos de acceso. Para que ello sea posible el canal operacional (frecuencia) tendrá que ser el mismo para la celda que es controlada por el AP y los enlaces inalámbricos a los demás AP.

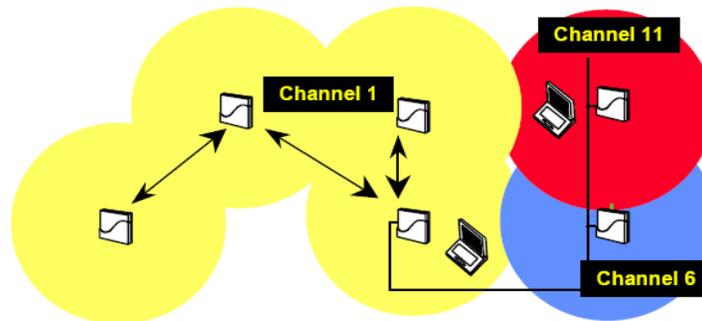


Figura 9. Aprovechamiento de canales en un sistema híbrido

Los dispositivos LAN, se comunican entre sí mediante el uso de direcciones MAC (direcciones de hardware que son asignadas específicamente en fábrica para cada dispositivo). Cada *Wireless PC Card*, tiene por lo tanto, una única dirección MAC que es utilizada por el sistema para enviar datos. Las tramas de datos transmitidos a través de una LAN contendrán un destino y una dirección fuente MAC, como parte del encabezado. Si una trama de datos se transmite mediante un cable Ethernet sólo dos direcciones MAC son obligatorias. Cuando hay paquetes de datos para la transmisión entre las estaciones de LAN final, que no son conectadas al mismo segmento de red local, es necesario un dispositivo intermedio como *Puente* de un segmento a otro. Un punto de acceso (AP) es un dispositivo también conocido como un puente, que tiene la capacidad de enrutar tráfico de un segmento a otro. Realiza ésta tarea con el uso de una *tabla de aprendizaje* del AP, donde se almacenan las direcciones MAC, en asociación con los segmentos LAN (o la interfaz física). El tráfico entre los dispositivos de una LAN inalámbrica que cumplen con el estándar IEEE 802.11 requiere 4 direcciones MAC en vez de 2. Cuando un enlace WDS se establece entre dos puntos de acceso, los cuatro pares de campos de dirección MAC en la cabecera que se utilizan son:

- La dirección MAC del remitente
- La dirección MAC del destino final,
- La dirección MAC de la tarjeta PC de envío en el punto de acceso
- La dirección MAC de la tarjeta PC que reciben en el otro punto de acceso

### 1.7.1. Configuraciones avanzadas

La flexibilidad que ofrece WDS, puede producir varias configuraciones distintas, cada una de ellas con importantes ventajas operativas y limitaciones al mismo tiempo. Algunas de las configuraciones se muestran a continuación con una explicación general sobre las cuestiones que han de tomarse en cuenta.

#### Configuración en estrella

En un WDS con configuración en estrella se establecen vínculos entre un AP y otros más, como se ve en la Figura 10 (8). El AP principal puede ser parte de una red cableada tipo

infraestructura, mientras que los otros AP están ubicados de manera tal que es posible cubrir una zona que es más grande que la que puede ser cubierta por una única celda.

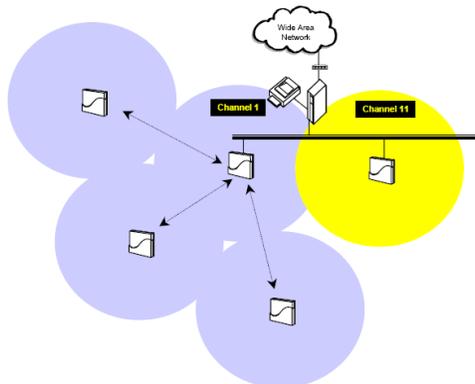


Figura 10. Configuración en estrella

En esta configuración, el AP raíz necesita tres puertos WDS habilitados para tres diferentes enlaces mientras que los tres AP aledaños, cada uno posee un puerto WDS activado. No es necesario que el número de identificación del puerto asignado a un determinado enlace WDS sea el mismo que el número de identificación del puerto en el otro lado del enlace WDS.

### Configuración en cadena

Mientras que la configuración en estrella puede cubrir una mayor área cuadrada o rectangular, una configuración en cadena permite una mayor cobertura de forma larga (por ejemplo, un gran corredor). Los AP's están encadenados en todo su conjunto, donde el primer AP, por ejemplo, podría tener una conexión a la red de infraestructura existente. En la Figura 11 (8) se puede apreciar con mayor facilidad esta configuración. En este modo, el AP en cada extremo de la cadena tendrá un puerto de WDS habilitado, mientras que el AP en el medio de la cadena requiere dos puertos WDS habilitados.

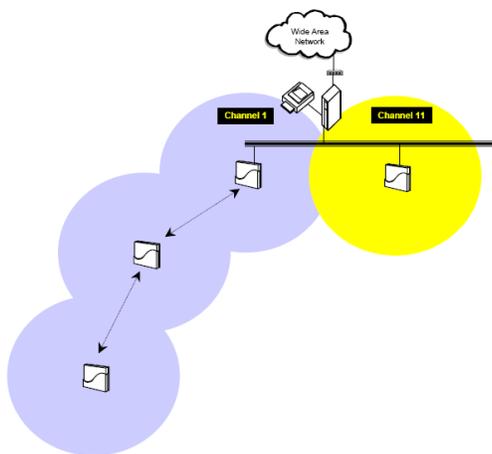


Figura 11. Configuración en Cadena

## Configuración de bucle

Si los puntos extremos de una cadena están conectados entre sí se crea un bucle. Normalmente se aconseja la utilización de Puentes (*Bridges*) para evitar los bucles (*loops*), sin embargo, si los puentes en el bucle soportan protocolos en árbol, un bucle puede ser creado añadiendo una conexión redundante que puede ser utilizada en caso de que uno de los puntos de acceso en el bucle falle.

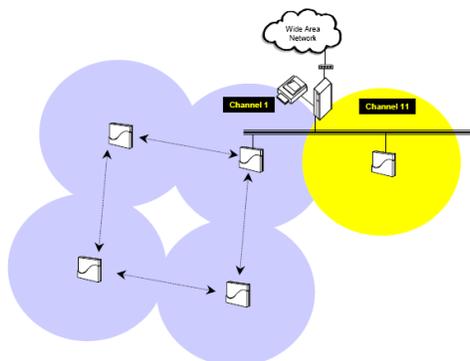


Figura 12. Configuración en bucle

Por ejemplo, cuando se mira en los cuatro AP en la parte izquierda de la Figura 12 (8), si el de la parte superior derecha falla, el que está justo a continuación todavía tiene una conexión a la columna vertebral a través de los otros puntos de acceso.

## 1.8. REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS (WSN)

Un sistema WSN (*Wireless Sensor Network*) de sensores inalámbricos es una red con numerosos dispositivos distribuidos espacialmente, que utilizan sensores para controlar diversas condiciones en distintos puntos, entre ellas la temperatura, el sonido, la vibración, la presión, el nivel, el flujo, el pH y movimiento entre otros. Los dispositivos son unidades autónomas que constan principalmente de un micro controlador, una fuente de energía (casi siempre una batería), un radio transceptor y un elemento sensor. En la Figura 13 (9) se puede ver un diagrama de bloques de un sensor de este tipo.

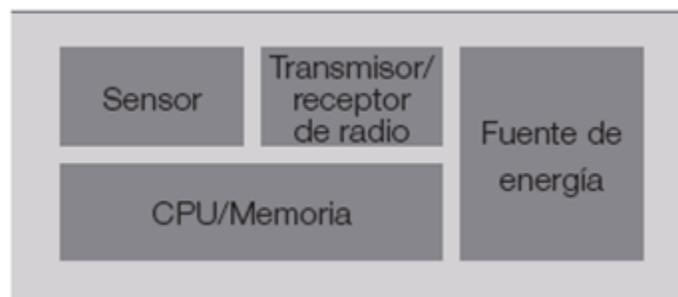


Figura 13. Dispositivo autónomo de una red de sensores inalámbricos.

Debido a las limitaciones en la tecnología de las baterías su duración es muy limitada, es por esto que los nodos se construyen teniendo presente la conservación de la energía, y generalmente pasan mucho tiempo en modo *durmiente* o *sleep* de ahorro de energía. Los nodos organizan sus redes automáticamente en una configuración *ad-hoc*, en lugar de tener una topología de red previamente programada. Además, las WSN tienen capacidad de auto restauración, es decir, si se avería un nodo, la red encontrará nuevas vías para encaminar los paquetes de datos, todo esto gracias a la inteligencia que se les provee a estos dispositivos. De esta forma, la red sobrevivirá en su conjunto, aunque haya nodos individuales que pierdan potencia o se destruyan.

En aplicaciones industriales todos los sensores son de vital importancia para la operación de la planta. Esto significa que no se puede admitir la pérdida de un nodo aunque la red global siga siendo operativa, por ejemplo que el sensor que mide el nivel de un tanque o la presión este defectuoso en su medición o no funcione sería muy peligroso para la operación y para la empresa ya que esto podría generar grandes daños y pérdidas económicas.

En el caso de que un nodo esté averiado, tendrá que ser sustituido cuanto antes. El tiempo que se demoran los datos en ser transportados es un factor esencial en las aplicaciones de procesos industriales, mientras que un paquete de datos en una WSN estándar puede emplear un tiempo indeterminado desde su origen hasta su destino, una aplicación industrial requerirá frecuentemente límites rigurosos de la máxima demora permitida variando estos tiempos según la aplicación, ya que hay procesos que necesitan la información en tiempo real para su óptimo funcionamiento. Este tipo de redes basan su operación según la norma IEEE 802.15. Mayor información sobre este tipo de redes se encuentra consignada en el ANEXO B.

## 2. CARACTERIZACIÓN DEL ESCENARIO CASO DE ESTUDIO

En este capítulo se presenta la información general sobre el proceso de tratamiento de agua realizado por la empresa Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A.E.S.P., se aborda el estado de las plantas, la instrumentación existente, las redes de comunicaciones actuales, las características topográficas del paisaje entre otros.

### 2.1. ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A.E.S.P.

El Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A., E.S.P., cuenta con dos plantas de tratamiento de agua que abastecen de agua potable a la población de la zona de Popayán. Una planta principal (Planta 1: El Tablazo) y una secundaria (Planta 2: Tulcán) la cual tiene una capacidad de procesamiento de agua menor que la primera y están totalmente incomunicadas. Se busca con el proyecto el diseño de una red que permita la comunicación directa entre las dos plantas para así, suplir el problema de la falta de comunicación entre las sedes de la empresa y dentro de las mismas, adquiriendo así, un mayor control sobre sus procesos generando un grado más de automatización e integración de las comunicaciones de la empresa.

#### 2.1.1. Planta 1: El Tablazo

El subsistema de El Tablazo (Figura 14 y Tabla 5) tiene como fuentes abastecedoras el río Las Piedras y la Quebrada de Pisojé, fue construido en 1958 y ampliado en 1990 posee una capacidad nominal de 1.050 lts. Este subsistema opera por gravedad en la mayor parte de la ciudad, exceptuando la zona ubicada al norte de la planta de tratamiento de El Tablazo, en donde opera por bombeo, con una capacidad de 228 lts, la planta de El Tablazo cubre el 90% de la población demandante de agua.

Tabla 5. Coordenadas planta El Tablazo

PLANTA TABLAZO	
Latitud	2° 28' 29" N
Longitud	76° 34' 52" O
Altitud	1820 m



Figura 14. Foto aérea planta El Tablazo.

### 2.1.2. Planta 2: Tulcán

El subsistema de Tulcán (Figura 15 y Tabla 6), tiene como fuente de abastecimiento el Río Molino y funciona por gravedad; fue construido en 1928 y ampliado en 1982. Posee una capacidad nominal de 150 lts, aunque en términos operativos ésta reduce a 70 lts. Está destinado a dar cobertura a las zonas oriental y central de la ciudad cubre el 10% restante de la población demandante de agua.

Tabla 6. Coordenadas planta Tulcán

PLANTA TULCÁN	
Latitud	2° 26' 35" N
Longitud	76° 35' 54" O
Altitud	1784 m

Las plantas de tratamiento mencionadas, aunque convencionales, poseen una capacidad suficiente para dar cobertura a la demanda actual y a la proyectada (año 2.015). Todas sus unidades, floculación, sedimentación, dosificación, filtración, almacenamiento y sistema de lavado, se encuentran en buen estado y operan normalmente en condiciones satisfactorias, merced a los programas de mantenimiento que se aplican. Mayor información sobre procesos de tratamiento de agua se puede encontrar en el ANEXO F. PROCESO.



Figura 15. Planta de tratamiento de agua Tulcán.

## 2.2. ANÁLISIS DE LA LÍNEA DE VISTA (LOS) (10)

En general la línea de vista es necesaria para comunicaciones inalámbricas, en estos sistemas puede definirse que la existencia de línea de vista es un requisito indispensable. El primer aspecto es identificar si existe una línea óptica de vista entre los dos puntos remotos con la necesidad de comunicación (plantas remotas), esto es muy importante porque permite determinar la presencia de obstáculos en la trayectoria de la señal y por ende evitar una mala comunicación.

Dentro de esta terminología, existe el concepto de la *Zona de Fresnel* (11), que es una zona de despeje adicional que hay que tener en consideración en un enlace punto a punto, además de la visibilidad directa entre las dos antenas. Como norma, se asume que entre el 60% y el 70% de la *Zona de Fresnel* debe estar libre de obstáculos. En los sistemas inalámbricos que se manejan en la frecuencia de 2.4 GHz, este concepto es realmente importante, pues debe mantenerse limpia de obstáculos que detengan la señal, por ejemplo, los árboles suelen detener mucho más esas señales que las paredes, por su alto contenido en agua. A continuación en la Figura 16 (12) se muestra un enlace punto a punto de dos antenas separadas por un obstáculo con su determinada línea de vista y su zona de *Fresnel*.

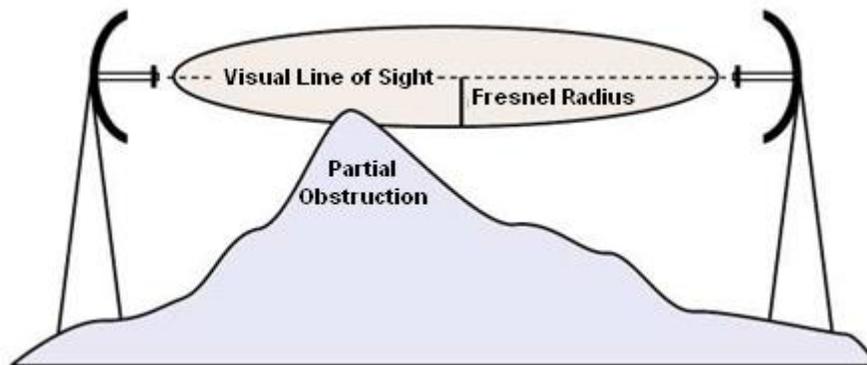


Figura 16. Zona de Fresnel enlace punto a punto

Se puede decir entonces, que garantizando la LOS se prevé la liberación de la *Zona de Fresnel* para determinar las alturas de las torres de las antenas necesarias para asegurar que la señal arribe a la antena receptora dentro de un margen de trayectorias que sean favorables para la contribución en los niveles de potencia.

Con la línea de vista establecida el segundo aspecto es valorar el recorrido entre los dos puntos y la existencia de la línea de vista en términos de RF, que se asocia a la claridad existente de la *Zona de Fresnel*.

Teniendo en cuenta la constitución topográfica de la zona, se debe determinar la LOS entre los puntos donde se desea hacer la conexión inalámbrica, en este caso la línea de vista entre las plantas de tratamiento de agua de El Tablazo y Tulcán, en caso de que el paisaje de la zona sea tal que se interponga entre los puntos donde se desea instalar la conexión inalámbrica es decir que no haya línea de vista libre, se deberá pensar en una instalación alterna de otro punto de red que sirva como puente o repetidor entre los dos puntos sin línea de vista y así poder hacer la transferencia de datos de una forma adecuada y segura.

En la Figura 17, se muestra una imagen aérea de la ciudad de Popayán y la ubicación de cada una de las plantas, señalando con la línea punteada de color naranja la línea de vista que debería estar disponible para hacer un enlace WDS entre las dos plantas de tratamiento de agua, en el diseño de la red se deberá comprobar la disponibilidad de LOS según las características topográficas presentes en la ubicación de cada una de las plantas y de no haber dicha disponibilidad se deberá plantear la solución más adecuada para el problema. La distancia entre las dos plantas de tratamiento de agua de El Tablazo y Tulcán es de 4 Km aproximadamente.



Figura 17. Foto aérea de la ubicación de las plantas El Tablazo y Tulcán.

Para el análisis de línea de vista del caso de estudio, se tuvo en cuenta las coordenadas y alturas de los emplazamientos y del único obstáculo significativo, El Morro. Las direcciones azimutales al Morro desde el Tablazo y Tulcán son las siguientes:

- Dirección Azimutal Tablazo: 208.5° - Distancia al Tablazo: 3.8 Km.
- Dirección Azimutal Tulcán: 27.4° - Distancia a Tulcán: 210 m.

Lo cual implica que El Morro se encuentra directamente en la trayectoria del enlace Tablazo – Tulcán, esto quiere decir que la línea de vista esta obstruida por lo tanto se deberá buscar una solución práctica a este problema para poder realizar la conexión de las dos plantas caso de estudio. A continuación se detalla el análisis del trayecto, zonas de Fresnel y alturas requeridas.

**El Radio de la Zona de Fresnel está dado por (10):**

$$Rf = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad \lambda = \frac{C}{f}$$

Donde:

- $d_1$ : Distancia a la antena 1
- $d_2$ : Distancia a la antena 2
- $f$ : Frecuencia

$$Rf = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} = \sqrt{\frac{0.125 * 3800 * 210}{3800 + 210}} = \underline{4.98 \text{ m}}$$

### Corrección de alturas

Se debe hacer la liberación de la Zona de *Fresnel*, para ello se utiliza el factor de corrección por la curvatura terrestre esta dado por la siguiente ecuación:

$$H_k = D_1 * D_2 / (2 * K * R)$$

Donde:

- $H_k$ : altura que es necesario agregar a la altura del obstáculo debido a la curvatura terrestre.
- $R$ : radio de la tierra 6.380Km
- $D_1, D_2$ : distancia del obstáculo a las estaciones respectivamente
- $K$ : Factor de corrección de curvatura terrestre = 4/3 para Colombia

La altura corregida sobre el obstáculo es  $h_c = h_o + h_k$  (corregida=original+curvatura)

$$H_k = 3.8\text{Km} * 0.21\text{Km} / (2 * 1.33 * 6378) = 4.69 * 10^{-5} \text{ Km} = \underline{4.69 \text{ cm}}$$

La cual es despreciable. Además, siendo éste un trayecto tan extenso, se puede afirmar que la corrección para los demás, es igualmente despreciable.

### Altura de antena en Tulcán

$$H_1 = (d_{\text{tot}}/d_1) * (h_{\text{obst}} + R_f) - H_a - (d_1/d_2) * H_b - (d_1/d_2) * H_2$$

- $d_{\text{tot}}$  = Distancia total del enlace
- $d_1$  = Distancia del primer punto al obstáculo
- $d_2$  = Distancia del segundo punto al obstáculo
- $H_1$  = Altura de la torre en el primer punto
- $h_{\text{obst}}$  = Altura corregida del obstáculo
- $H_a$  = Altura del primer punto sobre el nivel del mar
- $H_b$  = Altura del segundo punto sobre el nivel del mar. En este caso, la torre ubicada en el Tablazo tiene 25m.
- $R_f$  = Radio Fresnel

$$H_1 = (4010\text{m}/3800\text{m}) * (1805\text{m} + 5\text{m}) - 1784\text{m} - (210\text{m}/3800\text{m}) * 1820\text{m} - (210\text{m}/3800\text{m}) * 25\text{m} = \underline{24.05\text{m}}$$

Del anterior resultado se concluye que para liberar la *Zona Fresnel* en el Morro se requiere una altura de torre de transmisión de casi 25 m, lo cual incrementaría los costos en buena medida. Ya que no se cuenta con LOS disponible se deberá buscar una alternativa para la comunicación de las dos sedes, esta podría ser la de un punto intermedio entre las plantas El Tablazo y Tulcán que permita la conectividad de las dos locaciones, una opción podría ser el cerro de las tres cruces que tiene una ubicación adecuada además de infraestructura que podría re utilizarse (Torre), en el Capítulo 4 en el diseño de la red, se verá con mas claridad lo que se propone para solucionar el problema de línea de vista entre las plantas para la comunicación de las plantas remotas de El Tablazo y Tulcán.

### 2.3. INSTRUMENTACIÓN EXISTENTE

Las plantas de tratamiento de agua del Acueducto y Alcantarillado de Popayán se encuentran con un grado de automatización bajo, tanto en elementos de medición, control, como en redes de comunicación. La mayoría de válvulas son accionadas de forma manual, los elementos de medición son muy básicos y también se operan manualmente, la calidad del agua dependen de la experiencia y habilidad del personal del

acueducto. Tienen tanques de almacenamiento de agua tratada de 800 Litros. Para medir la turbidez del agua utilizan un instrumento llamado *Turbidity Meter HI 93703 Microprocessor* de *Hanna Instruments* y para medir el Ph/Cl<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> utilizan un colorímetro *Spectroquam Picco* marca *Merk* con una regla de colores que indica el pH del agua según su color, estos instrumentos se tienen en la sala de dosificación de cada planta y se presentan en la Figura 18 (13) (14) .



Figura 18. Colorímetro y Turbidímetro.

A continuación en la Figura 19 (15), se muestra un dispositivo HYDRO de la serie 500 para la inyección y dosificación de cloro gaseoso en una instalación de una tubería con agua, utilizado en las plantas del Acueducto de Popayán, este se encuentra instalado en la sala de cloración de cada una de las plantas.

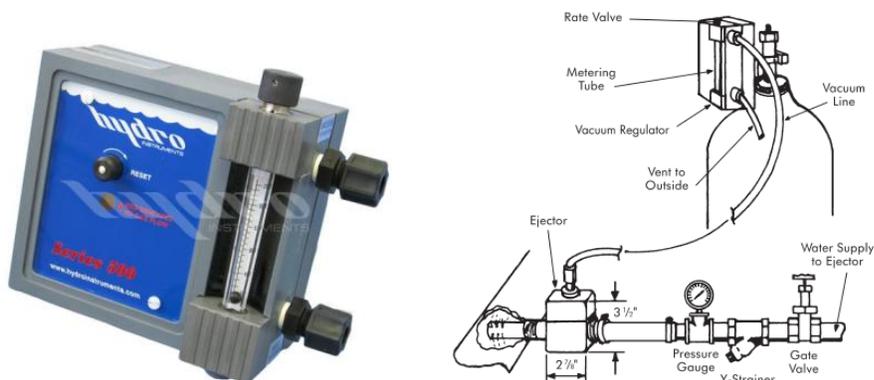


Figura 19. Eyector de cloro.

Para aplicar el sulfato de aluminio tipo B como primera fase del proceso de tratamiento se utiliza un dosificador mecánico. En la siguiente figura se puede ver la maquina dosificadora de sulfato de aluminio tipo B accionada por un motor trifásico que dosifica con una paleta según la calibración manual previa de la máquina hecha por el operario calificado que depende netamente de la experiencia y pericia de este.



Figura 20. Máquina dosificadora de Sulfato de Aluminio.

En la planta de tratamiento de El Tablazo, hay instalada una red industrial que contiene un PC de supervisión, un PLC SIEMENS S7-300 que controla la apertura de las válvulas de desagüe y entrada de agua, por el momento no se encuentra en funcionamiento por fallas técnicas por lo cual la apertura de las válvulas la hace manualmente un operario de la planta. En la Figura 21, se muestra un esquema de la red existente en la planta El Tablazo.

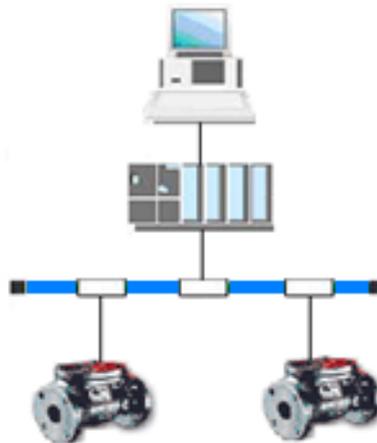


Figura 21. Red de control de válvulas planta El Tablazo.

Como se pudo ver en la descripción general de los sistemas actuales de las plantas de El Tablazo y de Tulcán, es fácil concluir que el grado de automatización es muy bajo y depende enteramente de la experiencia del personal que maneja las plantas, sería conveniente combinar esa experiencia y potencializarla adecuadamente para elevar la producción y la calidad en el proceso tratamiento del agua mejorando los sistemas de comunicación de las plantas con instrumentos de medición y control más modernos y de mayor precisión que ayudaran a mejorar la calidad y el volumen de producción. En el diseño de la red se propondrán alternativas para la solución de los problemas aparentes de comunicación externa e interna.

## Necesidad del cliente

Con este proyecto se busca optimizar las redes de comunicaciones industriales de las plantas caso de estudio ya que son plantas de tratamiento con un nivel muy bajo de automatización y al ser ésta empresa prestadora de un servicio vital como lo es el del agua potable para consumo humano se debe tener la seguridad de que el servicio que se preste sea de optima calidad y que supla las necesidades de la ciudad.

Estas plantas tienen unas necesidades actuales que deberán ser suplidas para optimizar los procesos de tratamiento del agua, estas necesidades se nombran a continuación:

- ✓ Integración del sistema de supervisión de las plantas remotas del Tablazo y Tulcán (Comunicación niveles 0, 1 y 2 de la pirámide CIM).
- ✓ El cliente necesita comunicar sus dos estaciones de supervisorio, poderlas enlazar y poder llevar a cabo el proceso de monitoreo de forma efectiva.
- ✓ Optimizar los métodos de sensado, control y supervisión de cada una de las plantas para obtener mayor calidad y productividad. Esto será posible con la utilización de instrumentación de sensado, equipos de control, componentes de red industrial cableada e inalámbrica, equipos de tráfico de red.
- ✓ Pasar de la experiencia y habilidad de los operarios en el sensado de las variables importantes del proceso a la utilización de instrumentos de medición más precisos y diseñados especialmente para ello. Esto es un gran aporte ya que la calidad de los procesos no quedara ligada a los operarios expertos en el proceso y así prever futuras fallas en caso de la falta de uno de estos.
- ✓ Accesibilidad de la información importante de los procesos desde cualquier planta.
- ✓ Información en campo accesible constantemente de forma fácil y confiable por medios más avanzados.
- ✓ Centralización de la información por medio de la integración en las comunicaciones de los primeros tres niveles de automatización.
- ✓ Mejorar la calidad de la información suministrada hacia niveles superiores.

### **3. CRITERIOS TÉCNICOS PARA EL DISEÑO Y PLANEACIÓN DE UNA RED RADIO/WIRELESS INDUSTRIAL**

En este capítulo en la primera sección se realiza una introducción al concepto de integración en las comunicaciones entre los diferentes niveles de automatización. En las secciones siguientes se presentan una serie de criterios técnicos para tener en cuenta a la hora del diseño de una arquitectura de red industrial inalámbrica que serán útiles para el ingeniero en automatización que desee implementar este tipo de tecnologías como parte de una solución de comunicación en ambientes industrializados.

#### **3.1. INTEGRACIÓN DE LAS COMUNICACIONES ENTRE NIVELES DE AUTOMATIZACIÓN**

En un proceso automatizado, la obtención y tratamiento de la información obliga a diseñar una infraestructura de comunicaciones, con diferentes niveles de funcionalidad que contemple las peculiaridades de cada una de las zonas donde ella se requiere.

Según la norma ISA 95, toda empresa productora de bienes o servicios tiene unos niveles básicos para su funcionamiento dependiendo de la función que cumple cada nivel. Como se ilustra en la Figura 22 (16), existe un nivel inferior, que es donde se transforma la materia prima y se llevan a cabo todos los procesos físicos para llegar a un resultado deseado, un nivel superior en donde se realiza la gestión de todos los procesos antes mencionados, esto es, idear un plan de negocios según el rendimiento, el estado y las especificaciones del proceso en particular, generando una agenda de producción y de operación basada en los datos generados por la planta baja, que de tener éxito produciría activos para la empresa. Los dos niveles antes mencionados producen un flujo de información totalmente ajeno a cada uno de ellos, en uno se ven curvas de productividad, presupuestos, datos de inventario, ordenes de producción entre otros y en el otro se ven las respuestas lógicas de la maquinaria utilizada en el proceso como los sensores, actuadores, controladores entre otros, queriendo decir con todo esto que la información generada en cada uno de los niveles es incompatible, por esta razón se necesita un nivel intermedio que sirva como medio de enlace o *middleware* entre estos niveles, que traduzca la información para que esté disponible en la forma que se necesita en todos los entes de la empresa.

La estructura de una empresa puede ser representada como una pirámide dividida en diferentes niveles jerárquicos, los cuales van desde la planta productiva o nivel de proceso, pasando por los sistemas de supervisión y control o nivel de célula, llegando hasta su nivel más alto el de factoría que es donde se realiza toda la gestión empresarial. En la industria, se hace indispensable mantener una comunicación entre cada uno de

estos niveles, ya que esto permitirá saber el estado actual de la empresa mejorando y agilizando la gestión de sus recursos permitiendo así, la conversión de decisiones de política empresarial en operaciones de control de bajo nivel, cuando esto se ha logrado se puede decir que la empresa tiene integración en sus comunicaciones dándole un grado más de automatización y control de la misma.

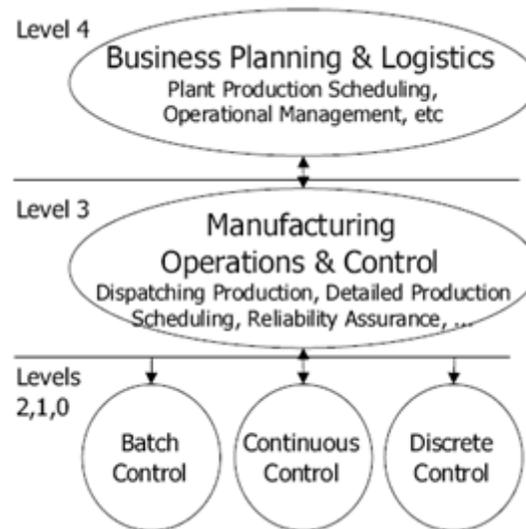


Figura 22. Jerarquía Funcional

Existe una clasificación jerárquica de las redes industriales según como se ve en la Figura 23 (17), estas son:

- ✓ Red de factoría (Nivel 3 y 4): Redes utilizadas en oficinas.
- ✓ Red de planta (Nivel 2): Interconecta módulos y células de fabricación entre sí y con otros departamentos.
- ✓ Red de célula (Nivel 1): Interconecta dispositivos de fabricación que operan en modo secuencial.
- ✓ Bus de campo (Nivel 0): Comunica los sensores, actuadores y los correspondientes dispositivos de control.

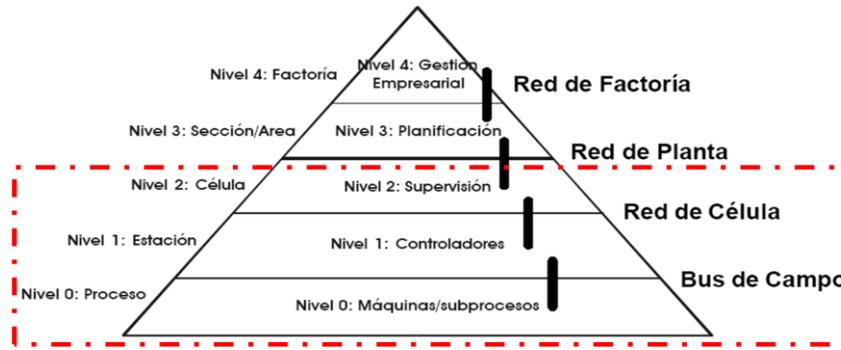


Figura 23. Jerarquía en los niveles de comunicación

Al comunicar dos dispositivos en un mismo nivel, estos generan un flujo de información horizontal y al comunicarlos con dispositivos de niveles superiores o inferiores tendrían un flujo de información vertical, es necesario tener control sobre esta información y su respectivo flujo, es decir su procedencia y su destino, al hacer esto se está integrando las comunicaciones entre los diferentes niveles de la pirámide de automatización. Cada nivel de la pirámide de automatización CIM<sup>6</sup> tiene su propia red que cumple funciones específicas e interconecta dispositivos específicos como se explica a continuación:

### Nivel 0

En este nivel se encuentran un conjunto de dispositivos, subprocesos, maquinaria en general, con que se realizan las operaciones elementales de producción en la empresa, también están situados los dispositivos de campo que interactúan con el proceso: sensores, actuadores, transmisores, entre otros. En este nivel, hay que destacar un concepto relativamente nuevo que es el de las WSN, que son redes diseñadas especialmente para la conexión de sensores de forma inalámbrica como su nombre lo indica, existen estándares como el IEEE 802.15.4 o ISA 100.11a, que se dedican al estudio y estandarización de las comunicaciones en este nivel operativo. Comúnmente se diseña la red de sensores con su determinada topología y esta se adapta a un bus de campo que se encarga de subir un nivel la información (Figura 23) y así sucesivamente hasta que la información esté disponible en los niveles superiores que es el objetivo de la integración de las comunicaciones generando mayor grado de automatización. Por ejemplo redes DeviceNet, ASII, WSN (varían según el fabricante).

### Nivel 1

Aquí se encuentran los dispositivos lógicos de control o autómatas programables (PLCs), tarjetas de control, ordenadores industriales, entre otros. Constituyen los elementos de mando y control de la maquinaria del Nivel 0. Proporciona y reciben información de actuación directa al Nivel 0 y de estado al Nivel 2. Por ejemplo redes DH-485, ControlNet, PROFIBUS.

<sup>6</sup> CIM: Computer Integrated Manufacturing (Manufactura Integrada por Computadora)

## Nivel 2

Este nivel emite órdenes de ejecución al Nivel 1 y recibe situaciones de estado de dicho nivel, igualmente recibe los programas de producción, calidad, mantenimiento del Nivel 3 y realimenta dicho nivel con las incidencias (estado de órdenes de trabajo, situación de máquinas, estado de la obra en curso, entre otros) ocurridas en planta. Este nivel comúnmente llamado de supervisión y control (SCADA), tiene diferentes tareas que se realizan por medios humanos o informáticos, estas son: Adquisición y tratamiento de datos, monitorización gestión de alarmas y asistencias mantenimiento correctivo y preventivo, programación a corto plazo, control de calidad, sincronización de células, coordinación de transporte, aprovisionamiento de líneas, seguimiento de lotes, seguimiento de órdenes de trabajo, entre otras. Por ejemplo redes ControlNet, PROFINET/Industrial Ethernet.

## Nivel 3

Es el nivel de planificación también conocido como MES (Manufacturing Execution Systems). En este nivel se realizan las siguientes tareas: Programación de la producción, gestión de compras, análisis de costos de fabricación, control de inventarios, gestión de recursos de fabricación, gestión de calidad, gestión de mantenimiento. El Nivel 3 emite los programas hacia el Nivel 2 y recibe de éste las incidencias de la planta. Del Nivel 4 recibe la información consolidada sobre: Pedidos en firme, previsiones de venta, información de ingeniería de producto y de proceso. Envía información relativa al cumplimiento de programas, costos de fabricación, costos de operación y cambios de ingeniería. Por ejemplo redes Industrial Ethernet.

## Nivel 4

Es el nivel corporativo o ERP (Enterprise Resource Planning). En el se realizan las siguientes tareas: Gestión comercial y marketing, planificación estratégica, planificación financiera y administrativa, gestión de recursos humanos, ingeniería de producto, ingeniería de proceso, gestión de tecnología, gestión de sistemas de información (MIS) investigación y desarrollo. Este nivel emite al Nivel 3 información sobre la situación comercial (pedidos y previsiones), información de ingeniería de producto y de proceso, entre otras. Para poder ajustar la planificación global este nivel recibe del Nivel 3 la información anteriormente indicada sobre cumplimiento de programas y costos. Por ejemplo redes Industrial Ethernet.

En el mundo industrial, existen gran cantidad de fabricantes que proveen productos para la automatización y la comunicación industrial entre los niveles antes mencionados, los más conocidos son Rockwell (E.E.U.U) y Siemens (Europa).

Para cada nivel de la pirámide de automatización existen diferentes tecnologías de comunicación de diferentes empresas ya sean cableadas o inalámbricas, algunas de ellas se pueden ver en la Figura 24 (18) (19) según su nivel de aplicación.

Sistema de bus	Industrial Ethernet	PROFINET	PROFIBUS DP	AS-Interface
				
Nivel				
Enterprise Resource Planning (ERP) (p. ej. PC)	■	□		
Control (p. ej. S7-300)	■	■	□	
Motion Control (p. ej. SIMOTION)	□	■	■	
Dispositivos de campo inteligentes (p. ej. ET 200S)	□	■	■	□
Dispositivos de campo sencillos (p. ej. módulos E/S digitales)		□	■	■
Sensor/actuador		□	□	■
Drives (p. ej. SINAMICS)	□	■	■	
Comunicación de seguridad		■	■	■

Industrial Ethernet	
<b>Industrial Ethernet</b> (IEEE 802.3 e IEEE 802.11 WLAN), el estándar de red internacional para todos los niveles	
<b>PROFINET</b> (IEC 61158), el estándar Industrial Ethernet abierto para la automatización	
PROFIBUS	
<b>PROFIBUS</b> (IEC 61158/EN 50170), el estándar internacional para el nivel de campo es el líder del mercado mundial en los buses de campo	
AS-Interface	
<b>AS-Interface</b> (IEC 62026-2/EN 50295) conecta sensores y actuadores a través de un cable bifilar, como alternativa económica al mazo de cables	
KNX	
<b>KNX/EIB</b> (EN 50090, ANSI EIA 776) es el sistema de bus universal para toda la gama de domótica. KNX ha sido desarrollado por la Konnex Association basándose en el EIB (European Installation Bus).	

Figura 24. Tecnologías de comunicación industrial según su nivel de aplicación

Es apreciable el uso de una tecnología con aplicaciones especiales en cada uno de los niveles nombrados con anterioridad, en la Figura 24, los cuadros de colores indican en donde se usa cada tecnología siendo los cuadros rellenos la tecnología que se debería usar preferiblemente y los no rellenos, la tecnología que se puede usar pero no fue creada especialmente para esa aplicación. Por ejemplo, en la fila de sensores/actuadores se pueden ver un cuadro relleno de color amarillo indicando AS-Interface como la preferente para estas aplicaciones pudiéndose también usar PROFIBUS o PROFINET indicadas con un cuadro azul y verde sin relleno respectivamente.

### 3.2. SELECCIÓN DE LOS CANALES Y LA FRECUENCIA DE OPERACIÓN

Elegir el espectro de frecuencia inalámbrica ideal es realmente importante a la hora de diseñar enlaces inalámbricos en ambientes duros como los industriales. La elección de la frecuencia y los canales de operación pueden alterar los atributos y capacidades de la red. Cada espectro posee ventajas y desventajas, pero al conocerlas se puede determinar de mejor forma donde implementar determinado equipamiento en el caso de estudio donde se quiera optar por una solución inalámbrica como parte de la comunicación.

Según lo plantea la norma IEEE 802.11 y como se vio en el Capítulo 1 sección 1.3, existen dos tipos de frecuencia operacional no licenciadas, la selección de una u otra dependerá del caso de estudio, por ejemplo:

- ✓ Si el proceso o la industria en la cual se desea implementar una red inalámbrica se encuentra en un entorno totalmente urbano en donde el uso de las redes WLAN se ha incrementado sobre todo en la banda de frecuencia de 2.4 GHz, es muy posible que si se utiliza una frecuencia igual, la red sufra de interferencias, malfuncionamiento y otros problemas característicos de estas tecnologías, entonces sería conveniente utilizar la banda de frecuencia de 5 GHz, siempre y cuando no se cubran áreas muy grandes es decir dentro de los parámetros de las características de trabajo de los dispositivos en la banda de 5 GHz.
- ✓ Si el proceso productivo o la fabrica se encuentran en un entorno rural o alejado de la polución espacial de las ondas de radio frecuencia de la ciudad, y se desea cubrir una gran extensión de área es muy conveniente usar la banda de frecuencia de 2.4 GHz.

Se establece un primer criterio técnico relacionado con la escogencia adecuada de la frecuencia de operación, el cual estipula que para la escogencia de la frecuencia de trabajo de la red se deben tener en cuenta factores tales como el país en donde se va a desarrollar la aplicación y sus respectivas regulaciones, la ubicación geográfica de la planta o industria teniendo en cuenta las redes ya existentes en los alrededores y sus respectivas frecuencias operacionales ya que hay que determinar las posibles fuentes de interferencia y por ultimo tener una visión general de la extensión de la red en términos geográficos haciendo una comparación costo/beneficio, ya que con la banda de 2.4 GHz se puede hacer una mayor cobertura con menos estaciones pero con altas probabilidades de interferencia a diferencia de la banda de 5 GHz que necesitaría mayores estaciones para cubrir una determinada área pero con una menor probabilidad de interferencia. A continuación se muestra la Tabla 7, que enmarca las ventajas y desventajas más notables de cada tecnología, por ejemplo en la frecuencia de 5.8 GHz hay disponible mayor cantidad de canales no traslapables pero una desventaja es que con ella se cubren distancias menores.

Tabla 7. Comparación bandas de frecuencias no licenciadas

Banda de Frecuencia	Ventajas	Desventajas
2.4 GHz	Gran cantidad de equipos compatibles con esta frecuencia.	Mucha interferencia en entornos urbanos.
	Gran velocidad de transmisión (11/54 Mbps).	Menor cantidad de canales no traslapables (3).
	Grandes distancias (150 m máximo teórico).	
5.8 GHz	Mayor cantidad de canales no traslapables (12).	Más sensibles a la absorción.
	Gran velocidad de transmisión (54 Mbps).	Distancias menores.
	Menor interferencia en entornos urbanos.	

Después de tener claro cuál es la banda de frecuencia que se utilizará para el diseño de red según las características propias del caso de aplicación, se propone como segundo criterio técnico proceder con la selección de los canales de operación de los componentes de la red. Para ello, como se explicó en la sección 1.3, en la banda de 2.4 GHz existen sólo unos canales no traslapables que se podrían utilizar sin que se genere interferencia entre ellos, estos canales están separados por 5 MHz en la mayoría de los casos y tienen un ancho de banda de 22 MHz, como resultado los canales se superponen y se pueden ver en las Tablas 2 y 4 que es posible encontrar un máximo de tres y doce canales respectivamente para cada banda de frecuencia no licenciada, los cuales no se traslapan.

Como ya se dijo, es necesario tener conocimiento de las redes ya instaladas en los alrededores si es que las hay y los canales de transmisión utilizados por sus respectivos componentes para así decidir que canales serían más confiables. Por ejemplo, si existiese una red WLAN cerca del territorio donde se va a situar la nueva red (con probabilidades altas de interferencia) que utiliza la banda de frecuencia de 2.4 GHz y además de eso utiliza los canales de transmisión 1, 6 y 11 no sería conveniente que la nueva red utilizara estos canales, pero podría cambiarse a otra configuración de canales no traslapables, esto es, tomando por ejemplo los canales 2, 7 y 12 evitando de esta manera posibles interferencias (Figura 25).

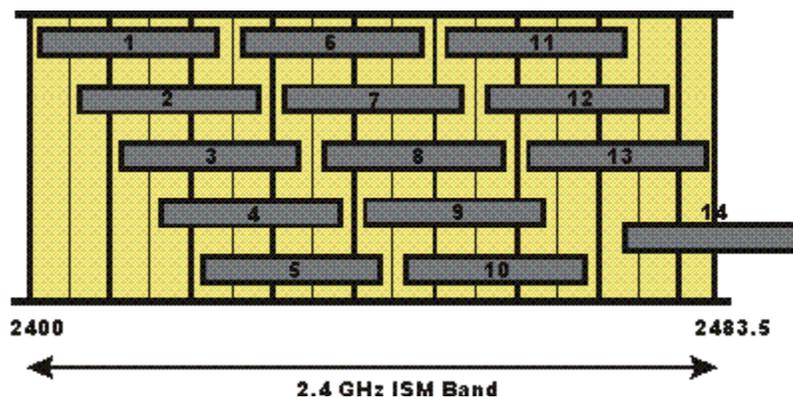


Figura 25. Canales no traslapables para la banda de 2.4 GHz (20).

En anterior imagen, se puede observar que los canales 1, 6, 11, ó 2, 7, 12, o 3, 8, 13 ó 4, 9, 14 (si lo permite) o el 5, 10 (y posiblemente 14 si lo permite) se pueden utilizar juntos, como juegos. A menudo los *routers* WiFi se configuran en el canal 6 que es la opción predeterminada y, por lo tanto, el conjunto de los canales 1, 6 y 11 es posiblemente el más utilizado. Para la banda de 5 GHz (ver Tabla 4) esto no es tan restrictivo ya que existe una mayor cantidad de canales no traslapables para la selección, entonces es cuestión de acomodarse a las necesidades y requerimientos de la red.

En conclusión, para la selección de la frecuencia y los canales de operación se debe:

- ✓ Seleccionar la banda de frecuencias teniendo en cuenta la teoría estudiada para ello (no licenciadas).

- ✓ Tener conocimiento del entorno caso de estudio, zona rural o urbana. Buscar posibles fuentes de interferencia.
- ✓ Seleccionar la frecuencia de operación. Si es una zona urbana con mucha interferencia utilizar frecuencia de operación de 5 GHz, si es zona rural con poca interferencia utilizar frecuencias de operación de 2.4 GHz.
- ✓ Según la frecuencia de operación escogida, seleccionar canales de comunicación no traslapables o configuraciones de ellos como se indica en la teoría estudiada.

### 3.3. TOPOLOGÍAS DE RED ADECUADAS (21)

Existen distintos modos de interconectar equipos en una red, el modo y medio escogido dependerá de la aplicación industrial como tal, no se espera que las redes inalámbricas reemplacen por completo a las redes cableadas ya que éstas ofrecen velocidades de transmisión mayores, sin embargo, se pueden mezclar las redes cableadas junto con las inalámbricas y de esta manera generar una *Red Híbrida* totalmente funcional y eficiente para un entorno industrial determinado.

Industrialmente, son muy codiciadas las soluciones cableadas ya que aportan grandes velocidades de transmisión, robustez, entre otras cosas además de que se usan en la mayoría de las industrias del mundo y su estudio está muy adelantado, comparado con las tecnologías inalámbricas industriales de la actualidad, se puede afirmar que estas no logran superar las velocidades de transmisión del cable por ello es conveniente la fusión de estas tecnologías ya que es innegable que los procesos se pueden hacer mucho más eficientes con el uso de tecnologías inalámbricas. Las aparentes ventajas de la simple y flexible disponibilidad y estaciones de red móviles, le da gran fuerza a la demanda de la integración de soluciones inalámbricas en una topología de red industrial (22).

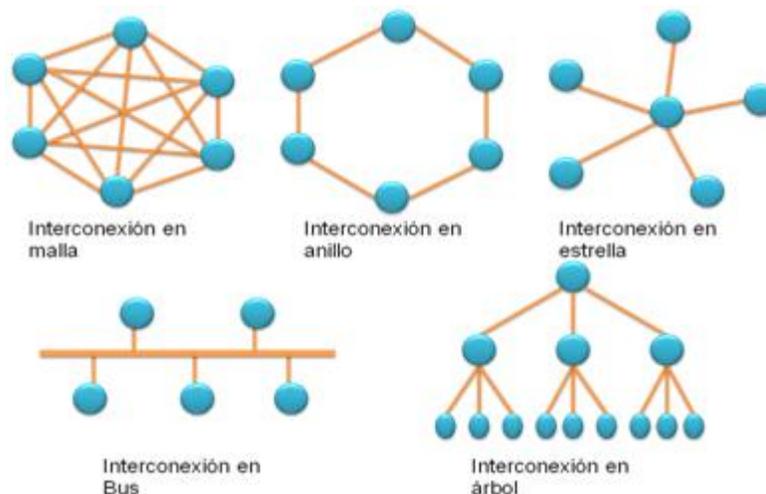


Figura 26. Topologías físicas de red.

Ahora, se hará una comparación de las bondades y los defectos de cada una de las topologías de la Figura 26, para luego sugerir criterios técnicos que ayuden en la selección de la topología de red adecuada para una determinada solución industrial.

### **BUS (23):**

#### ***Ventajas***

- Facilidad de implementación y crecimiento.
- Simplicidad en la arquitectura.
- Existe una interconexión física total entre los equipos que integran la red.
- Manejo de grandes anchos de banda.
- Soporta gran cantidad de equipos.
- Uso muy común en las industrias del mundo para la comunicación a nivel de planta.

#### ***Desventajas***

- Longitudes de canal limitadas.
- Un problema en el canal usualmente degrada toda la red.
- El desempeño se disminuye a medida que la red crece.
- El canal requiere ser correctamente cerrado (camino cerrado).
- Altas pérdidas en la transmisión debido a colisiones entre mensajes.

Una topología de bus hace posible que todos los dispositivos de la red vean todas las señales de todos los demás dispositivos. Esto representa una ventaja si desea que toda la información se dirija a todos los dispositivos. Sin embargo, puede representar una desventaja ya que es común que se produzcan problemas de tráfico y colisiones. Es recomendable para la instalación en redes pequeñas (24). Este tipo de topología es típica de las redes cableadas.

### **Estrella (25):**

#### ***Ventajas***

- El fallo de un nodo no causa problemas en el funcionamiento del resto de la red.
- Permite que todos los nodos se comuniquen entre sí de manera conveniente.
- La detección y localización de averías es sencilla.
- Es posible conectar terminales no inteligentes, ya que el nodo central tiene capacidad de procesamiento.
- Control de tráfico centralizado.

### **Desventajas**

- Si el nodo central falla, toda la red se desconecta.
- En caso de ser cableada es costosa, ya que requiere más cable que la topología Bus y Ring.
- Se necesitan longitudes grandes de cableado, ya que dos estaciones cercanas entre sí, pero distantes del nodo central, requieren cada una un cable que las una a éste lo cual puede mitigarse usando tecnología inalámbrica.
- La carga de red es muy elevada en el nodo central.
- Problemas de expansión, depende de la capacidad del dispositivo central.
- El flujo de toda la información pasaría entonces a través de un solo dispositivo. Esto podría ser aceptable por razones de seguridad o de acceso restringido, pero toda la red estaría expuesta a tener problemas si falla el nodo central de la estrella.

Este tipo de red es adecuado cuando se tiene una computadora central muy poderosa rodeada de máquinas menos potentes que sirven únicamente como terminales de entrada y salida de datos, ya que todos los extremos de la red tienen acceso a los recursos de la máquina principal de manera directa, sin interferencia de elementos intermedios. También pueden ser usadas con redes Punto a Punto, de tal forma que todos los dispositivos, con iguales características, están conectadas al HUB o concentrador y cualquiera de ellas puede tener acceso a las demás. Es una configuración ampliamente utilizada a nivel empresarial y es posible su aplicación tanto en redes cableadas como inalámbricas (26).

### **Árbol:**

#### **Ventajas:**

- Tiene una gran facilidad de expansión, siendo la colocación de nuevos nodos o ramas sencillas (estrellas).
- La detección de problemas es relativamente sencilla, ya que se pueden desconectar estaciones o ramas completas hasta localizar la avería.
- Otra de sus características es que se auto organiza y soporta la redundancia en la red, lo que permite un alto grado de resistencia a las fallas y adicionalmente se auto reparan.

### **Desventajas**

- Hay una dependencia de la línea principal, y los fallos en una rama provocan la caída de todos los nodos que cuelgan de la rama o sub ramas.
- Existen problemas de atenuación de la señal por las distancias, y pueden necesitarse repetidores.

La topología en árbol no es más que muchas topologías en estrella conectadas en serie por ende los pros y los contras de la topología en estrella se aplican a este tipo de configuración de red (27). Se puede implementar tanto en redes cableadas como inalámbricas.

#### **Malla (26):**

##### ***Ventajas***

- Cada nodo está físicamente conectado a todos los demás nodos lo cual crea una conexión redundante (28).
- Si fallara cualquier enlace, la información podrá fluir a través de una gran cantidad de enlaces alternativos para llegar a su destino.
- Permite que la información circule por varias rutas.

##### ***Desventajas***

- La desventaja física principal es que sólo funciona con una pequeña cantidad de nodos, ya que de lo contrario la cantidad de medios necesarios para los enlaces y la cantidad de conexiones con los enlaces se torna abrumadora (29).
- El comportamiento de una topología de malla completa depende enormemente de los dispositivos utilizados.

La topología tipo malla se puede implementar tanto en redes cableadas como en redes inalámbricas, pero su uso es más común en sistemas de comunicación que utilizan tecnología inalámbrica sobre todo en las WSN que es un campo de gran acogida para este tipo de topologías.

Después de haber visto las características de cada una de las topologías y de explorar su ventajas y desventajas se deberá analizar según sea caso de aplicación cual topología sería adecuada seleccionar.

Una topología de red industrial, depende del lugar donde vaya a ser instalada y la función que vaya a cumplir. Por ejemplo, como se vio en la sección 3.1, en la industria existen diferentes niveles que necesitan ser comunicados y puede darse el caso de que la red se vaya a utilizar para comunicar sensores o para comunicar controladores o equipos de supervisión o redes de oficinas (5). Jerárquicamente la red podría comenzar en una topología en árbol de la cual deriven buses de campo que reciben las señales de una red de sensores, este es un ejemplo de la gran variedad de soluciones que podrían darse.

Para una aplicación en donde se necesite una red WSN industrial existen ciertas topologías que son convenientes usar, por ejemplo la clásica topología de red en malla,

además de esta existen otras topologías comunes en la industria para este tipo de redes, como se puede ver en la Figura 27 (30). En la topología de red en estrella, predominante hoy en día, los nodos inalámbricos se comunican con un dispositivo de *pasarela* o *gateway* que hace de puente de comunicación con la red que vaya a tomar los datos provenientes de los sensores.

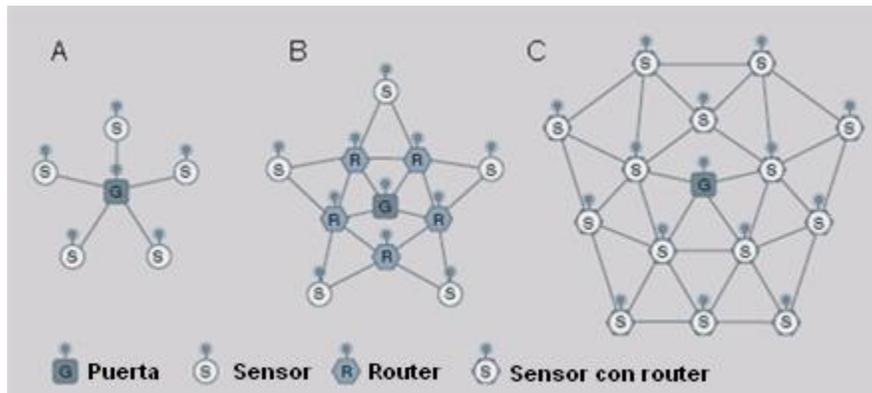


Figura 27. Topologías comunes de redes de sensores inalámbricos.

Una solución intermedia emergente y común cuando la aplicación sea en una red de sensores, es tener dispositivos *enrutadores* o *routers* que se comunican con la pasarela. Los sensores sólo necesitan establecer la comunicación punto a punto con los *routers* y por consiguiente, pueden seguir siendo sencillos y de baja potencia, al tiempo que se mejora el rango y la redundancia de la propia red como se ve en la topología B de la Figura 27.

Existe una topología de red adecuada para cada fin, y elegir cuál es la más conveniente de usar no es tarea fácil. Al escoger la topología hay que tener en cuenta las ventajas y desventajas existentes en cada una de ellas según sea el caso de aplicación, ya que existen diferentes factores a considerar para determinar cual topología es la más apropiada para un problema de comunicación dado. Entre los criterios más relevantes para tener en cuenta a la hora de la selección de una topología están:

- El tamaño de la red, ya que se podrá determinar los componentes necesarios para una adecuada distribución y cobertura.
- El tipo de equipo que la red necesita, ya que dependiendo de la topología que use necesitará determinados componentes, cada equipo varía su costo dependiendo de las funciones que cumpla y por ende influyen en el costo total de la red.
- Interoperabilidad de las tecnologías a usar (entre los fabricantes proveedores).
- Ubicación física, se deberá estudiar los alrededores de la ubicación buscando posibles interferencias o fallas geográficas que necesiten estructuras adicionales.
- Relación *costo/beneficio*, hace referencia al costo de la red según los beneficios que genera ésta para la industria, obviamente los beneficios deben justificar dicho costo.

- El número de variables del proceso a ser manejadas, ya que de eso depende la escogencia de los dispositivos de control (PLC), el flujo de datos por la red y su forma de conexión.
- Seguridad y fiabilidad de las fuentes de energía esenciales para el funcionamiento de la red.
- Capacidad de expansión, contemplando futuro crecimiento de la red.

Entonces como conclusión se puede decir, que para la selección de la topología adecuada se debe:

- ✓ Conocer la zona en donde se pretende instalar la red (condiciones geográficas, extensión).
- ✓ Filtrar qué tipos de topologías son más convenientes según sus ventajas y desventajas relacionándolas con el caso de estudio específico.
- ✓ De las topologías resultantes, hacer una comparación entre ellas tomando como base los criterios relevantes para la selección de la topología nombrados anteriormente, prestando mucha atención a la relación costo/beneficio que es uno de los factores más decisivos a la hora de diseñar una red y de seleccionar una topología óptima.

### 3.4. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

En principio un protocolo de comunicación es un conjunto de reglas que permiten la transferencia e intercambio de datos entre los distintos dispositivos que conforman una red y depende de la tecnología a usar. Estos han tenido un proceso de evolución gradual a medida que la tecnología electrónica ha avanzado y muy en especial en lo que se refiere a los microprocesadores.

Un protocolo es una *convención, tecnología o estándar* que controla o permite la conexión, comunicación, y transferencia de datos entre dos puntos finales. En su forma más simple, un protocolo puede ser definido como las reglas que dominan la sintaxis, semántica y sincronización de la comunicación. Los protocolos pueden ser implementados por hardware, software, o una combinación de ambos. A su más bajo nivel, un protocolo define el comportamiento de una conexión de hardware (31). Las funciones que realizan los protocolos son:

- **Establecimiento y finalización de la comunicación.** Indicación, aviso y acuerdo entre ambas partes del comienzo y finalización de la comunicación.
- **Sincronización de la conversación.** Comienzo y fin de cada bloque de información (sincronización a nivel de bloques o de tramas), de las palabras

(sincronización de palabras o bytes) y momentos en que se transmiten y debe recibirse o leerse cada bit (sincronización a nivel de bit).

- **Control de flujo.** Indicación de la disponibilidad o no de cada uno de los participantes en la comunicación.
- **Detección de errores.** Posibilidad por parte del receptor de comprobar que la información recibida es correcta y libre de errores.
- **Recuperación de errores.** Posibilidad de recuperar aquellos errores producidos en la fase de la comunicación.

Existen ciertas consideraciones que se deben tener en cuenta para el establecimiento y buen funcionamiento de un protocolo en una red industrial, estas se pueden ver en la tabla a continuación:

Según el modelo de referencia OSI hay siete capas numeradas, cada una de las cuales ilustra una función de red específica, fue creado por la *Organización Internacional para la Normalización* (ISO) y es uno de los modelos más utilizados por los fabricantes a la hora de relacionar sus productos para las redes de comunicación (32).

Tabla 8. Consideraciones para los protocolos de red

<b>Forma de direccionamiento</b>
<b>Tipo de comunicación: Simplex, Duplex, Halfduplex</b>
<b>Detección y corrección de errores</b>
<b>Orden de los paquetes</b>
<b>Emisor rápido no sature a un Receptor lento</b>
<b>Congestión</b>
<b>Paquetes de tamaño variable o fijo</b>
<b>Multiplexación y demultiplexación</b>
<b>Enrutamiento</b>

El modelo de referencia OSI es aplicable a cualquier tipo de redes, pero en el caso de las redes industriales que demandan especificaciones técnicas diferentes y más agresivas en sus niveles inferiores de planta, como por ejemplo tiempos de respuesta críticos, los usuarios son procesos con instrumentación industrial, el tráfico es determinístico, entre otros. Se requiere entonces que el modelo sufra ciertos cambios para adaptarse a las especificaciones de las redes industriales en el nivel de planta con el fin de que la comunicación se realice en tiempo real, entonces se genera el modelo de referencia OSI Reducido (31). Este modelo como su nombre lo dice, se reduce tan solo a tres capas las cuales son:



Figura 28. Modelo de referencia OSI Reducido.

Hay que hacer especial énfasis, en que este modelo de referencia OSI Reducido es aplicable a las comunicaciones en el nivel de planta que tiene unas especificaciones de comunicación características es por ello que al ir subiendo del nivel de planta hacia niveles de mayor jerarquía, se hace indispensable utilizar el modelo OSI completo ya que en cada nivel va aumentando el flujo de información y la complejidad en la comunicación.

En el mundo industrial existen muchos fabricantes de componentes para la automatización, es por ello que la compatibilidad es un factor muy importante a tener en cuenta en el diseño de las redes industriales. En nuestro país, un importante número de empresas presentan la existencia de islas automatizadas (células de trabajo sin comunicación entre sí), siendo en estos casos las redes, medios y los protocolos de comunicación industrial indispensables para realizar un enlace entre las distintas etapas que conforman el proceso. La irrupción de los microprocesadores en los componentes industriales ha posibilitado su integración a redes de comunicación con importantes ventajas, entre las cuales figuran:

- Mayor precisión derivada de la integración de tecnología digital en las mediciones
- Mayor y mejor disponibilidad de información de los dispositivos de campo
- Diagnóstico remoto de componentes

La integración de las mencionadas islas automatizadas suele hacerse dividiendo las tareas entre grupos de procesadores jerárquicamente anidados. Esto da lugar a una estructura de redes Industriales, las cuales es posible agrupar en tres categorías:

- Buses de campo
- Redes LAN
- Redes LAN-WAN

Varios grupos han intentado generar e imponer una norma que permita la integración de equipos de distintos proveedores. Sin embargo, hasta la fecha no existe un bus de campo industrial universal (33). Los buses de campo con mayor presencia en el área de control y automatización de procesos son:

## **HART**

El protocolo HART (High way-Addressable-Remote-Transducer) agrupa la información digital sobre la señal analógica típica de 4 a 20 mA DC. La señal digital usa dos frecuencias individuales de 1200 y 2200 Hz, que representan los dígitos 1 y 0 respectivamente y que en conjunto forman una onda sinusoidal que se superpone al lazo de corriente de 4-20 mA. Como la señal promedio de un onda sinusoidal es cero, no se añade ninguna componente DC a la señal analógica de 4-20 mA., lo que permite continuar utilizando la variación analógica para el control del proceso (34).

## **PROFIBUS**

PROFIBUS o Process Field Bus (35), es una norma internacional de bus de campo de alta velocidad para control de procesos normalizada en Europa. Existen tres perfiles de esta:

- Profibus DP (Decentralized Periphery). Orientado a sensores/actuadores enlazados a procesadores PLCs o terminales.
- Profibus PA (Process Automation). Para control de procesos, cumple normas especiales de seguridad para la industria.
- Profibus FMS (Fieldbus Message Specification). Para comunicación entre células de proceso o equipos de automatización.

## **FOUNDATION FIELDBUS**

Foundation Fieldbus (FF) es un protocolo de comunicación digital para redes industriales, específicamente utilizado en aplicaciones de control distribuido. Puede comunicar grandes volúmenes de información, ideal para aplicaciones con varios lazos complejos de control de procesos y automatización. Está orientado principalmente a la interconexión de dispositivos en industrias de proceso continuo. Los dispositivos de campo son alimentados a través del bus cuando la potencia requerida para el funcionamiento lo permite. Otros protocolos ampliamente usados aunque de menor alcance son:

## **MODBUS**

Modbus es un protocolo de transmisión para sistemas de control y supervisión de procesos (SCADA) con control centralizado, puede comunicarse con una o varias Estaciones Remotas (RTU) con la finalidad de obtener datos de campo para la

supervisión y control de un proceso. Las Interfaces de Capa Física pueden estar configuradas en RS-232, RS-422 o RS-485. En Modbus los datos pueden intercambiarse en dos modos de transmisión, en modo RTU o en modo ASCII.

### **DEVICENET**

Red de bajo nivel adecuada para conectar dispositivos simples como sensores fotoeléctricos, sensores magnéticos, pulsadores, entre otros y dispositivos de alto nivel como PLC, controladores, computadores, HMI, entre otros. Provee información adicional sobre el estado de la red, cuyos datos serán desplegados en la interfaz del usuario. A continuación se muestra una tabla comparativa entre algunos de los diferentes buses y protocolos disponibles para la industria (36).

Si bien los protocolos o tecnologías pueden variar mucho en propósito y sofisticación, la mayoría especifica una o más de las siguientes propiedades:

- Detección de la conexión física subyacente (con cable o inalámbrica), o la existencia de otro punto final o nodo.
- Handshaking: Es un proceso automatizado de negociación que establece de forma dinámica los parámetros de un canal de comunicaciones establecido entre dos entidades antes de que la comunicación por el canal comience.
- Negociación de varias características de la conexión.
- Cómo iniciar y finalizar un mensaje.
- Procedimientos en el formateo de un mensaje.
- Qué hacer con mensajes corruptos o formateados incorrectamente (corrección de errores).
- Cómo detectar una pérdida inesperada de la conexión, y qué hacer entonces.
- Terminación de la sesión y/o conexión.

Tabla 9. Comparación de características entre algunos protocolos o tecnologías.

Nombre	Topología	Soporte	Max dispositivos	Velocidad de transmisión bps	Distancia Max Km	Comunicación
<b>Profibus DP</b>	Línea, estrella y anillo	Par trenzado fibra óptica	127/segm	Hasta 1.5 M y 12 M	0.1 segm 24 fibra	Maestro/Esclavo Peer to peer
<b>Profibus PA</b>	línea, estrella y anillo	par trenzado fibra óptica	par trenzado fibra óptica	31.5K	0.1 segm 24 fibra	Master/Slave peer to peer
<b>Profibus FMS</b>		par trenzado fibra óptica	127/segm	500K		Master/Slave peer to peer
<b>Foundation Fieldbus HSE</b>	Estrella	par trenzado fibra óptica	240 p/segm 32.768 sist	100M	0.1 par 2 fibra	Single/multi master
<b>Foundation Fieldbus H1</b>	estrella o bus	par trenzado fibra óptica	240 p/segm 32.768 sist	31.25K	1.9 cable	Single/multi master

<b>LonWorks</b>	bus, anillo, lazo, estrella	par trenzado fibra óptica coaxial, radio	32768 /dom	500K	2	Master/Slave peer to peer
<b>Interbus-S</b>	segmentado	par trenzado fibra óptica	256 nodos	500K	400/segm 12.8 total	Master/Slave
<b>DeviceNet</b>	troncal/puntual c/bifurcación	par trenzado fibra óptica	2048 nodos	500K	0.5 6 c/repetid	Master/Slave, multi-master, peer to peer
<b>AS-I</b>	bus, anillo, árbol, estrella	Par trenzado	31 p/red	167K	0.1, 0.3 c/rep	Master/Slave
<b>Modbus RTU</b>	línea, estrella, árbol, red con segmentos	par trenzado coaxial radio	250 p/segm	1.2 a 115.2K	0.35	Master/Slave
<b>Ethernet Industrial</b>	bus, estrella, malla-cadena	coaxial par trenzado fibra óptica	400 p/segm	10, 100M	0.1 100 mono c/switch	Master/Slave peer to peer
<b>HART</b>		par trenzado	15 p/segm	1.2K		Master/Slave

Concluyendo de todo lo anterior, se puede decir que para la selección del protocolo de comunicación se debe tener primero que todo conocimiento del estado del arte de las tecnologías existentes tanto cableadas como inalámbricas haciéndose a una visión global de las posibilidades de comunicación existentes. En el mundo industrial existen divisiones jerárquicas que definen que información es necesaria en cada nivel (Capítulo 3 sección 3.1) según esto, las empresas dedicadas al desarrollo de tecnologías para la automatización han desarrollado una solución específica para cada uno de estos niveles estructurales como se ve en la Figura 29 según el fabricante de elementos para la automatización SIEMENS. Además de esto, se deben tener en cuenta factores tales como:

- ✓ Protocolo abierto o cerrado
- ✓ Prestaciones del protocolo
- ✓ Posibilidades de comunicación
- ✓ Interoperabilidad
- ✓ Velocidades de transmisión
- ✓ Tiempos de respuesta
- ✓ Que dispositivos y cuantos se van a conectar.
- ✓ Soporte técnico

Sistemas de bus	AS-Interface	PROFIBUS DP	Industrial Ethernet	PROFINET
				
Criterio				
Velocidad de transferencia	Tiempos de actualización $\leq 5$ ms	9,6 kbits/s – 12 Mbits/s ajustable 31,25 Kbits/s	10/100 Mbits/s 1 Gbit/s	
Número máx. de estaciones (nodos)	62	125 125 DP/PA Links 31 dispositivos de campo por DP/PA Link	más de 1000	
Alcance de la red	eléctrica hasta 600 m: – con Extensión Plug hasta 200 m – con repetidor o extensor hasta 300 m – con repetidor y Extensión Plug hasta 600 m	– eléctrica hasta 9,6 km – óptica hasta 90 km  Ex: máx 1,0 km Non-Ex: 1,9 km	– eléctrica hasta 5 km – óptica hasta 150 km	
• LAN (Local Area Network)				
• WAN (Wide Area Network)			– global con TCP/IP – inalámbrica con wireless LAN	
Topología	línea árbol estrella 	línea árbol anillo estrella 	línea árbol anillo estrella 	

Figura 29. Información técnica de Buses de Campo marca SIEMENS

Todos estos son factores se pueden conocer a través de los proveedores y sus catálogos, no necesariamente un protocolo es mejor que el otro, se escoge qué protocolo usar dependiendo de las necesidades de comunicación de la red. En la Figura 29 (37), se muestra información técnica relativa a protocolos o tecnologías de buses de campo industriales que pueden utilizarse como criterios de selección.

### 3.5. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DE UNA RED

La selección de una instrumentación adecuada puede hacer que una red sea óptima y determina en mayor parte el costo de la misma. Cuando se habla de instrumentación, no sólo se hace referencia a sensores, actuadores, controladores si no también a los dispositivos que sirven como enlace entre un punto y otro como por ejemplo los repetidores, *hubs*, APs, puentes, *switches*, *routers*, *gateways* entre otros. Se debe tener en cuenta que éstos dispositivos son importantes ya que ayudan en el control del tráfico de la información transportada por la red gracias a que son diseñados con una inteligencia que les permite realizar dichas acciones. A continuación, se estudiarán algunos de los

componentes de red antes nombrados, los más relevantes para el estudio en cuestión. Mayor información sobre este tema se encuentra en el ANEXO D. TOPOLOGÍAS Y COMPONENTES DE RED.

### Switch

Un *switch*, al igual que un puente, es un dispositivo de Capa 2. De hecho, el *switch* se le conoce también como puente multipuerto, así como el *hub* se denomina repetidor multipuerto. La diferencia entre el *hub* y el *switch* es que los *switches* toman decisiones basándose en las direcciones MAC y los *hubs* no toman ninguna decisión. Como los *switches* son capaces de tomar decisiones, hacen que la red sea mucho más eficiente ya que conmutan los datos sólo hacia el puerto apropiado al que está conectado el host de destino. Por el contrario, el *hub* envía datos desde todos los puertos, de modo que todos los dispositivos conectados a éste deben ver y procesar la aceptación o rechazo de todos los datos transmitidos.

Tanto los *hubs* como los *switches* tienen varios puertos de conexión, dado que una de sus funciones es la concentración de la conectividad. La diferencia entre un *hub* y un *switch* está dada por lo que sucede dentro del dispositivo. El *switch* es un elemento que puede combinar la conectividad de un *hub* con la regulación de tráfico de un puente en cada puerto. El *switch* conmuta paquetes desde los puertos entrantes a los puertos salientes, suministrando a cada puerto el ancho de banda total (la velocidad de transmisión de datos en el *Backbone* de la red). A continuación se ve una imagen que muestra un *switch* industrial SIEMENS y un ejemplo de utilización del mismo (5).

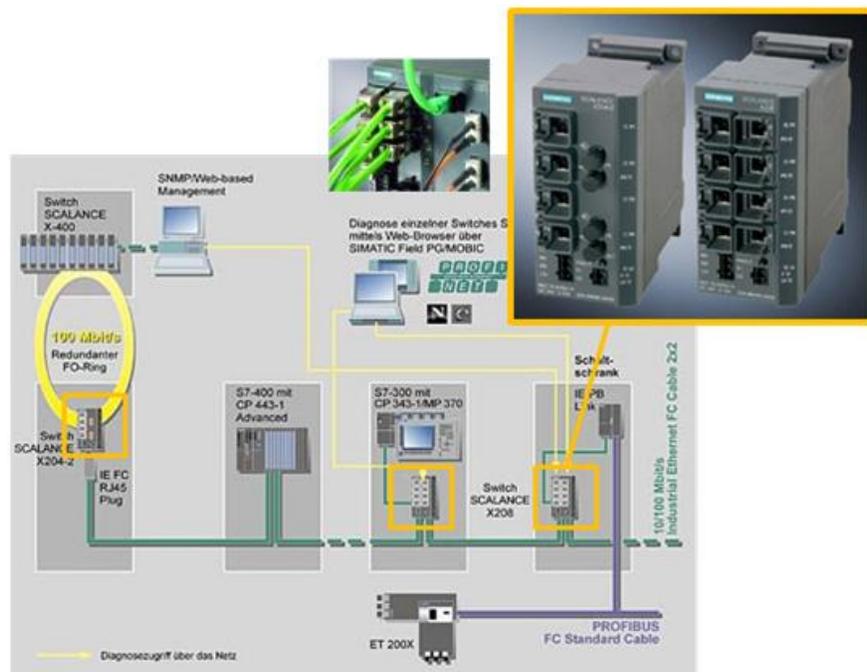


Figura 30. Switch industrial SIEMENS.

### **Puntos de Acceso – APs**

Los Puntos de Acceso – APs – (Access Points) son dispositivos inalámbricos que por medio de radio frecuencia (RF) reciben información de estaciones móviles y la transmiten a un servidor. Se puede decir que existen dos clases de APs, los *delgados* que son dispositivos muy sencillos con una funcionalidad mínima y muy básica, y los APs *robustos* que son dispositivos inteligentes que incorporan gran cantidad de funciones las cuales no solo aumenta su confiabilidad si no también su precio. Un AP se puede configurar de tres modos diferentes. Estos son:

- **Modo Raíz (Root):** Este es el modo más común donde múltiples usuarios acceden al punto de acceso al mismo tiempo.
- **Modo Repetidor (Repeater):** El modo repetidor se utiliza cuando se quiere extender la señal más allá de los límites actuales. Se necesita emplazar el punto de acceso en modo repetidor dentro del área de un punto de acceso en modo raíz. Con esto la señal del AP maestro se extenderá con igual fuerza por medio de este AP repetidor mejorando el alcance y regenerando la señal.
- **Modo Puente (Bridge):** Se hace un puente inalámbrico entre dispositivos. Dos puntos de acceso en modo bridge solo hablarán entre ellos. Este tipo de conexión es útil cuando se desea interconectar dos locaciones separadas, donde instalar cableado no resulta fácil o económicamente viable.

Para preparar un puente inalámbrico son necesarios dos puntos de acceso y dos antenas direccionales. Lo primero será ingresar las respectivas direcciones MAC o físicas para que los AP's se reconozcan. Dependiendo de la distancia, se tendrá que contar con algún software para comprobar la conectividad entre los equipos.

Montar las antenas de forma adecuada es una de las cosas más importantes a tener en cuenta para la transmisión. Si se monta la antena en un tejado, se debe colocar en un soporte adecuado. El factor viento es algo a tener en cuenta a la hora de alinear una antena, esto afectará la calidad de la señal, la fijación para que la antena no se mueva es por tanto primordial. Los APs incorporan por defecto antenas lineales, generalmente externas, de reducidas dimensiones, omnidireccionales y de baja ganancia. Además, existen numerosos modelos de antenas, con ganancias que pueden superar en algunos casos los 20 dB. Se debe tener en cuenta algunos aspectos a la hora de seleccionar e instalar una antena, estos son:

- La selección de la antena debe hacerse en función de las características de la zona a la que se desea instalar.

- Instalar las antenas externas, con *downtilt* hacia abajo o diagrama orientado hacia abajo, es decir en dirección al sector donde se necesita conectividad alineándose con el punto donde hay máxima radiación.
- Paneles para colocar en paredes, con cobertura en un ángulo de 180°, para uso en interiores.
- Paneles sectoriales, similares a los que se utilizan en telefonía móvil, para coberturas exteriores.
- Antenas aún más directivas, tipo Yagi u otras, son útiles cuando la cobertura se limita a una zona de extensión reducida, o para establecer enlaces punto a punto.

Un aspecto importante a considerar es el cable de unión entre el AP y la antena, cuya longitud no debería superar los 10 metros, ya que en las bandas de 2,4 y 5 GHz los cables presentan pérdidas que pueden ser muy altas.

En conclusión, cuando se adquiere un AP realmente se está comprando tres tipos de conectividad Wireless. *Root* para conectar muchos clientes a la vez, *Repeater* para extender la señal de otro punto de acceso y modo *Bridge* para simular que varios AP parezcan solo uno. Es por esto que los puntos de acceso se han convertido en uno de los componentes indispensable en las redes de comunicaciones de todo tipo, incluyendo las redes industriales, gracias a la aparición de APs robustos capaces de operar en ambientes difíciles y de la introducción de la tecnología inalámbrica en el mundo de las comunicaciones industriales. Existen en la actualidad decenas de marcas de Access Point y cientos de modelos. La tarea de seleccionar el Punto de Acceso adecuado para las necesidades de cada organización no es nada sencilla. Además de ser fiable, una construcción robusta es un requisito importante de la industria, permitir la máxima flexibilidad de instalación, aunque, es importante tener en cuenta que a menudo, la más sencilla ubicación para la instalación no es la ubicación ideal desde una perspectiva de transmisión inalámbrica.

A continuación se concluye con una serie de aspectos relevantes como criterios a tener en cuenta a la hora de la selección de los equipos.

- ✓ Se debe tener claro cómo y cuando se usa un determinado equipo.
- ✓ Funciones y capacidades del equipo.
- ✓ Que dispositivos se desean interconectar y con qué objetivo (estado del arte).
- ✓ Robustez de los equipos ante ambientes industriales.
- ✓ Tener en cuenta las recomendaciones técnicas de conexión e instalación que el fabricante provee de cada uno de los instrumentos y componentes de la red.
- ✓ Bajo qué normas fue diseñado y creado el dispositivo.
- ✓ Niveles óptimos de operación y umbrales de cada dispositivo según especificaciones.
- ✓ Forma de calibración del dispositivo (si es necesaria).
- ✓ Software para la configuración y tipo de programación (si es posible y necesario).
- ✓ Modos de funcionamiento y tipos configuración que permite el dispositivo.

- ✓ Antes de instalar y usar, leer los manuales de usuario o consultar con el soporte técnico.
- ✓ Tener en cuenta la interoperabilidad de los dispositivos de un determinado fabricante con otro.
- ✓ Todos los entes relacionados deben estar de acuerdo en el uso de una determinada tecnología.
- ✓ Procurar en lo posible usar todas las tecnologías de un mismo fabricante, existen muchas empresas que ofrecen gamas de dispositivos para todas las necesidades de la industria o en su defecto una gran interoperabilidad con dispositivos de otros fabricantes.

### **3.6. SEGURIDAD**

El tema de la seguridad en las comunicaciones es cada vez más relevante en las modernas instalaciones industriales automatizadas. Los sistemas de automatización modernos proporcionan altos niveles de interconexión, con implementaciones basadas en plataformas comerciales, muchas de las cuales son conocidas por ser vulnerables a los ataques electrónicos. En esta sección se presentan de forma general los temas relacionados con la seguridad de los sistemas de comunicación en la industria que son relevantes a la hora del diseño de la arquitectura de red. Para información más detallada, consultar el ANEXO C.

En el pasado, los sistemas de automatización industrial, no estaban vinculados entre sí y no estaban conectados a las redes públicas como el Internet. Hoy en día, la situación es algo diferente, esto es, porque el mercado presiona a las compañías a tomar decisiones rápidas, precisas y económicamente eficientes, y la información actualizada acerca de la planta y el estado del proceso deben estar disponibles no sólo en el nivel de planta, sino también a nivel de gestión e incluso para los socios de la cadena de suministro.

Lo anterior se traduce en una mayor interconexión entre los sistemas de automatización y entre los diferentes sistemas de oficina, es decir la integración de los niveles inferiores de control con los niveles superiores de gestión. Los sistemas de automatización industrial modernos son, en gran medida, basados en sistemas operativos comerciales con desarrollos específicos para ambientes industriales, la implantación de protocolos, y las aplicaciones de comunicación son originalmente desarrolladas por los entornos de las Tecnologías de Información (TI) de oficinas. Como se dijo antes, muchos de estos sistemas son conocidos por su vulnerabilidad ante ataques, y con las tecnologías de internet abiertas y estandarizadas, la experiencia y el conocimiento de estas vulnerabilidades es de fácil acceso para los atacantes potenciales. Mediante la conexión de las instalaciones industriales a la Internet o a otras redes públicas hace que estén expuestos a dichas vulnerabilidades. Es por ello, que las cuestiones de seguridad son de vital importancia en los sistemas de automatización industrial.

En conclusión, la seguridad en la industria es un factor fundamental y de gran prioridad para los intereses de toda empresa sobre todo en términos de costos y de privacidad. Es indispensable tener conocimiento de los mecanismos de seguridad existentes y su respectiva aplicación para así idear la mejor estrategia para la seguridad según las exigencias del sistema.

Toda organización debe estar a la vanguardia de los procesos de cambio. Donde disponer de información continua, confiable y en tiempo real, constituye una ventaja fundamental, donde tener información es tener poder, donde la información se reconoce como: Crítica, indispensable para garantizar la continuidad operativa de la organización; Valiosa, es un activo corporativo que tiene valor en sí mismo; Sensitiva, debe ser conocida por las personas que necesitan los datos, y donde identificar los riesgos de la información es de vital importancia.

Entonces se define que la seguridad en un sistema de seguridad debe garantizar:

- La *disponibilidad* de los sistemas de información.
- La *recuperación* rápida y completa de los sistemas de información
- La *integridad* de la información.
- La *confidencialidad* de la información.

Para lo anterior, según la teoría estudiada y la información consignada en el ANEXO C., se propone lo siguiente:

- ✓ Implementación de políticas de seguridad informática.
- ✓ Identificación de problemas de seguridad.
- ✓ Desarrollo del plan de seguridad informática.
- ✓ Análisis de la seguridad en los equipos de computación.
- ✓ Auditoría y revisión de sistemas.
- ✓ Utilización de herramientas software y hardware de seguridad.

### **3.7. MANTENIMIENTO DE LA RED**

En el sector operativo de las plantas de todos los sectores de la industria se considera que el motor más eficaz para aumentar la productividad es disfrutar de una mayor disponibilidad y de menores períodos de inactividad de las plantas tanto de las redes de comunicación como de la instrumentación y todos los componentes de esta (38).

Se han hecho estudios que muestran que los períodos de inactividad a menudo están motivados por un mantenimiento no óptimo, pese a que el mantenimiento ya representa una parte significativa de los costos del ciclo de vida de las instalaciones.

Las plataformas de gestión del mantenimiento asistido por computadora pueden ser utilizadas por cualquier organización que necesite gestionar el mantenimiento de sus equipos de comunicación, activos y propiedades. Algunas de las soluciones existentes están enfocadas a mercados específicos aunque también existen productos enfocados a un mercado general. Puede ser accesible vía web, mientras que la aplicación se encuentra alojada en los servidores de la empresa que vende el producto o de un proveedor de servicios de TI<sup>7</sup> o accesible vía LAN si la empresa lo aloja en su propio servidor. Entre las funciones principales de un software de gestión del mantenimiento son:

- Toda la información relacionada con el mantenimiento debe ser accesible en cualquier momento.
- Permitir la planificación y control del mantenimiento, incluyendo las herramientas necesarias para realizar esta labor de forma sencilla.
- Suministro de información procesada y tabulada de forma que pueda emplearse en la evaluación de resultados y servir de base para la correcta toma de decisiones.

Las distintas aplicaciones comerciales inciden más o menos profundamente en cada uno de estos puntos, originando productos adecuados para todas las necesidades. Aunque conceptualmente un software de gestión del mantenimiento es un producto genérico, aplicable a cualquier tipo de organización, existen desarrollos específicos dirigidos a algunos sectores industriales.

Por ejemplo SIEMENS, que es una empresa dedicada a proveer a todas las industrias con tecnología para la automatización industrial, ha desarrollado un nuevo concepto llamado *Mantenimiento Inteligente* que utiliza un software para la gestión de activos a nivel de planta llamado *SIMATIC PCS 7 Maintenance Station* que pertenece a la gama de productos *Totally Integrated Automation*, en el cual se visualiza uniforme y claramente las informaciones de todos los componentes de automatización relevantes para el mantenimiento y, por lo tanto, ofrece valiosos datos que facilitan las decisiones al mantenedor. Entre las ventajas que tiene el uso de un software de estos se tiene:

- La automatización y la gestión de activos a nivel de planta se ejecutan en el mismo sistema.
- La información para los operadores de la planta y los mantenedores se dividen entre la estación de operador (OE) y la estación de mantenimiento (ME).

---

<sup>7</sup> TI: Tecnologías de Información

- Una configuración común y unas interfaces unificadas minimizan el trabajo para conseguir una gestión de activos a nivel de planta eficaz.
- La monitorización continua de la planta reduce el riesgo de fallos y aumenta la disponibilidad y convierte el mantenimiento en un proceso planificable.
- La aplicación optimizada de recursos de mantenimiento aumenta la calidad del mantenimiento y aporta ahorro de costes que resultan en el mismo mantenimiento y porque se evitan costes derivados

Otra tendencia muy importante en estos momentos es la posibilidad de conectar estas aplicaciones con los sistemas de gestión de la organización ERP o bien integrarlos completamente en estos, para facilitar el intercambio de información entre los diversos sectores implicados.

Concluyendo, se puede decir que es totalmente necesario que la empresa en la cual se vaya a instalar la red de comunicaciones implemente dentro de sus planes de mantenimiento estrategias agresivas que permitan la disponibilidad total y continua de la red de comunicaciones, ya que en las industrias con un elevado nivel de automatización utilizan sus redes de comunicación no solo para el transporte de información referente a la producción, materiales entre otros si no que también comparten el medio los datos de control y de estado de los instrumentos de las plantas de procesos, en pocas palabras si la red de comunicaciones falla, podría ocasionar una falla total de la producción, es por ello que se debe evitar al máximo el deterioro de los componentes aquí relacionados y en caso de que fallen tener un plan eficaz para solucionar dichas fallas.

Es un criterio recomendable apoyarse de herramientas software como las antes mencionadas de gestión de la seguridad combinado con planes de mantenimiento a corto y largo plazo, ya que se tendrá información continua del estado de la red y de sus componentes en cualquier momento, pero obviamente el software cumple la función de tomar, organizar y suministrar información y análisis del estado de los componentes de la red pero es indispensable que el personal de mantenimiento tenga la capacidad de hacer el análisis de dicha información y gestionar un mantenimiento efectivo.

Mayor información sobre los tipos de mantenimiento disponibles para ser implementados dentro de una industria se encuentra en el ANEXO C. RECOMENDACIONES.

Para finalizar el capítulo 3, se muestra en la Tabla 10 un resumen de los criterios técnicos aquí desarrollados, los cuales podrán ser utilizados en cualquier diseño de una arquitectura de red en general que aplique tecnología inalámbrica dentro de su desarrollo. Estos criterios, serán usados en el presente proyecto para el diseño de la red caso de estudio las plantas remotas de El Tablazo y Tulcán de la empresa ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A.E.S.P., la cual consta en la comunicación de las plantas remotas por medio de un WDS y de la integración en las comunicaciones de los primeros tres niveles de la pirámide CIM de la automatización en cada una de las plantas.

Tabla 10. Tabla Resumen Criterios Técnicos

No.	Criterio Técnico
1	Selección de los canales y frecuencia de operación
2	Selección de la topología de red adecuada
3	Selección de los protocolos de comunicación
4	Selección de los componentes de la red
5	Seguridad de la red
6	Mantenimiento de la red

#### 4. DISEÑO DE LA RED

En este punto del desarrollo del trabajo, ya se cuenta con una teoría clara que contiene conceptos validos y totalmente necesarios para entender el funcionamiento de un sistema de comunicaciones industrial con la aplicación de tecnologías inalámbricas, la cual da soporte a unos criterios técnicos (Tabla 10) que ayudaran al ingeniero en automatización en el diseño y la planeación de una arquitectura de red funcional que permita cumplir con los requerimientos de la industria. En este capítulo se busca utilizar toda la teoría consignada en los capítulos 1 y 2, además de la aplicación de los criterios técnicos generados en el capítulo 3 sobre el caso de estudio específico para la realización del diseño de la red.

El diseño de la red de comunicaciones del caso de estudio según los objetivos planteados en el anteproyecto y en la introducción de este documento, se divide en la integración de la comunicación de los primeros tres niveles de las plantas de tratamiento de agua y en la comunicación de éstas dos sedes remotas, esto se puede apreciar con mayor claridad en la Figura 31.

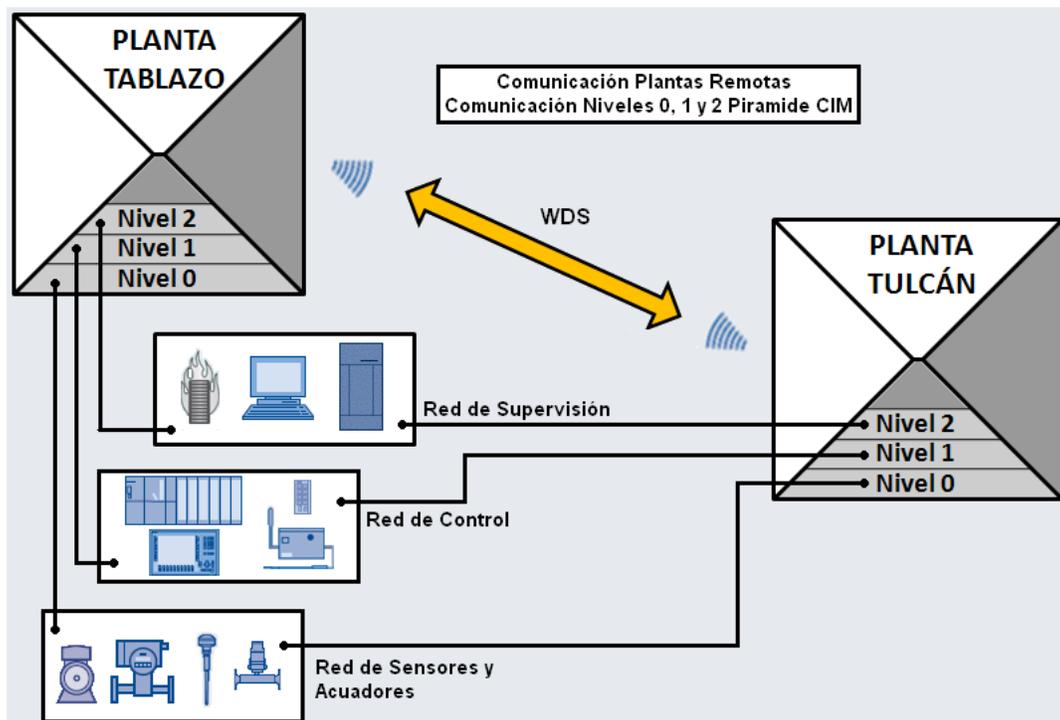


Figura 31. Imagen explicativa red caso de estudio

A continuación se nombran los pasos típicos que se deben tener en cuenta en todo diseño de una arquitectura de red, enfocados hacia la industria, para luego a lo largo del capítulo desarrollarlos paso a paso según el caso de estudio antes planteado, estos son:

- **Estudio preliminar:** Consiste en la recopilación y el análisis de información sobre las instalaciones y redes existentes que puedan afectar el funcionamiento de la red caso de estudio.
- **Frecuencia y canales de operación:** En este paso se busca escoger la frecuencia de operación de los dispositivos que se utilizaran para realizar la comunicación inalámbrica, además de la selección de los canales óptimos para su operación.
- **Selección de la topología de red:** Según los criterios técnicos del capítulo tres, se escogerá la topología de red adecuada.
- **Protocolos de comunicación:** Se seleccionan los protocolos a usar en la red según los requerimientos de la misma.
- **Componentes de la red:** Hace referencia a todos los dispositivos que componen la red.
- **Capacidad:** Se debe tener en cuenta para el manejo y administración del ancho de banda, el número de usuarios y las aplicaciones acorde con sus necesidades y requerimientos.
- **Cobertura:** Este paso determina el área de cobertura donde se desea proporcionar conectividad inalámbrica como una solución de comunicación, finalizando con una escogencia de la ubicación de los equipos, la orientación de las antenas y el patrón de radiación de las antenas.
- **Estudio del Sitio (Site Survey):** Es un paso importante para la implementación de la red, ya que se verifica si el diseño es correcto.
- **Seguridad:** Se hace el análisis de requerimientos de seguridad de la red, se crea políticas de seguridad y se decide acerca del mecanismo de seguridad a usar.
- **Estrategias de mantenimiento de la red:** Se define una estrategia para el mantenimiento de la red.

#### 4.1. ESTUDIO PRELIMINAR

En este ítem, se busca dar una visión general sobre las redes existentes en las que puede estar inmersa la red que se desea diseñar, información requerida para la escogencia de las frecuencias y los canales de operación de la red caso de estudio y así evitar posibles fuentes de interferencia y por ende un mal funcionamiento de la red.

##### 4.1.1. Análisis del entorno

Hace referencia al sitio en donde se desea instalar la red, en este caso las plantas de El Tablazo y Tulcán de la empresa prestadora del servicio de agua potable para la ciudad de Popayán el ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A.E.S.P.

Estas plantas de tratamiento de agua, se encuentran inmersas en una ambiente totalmente urbano lo cual podría ser una desventaja para el diseño, ya que como se dijo en capítulos anteriores las redes WLAN se han hecho muy populares en las ciudades, por

lo cual se encuentra un espacio aéreo lleno de señales de RF que podrían generar fuentes de interferencia no deseables para la red caso de estudio, ya que se desea hacer un enlace WDS entre las dos sedes remotas (comunicación OUTDOOR) además de la implementación de tecnología inalámbrica en la red interna de cada planta, es por ello que se debe tener especial cuidado a la hora de la selección de la frecuencia de operación como lo sugiere el criterio de la sección 3.2.

Para el estudio, es necesario el uso de los planos de las plantas los cuales para el caso de estudio no están digitalizados y se encuentran disponibles en el archivo general del Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A.E.S.P., en la oficina central ubicada en el centro de la ciudad, por lo cual se hace uso de herramientas de dibujo para su digitalización y así poder observar de mejor forma los detalles de las plantas y edificios que hacen parte del complejo y simular la red para un diseño óptimo. En las siguientes figuras se muestran los planos de las plantas de El Tablazo y Tulcán con sus respectivas dimensiones, estas imágenes son utilizadas para facilitar el estudio.

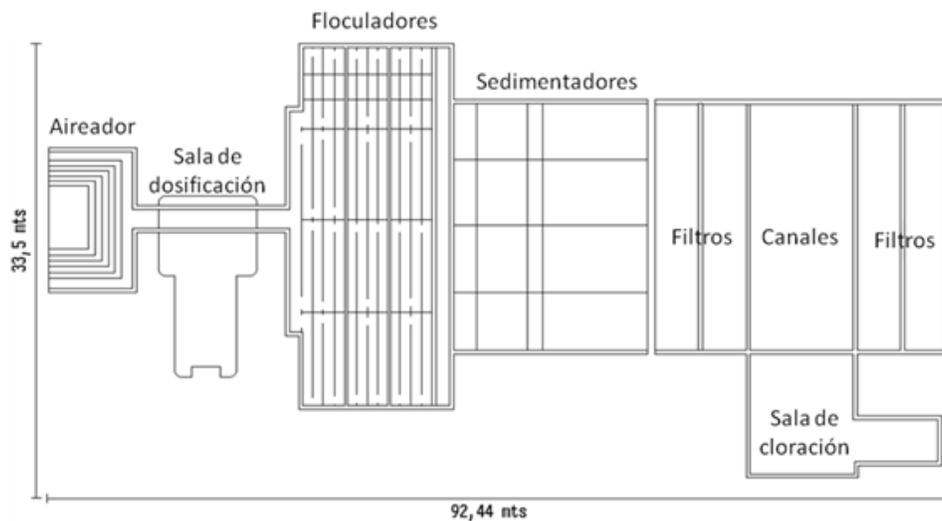


Figura 32. Plano arquitectónico - Planta El Tablazo

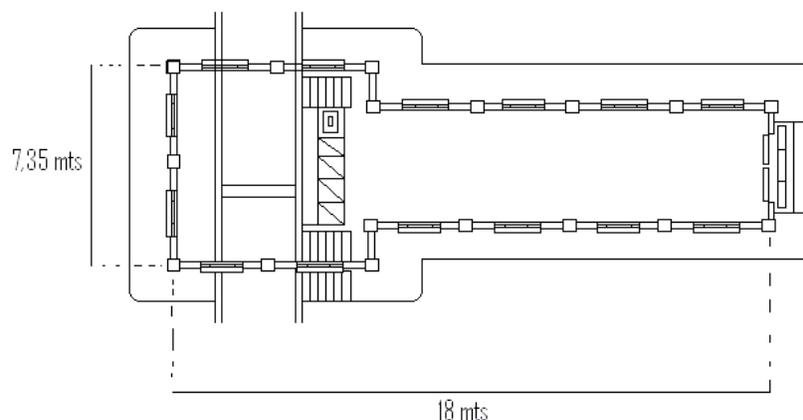


Figura 33. Plano arquitectónico - Sala de Dosificación Planta El Tablazo



Figura 34. Plano arquitectónico - Filtros Planta El Tablazo



Figura 35. Plano arquitectónico - Planta Tulcán

Es importante saber los materiales con los cuales están construidos los edificios que constituyen las plantas, ya que dependiendo del material la propagación de las ondas de RF cambia, estos son:

- Concreto
- Madera
- Vidrio
- Maquinaria Industrial
- Agua en diferentes densidades (debido a sus compuestos orgánicos)

Se ha identificado que la altura de cada edificación (Filtros, sedimentadores, etc.) que constituye el proceso de tratamiento de agua no son mayor obstáculo, pero respecto a las oficinas que rodean cada planta, se puede afirmar que tienen una altura no máxima de 3 metros en promedio, estas alturas son tomadas en cuenta para la realización del área de cobertura de la simulación de RF. Las plantas de Tulcán y El Tablazo están ubicadas a una altura de 1784 m y 1820 m al nivel del mar respectivamente, alrededor se puede encontrar árboles de diferentes tamaños y zonas de precipitación de montaña que pueden hacer que las señales de RF presenten fenómenos de atenuación, aunque esto no se presente en la zona de la planta sino en los alrededores, es indispensable tener en cuenta para futuras mediciones en la extensión de red a zonas alejadas de las plantas.

#### **4.1.2. Análisis de interferencia**

Las redes inalámbricas trabajan en una banda libre por lo tanto deben compartir el espectro electromagnético con otras redes es por ello que se considera un recurso escaso, se hizo una consulta acerca de la existencia de redes inalámbricas exteriores cercanas que puedan causar interferencia con la red interna que se está diseñando, como por ejemplo la presencia de redes WLAN, redes Bluetooth o cualquier tipo de red con tecnología IEEE 802.11x así como la existencia de equipos inalámbricos que transmitan en las bandas especificadas por las normas (2.4 GHz – 5 GHz). Para ello se pueden utilizar herramientas software diseñadas para la detección de señales de RF, en este caso la herramienta gratuita de detección de redes NetStumbler 0.4.0<sup>8</sup>. Para el caso de estudio no existen redes cercanas que puedan ser una amenaza de interferencia e internamente no existe ninguna red inalámbrica, solo una red cableada que esta fuera de funcionamiento.

## **4.2. FRECUENCIA Y CANALES DE OPERACIÓN**

Según la teoría estudiada, aplicar tecnologías inalámbricas en redes de comunicaciones industriales puede ayudar a que una red de este tipo sea mucho más flexible y robusta. La

---

<sup>8</sup> <http://www.netstumbler.com>

comunicación inalámbrica de datos ofrece numerosas ventajas en la fabricación industrial, por ejemplo en la coordinación y ejecución de procesos logísticos, líneas de fabricación y en sistemas de transporte y manutención así como para la medición, el diagnóstico y el mantenimiento. Pero hay que ser conscientes de que en este momento la tecnología inalámbrica no está tan desarrollada como para ser capaz de sustituir por completo un sistema de comunicaciones cableado avanzado, es una tecnología joven que aún tiene demasiados campos para ser investigados y desarrollados, por eso es seguro que en un futuro habrán desarrollos bastante interesantes a los cuales hay que prestar mucha atención, por ello es conveniente por el momento fusionar esta tecnología novedosa con las ya existentes que siguen en una continua evolución generando así una red de comunicación industrial híbrida con grandes beneficios y prestaciones para las empresas que decidan invertir en este tipo de tecnologías.

Para la selección de la frecuencia adecuada de operación se analizaron los entornos de las plantas caso de estudio en busca de posibles interferencias que pueda inferir en un mal funcionamiento de la red en cuestión, teniendo en cuenta la teoría del capítulo 1, 2 y la sección 3.2, podrá definirse la frecuencia de operación en las secciones de la red donde se decida aplicar tecnología inalámbrica como una solución en la comunicación.

Según el análisis hecho en la sección 2.2, la línea de vista directa entre las plantas de El Tablazo y Tulcán está obstruida, una solución por ejemplo es pensar en repetir la señal transmitida desde la planta de El Tablazo hacia la planta de Tulcán con una locación que permita tener una línea de vista con las condiciones necesarias para la transmisión/recepción de las dos plantas aunque en lo posible se recomienda no repetir las señales a no ser de que sea realmente necesario por factores de línea de vista o de distancias muy largas, si esto se cumple se tendrá la zona de *Fresnel* necesaria para trabajar con una frecuencia de operación de 5.8 GHz y establecer un WDS o conexión punto a punto de manera confiable. Es posible también, levantar una estructura en un punto de las plantas que sobre pase los obstáculos y que permita tener línea de vista directa entre las dos, la opción seleccionada dependerá en gran medida de los costos.

Es preferible usar una frecuencia de operación de 5.8 GHz por sus características, además de que hay disponibles mayor número de canales no traslapables y existen en el mercado gran cantidad de equipos de tecnología inalámbrica con un diseño para la industria que trabajan en esta frecuencia y alcanzan velocidades de transmisión hasta de 54 Mbps y distancias hasta de 40 Km entre enlaces. En esta frecuencia, se tendrán doce (12) canales de transmisión disponibles como se explica en la sección 3.2., y se utilizarán para la comunicación de las plantas remotas los canales 149 y 153 de la parte alta de la banda UNII si se hace una configuración WDS en cadena, y en caso de que sea un sólo enlace directo se utilizará el canal 149. Entre más alejados estén los canales mucho mejor para la comunicación, ya que así se evitan las interferencias y el solapamiento entre canales. Entonces se puede concluir que se usarán tecnologías bajo las especificaciones de la norma IEEE 802.11a/h para la comunicación inalámbrica de las dos plantas remotas.

Se definieron los canales y la frecuencia de operación para el enlace WDS entre las dos plantas remotas, ahora se hará el mismo procedimiento para las partes de la red interna donde se usará tecnología inalámbrica.

## NIVEL 0

En éste nivel se tienen dos tipos de redes, la red de sensores y la red de actuadores. Según el estudio hecho en este documento, se sabe que en la actualidad existen redes de sensores inalámbricas muy efectivas y con costos reducidos por ende se propone que esta red sea totalmente inalámbrica, a diferencia de esta, en la red de actuadores es conveniente usar tecnología cableada en conjunto con tecnología inalámbrica para así obtener beneficios tanto en los costos como en efectividad.

Para la parte de la comunicación inalámbrica de la red interna, es decir la comunicación de la red de actuadores y la red WSN se tiene:

**Red de Actuadores:** Como se ve en la Figura 36, la red de actuadores se comunica con la red de control por medio de enlaces punto a punto o WDS formado entre dos estaciones con dispositivos APs y sus respectivas antenas direccionales. Para este enlace se hace el mismo análisis que se hizo para la comunicación de las plantas remotas, para evitar interferencias se utilizará una frecuencia de operación de 5.8 Ghz con el canal 36 habilitado para la transmisión desde la red de control hasta la red de actuadores y el canal 48 para la transmisión desde la red de actuadores hasta la red de control, es decir una comunicación full dúplex o bidireccional.

**Red WSN:** Igualmente en la Figura 36, se puede ver la red de sensores inalámbricos. Como se explica en el ANEXO B, las redes de sensores inalámbricos trabajan bajo la tecnología definida por la IEEE 802.15.4, la cual define 27 canales de operación distribuidos en diferentes frecuencias y que dependen de la zona del mundo donde se esté como se ve en la Tabla 10. Para la interface de la red de sensores con la red de nivel 1 se utilizara un dispositivo de enlace, que permitirá recoger la información de la red de sensores de forma inalámbrica para luego transportarla a los niveles superiores a través de un medio cableado (39).

Tabla 11. Características especificación IEEE 802.15.4 para WSN

Banda de Frecuencia	¿Licencia Requerida?	Región	Velocidad de Datos	Numero de Canales
868.3 MHz	No	Europa	20 Kbps	0
902 – 928 MHz	No	E.E.U.U.	40 Kbps	1 – 10
2.405 – 2.480 GHz	No	Todo el Mundo	250 Kbps	11 – 26

Para el caso en cuestión se definirá la frecuencia de operación de la banda de 2.4 GHz especificada para aplicaciones en cualquier parte del mundo con la utilización de los canales de transmisión que van desde el 11 hasta el 26.

A continuación se muestra una tabla resumen de lo antes dicho según los criterios para la selección de la frecuencia y los canales de operación.

Tabla 12. Tabla resumen selección de frecuencias y canales

Red	Banda de Frecuencia	Tipo de Zona	Frecuencia de Operación	Canales de Operación	Especificación
WDS	No licenciada	Urbana	5.8 GHz	149 , 156	IEEE 802.11 a/h
Actuadores	No licenciada	Urbana	5.8 GHz	36 , 48	IEEE 802.11 a/h
WSN	No licenciada	Urbana	2.4 GHz	11 - 26	IEEE 802.15.4

## NIVELES 1 y 2

En el nivel de control y en el nivel de supervisión, es más conveniente el uso de tecnología cableada como ya se ha mencionado en el documento ya que en este nivel existe un mayor flujo de información y es necesario tener gran capacidad de procesamiento de datos, lo cual es posible lograr de manera efectiva con tecnología cableada. Por lo tanto el ítem de selección de la frecuencia y los canales de operación sería válido solo para las partes donde se utilice tecnología inalámbrica (Enlace WDS, la red WSN y el enlace entre la red de actuadores y la red de control). A continuación en la Figura 36, se muestra una imagen que ilustra lo antes dicho:

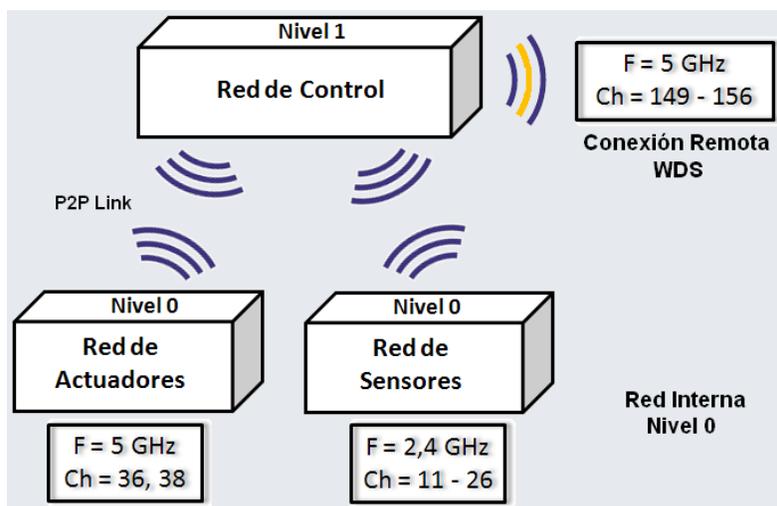


Figura 36. Selección de frecuencia y canales de operación

### 4.3. SELECCIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE RED

#### Comunicación de las dos plantas caso de estudio

Esta es una primera parte de los objetivos de éste proyecto, se busca entonces además de comunicar los niveles internos de las dos plantas de tratamiento de agua, tener una comunicación entre ellas por medio de un sistema de distribución inalámbrico (WDS) o

conexión punto a punto, lo cual permitirá tener la información del estado de las plantas de manera centralizada y de igual forma esta información disponible para los niveles superiores.

En la sección 1.7, se habla sobre lo relacionado con el funcionamiento de un WDS, con esta teoría se pretende soportar el uso de este método de comunicación como una alternativa para la comunicación de las dos plantas caso de estudio Tulcán y El Tablazo, ayudando en el aumento del grado de automatización de la empresa gracias a las gestión inteligente de la información vital de los procesos lo cual le da poder a los niveles superiores (Niveles 3,4 pirámide CIM, Figura 23) en la toma acertada de decisiones de esta índole.

Como se ve en la Figura 17 del Capítulo 2, la distancia entre estas dos locaciones es lo suficientemente grande como para desistir de una conexión cableada siendo esto un factor que alienta a buscar soluciones inalámbricas para la comunicación. Existen varias configuraciones de WDS que pueden usarse para dar soluciones de comunicación a un caso en especial, esto se puede ver de forma muy clara en la teoría del Capítulo 1. Para el caso en cuestión, se deberá usar una configuración en cadena como la mostrada en la Figura 11 utilizando el AP del medio en modo repetidor debido a la falta de LOS. Una segunda solución podría ser, una configuración de dos APs uno en la planta El Tablazo y el otro en la planta Tulcán conectados mediante un repetidor. Este repetidor puede estar en modo pasivo es decir que no procesa la señal pero esta opción no es muy conveniente en entornos urbanos ruidosos sino mas bien en zonas rurales, también es posible una configuración *Back to Back*, esto es, que el primer equipo de la planta El Tablazo le envía la señal a un equipo repetidor que la toma y la procesa, luego por medio de un cable de Ethernet se conecta con otro equipo repetidor que le envía la señal procesada al equipo de la planta de Tulcán. Entre enlace y enlace debe haber antenas de transmisión directivas o direccionales en la dirección de la línea de vista entre punto y punto, este tipo de soluciones se utiliza con frecuencia en proyectos de redes de gran envergadura. Se escoge una configuración de WDS en cadena, ya que esta permite dar solución al problema de línea de vista mencionado en el capítulo dos entre las plantas remotas, seleccionando un punto intermedio como puente para la comunicación entre las dos plantas de tratamiento evitando así los obstáculos (El Morro) que obstruyen la LOS.

Ahora, según el análisis hecho del caso de estudio en el Capítulo 2, se ha definido que en el nivel cero, que es la zona donde se encuentran los sensores y actuadores es decir la instrumentación relacionada directamente con el proceso productivo, se use una red de sensores inalámbricos (WSN) que transmita y reciba datos de sensado y del nivel de control, además de la comunicación de los actuadores con los niveles superiores por medio de un enlace punto a punto que establezca una comunicación bidireccional robusta. Como se ve en la sección 3.3, las topologías físicas más comunes y desarrolladas en las redes de sensores inalámbricos son la topología en *malla* y la topología en *estrella* en todas sus variaciones, entonces teniendo ya reducidas otras opciones se debe seleccionar entre estas dos. Analizando la información consignada en la

sección 3.3, se definirá cuál de éstas topologías físicas es más conveniente de usar para el caso de estudio. Se sabe que las dos plantas remotas en cuestión, siguen el mismo proceso para el tratamiento de agua dentro de sus instalaciones y manejan la misma información, con la diferencia de que la planta de El Tablazo tiene mayor capacidad de producción que la planta de Tulcán y además de que internamente son físicamente similares, es por ello que el diseño será el mismo para las dos.

#### **NIVEL 0.**

En este nivel, se encuentran los dosificadores, las válvulas de control de paso de agua y los instrumentos de medición de las variables en el proceso, estas son:

- Flujo/Caudal
- Acidez/pH
- Nivel
- Turbidez
- Sólidos en suspensión

Se requiere construir una WSN que integre toda la instrumentación del nivel de procesamiento dedicada a la medición de las variables críticas del proceso, esto es recoger los datos de cada instrumento de sensado y transmitirlos hacia los niveles superiores de supervisión y control, además se debe comunicar la red de actuadores con los niveles superiores para el envío/recepción de datos de control necesarios para el funcionamiento del proceso de forma adecuada, por ejemplo apertura/cierre de válvulas de control. Según las ventajas y desventajas de las topologías filtradas y los criterios a tener en cuenta para la selección de la topología de red, se definirá cuál de estas topologías es más conveniente para el caso de estudio:

- ✓ Para el caso de estudio en cuestión, el área que se debe abarcar no es demasiado extensa por ello cualquiera de las dos topologías indiferentemente es conveniente de usar.
- ✓ Como se ve en la Figura 27 de la sección 3.3, la topología en malla tiene sensores con funciones de ruteo de la información es decir tienen la capacidad de escoger una ruta dentro de la malla para el envío de los paquetes de datos, esto es necesario para el dinamismo y robustez de este tipo de configuraciones ya que una red en malla se caracteriza por que los dispositivos pueden escoger múltiples caminos para enviar la información analizando previamente el tráfico y la disposición de la misma. En la misma imagen se puede ver dos tipos de configuraciones en estrella, las cuales utilizan sensores comunes conectados directamente al *Gateway* con una ruta predefinida para el flujo de datos y también sensores comunes combinados con dispositivos de ruteo que forman una pequeña malla alrededor del *Gateway* o Puerta de Enlace generando un poco más de dinamismo en la red. Aquí se debe tener muy

en cuenta la relación costo/beneficio que genere determinada configuración, para el caso de estudio en cuestión.

- ✓ La compatibilidad es un factor muy importante cuando el caso de estudio tiene ya implementadas redes dentro de su estructura de comunicaciones con determinadas tecnologías, en el caso de estudio en cuestión como se comentó en el Capítulo 2 no se tiene por el momento ningún tipo de redes que comuniquen la información de planta hacia los niveles superiores, por lo tanto la tecnología que se use no tendrá problemas de compatibilidad.
- ✓ La ubicación física de la WSN dentro de la planta no tiene mayor inconveniente que la ubicación acertada de los instrumentos con respecto a los edificios ya que no hay fallas geográficas dentro de las instalaciones de la plantas que puedan interferir en la transmisión, este problema se deberá resolver cuando se deseen comunicar las dos plantas remotas, por lo tanto no es un factor determinante para descartar una u otra topología.
- ✓ La relación costo/beneficio es un factor muy importante y muchas veces determinante, con el cual se puede definir cuan beneficiosa puede llegar a ser una topología según su costo. Como se explicó antes, los componentes de la topología en malla por sus características particulares son de mayor costo ya que realizan funciones mayores o más avanzadas que los componentes activos de una topología en estrella. En el caso de estudio, no se justifica utilizar componentes tan avanzados ni tan costosos ya que no son necesarios para poder suplir de buena forma las necesidades de comunicación latentes.
- ✓ Según el caso de estudio, cualquiera de las topologías que se use, será capaz de soportar el flujo de datos generados por los instrumentos, aunque es conveniente que sea una transmisión uno a uno aprovechando que no son demasiados dispositivos para así evitar grandes flujos de información, podría decirse que una topología en malla estaría sobre dimensionada.
- ✓ El factor de las fuentes de energía es muy importante, ya que es conocido que en las plantas caso de estudio las amenazas climatológicas como los rayos traen muchos inconvenientes para la instrumentación además que podría afectar la disponibilidad de la red. Se debe escoger una configuración que no consuma mucha energía además de fuentes de energía alternas (*backups*) independiente de que topología se escoja, según esto la topología en estrella sería la más conveniente.

En conclusión, se puede decir que para el caso de estudio de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A.E.S.P., es conveniente usar una topología de red WSN estrella simple en su nivel de planta (Figura 37), es decir los instrumentos conectados directamente al Gateway/Puerta de enlace, que a su vez conecta la WSN con los niveles superiores. La puerta de enlace deberá escogerse de manera acertada según las especificaciones y los requerimientos es decir que sea capaz de soportar el tráfico que genere dicha red a un costo satisfactorio.

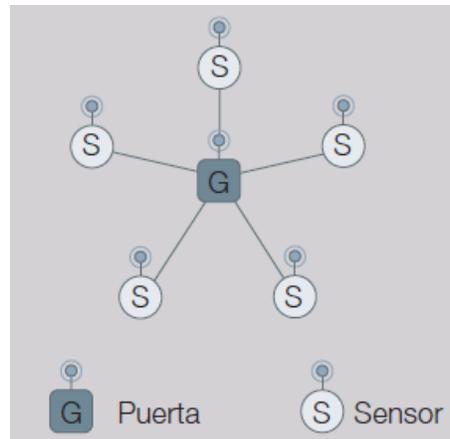


Figura 37. Topología en estrella simple

Para la red de actuadores (Motobombas, Válvulas) la topología escogida para la comunicación inalámbrica más conveniente según la situación dada es un enlace punto a punto (P2P) que vaya desde la red de Actuadores hasta la red de Control cableada del nivel 1. Para la comunicación de los actuadores se utilizará tecnología cableada, seleccionando la topología en Bus como mejor opción de conexión, esto se hizo teniendo en cuenta las ventajas y desventajas nombradas en la sección 3.3 y los criterios de selección como se ve a continuación. En el ítem de 4.4 se seleccionará la tecnología cableada a usar.

- ✓ Para el caso en cuestión, el tamaño y los puntos a comunicar no son muy extensos.
- ✓ La topología en Bus no necesita equipos para su implementación.
- ✓ En caso de que se desee fusionar dos tecnologías de Bus diferentes en una misma línea se deberá hacer uso de un respectivo acoplador.
- ✓ No hay interferencias demasiado fuertes que puedan afectar el funcionamiento del Bus, además estas tecnologías traen incorporadas chaquetas metálicas para la protección contra interferencias.
- ✓ Un punto a favor de Bus son los costos, ya que son bajos con respecto a la utilidad de los mismos.
- ✓ Si no son demasiados equipos no se tendrá problemas con el flujo de los paquetes de datos.
- ✓ Como se dijo anteriormente, es conveniente el uso de *backups* de energía, además de puntos de conexión óptimos.
- ✓ El Bus es de muy fácil expansión.

## NIVEL 1.

Este es el nivel de control, como su nombre lo indica, es en donde se tienen los PCs industriales, instrumentos de control como lo son los PLCs que son dispositivos lógicos programables cuya función es la de controlar y de leer las variables que arrojan los dispositivos y la maquinaria encargada del proceso productivo en la planta, además de bajar los datos de control generados en los niveles superiores.

El objetivo de la red de este nivel, es de manejar la información proveniente del nivel de supervisión y del nivel de planta haciendo una especie de *middleware* o medio de transporte de la información entre estos dos niveles. A continuación se llevará a cabo el mismo procedimiento que en el nivel 0 para la selección de la topología de red.

Es sabido, que en un proceso productivo dependiendo de la cantidad de maquinaria y de la cantidad de variables que se desee controlar son necesarios un número de dispositivos de control mínimos para hacer que funcione de forma adecuada. Existen procesos en donde la cantidad de variables son tal, que es necesario usar varios PLCs gama alta con una gran cantidad de módulos de entrada y salida. En el escenario caso de estudio, no se tienen tal cantidad de variables y de maquinaria ya que el proceso no exige tal nivel de control aunque en un futuro esto podría cambiar, por lo cual con un PLC gama alta sobre dimensionado bastaría.

A continuación se hará el análisis de qué topología de red sería conveniente usar en el nivel de control:

- ✓ Si en el nivel de campo no se tiene problema por la extensión física que debe abarcar la red, en este nivel que es un poco más concentrado no habrá ningún problema con este factor gracias a las características físicas de las plantas.
- ✓ En este nivel se interconectarán los equipos de control (PLC) como se dijo anteriormente, junto con los dispositivos encargados de mandar y recibir la información de los dispositivos del nivel 0 concentrados por un *switch*. Se hace énfasis en que por las características de las plantas de proceso caso de estudio, no hay gran cantidad de equipos a interconectar.
- ✓ Como se dijo anteriormente, no hay redes instaladas en las plantas con tecnologías que puedan interferir con la red que se desea montar.
- ✓ Se debe poner mucha atención a la ubicación de los dispositivos de transmisión/recepción para evitar interferencias con muros o paredes de las instalaciones de la planta.
- ✓ El factor costo/beneficio como se dijo antes, es un factor casi decisivo para la escogencia de qué tipo de topología usar. Se deberá filtrar según la información que se tiene en el Capítulo 3 cual topología aparenta ser más viable. Para el caso de estudio de este proyecto, se puede decir que en este nivel se puede discernir entre una topología de bus de campo o una en estrella extendida.
- ✓ Como en el nivel 0, se recomienda utilizar un direccionamiento uno a uno con un modo de transmisión Semi - Dúplex o Half - Dúplex es decir que se puede transmitir y recibir información de forma bidireccional utilizando el mismo canal de comunicaciones. Se debe tener en cuenta el ancho de banda de la red.

- ✓ En este nivel las instalaciones físicas provee un suministro de energía continuo y confiable. Se recomienda utilizar fuentes de energía alternas del tipo que sea (backups) en caso de una emergencia.

Se puede concluir, que en este nivel por el flujo de información que maneja es conveniente usar tecnologías cableadas ya que proveen velocidades mucho mayores con mayor ancho de banda, generando así una red híbrida que permita la conexión simultánea de los equipos industriales, en este caso un bus de campo llevaría a cabo esta función de manera apropiada.

## **NIVEL 2.**

Este es el último nivel relacionado directamente con el proceso productivo, toma la información de los dos primeros niveles para luego subirla en forma de gráficos de tendencias u otros. Generalmente en este nivel se tienen PCs de gran capacidad y visualización para un manejo de gran flujo de información además de PCs que transforman la información de planta en información digerible para los niveles superiores.

Ya que la estructuración por niveles que se tiene en el caso de estudio de las plantas del Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A.E.S.P., no está muy bien marcada de manera física sino más bien de manera conceptual (ya que se tiene el nivel de control contiguo o fusionado con el nivel de supervisión), podría decirse que el mismo bus de campo que se utilizaría en el nivel de control serviría para conectar el (los) PCs encargado(s) de cumplir la función de supervisión junto con el (los) PCs encargados de subir la información hacia los niveles superiores de la pirámide CIM, entonces la red total se puede definir como una topología de red en árbol para así hacer un diferenciamiento mucho más marcado de las jerarquías de los niveles dentro de la empresa.

A continuación en la Figura 38, se muestra una imagen que plasma de forma gráfica el análisis hecho anteriormente, de cómo podría ser la topología de red adecuada para este proyecto que toma a las plantas del Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A.E.S.P., como caso de estudio.

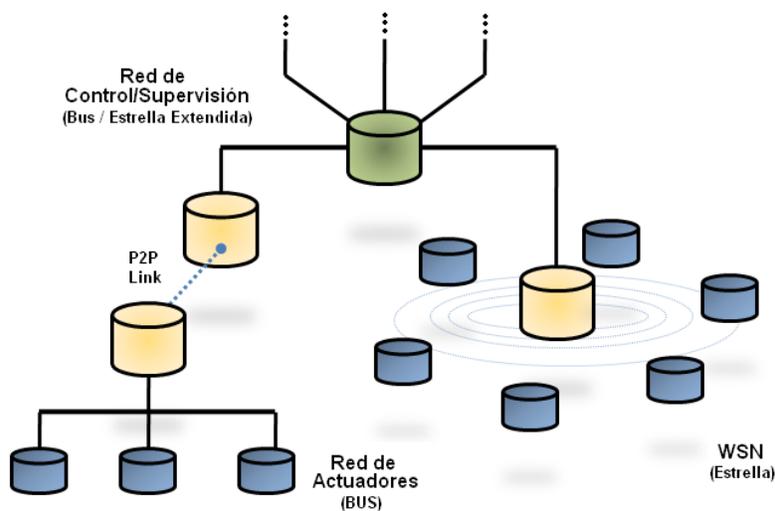


Figura 38. Selección de la topología de red interna de las plantas

#### 4.4. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

En esta sección se tratará sobre los protocolos de comunicación que se usarán según el diseño de red, esta es una red de comunicaciones industriales híbrida que combina tecnologías cableadas junto con tecnologías inalámbricas.

##### 4.4.1. Comunicación Inalámbrica

Para la comunicación inalámbrica los APs utilizan el protocolo DHCP, que es el Protocolo de Configuración Dinámica de Máquinas (Dynamic Host Configuration Protocol), que especifica un método para configurar dinámicamente los parámetros de red necesarios para que un sistema pueda comunicarse efectivamente. Como se dijo anteriormente, se utilizarán tecnologías del estándar IEEE 802.11, el cual define el protocolo CSMA/CA (Múltiple acceso por detección de portadora evitando colisiones) como método de acceso.

Se utiliza para este tipo de comunicación el SSID (Service Set Identifier) que es un código incluido en todos los paquetes de una red inalámbrica para identificarlos como parte de esa red. El código consiste en un máximo de 32 caracteres alfanuméricos. Todos los dispositivos inalámbricos que intentan comunicarse entre sí deben compartir el mismo SSID y una interface Ethernet o tarjeta de red comúnmente llamadas NIC (Network Interface Card).

También se debe tener en cuenta que la especificación IEEE 802.15.4, sobre la que se basan los estándares para WSN como por ejemplo ISA 100, para el transporte de datos utiliza CSMA/CA, es decir, no hay dos nodos dentro del radio de alcance uno del otro que puedan transmitir simultáneamente. Si lo hacen, ambos fracasan y ambos lo reintentarán

en un momento posterior. Si la red ya está congestionada, los reintentos producen un fallo de transmisión en cascada por la que más y más nodos intentan acceder al medio, sólo para encontrarlo ocupado.

Con respecto a la WSN del caso de estudio, se ha decidido usar sensores que trabajan bajo el protocolo de comunicación industrial *wirelessHART* que está diseñado bajo el estándar de redes inalámbricas de sensores IEEE 802.15.4.

SIEMENS permite el enlace de las redes WSN con las redes PROFINET por medio de una pasarela *wirelessHART* que en este caso funciona como *Gateway* o puerta de enlace con la red cableada PROFINET permitiendo la comunicación de los sensores de nivel de planta con el nivel de control (40).

#### 4.4.2. Comunicación por cable

Como se aprecia en la Figura 24, la tecnología Ethernet tiene usos en todos los niveles de automatización, por lo cual permite integrar redes PROFIBUS y otros sistemas de bus de campo ya existentes, haciendo posible crear sistemas mixtos compuestos por subsistemas basados en bus de campo y en Ethernet. Igual que en el nivel 1, este nivel tiene un gran flujo de información y son necesarias grandes velocidades y anchos de banda para suplir la demanda del sistema de comunicación, es por ello que se opta por la tecnología Ethernet. Lo antes dicho se puede ver en la Figura 24 del ANEXO D.

Como se puede ver en la en la sección 3.4 y la Figura 24, existe una solución cableada en especial para cada tipo de red en la industria según los requerimientos que se tengan. Por ejemplo, para la comunicación de las válvulas se utilizará la tecnología PROFIBUS PA y para la comunicación de los actuadores se utilizará la tecnología PROFIBUS DP, ya que cada una está especialmente diseñada para un óptimo desempeño en dichos ambientes, ellas están unidas por un acoplador DP/PA que convierte la tecnología PA a tecnología DP para luego enviar la información de los instrumentos de forma inalámbrica al siguiente nivel. A continuación se hace una breve descripción de los protocolos nombrados:

**Protocolo PROFINET/Industrial Ethernet (IEEE 802.3, IEEE 802.3u y IEEE 802.11 WLAN):** Es el estándar abierto e innovador de Industrial Ethernet, cumple con todos los requisitos de la automatización industrial y permite una comunicación homogénea a escala corporativa. PROFINET/Industrial Ethernet sirve para la conexión directa de aparatos de campo descentralizados a Industrial Ethernet y para solucionar aplicaciones de control de movimiento isócronas. Además, PROFINET/Industrial Ethernet permite la automatización distribuida con ayuda de la tecnología de componentes, la integración vertical y la solución de aplicaciones orientadas a la seguridad. PROFINET/Industrial Ethernet también es compatible con la comunicación controlador/controlador.

La importancia creciente de la integración vertical muestra el papel decisivo que desempeña la comunicación industrial en los sistemas de automatización modernos. PROFINET/Industrial Ethernet, el estándar abierto y no propietario basado en Industrial Ethernet, permite un acceso directo y transparente desde el nivel de gestión hasta el nivel de campo. Para ello PROFINET/Industrial Ethernet apuesta por los estándares establecidos de las tecnologías de la información y soporta TCP/IP sin ningún tipo de restricciones. PROFINET/Industrial Ethernet se caracteriza por la utilización conjunta de la comunicación en tiempo real y basada en TCP en un solo cable, así como la comunicación escalable en tiempo real para controladores, periferia descentralizada y control de movimiento. De esta forma permite tiempos de reacción más breves así como homogeneidad desde el nivel de campo hasta el nivel de gestión. Para lograr sus funciones, tres niveles diferentes de protocolos son definidos:

- TCP / IP y UDP/IP, Utilizados para la transferencia de datos con tiempos de ciclo de 100 ms.
- RT (Tiempo Real), Protocolo para PROFINET CBA y PROFINET IO aplicaciones de hasta 10 ms tiempos de ciclo.
- IRT (Tiempo Real Isocrónico) para aplicaciones PROFINET IO en sistemas de accionamiento con los tiempos de ciclos de menos de 1 ms.

En el protocolo PROFINET se puede ver el estado de la red utilizando cualquier herramienta software de análisis de Ethernet. En las versiones actuales, Wireshark/Ethereal son capaces de decodificar tramas PROFINET.

**Protocolo PROFIBUS (IEC 61158/EN 50170):** Define las características técnicas y funcionales de un bus de campo el cual interconecta dispositivos digitales de campo distribuidos en los rangos de desempeño bajo (nivel de sensores y actuadores) hasta el nivel medio (nivel de celda). El sistema contiene dispositivos maestros y esclavos. Los Dispositivos maestros son capaces de controlar el bus de comunicaciones. Cuando tiene el derecho de acceso, un maestro puede transferir mensajes sin requerimientos remotos. En el protocolo PROFIBUS, los maestros son denominados estaciones activas. Los dispositivos esclavos son dispositivos periféricos sencillos, típicamente, los transmisores, actuadores y sensores. La arquitectura del protocolo está basada en el modelo de referencia OSI de acuerdo a la norma internacional ISO 7498. En la Tabla 13, se pueden ver características importantes del protocolo PROFIBUS.

En PROFIBUS FMS las capas 3 a la 6 no son explícitas. Las funciones de estas capas, están combinadas en la interfaz de capas bajas (LLI), el cual es una parte de la capa 7. La especificación de mensaje de bus de campo (FMS) contiene el protocolo de aplicación y ofrece una variedad de poderosos servicios de comunicación, este provee la interfaz al usuario. El servicio FMS está definido como una sub parte de las funciones Especificaciones de Mensajes del Fabricante (MMS/ISO 9506) del protocolo MAP. Las

complejas funciones de MMS son optimizadas dependiendo de los requerimientos del bus de campo. Adicionalmente, son definidas las funciones específicas del bus de campo para la administración de objetos de comunicación y manejo de red.

Tabla 13. Características Protocolo PROFIBUS

<b>Característica Protocolo PROFIBUS</b>	
<b>Topología de la red</b>	Bus lineal con terminales en ambos extremos. Es posible el bus tipo árbol.
<b>Medio físico</b>	Cable par trenzado apantallado (STP), el apantallamiento puede ser omitido dependiendo de las condiciones ambientales.
<b>Número de estaciones</b>	32 estaciones en cada segmento sin repetidores, expandibles a 127 estaciones con repetidores.
<b>Máxima longitud del bus</b>	(sin repetidores) 100 mts a 12 Mbit/s Cable A: 200 mts a 1500 Kbits/s hasta 1.2 Km. a 93.750 bits/s. Cable B: 200 mts a 1500 Kbits/s hasta 1.2 Km. a 93.750 bits/s. La longitud máxima del bus puede ser extendida hasta aproximadamente 10 Km. con repetidores. El número máximo de repetidores que pueden ser utilizados en una red depende del tipo de repetidores y puede ser entre 3 y 10.
<b>Velocidad de transmisión</b>	9.6, 19.2, 93.75, 187.5, 500, 1500 hasta 12000 Kbits/s en pasos seleccionables.
<b>Conector</b>	Conector Sub-D de 9 pines.

En PROFIBUS, las capas 3 a 7 no son utilizadas. La capa de aplicación (capa 7) es omitida de manera de lograr el desempeño necesario. El Mapeador de Enlace Directo de Datos (DDL) suministra un mapeo conveniente de las funciones de la capa 2 en la interfaz de usuario.

#### 4.5. COMPONENTES DE LA RED

Es necesario vislumbrar a groso modo el tipo de equipos clientes que va a soportar la red. Ya que se trata de una red de comunicaciones industriales, los clientes que esta red soportará no son los típicos de una red WLAN, en esta se encontrarán equipos tales como PCs industriales, servidores OPC, Firewalls, dispositivos HMI, PDAs, Robots, controladores industriales, DCSs, SCADAs, cámaras de supervisión, entre otros dispositivos de gama industrial además de las aplicaciones disponibles para la industria como OPC, HTTP, SNMP, etc.

El objetivo de este ítem, es definir qué tipos de componentes activos de red son necesarios para el diseño que se está planteando, teniendo en cuenta la teoría del Capítulo 3 y los aspectos relevantes para la escogencia adecuada de los dispositivos. En la Figura 39, se aprecia de manera muy general que equipos se necesitarían para el diseño de red planteado para el caso de estudio, a continuación se hará una descripción de los equipos por niveles de jerarquía.

#### ✓ Nivel 0

En este nivel se debe hacer una distinción clara sobre las redes de comunicación presentes. Primero, hay una red que comunica todos los sensores que es la WSN y otra red que comunica todos los actuadores que es un bus de campo (Figura 38 y 39). Para la WSN son necesarios primero que todo un *Gateway* o puerta de enlace cuyo papel es tomar la información de los sensores inalámbricos y hacer el enlace entre ellos y la red Ethernet para luego enviar el paquete de datos al siguiente nivel jerárquico por medio de un *switch* ubicado en el nivel 1 al cual se conecta de forma cableada.

Tabla 14. Componentes de Red Nivel 0 (Ver ANEXO D)

EQUIPO	NOMBRE
<b>Gateway</b>	IE/WSN-PA LINK (AP 1)
<b>Acoplador DP/PA</b>	SIMATIC DP/PA Coupler
<b>Acoplador PB/PN</b>	IWLAN PB Link PN IO (AP 3)
<b>Panel Móvil</b>	277F IWLAN Mobile Panel
<b>Actuadores</b>	Motobombas centrífugas verticales modelo 12MB Válvulas de control BERMAD Modelo 730
<b>Sensores</b>	Sensor de pH WirelessHART 6081_P Sensor de flujo WirelessHART 3051S_F Sensor de nivel WirelessHART 3051S_L Sensor de Turbidez TU 810 Sensor de Sólidos en Suspensión Turbi-Tech 2000 Dosificador MICRODOS

Para la red de actuadores, primero que todo es necesario un acoplador DP/PA que une la red PROFIBUS PA con la red PROFIBUS DP para luego ser conectadas al acoplador inalámbrico IWLAN PB Link PN IO (AP 3) que tomará la información de los actuadores conectados a la línea de bus de campo para luego enviar el paquete de datos de forma inalámbrica al AP 2 conectado a la red PROFINET/Industrial Ethernet creando una conexión punto a punto entre los dos, como se ve en la Figura 39. Para el monitoreo constante del estado de los instrumentos de nivel 0 se definió un panel móvil 277F IWLAN el cual podrá acceder a dicha información vía inalámbrica (Mayor información de los

equipos mencionados en el ANEXO D) (41). En la Tabla 13, se muestra una lista de los componentes de red en el nivel de planta.

### ✓ Nivel 1

En este nivel se tiene el AP 2 encargado de Transmitir/Recibir información de la red de actuadores a la red PROFINET, este es el AP 2 (AP SCALANCE W788), que se conecta al *switch* al igual que la Gateway de la red WSN concentrando así la conectividad y regulando el tráfico que pasa por él. Siguiendo con la descripción de los equipos, se tiene también un PLC (Dispositivo de control) junto con una interface hombre – máquina (HMI) para la visualización de la información de los dispositivos del nivel de planta (Nivel 0) ambos conectados al *switch*. En la Tabla 15, se muestra la lista de los equipos del nivel de control.

Tabla 15. Componentes de Red Nivel 1

EQUIPO	NOMBRE
Switch	SCALANCE X208
Acces Point	AP SCALANCE W788 (AP 2)
PLC	S7 - 300
HMI	Panel PC 477-HMI/RTX

### ✓ Nivel 2

En el nivel de supervisión, se tienen equipos como computadores industriales de gran capacidad uno para la supervisión control y adquisición de datos referentes a los niveles inferiores y otro para uso del software de gestión del mantenimiento (Mantenimiento inteligente, sección 3.7). En este nivel de jerarquía se tiene un gran flujo de información proveniente de otros niveles además de la posibilidad de conexión vía internet por una red pública, es por ello que se ha pensado en un firewall para proteger la red interna de ataques como se trató en la sección 3.6, además de un servidor OPC<sup>9</sup> que permite que diferentes fuentes (o Servidores OPC) envíen datos a un mismo cliente OPC, al que a su vez podrán conectarse diferentes programas compatibles con dicho estándar. De este modo se elimina la necesidad de que todos los programas cuenten con drivers para dialogar con múltiples fuentes de datos, basta con tener un driver OPC que permita la interacción. En este nivel también se tiene el AP WDS que permite la comunicación de las dos sedes remotas por medio de un enlace WDS configuración en cadena como se ve en la Figura 40. En la Tabla 16 se listan los equipos que intervienen en la red de supervisión.

<sup>9</sup> OPC: OLE for Process Control.

Tabla 16. Componentes de Red Nivel 2

EQUIPO	NOMBRE
Firewall	SCALANCE S612
Supervisión	PC Industrial
Servidor	Servidor OPC SNMP
AP Outdoor	SCALANCE W786 (AP WDS)

En las Figuras 39 y 40, se puede ver resumido todo lo antes dicho. Para mayor información de los equipos antes nombrados consultar ANEXO D.

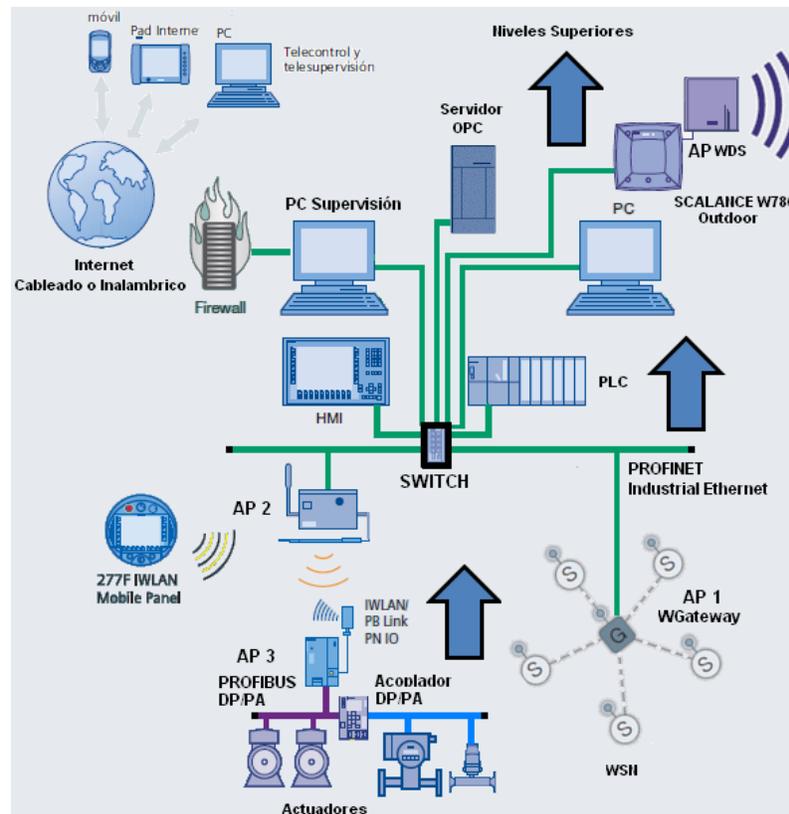


Figura 39. Topología de red caso de estudio – Niveles 0,1 y 2.

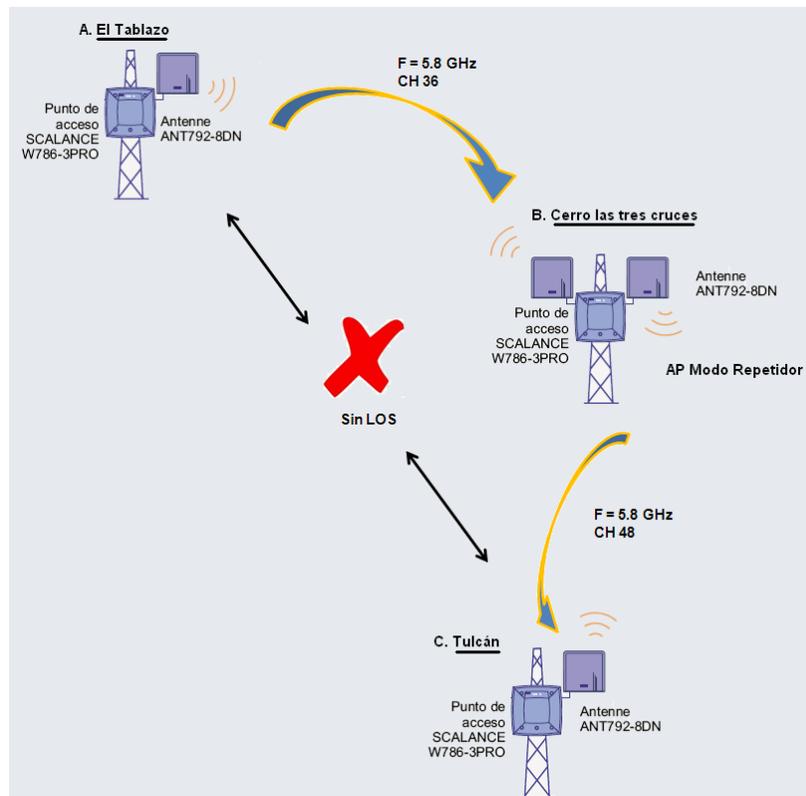


Figura 40. Enlace WDS configuración en cadena entre las plantas remotas.

#### 4.6. CAPACIDAD

En este ítem, se determinarán los factores relevantes que influyen directamente y en gran medida en la capacidad del sistema de comunicaciones.

##### 4.6.1. Tecnología

Las tecnologías de redes WLAN IEEE 802.11x ofrecen velocidades de transmisión desde 11 Mbps hasta 360/540 Mbps (Tabla 2 del ANEXO A) en diferentes bandas de frecuencia especificadas por la norma. Este ancho de banda es menor comparado con las redes cableadas, las cuales operan a 100 Mbps hasta 1 Gbps, es por esta razón por la que se pretende el diseño de una red híbrida de grandes prestaciones. El ancho de banda especificado por los estándares 802.11x es teórico y se cumple sólo en condiciones ideales. El máximo desempeño depende de muchos otros factores, como los equipos que componen la red, el tráfico que va a soportar la red, entre otros. La tecnología IEEE 802.15.4 de WSN, alcanza una velocidad de transmisión de datos de 250 kbps es por ello que este tipo de redes se caracterizan por su bajo consumo de energía y la baja transmisión de datos por intervalos de tiempo determinados según los requerimientos.

#### 4.6.2. Cambio de Velocidades

Se debe tener en cuenta que las velocidades de transmisión disminuyen a medida que aumenta la distancia del dispositivo cliente a la fuente de RF, esto es debido a la relación señal/ruido, que determina la velocidad a la cual el cliente puede asociarse, por ejemplo un dispositivo que esté más cerca a un AP que otro, tendrá velocidades más altas de transmisión ya que el campo de RF a medida que se aleja de la fuente que lo genera va disminuyendo. Estos cambios también dependen de la sensibilidad del receptor, que consiste en un umbral mínimo de energía recibida para que la señal alcance cierta velocidad, esta información se encuentra en los *datasheet* de cada dispositivo dado por el fabricante.

#### 4.6.3. Ancho de banda por usuario

Un dispositivo de transmisión inalámbrica como por ejemplo un AP industrial, puede soportar cierta cantidad finita de usuarios dependiendo de las características de los fabricantes y de las aplicaciones que se estén usando. El desempeño de una red ya sea inalámbrica o cableada, se degrada a medida que el tráfico que fluye por ella aumenta, por lo tanto, cuando hay muchos dispositivos se recomienda colocar mas APs o dispositivos con capacidades de manejo de tráfico dentro de la misma área para disminuir la carga (hablando de redes inalámbricas e igualmente en las cableadas).

Dependiendo del tipo de usuarios de la red los requerimientos de esta cambian, por ejemplo un actuador no demanda el mismo ancho de banda que un PC industrial de supervisión o un HMI, empezando por las aplicaciones que usa cada uno y el tipo de información que transmite/recibe. Por ejemplo, una red de actuadores con dispositivos que demandan un ancho de banda desde 10 hasta 100 Bps por dispositivo y hasta 100 Kbps para algunos dispositivos inteligentes, con un ancho de banda de 100 Mbps se podrán anidar hasta 62 nodos con un ancho de banda de 100 Kbps por usuario con tiempos de 100 ms para funciones de monitoreo y de varios minutos, incluso para funciones de programación y con una actualización de datos de proceso cada 5 ms, para redes de sensores se podrán anidar desde 250 hasta 65000 dispositivos con velocidades de transmisión que van desde 20 hasta 250 Kbps. Obviamente entre menos dispositivos el ancho de banda se dividirá entre menos usuarios lo que se verá traducido en una mejor velocidad de transmisión y óptimo funcionamiento, todo dependerá de los requerimientos de la empresa que desea implementar la red.

La tecnología PROFIBUS trabaja según el procedimiento híbrido *token-passing*<sup>10</sup>, puede comunicar 32 participantes hasta un máximo de 125 aumentando este número con la ayuda de acopladores para expansión de la red. Su trama puede transmitir un máximo de 256 bytes, y el ciclo para 32 participantes es de aproximadamente 90 ms (42).

---

<sup>10</sup> Token-Passing: Método de acceso al canal donde una señal llamada *Token* es pasada entre los nodos de la red que los autoriza para que puedan transmitir.

Aplicando esto al caso de estudio específico, tomando como referencia a la información de los componentes de red del ítem 4.5, la información mostrada en la Figura 29 y la Tabla 13, se puede concluir que la tecnología PROFIBUS cumple a cabalidad los requerimientos de la red caso de estudio, ya que el bus de la red de actuadores comunicara un máximo de 15 equipos en cada una de las plantas con un tiempo de ciclo para la transmisión menor a 90 ms, es decir los requerimientos de la red de actuadores del caso de estudio son menores a la capacidad que provee la tecnología PROFIBUS.

PROFINET reserva el ancho de banda entre un punto de acceso y un cliente ya definido. Esto garantiza un alto grado de rendimiento para este cliente, independientemente del número de los restantes clientes que usen el punto de acceso. Una trama PROFINET puede transportar hasta 1.440 bytes de datos de proceso. Los recursos disponibles de PROFINET son más que suficientes para el futuro previsto. Esto queda patente con el siguiente ejemplo: en un ciclo de 500  $\mu$ s se pueden operar 70 accionamientos de forma isócrona a un alto nivel de rendimiento. Esto deja libre el 50% de los recursos para la comunicación abierta con protocolos estándar de TI, por ejemplo, para ingeniería, diagnóstico, mantenimiento remoto Canal o adquisición de datos de proceso. PROFINET se basa en la tecnología de conmutación a 100 Mbits/s.

A diferencia de otros procesos, la tecnología de conmutación permite que todas las estaciones transmitan datos en cualquier momento. La conexión puede funcionar en ambos sentidos al mismo tiempo (envío y recepción) y tiene un ancho de banda de 200 Mbits/s. La principal ventaja: los segmentos de red o nodos que no necesiten la trama, no la recibirán; con lo que se reduce la carga (43).

Los requerimientos los sistemas WSN están mayormente encaminados a situaciones donde no es necesario un gran ancho de banda, el periodo de inactividad divide este ancho de banda de forma proporcional, ya que durante cada periodo de actividad sólo se puede transmitir una trama (44). En una red ZigBee pueden haber hasta 254 nodos, no obstante, según la agrupación que se haga, se pueden crear hasta 255 conjuntos/clusters de nodos con lo cual se puede llegar a tener 64770 nodos para lo que existe la posibilidad de utilizar varias topologías de red como las ya nombradas en la sección 3.3.

Se puede decir entonces que los requerimientos de comunicación de la red caso de estudio pueden ser suplidos sin ningún problema con la tecnología seleccionada ya que los instrumentos de sensado, control y supervisión definidos para la red caso de estudio no exceden los límites de capacidad total de la red, es más se puede estar seguros de una futura expansión sin inconvenientes.

## 4.7. COBERTURA

Se determina el área que debe ser cubierta por la red, la ubicación de los equipos, la orientación de las antenas, entre otros factores que inciden en el diseño para lograr una óptima cobertura, funcionamiento eficiente y ahorros de costos de la red.

### 4.7.1. Área de cobertura

En este paso se determinará cuál es el área donde se requiere cobertura inalámbrica, ella está determinada por aquellos lugares donde no existe conectividad a la red o se quiere aumentar la conectividad o en zonas de difícil acceso como se ha comentado a lo largo del documento.

Como es sabido, las redes inalámbricas en la industria no superan las bondades ofrecidas por la conectividad cableada es por ello que se piensa en una red híbrida que permita aprovechar los dos medios de comunicación, por ejemplo el *wireless* tiene gran usabilidad en los niveles de planta por su gran flexibilidad y la baja tasa de flujo de información en este nivel y para la interconexión de grandes distancias.

Tabla 17. Área de Cobertura del Proceso

Planta	Etapa de proceso	División para la simulación
Planta Tablazo	Aireador	NA
	Dosificación	Sala de dosificación
	Floculación	Floculadores/Sedimentadores
	Sedimentación	
	Filtrado	Filtros
	Cloración	
Planta Tulcán	Aireador	Planta de Tratamiento Tulcán
	Dosificación	
	Floculación	
	Sedimentación	
	Filtrado	
	Cloración	

NA: No aplica, esta zona no será tomada en cuenta por el análisis hecho en este documento ya que no hay variables críticas a medir que puedan afectar el buen desarrollo del proceso.

En el caso de estudio se utilizará la comunicación inalámbrica para interconectar las dos sedes remotas, además de internamente conectar la red de actuadores y sensores con los niveles superiores. Para los enlaces punto a punto se deberán utilizar antenas direccionales de alta ganancia y para la cobertura de la red de sensores se deberán utilizar antenas omnidireccionales que puedan cubrir las áreas deseadas. En la Figura 17 del Capítulo 2, se puede ver la ubicación de las dos plantas y del enlace que se desea hacer entre ellas. Las plantas caso de estudio tiene áreas definidas donde se debe implementar esta tecnología, los lugares son determinados por las áreas de cada proceso. El área de cobertura está presente en toda la planta, pero para su mejor análisis y por recomendación de los estándares de automatización ISA95, se divide el proceso en sub áreas y se hace su respectivo análisis que para el caso de este trabajo de grado corresponde al estudio de RF, así para cada etapa de proceso se decidió dividir las plantas en áreas de análisis a continuación relacionadas cada etapa del proceso real con el propuesto. Para el caso de la planta Tulcán se decidió tomar toda la planta como una sola etapa de análisis debido a su complejidad menor y a sus pocos elementos de red, como se ve en la Tabla 17.

#### **4.7.2. Montaje y ubicación de APs y de antenas**

Lo más confiable a la hora de hacer un montaje de un dispositivo de transmisión inalámbrica y sus respectivas antenas es ubicarlos lo más cerca posible con el fin de disminuir las pérdidas. Por ejemplo, un AP puede ser montado sobre una superficie o en una pared, pero cuando se desea protegerlo de factores como el clima, manipulación indeseada o robo se deben considerar el uso de armarios especiales para dicha instalación que pueden ser usados tanto en INDOOR como en OUTDOOR.

El montaje de la antena también depende de su uso, si es para ambientes externos o internos además de que debe ser lo suficientemente sólido para evitar el balanceo de la antena ya que afectara la transmisión y el área de cobertura.

Obviamente la ubicación de los dispositivos de transmisión debe ser la adecuada según los requerimientos de cobertura de las zonas en donde se va a usar conectividad inalámbrica, se recomienda además de hacer el análisis en papel la utilización de herramientas software de simulación con los respectivos planos del sitio y así obtener una visión más confiable de cómo y dónde ubicar los dispositivos (sección 4.8). Hay que tener en cuenta que el enlace entre la red de actuadores con la red de control es *Punto a Punto* (P2P) por lo tanto, el AP 2 y el AP 3 usaran antenas direccionales, en cambio el AP 1 que comunica los sensores con la red de control usará antenas radiales u omnidireccionales que generen una nube de RF que cobije a todos los sensores de la planta. A continuación se muestran los planos de las plantas de El Tablazo y Tulcán con la respectiva ubicación de los APs y en las distintas zonas de las plantas.

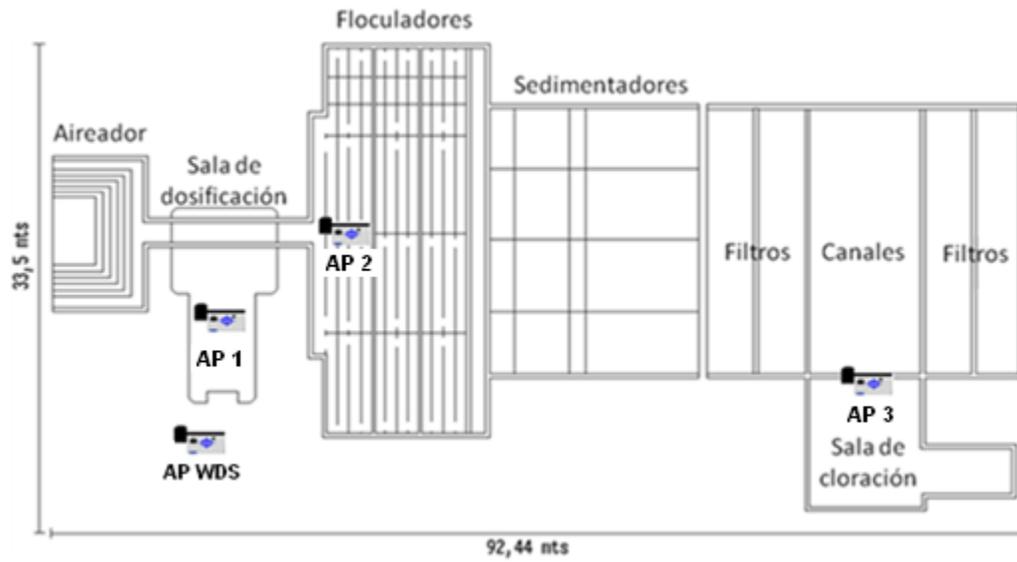


Figura 41. Ubicación de los APs – Planta El Tablazo



Figura 42. Ubicación de los APs – Planta Tulcán

### 4.7.3. Radiación de la antena

Para el diseño de red se utiliza antenas omnidireccionales y antenas direccionales como se explica en la sección 4.7.2, donde siempre se debe tener en cuenta el eje z que define su posición y se debe especificar la posición de radiación. Para esto se selecciona el modelador de antena que ofrece la herramienta de simulación SINEMA E, para éste caso los valores van a estar supeditados a una posición vertical con poca inclinación, donde es importante la altura en la que se ubica la antena para obtener una optima recepción de las señales de RF. En la Figura 43, se muestra un ejemplo de montaje de una antena con su respectivo soporte que permite variar el *downtilt* según se necesite y así obtener un ángulo de cobertura óptimo.

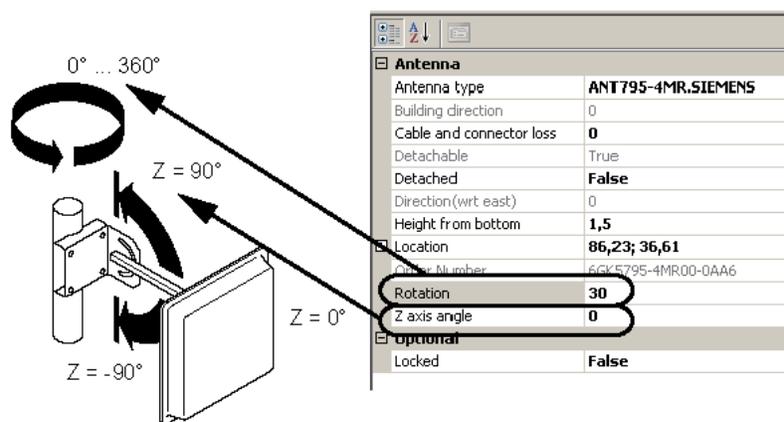


Figura 43. Configuración Antena

Las antenas utilizadas son nombradas a continuación:

- ANT792-8DN (antena direccional 5 GHz – AP WDS)
- ANT795-4MR (antena direccional 5 GHz – AP 2 y 3 - Actuadores)
- ANT795-6MR (antena omnidireccional 2.4 / 5.2 GHz - AP 1 - WSN)

## 4.8. ESTUDIO DEL SITIO (Site Survey)

Para el estudio de cada una de las áreas a cubrir, se recurre a la herramienta SINEMA E de SIEMENS, este software ofrece una licencia de uso gratuita por 14 días, aunque existen herramientas de simulación de otros fabricantes, SIEMENS ofrece de manera espectacular suplir casi todas las necesidades de la planeación y diseño de redes IWLAN.

#### 4.8.1. Utilización del SINEMA E

La simulación con SINEMA E permite determinar todos los pasos que aseguren el cubrimiento de los criterios desarrollados en el Capítulo tres para el diseño de una red IWLAN. La ventana de simulación muestra los resultados del cálculo del campo RF con el área de los *Access Point* configurados. Los datos de simulación son desplegados en una escala de colores con un significado particular para cada uno especificando un porcentaje de la variable a medir, la leyenda de colores indica la escala usada por ejemplo en el *Signal Strength*, *Signal to Noise Ratio* and *Data Rate* y el color asignado para los APs en herramientas como el *Strongest Access Point* y *Overlapping*, los cuales se comentan a continuación.

**Dibujos en planta:** Se toman las imágenes reales y las digitalizadas de los planos de las plantas a las que se les haga el diseño y se dibujan los posibles obstáculos, paredes, muros etc., para una mejor simulación.

**Configuración Coverage Filters:** Se hace la configuración del alcance de los filtros de cobertura. Se pueden mostrar u ocultar determinados productos de simulación mediante el uso de *checking boxes* seleccionando cuales instrumentos usar para la simulación.

**Signal Strength:** Muestra el área de simulación con el cálculo del *signal strength* en el área de los APs configurados. Las áreas en diferentes colores representan diferentes *signal strength*, se visualiza el campo pero no provee una detallada información de *signal strength*. Para un *signal strength* preciso es necesario parar el puntero del mouse en la zona del área de simulación en la que se quiera una medida precisa, en este caso corresponde a las áreas donde los instrumentos de medición y control son ubicados.

**Signal Quality (SINR):** Muestra el área de simulación con el cálculo del SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) de los APs configurados. El SINR en los alrededores de un *Access Point* depende de su localización y el *strength* de los APs aledaños.

**Data Rate:** Muestra el área de simulación con el cálculo del *data rate* o la velocidad de transferencia de datos en el área que cubren los *Access Point* configurados.

**Strongest Access Point:** Muestra el área de simulación con la intensidad de la señal de los APs configurados. Esta opción lo que hace es una comparación de la señal RF de un AP con respecto a otro.

Gráficamente en la simulación se puede ver la calidad de la señal simulada según los parámetros dados en la leyenda de colores (Figura 44). La leyenda cubre un rango de valores correspondiente al *Signal Strength*, un mayor número negativo equivale a una señal menor a 1 mW. -80 dBm es aceptable (color rosado), -70 dBm es un enlace regular (color naranja), -60 dBm es un buen enlace (color verde), -40 dBm es un enlace casi perfecto (azul).

Signal strength	
Color	Signal Strength (in %dBm)
	100/ -35
	95/ -38
	92/ -40
	88/ -42
	83/ -45
	79/ -48
	75/ -50
	71/ -53
	67/ -55
	62/ -56
	58/ -60
	54/ -62
	50/ -65
	45/ -68
	42/ -70
	37/ -72
	33/ -75
	29/ -78
	25/ -80
	21/ -82
	17/ -85
	12/ -88
	5/ -90
	4/ -92
	0/ -95

Figura 44. Signal Strength – Leyenda de colores

A continuación se mostrara la información de la simulación de los puntos más relevantes para el proceso de diseño, el resto de la información está consignada en el ANEXO E. SIMULACIÓN.

#### 4.8.2. Informe de la simulación

SINEMA E, tiene un módulo que genera informes de la configuración desarrollada durante la simulación, este módulo genera una lista de componentes que incluye los datos de todos los dispositivos del catálogo del módulo. Esto facilita a principios de licitación, la planificación y el costo y la previsión del tiempo para un proyecto. Las simulaciones realizadas también están integradas en el informe como gráficos informativo que indican la intensidad de la señal, velocidad de datos e interferencias. El informe sirve como documento de aceptación y soporte para el diseño y la puesta en marcha de la red, generando así garantías en el funcionamiento de la red diseñada y simulada.

#### **Signal Strength**

Las imágenes de simulación muestran la fuerza de la señal inalámbrica, a mayor distancia menor fuerza. Un nivel de 0 dBm es igual a 1 mW (milivatio). Estos valores se miden en dBm porque el dBm es la cantidad de señal que hay con respecto a 1 mW (un milivatio).

La Figura 45, muestra el área de floculación y la de sedimentación, la línea roja representa los muros definidos, pero la zona interior de estos muros son espacios reales

muy pequeños donde no se amerita especificar muros ni paredes para la simulación; se decidió tomar cómo una sola área compuesta de cemento y agua, pues es lo que realmente contiene esta zona y es así como está configurada en el SINEMA E, pero para el análisis de radio frecuencia estas zonas no miden más de 1,4 metros de altura por lo que no afecta de manera significativa el campo RF, ya que cada *Access Point* debe estar ubicado a una altura mayor.

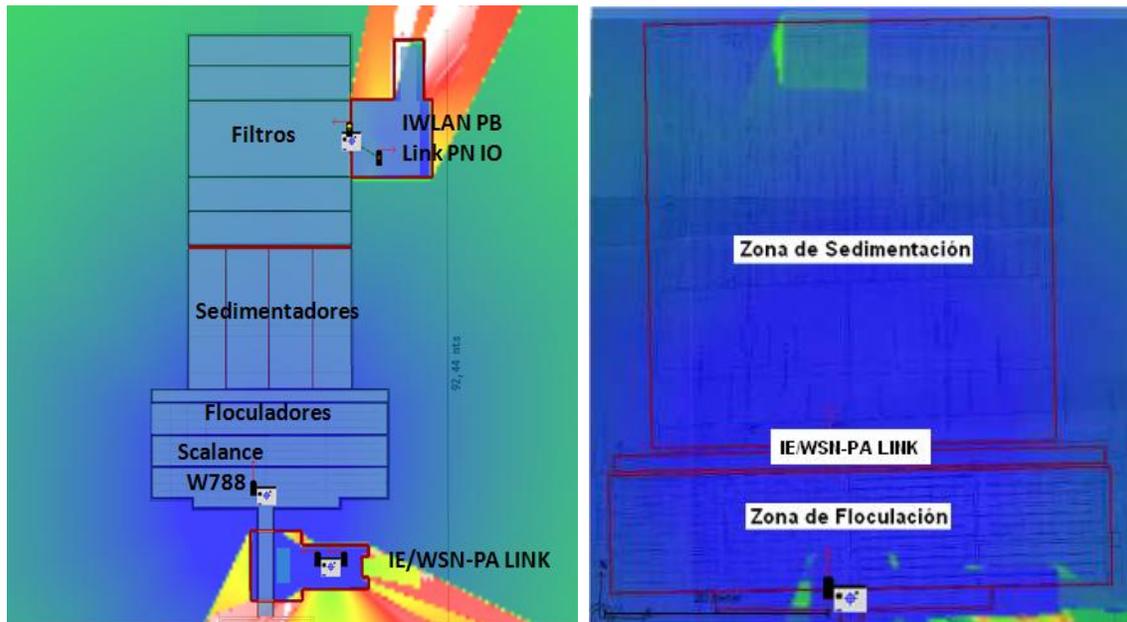


Figura 45. Signal Strength del AP 1 IE/WSN-PA LINK (Antena 2)- Floculadores/Sedimentadores planta El Tablazo

La Figura 45 muestra el *signal strength* de la antena 2 del AP 1 que cubre al área de tratamiento básico donde las variables correspondientes a pH, Turbidez (Floculación) y sólidos en suspensión (Sedimentación) son medidas por los respectivos sensores. La clase de antenas necesarias para la recepción de la información de los sensores son omnidireccionales debido a las áreas a cubrir, hay que tener en cuenta que los APs utilizados soportan dos antenas las cuales pueden ser direccionadas a distintas zonas donde se necesite recepción de RF como la red WSN. Esto se puede ver para la planta El Tablazo en las Figuras 45 y 46 donde la antena 1 cubre el área de dosificación y la antena 2 cubre la zona de floculación, sedimentación y las zonas aledañas con una intensidad menor. En la Tabla 18 puede ver la intensidad de señal en tres posiciones de inclinación de las antenas:

Tabla 18. Posiciones del IE/WSN-PA LINK (AP1)

%	90.27	93.63	100
dbm	(-40.84)	(-37.02)	(-35)
nW	82.42	198.49	316.23

Los datos de la Tabla 17, indican que la magnitud del campo eléctrico es suficiente para garantizar que el IE/WSN-PA LINK tenga un enlace casi perfecto con los instrumentos, ya que los valores están por encima de -60dBm.

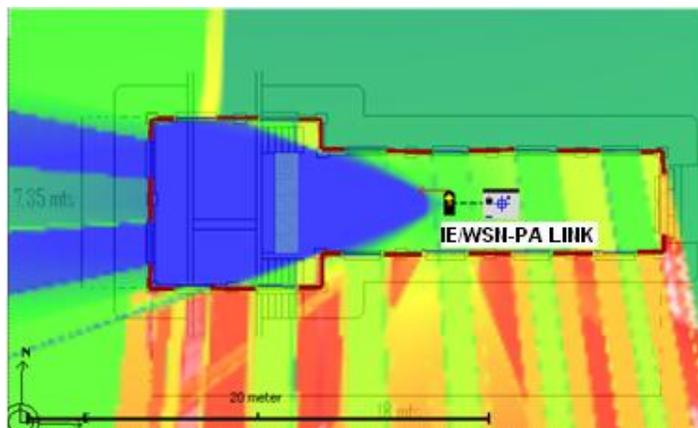


Figura 46. Signal Strength del AP 1 IE/WSN-PA LINK (Antena 1) de la Sala de Dosificación planta El Tablazo

La Figura 46 muestra el *Signal Strength* de la antena 1 del AP 1 direccionada hacia la sala de dosificación de sulfato de aluminio el cual está encargado de la comunicación de la red WSN, la simulación muestra una medida del 100% de la señal a -35dBm para el área de los sensores, garantizando así que la señal tiene un enlace casi perfecto, y que corroborando con la leyenda de niveles corresponde al color azul, sin embargo la simulación muestra para la zona de color verde y amarillo una señal de 66.17% a -57.19dBm, donde la intensidad de señal puede garantizar un buen enlace, en estas zonas puede enlazarse cualquier dispositivo de medida portátil como por ejemplo el 277F IWLAN Mobile Panel.

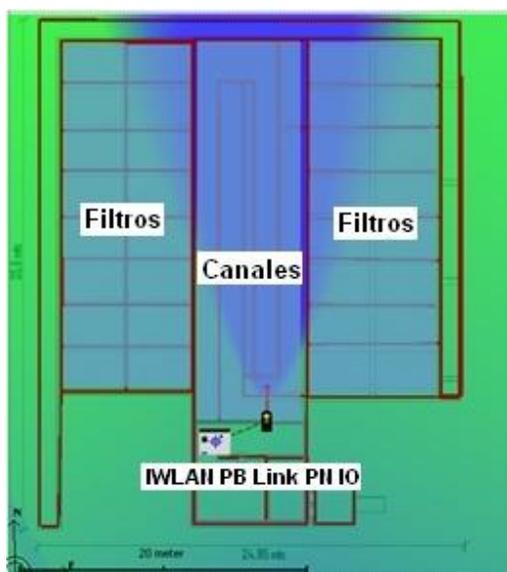


Figura 47. Signal Strength del AP 3 IWLAN PB Link PN IO- Zona de Filtros planta El Tablazo

La Figura 47, muestra el *Signal Strength* del AP 3 para la zona de filtros las medidas simuladas están comprendidas entre 100% a -35 dBm hasta 89,7% a 63.8 dBm, dando la comprobación de un enlace casi perfecto para la zona central. Se puede comprobar que existe un buen enlace para la demanda del proceso.

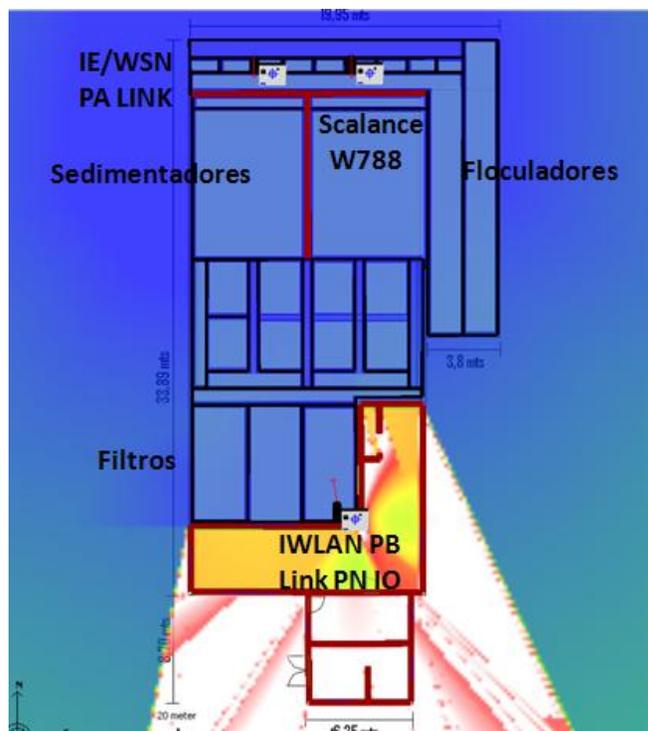


Figura 48. Signal Strength del AP 1 IE/WSN-PA LINK - Planta Tulcán

En la Figura 48 se pueden ver las zonas de proceso definidas en azul claro, como se mencionó anteriormente estas zonas tienen una altura que no presenta obstrucción, por lo que se pueden obviar y dedicarse a analizar la cobertura general del sitio.

El *Signal Strength* del AP 1 de la Figura 48 de la planta de Tulcán tiene un cubrimiento del 100% a -35dBm (áreas azules) se garantiza así un enlace casi perfecto, se cubre el área casi total del proceso donde están la mayoría de sensores, es importante que sea de esta forma ya que este proceso tiene áreas de medición en cada etapa del mismo. Hay que tener en cuenta que si se trabaja con más de un AP la potencia de cada uno debe estar por debajo de los -3 dBm, para garantizar que no hallan interferencias y que cuando se retira alguno para su mantenimiento o posible falla el otro debe ser puesto a potencia full.

En la mayoría de simulaciones se puede identificar que el *Signal Strength* cumple para las zonas de mediciones, es decir, que las zonas donde los dispositivos de lectura que utilizarán cada celda contarán con un *Signal Strength* adecuado para cada solución, recordando que la tecnología *Siemens* necesita por lo menos un nivel de 60 dBm como se ve en la Figura 44, para garantizar un enlace óptimo.

#### 4.9. SEGURIDAD DE LA RED

La seguridad informática ha tomado gran auge, debido a las cambiantes condiciones y nuevas plataformas tecnológicas disponibles. La posibilidad de interconectarse a través de redes, ha abierto nuevos horizontes a las empresas para mejorar su productividad y poder explorar más allá de las fronteras nacionales, lo cual lógicamente ha traído consigo, la aparición de nuevas amenazas para los sistemas de información.

Estos riesgos que se enfrentan han llevado a que muchas empresas desarrollen documentos y directrices que orientan en el uso adecuado de estas destrezas tecnológicas y recomendaciones para obtener el mayor provecho de estas ventajas, y evitar el uso indebido de las mismas, lo cual puede ocasionar serios problemas a los bienes, servicios y operaciones de la empresa.

En este sentido, las políticas de seguridad informática surgen como una herramienta organizacional para concientizar a los colaboradores de la organización sobre la importancia y sensibilidad de la información y servicios críticos que permiten a la empresa crecer y mantenerse competitiva. Ante esta situación, el proponer o identificar que una política de seguridad requiere un alto compromiso con la organización, agudeza técnica para establecer fallas y debilidades, y constancia para renovar y actualizar dicha política en función del dinámico ambiente que rodea las organizaciones modernas.

Las políticas de seguridad son las reglas y procedimientos que regulan la forma en que una organización previene, protege y maneja los riesgos de diferentes daños. Los objetivos de las políticas de seguridad son Informar al mayor nivel de detalle a los usuarios, empleados y gerentes de las normas y mecanismos que deben cumplir y utilizar para proteger los componentes de los sistemas de la organización. Mayor información sobre seguridad de una red se encuentra en el ANEXO C.

Entre los componentes de una política de seguridad se encuentran:

- Una política de privacidad
- Una política de acceso
- Una política de autenticación
- Una política de contabilidad
- Una política de mantenimiento para la red
- Una política de divulgación de información.

A continuación se definen unas políticas de seguridad para el uso de la red:

- ✓ Mantener actualizado el firmware de los APs.
- ✓ Revisar constantemente la posición de las antenas y de los APs.
- ✓ Cambiar el SSID por defecto de los APs.
- ✓ Inhabilitar la difusión del SSID.

- ✓ Evitar el uso de APs no autorizados.
- ✓ Configurar los equipos con la máxima seguridad posible.
- ✓ Usar aplicaciones software y hardware para monitorear en tiempo real la red inalámbrica y el uso del espectro evitando las posibles interferencias de modo que se tomen decisiones inmediatas y acordes con el problema. Igualmente para la red cableada.
- ✓ Usar aplicaciones de detección de intrusos.
- ✓ Planear futuras mejoras en cuanto a seguridad.
- ✓ Configurar de manera adecuada los permisos de acceso a la red con las ACLs<sup>11</sup> del firewall.
- ✓ Configurar la herramienta NAT<sup>12</sup> en el firewall.
- ✓ Es muy recomendable utilizar divisiones VLAN<sup>13</sup> en el switch para separar las redes internas y disminuir el tráfico en cada una de ellas, por ejemplo una VLAN1 que se encargue del tráfico de la red del nivel 2 y una VLAN2 que se encargue del tráfico de la red de los niveles 0 y 1.

#### 4.10. ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO DE LA RED

En este ítem, se tratará sobre qué tipo de estrategia de mantenimiento deberá tenerse en cuenta para asegurar el buen funcionamiento del diseño de red del caso de estudio utilizando la teoría estipulada en la sección 3.7 como criterio técnico para la definición de este punto tan importante.

Comenzando el análisis con el mantenimiento correctivo, puede decirse que existen fallas que por su naturaleza no pueden planificarse en el tiempo dentro de un plan de mantenimiento por ello se hace un mantenimiento correctivo. Aplicando lo anterior en el caso de estudio, sale a flote que es muy perjudicial tanto productiva como económicamente para una empresa tener fallas en su funcionamiento, mas aun en sus comunicaciones, teniendo en cuenta factores como las condiciones climatológicas a las cuales están expuestas las plantas cuando el tiempo es desfavorable, por ejemplo una tormenta eléctrica podría afectar el flujo de energía de toda la ciudad es por ello que se aboga por el uso de fuentes de energías alternas, además de esto el caudal del suministro de agua podría crecer de sobremanera y por lo tanto el flujo de entrada en las bocatomas, estos son factores que se salen de las manos y hay que lidiar con ellos de la mejor manera posible.

Una herramienta mucho más severa pero a la vez efectiva ante situaciones que pudieran haber sido detectadas a tiempo o que no debieron de haber ocurrido, es el mantenimiento preventivo que como su nombre lo indica, prevé las fallas antes de que ocurran, esto es mucho mas conveniente desde todos los puntos de vista pero debe hacerse de forma

---

<sup>11</sup> ACL: Lista de Control de Acceso.

<sup>12</sup> NAT: Traducción de Direcciones de Red.

<sup>13</sup> VLAN: Red de Área Local Virtual.

controlada y programada y llevando registro de todo las anomalías que se puedan presentar para así ir fortaleciendo cada vez mas la estrategia de mantenimiento.

Como se dijo anteriormente, es conveniente hacer registro de las actividades de mantenimiento para luego hacer un respectivo análisis, para ello es conveniente usar software especializado en la gestión de este tipo de información llevando el proceso de mantenimiento a un punto mucho mas elevado, complejo y efectivo pudiéndose predecir posibles fallas futuras analizando el comportamiento de los sistemas, en este caso del sistema de comunicaciones industrial. Esto es muy adecuado cuando son grandes y extensos procesos productivos, de igual forma, se recomienda que toda empresa que tenga la posibilidad de acceder a una herramienta de este tipo lo haga sin dudarlo, ya que en este continuo proceso evolutivo de la industria se deben tener las mejores herramientas para ser completivos, a demás de que en procesos que generan servicios que afectan a una población entera como es el caso del servicio del agua se debe tender a prestar el mejor de los servicios posible y para ello se debe funcionar de manera óptima.

Se concluye entonces, que la mejor decisión que puede tomar una empresa para la gestión de la información de mantenimiento y la reducción de costes por fallas, es hacerse a un herramienta software como la mencionada en la sección 3.5.3 aplicando el concepto de *mantenimiento inteligente*, lo cual implícitamente conlleva a crear e implementar planes de mantenimiento rigurosos basados en las grandes posibilidades que ofrecen dichas herramientas. Mayor información en el ANEXO C.

A continuación, después de haber culminado con todos los pasos para el diseño de la red caso de estudio que fueron definidos al inicio de este capítulo, se culmina con unas imágenes que esbozan la red producto final según todo el estudio realizado a lo largo del documento. Se muestran la ubicación de los respectivos componentes de red además del concepto general de la comunicación entre dos plantas, la integración de las comunicaciones de los primeros tres niveles de la pirámide de automatización CIM.

En las Figuras 49 y 50, se muestran las plantas de El Tablazo y de Tulcán con la ubicación de los respectivos componentes de red e instrumentos definidos en el diseño, se utiliza el código de colores indicado en la Tabla 19 para representar la tecnología utilizada, y para los sensores el número en paréntesis indica la cantidad de sensores utilizados en la planta de El Tablazo y Tulcán respectivamente.

Tabla 19. Código de Colores Componentes de Red

COLOR	TIPO
	Componentes de la red conectados con tecnología PROFINET: Switch, PLC, Firewall, HMI, Servidor, PCs Industriales, AP, and Gateway.
	Componentes de la red conectados con tecnología PRFIBUS DP: Motobombas.
	Componentes de la red conectados con tecnología PROFIBUS PA: Válvulas.
	Sensores inalámbricos <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 - Caudal/Flujo (5)</li> <li>• 2 - Dosificación (2)</li> <li>• 3 - pH/Alcalinidad (5 - 3)</li> <li>• 4 - Sólidos en suspensión (8 - 4)</li> <li>• 5 - Nivel (1)</li> <li>• 6 - Sensores de Turbidez (4 - 2)</li> </ul>

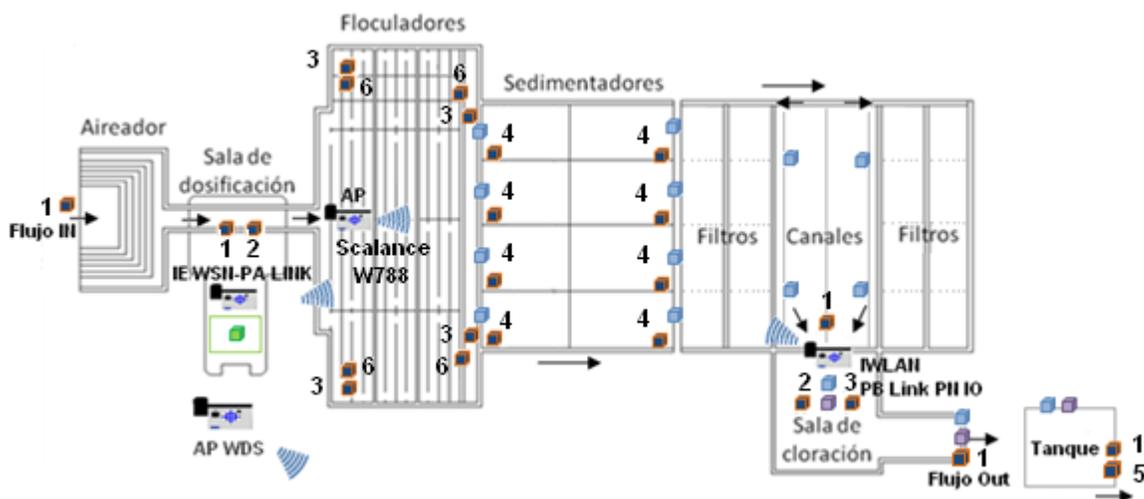


Figura 49. Planta El Tablazo

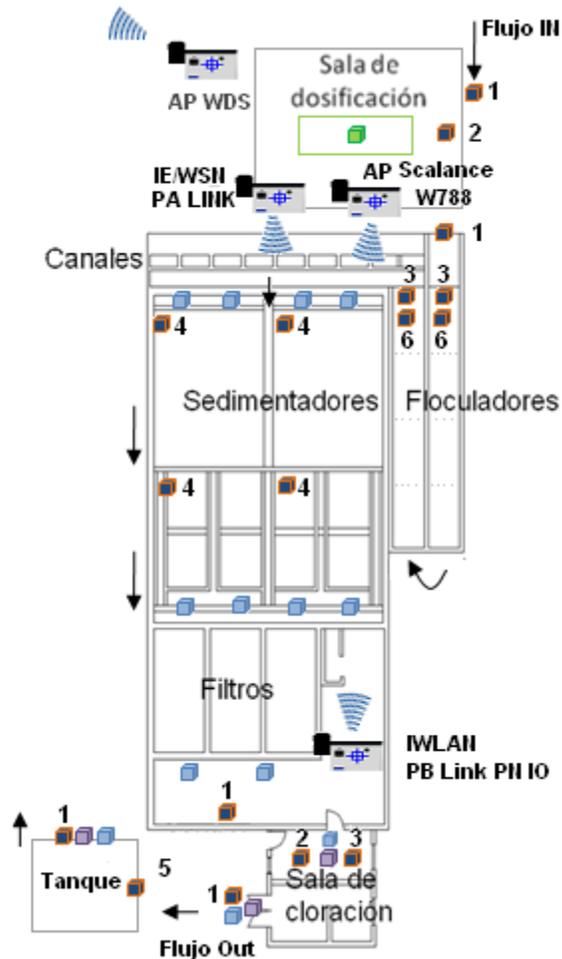


Figura 50. Planta Tulcán

Por último se concluye con una imagen que esboza de manera general el concepto de comunicación que se logró con el presente trabajo, es decir, la comunicación de los primeros tres niveles de las plantas de tratamiento de agua de la empresa El Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A., E.S.P., además de la comunicación entre dichas plantas por medio de un enlace WDS. Con esta propuesta se genera un grado mayor en la automatización de la empresa y de sus procesos de comunicación con una arquitectura de red diseñada de manera óptima, con conceptos teóricos válidos, ayudándose de herramientas software de simulación.

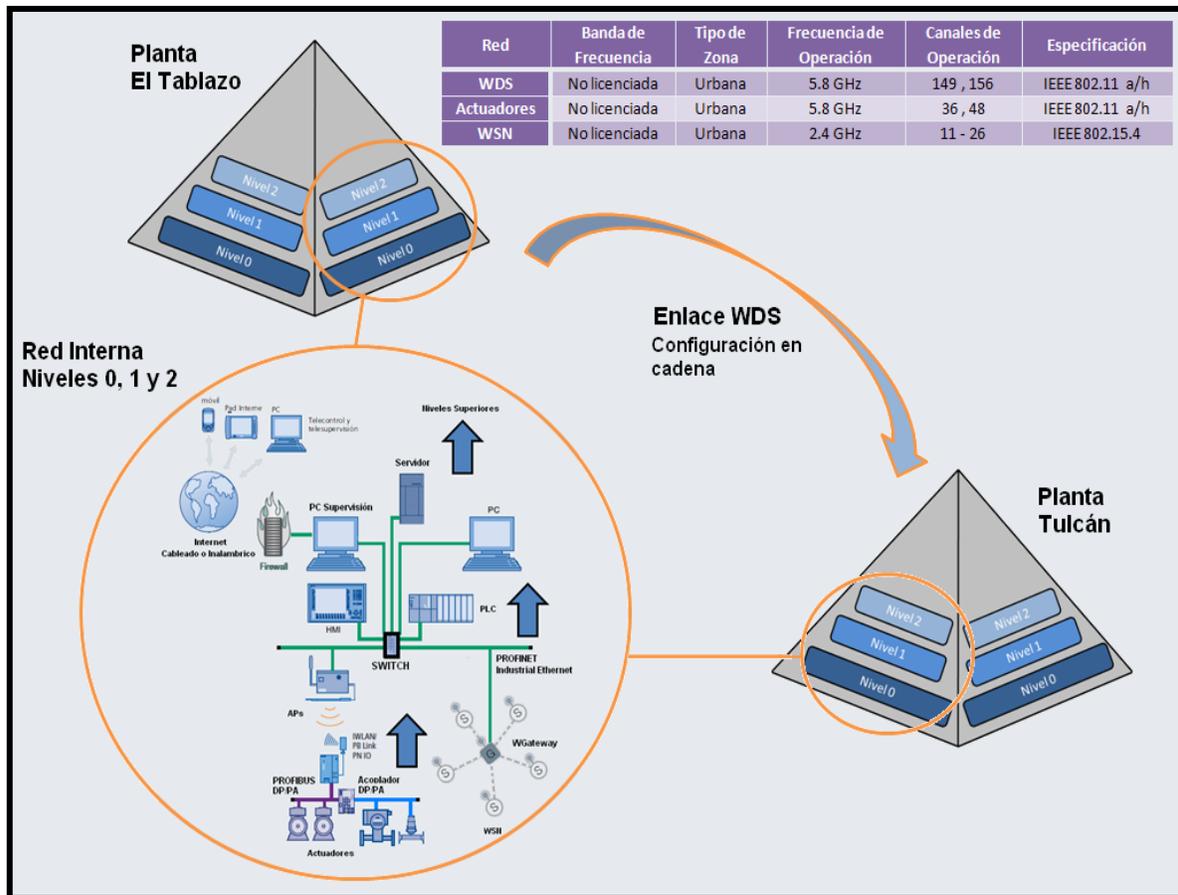


Figura 51. Red Caso de estudio a gran escala

#### 4.11. PLANEACIÓN DEL DISEÑO DE LA RED

En el Capítulo 2, se definieron las necesidades actuales del cliente (Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A., E.S.P.), para las cuales se planteó un diseño de red industrial para suplir dichas necesidades de comunicación el cual se ve en el Capítulo 4.

Se ve la necesidad de realizar la planeación del diseño basado en los requerimientos del cliente. Se identificaron tres necesidades verticales claras basadas en la información suministrada en el capítulo 2, estas se muestran a continuación según su prioridad en la implementación:

- Comunicación de las dos plantas remotas de El Tablazo y Tulcán.
- Optimización del sistema de comunicaciones para los actuadores de las respectivas plantas.
- Optimización del sistema de comunicaciones para los sensores de las respectivas plantas

- Integración de todo el sistema de comunicación de las plantas en los primeros tres niveles de automatización.

A continuación se proponen cuatro fases que deberán seguirse según del diseño para la red de comunicaciones como propuesta de solución para los respectivos requerimientos.

### **FASE 1**

Se debe implementar como primer paso, el sistema de comunicación para la interacción de las dos plantas remotas caso de estudio. Como se ve en el diseño de la red, esto se hará por medio de un WDS (Wireless Distribution System) con una configuración en cadena tomando como punto intermedio el cerro las tres cruces y con la utilización de APs inalámbricos para la comunicación de cada punto como se ve en la Figura 40.

### **FASE 2**

Implementación del diseño del sistema de comunicación de los actuadores. Al ser estos, los elementos finales de control su optimización es de gran importancia para suplir la necesidad de tener mayor control de forma efectiva y precisa del proceso reflejándose en una mayor productividad. Según el diseño, se recomienda que la comunicación de los actuadores sea por medio de un bus de campo (SIEMENS - PROFIBUS DP/PA) y su integración a la red de nivel 1 de forma inalámbrica (Comunicación híbrida), con la utilización de APs como se ve en la Figura 39 (AP 2 – AP 3).

### **FASE 3**

Implementación del diseño del sistema de comunicación de los sensores. Como se dijo en el capítulo dos, se busca tener mayor precisión en la medición de las variables importantes del proceso de tratamiento de agua y pasar de la experiencia y habilidad de los operarios en el sensado de las variables del proceso a la utilización de instrumentos que realicen dicha medición de forma más precisa. Según el diseño, se recomienda la utilización de una red WSN (Wireless Sensor Network) que se comunicación la red del nivel 1 por medio de un Gateway que recoja la información de los sensores del nivel 0 y la suba al nivel 1 como se ve en la Figura 39.

### **FASE 4**

Integración del diseño de las tres fases anteriores, con esto se busca la integración de las comunicaciones de los primeros tres niveles de automatización de la pirámide CIM a

demás de la comunicación de las plantas remotas para así tener accesibilidad de la información del proceso desde cualquier planta, la información de campo accesible constantemente de forma fácil y confiable, además de la centralización de dicha información y la mejora de la información suministrada a los niveles superiores (Niveles empresariales) según el diseño de red presentado en el transcurso del capítulo 2 como se ve en la Figura 52.

## **FASE 5**

Esta última fase se define como la capacitación del personal que usará y administrará la red ya que por más óptimo que sea el diseño y su implementación, su efectividad dependerá del personal capacitado que sepa usar la red y haga el análisis y gestión de la información de manera adecuada, es por ello que se hace énfasis en este aspecto.

### **4.12. PLANEACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO**

En esta sección se planifica la implementación de diseño suponiendo la implementación del mismo. Se ha planificado las actividades derivadas de las necesidades del cliente.

#### **Propuesta**

Integración de la supervisión de las plantas remotas a través de una arquitectura de red industrial de comunicaciones híbrida wireless.

#### **Planeación**

A continuación se encontrará el listado de actividades a realizar para este proyecto el cual contempla una duración estimada de horas de ingeniería:

#### **Alcances Generales**

Suministro de ingeniería para el desarrollo y puesta en servicio de un sistema de comunicaciones en el área de tratamiento de agua para las plantas remotas de Tulcán y Tablazo. El sistema de comunicaciones enlazará las dos plantas adquirirá las señales del área de piso y las enlazará al sistema de supervisión.

La ingeniería incluye la programación y puesta en marcha. Se considera que no se realiza control sobre el sistema, el sistema solo recopila las señales para enlazarlas entre sí. Tampoco se tiene en cuenta la cotización de equipos

#### **Actividades a realizar**

1. Levantamiento de Información: Se recolecta la información referente a los dispositivos que intervienen y que cuenta la empresa en su sistema de control y monitoreo. Esta información se revisará con el cliente en campo, se identificarán con el responsable las señales que intervienen en el control. Se establecerán los diagramas base para la realización del enlace de comunicación.
2. Documento de Diseño: Con la información que ha sido recolectada en campo se estudiará y se determinarán los típicos de arquitectura de comunicación. Con la información recolectada se procede a realizar un documento descriptivo de la implementación que se realizará. Apoyados de la monografía realizada se da soporte de diseño. Este documento deberá ser aprobado por el cliente para la implementación de la solución.
3. Programación de dispositivos: Se realizará la programación y escalización de los dispositivos de red. Se programarán los enlaces y se verificará el enlace de red.
4. Pruebas y simulación de la implementación: Ajustes, correcciones y modificaciones en oficina. Se verifica que la implementación cumpla con lo establecido en el documento de diseño.
5. Pruebas FAT (Factory Acceptance Test): Pruebas de los equipos y software con personal del cliente en oficinas para verificar tanto la implementación, como el correcto funcionamiento de los equipos y software suministrado.
6. Pruebas en Vacío: Pruebas en vacío y de las secuencias automáticas en planta. Durante la pruebas se pueden producir modificaciones o correcciones que sean necesarias para el correcto funcionamiento del sistema.
7. Pruebas con Carga: Durante la pruebas se pueden producir modificaciones o correcciones que sean necesarias para el correcto funcionamiento del sistema.
8. Arranque y Puesta en Servicio: Una vez se hayan realizado las pruebas en vacío y con carga el sistema estará listo para su arranque y puesta en servicio. Para ello están contempladas 25 días. En estas horas se pueden producir modificaciones pequeñas y/o sencillas que no afecten el funcionamiento del sistema.
9. Capacitación: La capacitación incluye un manual de operación del sistema del sistema de supervisión. Se contempla la formación de un grupo de ocho personas entre personal de mantenimiento y operaciones. El grupo en entrenamiento y/o capacitación se establece un tiempo máximo de cuatro horas. La capacitación estará dirigida a la operación del sistema de supervisión y la solución de problemas básicos con el sistema de comunicaciones.

10. Documentación: Una vez el sistema se encuentre operando se realizará la actualización del documento de diseño de la implementación, los listados de señales, los *print layout* de las pantallas de configuración y el manual de operación del sistema de comunicaciones.

11. Administrativa: Tiempo dedicado a la administración del servicio.

### Propuesta Económica

Tabla 20. Tabla resumen propuesta económica del proyecto

Ítem	Descripción	Días	Valor Unitario	Valor Total
1	Servicio de Ingeniería	25	\$ 1.824.480	\$ 45.612.004
2	Servicio técnico	10	\$ 13.858.300	\$ 13.858.300
3	Gastos Asociados con la prestación del servicio		\$ 1.210.000	\$ 1.210.000
<b>TOTAL DEL SERVICIO</b>				<b>\$ 59.656.789</b>

## CONCLUSIONES

Colombia es un país en el cual la industria ha tenido una gran evolución en los últimos años, y el mercado de las redes inalámbricas aplicado a los ambientes industriales promete ser un área con gran dinamismo en los tiempos venideros. En este sentido las redes de sensores inalámbricas, los enlaces inalámbricos punto a punto y otras posibilidades de esta tecnología, pueden producir un impacto positivo en el objetivo de masificar su uso junto con redes de comunicación industrial cableadas.

Es claro que no hay una fórmula mágica que determine con precisión cual tecnología es la mejor para cada situación, existen un gran número de variables además de los aspectos técnicos que deben ser tenidos en cuenta en el momento de realizar la implementación de una red de este tipo. Se debe tener en cuenta la situación económica de la empresa, de los usuarios, de la industria en la cual se desea aplicar y hasta el ambiente cultural e ideológico, ya que una infraestructura de este tipo trasciende más allá el aspecto tecnológico para convertirse en un fenómeno con la capacidad de cambiar la forma y el nivel de tratamiento de la información y de los datos relevantes de una industria, mediante los servicios que se pueden ofrecer a través de redes de este tipo.

Si bien existen un gran número de combinaciones, formas y estilos en los que estas tecnologías pueden utilizarse, un correcto proceso de diseño y planeación puede llevar a encontrar la solución que mejor se adapte a las condiciones particulares del caso de aplicación. Por estas razones, en este trabajo se han querido generar un conjunto de criterios generales con el objetivo de conformar un proceso estructurado que facilite de algún modo la realización de dichas actividades por parte del ingeniero de automatización en el uso de estas tecnologías.

De todo lo anterior, se pueden hacer las siguientes conclusiones:

- ✓ No hay duda de los beneficios ofrecidos por el uso de tecnologías inalámbricas en entornos industriales y la disminución de costos con el uso de las mismas, pero también es indudable que este tipo de tecnologías en este momento de su desarrollo no son capaces de sustituir por completo una red industrial cableada, es por ello que se aboga por el uso de tecnologías cableadas junto con tecnologías inalámbricas generando así las llamadas redes híbridas de comunicación, las cuales ofrecen mayor flexibilidad, mayor alcance en sitios que con tecnologías cableadas sería imposible o muy costoso y gran cantidad de servicios y aplicaciones que antes no se tenían, los equipos móviles interconectados a través de redes de datos inalámbricas, permiten diseñar procesos mucho más eficientes ya que permiten establecer comunicación con estaciones en movimiento o de difícil acceso, de un modo sencillo y flexible.
- ✓ La comunicación móvil supone un aumento general de la competitividad, ya que la tecnología inalámbrica de enlace con sistemas de automatización y terminales

industriales permite alcanzar una mayor flexibilidad y con ello a su vez simplificar las tareas de mantenimiento, reducción de gastos de reparación y los tiempos improductivos y permite hacer uso óptimo del personal.

- ✓ La selección adecuada de la frecuencia y canales de comunicación, es un punto indispensable para el buen funcionamiento de la red, ya que de esto dependerá la fidelidad de las comunicaciones inalámbricas evitando así interferencias no deseadas y la no disponibilidad de la información.
- ✓ El estudio del ambiente y los alrededores en donde se desea aplicar la tecnología es de vital importancia, ya que así se obtendrá información que ayudara a determinar qué tipo de frecuencia se debe usar dependiendo de si es una zona con mucha o poca interferencia a demás que se definirá el alcance de la red pudiendo así estimar cuales y qué tipo de equipos son necesarios.
- ✓ El uso de enlaces punto a punto o enlaces WDS, es una solución óptima para la comunicación de locaciones remotas de grandes distancias, siempre y cuando se garantice una línea de vista (LOS) libre de obstáculos que pudieran interferir con la transmisión y recepción de las antenas direccionales, si esto se garantiza no habrá ningún impedimento en la utilización de este tipo de métodos.
- ✓ Por más de que una red haya sido diseñada de manera óptima y confiable no se garantiza que esta funcione por tiempo indefinido de manera confiable sin un adecuado mantenimiento, es por eso que se concluye la necesidad de estrategias de mantenimiento agresivas para obtener una mayor disponibilidad de la red funcionando dentro de los parámetros establecidos y para ello lo más conveniente sería el uso de herramientas software que ayuden a los encargados del mantenimiento no sólo de la red sino de los procesos en general en el cumplimiento de su labor.
- ✓ Es mucho más conveniente simular la red antes de comenzar el proceso de instalación y puesta en marcha, ya que de esta forma se podrá predecir el funcionamiento de la red en futuro y evitar agujeros de cobertura en una futura implementación, áreas de mal servicio, baja respuesta, pobre calidad de servicio e inadecuada capacidad, es por ello que siguiendo con la tendencia mundial de simular antes de implementar, se recomienda el uso de herramientas de simulación de este tipo de redes tales como el software de simulación de redes industriales inalámbrica SINEMA E que ofrece la productora de software y hardware para aplicación industrial SIEMENS.
- ✓ El uso de simuladores software incrementa la efectividad y disminuyen los costos en la planeación y el diseño, permitiendo que más personas y empresas puedan implementar la tecnología inalámbrica a las necesidades propias de cada uno.
- ✓ El análisis de la planeación y el diseño permiten realizar una posible estrategia para enfrentar los costos de una implementación de este tipo, permitiendo optimizar el tiempo en la consecución de los mismos.

- ✓ El desarrollo del presente proyecto permite la integración del conocimiento adquirido en las asignaturas del programa de Ingeniería en Automática Industrial como por ejemplo redes y sistemas computarizados de control, gestión de proyectos y además que complementan el conocimiento sobre otras áreas de estudio que amplían el horizonte para la consecución de cualquier proyecto con aplicación industrial.
- ✓ El proyecto de grado es un arduo trabajo interdisciplinario, que a través de este tiempo permitió acceder a información que la academia no cubre en los semestres de estudio, pero que sentó las bases para permitir asimilar conocimientos alternos, además este trabajo permitió establecer relaciones con profesionales de otros campos que guiaron la consecución de las ideas para la culminación de los objetivos de este proyecto.
- ✓ Adición de los puntos en las bocatomas dentro de la red WSN. Internamente en las plantas, el único problema aparente de transmisión es en las mediciones del caudal de entrada de agua en las bocatomas que se encuentran a una distancia considerable de la infraestructura de las plantas.
- ✓ El estándar ISA 100 de comunicación inalámbrica es un estándar nuevo que busca la integración de la tecnología en la industria, su aplicación está dirigida estrictamente para instrumentos en el nivel de planta es decir redes WSN, ya que esta basada en el estándar IEEE 802.15.4 se puede decir que la red WSN caso de estudio cumple con el estándar.
- ✓ La empresa ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN S.A.E.S.P., ha comenzado la construcción de una tercera planta de tratamiento de agua, entonces se podría pensar en integrar la misma con las otras dos plantas caso de estudio con la aplicación de tecnologías inalámbricas como se realizó en el presente proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **UNIVERSIDADE DE VIGO, E. T. S. Ingenieros Industriales, José Ignacio Armestto Quiiroga.** Instalación de Sistemas de Automatización y Datos. [En línea] 2008. [http://tv.uvigo.es/uploads/material/Video/1466/ISAD\\_Tema5.pdf](http://tv.uvigo.es/uploads/material/Video/1466/ISAD_Tema5.pdf).
2. **SIEMENS.** Applicattions and tool, set up an industrial wireless LAN. [En línea] 2007. [https://a248.e.akamai.net/cache.automation.siemens.com/dnl/jlyMzg3AAAA\\_22681042\\_Tools/22681042\\_Aufbau\\_IWLAN\\_v11\\_e.pdf](https://a248.e.akamai.net/cache.automation.siemens.com/dnl/jlyMzg3AAAA_22681042_Tools/22681042_Aufbau_IWLAN_v11_e.pdf).
3. **TRICALCAR.** Introducción a la Física de la Radio. [En línea] 08 de 2007. [http://www.eslared.org.ve/tricalcar/03\\_es\\_radio-fisica\\_guia\\_v01%5B1%5D.pdf](http://www.eslared.org.ve/tricalcar/03_es_radio-fisica_guia_v01%5B1%5D.pdf).
4. **Pareek, D.** *The Business of WiMAX*. s.l. : Ed. Chichester: John Wiley & Sons. 2006. ISBN: 10-0470-02691, 2006.
5. **SIEMENS.** Simatic net Industrial Ethernet, Network Topologies. [En línea] 2005. [http://www.automation.siemens.com/download/internet/cache/3/1218442/pub/en/ie\\_netztopologien\\_v1\\_1.pdf](http://www.automation.siemens.com/download/internet/cache/3/1218442/pub/en/ie_netztopologien_v1_1.pdf).
6. **Alfredo Rosado, Universidad de Valencia.** Sistemas Industriales Distribuidos. *Tema 2. Redes de Comunicación: Topologías y Enlaces*. [En línea] 2006 - 2007. [http://www.uv.es/rosado/sid/Capitulo2\\_rev0.pdf](http://www.uv.es/rosado/sid/Capitulo2_rev0.pdf).
7. **ORiNOCO, Technical Bulletin 046/ A.** WDS: Wireless Distribution System. [En línea] Febrero de 2002. <http://www.pafree.net/media/TB-046.pdf>.
8. **Department of Computer Science & Engineering, Jadavpur University.** Setting up of a Wireless Distribution System (WDS). [En línea] 2002. <http://www.cs.ucsb.edu/~sudipto/files/wds.pdf>.
9. **Niels Aakvaag, Jan-Erik Frey.** Redes de sensores inalámbricos, Nuevas soluciones de interconexión para la automatización industrial. *Redes de sensores inalámbricos, Nuevas soluciones de interconexión para la automatización industrial*. [En línea] 2006. [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot271.nsf/VerityDisplay/A019E9833DCF2819C1257199004E5DD2/\\$File/39-42%202M631\\_SPA72dpi.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot271.nsf/VerityDisplay/A019E9833DCF2819C1257199004E5DD2/$File/39-42%202M631_SPA72dpi.pdf).
10. **Ivan Bernal, Ph.D.** Antenas. [En línea] 10 de 2005. <http://clusterfie.epn.edu.ec/ibernal/html/CURSOS/AbrilAgosto06/Inalambricas/CLASES/AntenasParteIII.pdf>.

11. **U.N.R., Escuela de Ingeniería Electronica.** Propagación y campo recibido. [En línea] 2007. <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Antenas%20y%20Propagacion/1513.pdf>.
12. **BrazilFW.** Wireless - Optimización - En Construcción. [En línea] 2006. <http://www.brazilfw.com.br/forum/viewtopic.php?f=40&t=65199>.
13. **Merk.** colorímetro Spectroquant Picco NO3-N. [En línea] [http://www.merck-chemicals.com/colorimetro/MDA\\_CHEM-173603/spanish/p\\_DM2b.s1LNhQAAAEWnOIfVhTI](http://www.merck-chemicals.com/colorimetro/MDA_CHEM-173603/spanish/p_DM2b.s1LNhQAAAEWnOIfVhTI).
14. **Instruments, Hanna.** Turbidity Meter HI 93703. [En línea] <http://www.hannainst.com/usa/prods2.cfm?id=010002&ProdCode=HI%2093703>.
15. **Hydro.** Cloradores a gas. [En línea] <http://www.hydroinstruments.com/files/Boletin%20500E%20%5BMarch%202010%5D.pdf>.
16. **ISA, International Society of Automation.** ANSI/ISA-95.00.01-2000 Enterprise-Control System Integration Part 1: Models and Terminology. [En línea] 2000. <http://www.isa.org>.
17. **Hernández, Miguel.** Introducción a las redes de comunicación industriales. [En línea] 1999. <http://isa.umh.es/asignaturas/ci/Tema%201.pdf>.
18. **SIEMENS.** Industrial Networking. *Febrero.* [En línea] 2007. [http://www.automation.siemens.com/download/internet/cache/3/1441710/pub/es/BS\\_Networking\\_sp.pdf](http://www.automation.siemens.com/download/internet/cache/3/1441710/pub/es/BS_Networking_sp.pdf).
19. **SIEMENS.** Comunicación industrial para aplicaciones de automatización. [En línea] 04 de 2007. [http://www.automation.siemens.com/download/internet/cache/3/1436552/pub/es/k\\_schrift\\_es\\_0407.pdf](http://www.automation.siemens.com/download/internet/cache/3/1436552/pub/es/k_schrift_es_0407.pdf).
20. **Phoenix Contact.** WLAN. [En línea] [http://www.phoenixcontact.es/tecnologia/18699\\_18716.htm](http://www.phoenixcontact.es/tecnologia/18699_18716.htm).
21. **SIEMENS.** Simatic net industrial Ethernet Basics. [En línea] 02 de 2005. [http://www.automation.siemens.com/download/internet/cache/3/1412996/pub/en/IE\\_Basics\\_WhitePaper\\_V1\\_0e.pdf](http://www.automation.siemens.com/download/internet/cache/3/1412996/pub/en/IE_Basics_WhitePaper_V1_0e.pdf).
22. **Soroush Amidi & Alex Chernoguzov, Honeywell.** Wireless Process Control Network Architecture Overview. [En línea] 3 de 2009. [http://hpsweb.honeywell.com/NR/rdonlyres/14F08C40-BE14-490C-8E82-8F4D09D3A9DB/76326/WirelessProcessControlNetworkArc\\_WP\\_March09.pdf](http://hpsweb.honeywell.com/NR/rdonlyres/14F08C40-BE14-490C-8E82-8F4D09D3A9DB/76326/WirelessProcessControlNetworkArc_WP_March09.pdf).

23. **Universidad de Oviedo.** Redes Locales en Entornos Industriales: Buses de Campo. [En línea] 2007. <http://www.isa.uniovi.es/docencia/redes/Apuntes/tema9.pdf>.
24. **Manali Oak.** Advantages and Disadvantages of Different Network Topologies. [En línea] 25 de 10 de 2008. <http://www.buzzle.com/articles/advantages-and-disadvantages-of-different-network-topologies.html>.
25. **Julio César Caicedo Eraso.** Redes Industriales. [En línea] 2008. <http://www.galeon.com/juce/artredind.pdf>.
26. **Daintree Networks.** What's so good about mesh networks? [En línea] 2007. <http://www.daintree.net/downloads/whitepapers/mesh-networking.pdf>.
27. **FCIT, Florida Center for Instructional Technology.** Chapter 5: Topology. [En línea] 2009. <http://fcit.usf.edu/Network/chap5/chap5.htm>.
28. **Bussmann, Cooper.** Wireless Mesh Networks – Reliability and Flexibility. [En línea] <http://www.cooperbussmann.com/pdf/df32d995-50e6-42e3-ac41-cb4456c3b9e6.pdf>.
29. **Linkses.** Topologías de Red. [En línea] <http://www.linkses.com/articulos/articulo.php?id=472>.
30. **ABB.** Redes de Sensores Inalambricos. [En línea] Febrero de 2006. [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot271.nsf/VerityDisplay/A019E9833DCF2819C1257199004E5DD2/\\$File/39-42%202M631\\_SPA72dpi.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot271.nsf/VerityDisplay/A019E9833DCF2819C1257199004E5DD2/$File/39-42%202M631_SPA72dpi.pdf).
31. **Universidad del Cauca, DEIC.** INTRODUCCION A LAS REDES DE COMUNICACIÓN INDUSTRIAL. [En línea] 2007. <ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/docs/Materias/Redes%20Industriales/Redes/Conferencias/Capitulo%201.pdf>.
32. **Universidad de Valencia, Alfredo Rosado Muñoz.** Sistemas Industriales Distribuidos: Redes de Comunicación (Topologías y enlaces). [En línea] 2004. [http://www.uv.es/rosado/sid/Capitulo2\\_rev0.pdf](http://www.uv.es/rosado/sid/Capitulo2_rev0.pdf).
33. **Universidad de Valencia, Alfredo Rosado Muñoz.** Sistemas Industriales Distribuidos: Redes de Comunicaciones Industriales. [En línea] 2004. [http://www.uv.es/rosado/sid/Capitulo3\\_rev0.pdf](http://www.uv.es/rosado/sid/Capitulo3_rev0.pdf).
34. **HART communication Foundation.** HART Field Communications Protocol Application Guide. [En línea] 1999. <http://grupos.emagister.com/ficheros/dspflashview?idFichero=162028>.

35. **SIEMENS.** PROFIBUS El bus polivalente para la comunicación en la industria de procesos. [En línea] 2008. [http://www.automation.siemens.com/w2/efiles/pcs7/pdf/78/prdbrief/kb\\_profibus\\_es.pdf](http://www.automation.siemens.com/w2/efiles/pcs7/pdf/78/prdbrief/kb_profibus_es.pdf).
36. **Ignacio Morande.** PROTOCOLOS DE COMUNICACIONES INDUSTRIALES. [En línea] [http://www.alumnos.usm.cl/~ignacio.morande/descargas/PROTOCOLOS\\_INDUSTRIALES.pdf](http://www.alumnos.usm.cl/~ignacio.morande/descargas/PROTOCOLOS_INDUSTRIALES.pdf).
37. **SIEMENS.** Comunicación industrial para Automation and Drives. [En línea] 2007. [http://www.sispm.com/descargas/04%20Comunicaciones/Catalogos/01\\_Automation\\_Drives.pdf](http://www.sispm.com/descargas/04%20Comunicaciones/Catalogos/01_Automation_Drives.pdf).
38. **SIEMENS.** Gestión de activos a nivel de planta, Productos para el mantenimiento inteligente en la Industria de Procesos. [En línea] Abril de 2008. [http://www.automation.siemens.com/w2/efiles/pcs7/pdf/78/maintenance\\_2sp.pdf](http://www.automation.siemens.com/w2/efiles/pcs7/pdf/78/maintenance_2sp.pdf).
39. **SIEMENS.** PROFINET Katja Koivistoinen. [En línea] 11 de 7 de 2008. [http://www.siemens.fi/CMSADwww.nsf/F7C54CD674F4C012C22574FD00307F61/\\$file/05\\_Profinet%20Innovation%202008.pdf](http://www.siemens.fi/CMSADwww.nsf/F7C54CD674F4C012C22574FD00307F61/$file/05_Profinet%20Innovation%202008.pdf).
40. **HART Communication Foundation.** WirelessHART. [En línea] 2009. [http://hartcomm.org/protocol/training/resources/wiHART\\_resources/WirelessHART\\_bro\\_es\\_r2.0.pdf](http://hartcomm.org/protocol/training/resources/wiHART_resources/WirelessHART_bro_es_r2.0.pdf).
41. **SIEMENS.** Profinet Success Story. [En línea] 2008. <http://www.automation.siemens.com/download/internet/cache/3/1418505/pub/de/E20001-A430-P820-X-7600.pdf>.
42. **Ing. Mario R.Modesti.** Sistemas de comunicación por bus de campo. [En línea] <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/sistemasinteligentes/UT5/busses.pdf>.
43. **SIEMENS.** PROFINET el estandar abierto de Industrial Ethernet,. [En línea] 04 de 2006. <http://www.automation.siemens.com/download/internet/cache/3/1432112/pub/en/e20001-a16-m116-v1-7800.pdf>.
44. **Abraham Menéndez Márquez, Juan José Pérez Solano, José Pelegrí Sebastián.** Red de sensores inalámbricos para monitorización de terrenos mediante tecnología IEEE 802.15.4. [En línea] [http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos\\_modernos/articulos\\_gandia\\_2005/articulos/SC4/563.pdf](http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos_modernos/articulos_gandia_2005/articulos/SC4/563.pdf).