

TARDIVO, EZEQUIEL AL
Análisis y diseño de

2013

73209

09525

73209



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE INGENIERÍA**



Crear... Crear... Crecer...

**ANÁLISIS Y DISEÑO DE SISTEMAS RADIANTES, APLICADOS A
REDES INTELIGENTES DE ENERGÍA ELÉCTRICA.**

Por

Ing. Ezequiel Alberto Tardivo

**Tesis presentada para la obtención del grado de Magíster en
Ciencias de la Ingeniería**

Diciembre 2013

75209

MFN:
Clasif:
T. 871

ANÁLISIS Y DISEÑO DE SISTEMAS RADIANTES, APLICADOS A REDES INTELIGENTES DE ENERGÍA ELÉCTRICA

por

Ing. Ezequiel Alberto TARDIVO



Dr. Fernando MAGNAGO
Director



Dr. Alberto BAVA
Co-Director

Aprobada por:



Dr. Gustavo GONZALEZ
Jurado de Tesis



Dr. Juan Carlos AMATTI
Jurado de Tesis



Mgter. Fernando CORTEGGIANO
Jurado de Tesis



Dr. Ing Leonardo MOLISANI
Secretario de Posgrado de la FI-UNRC



M.Sc. Jorge BARRAL
Secretario de Posgrado y Cooperación
Internacional de la UNRC

Diciembre 2013

A Dios, a mi Esposa, a mis Hijos,
a mis Padres, a mis Suegros,
a mis familiares y a mis amigos,
por acompañarme
de una forma u otra
en este camino.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo de numerosas personas a quienes quiero agradecer con sincero afecto.

Al director y consejero académico de este trabajo, Fernando, por su constante e incondicional apoyo y orientación.

Al Co-Director, Alberto, por enseñarme, alentarme y motivarme en el estudio de estos temas.

A Rita Amieva quien me corrigió con total disposición y desinteresadamente este trabajo y además me enseñó a redactarlo.

A quienes me acompañaron a lo largo de este camino e hicieron interesantes aportes a este trabajo: Noelia Veglia, Federico Aguirre, David Deyong y Aldo Pruggia.

A los compañeros de trabajo del Dpto. de Telecomunicaciones con quienes cada día trabajamos por crecer en capacitarnos y enseñar.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), al Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT), porque hicieron posible este trabajo gracias a las becas y cargos otorgados.

TABLA DE CONTENIDOS:

• I. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Descripción del problema.....	2
1.2. Objetivo.....	4
1.3. Organización de la tesis.....	5
• II. CAPÍTULO 2: SMART GRID.....	7
2.1. Motivación.....	7
2.2. Definición de <i>Smart Grid</i>	10
2.3. Dominios de SG.....	13
2.4. Desafíos.....	15
2.5. Conclusiones.....	18
• III. CAPÍTULO 3: TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN.....	21
3.1. Tipos de redes en SG.....	22
3.2. Tecnologías de comunicación inalámbricas.....	24
3.2.1 Bluetooth.....	24
3.2.2 ZigBee.....	25
3.2.3 Wi-Fi.....	26
3.2.4 WiMAX.....	29
3.3. Implementación de tecnologías de comunicación inalámbricas en SG.....	31
3.3.1. Redes en el dominio de los Clientes. Home Area Network (HAN).....	31
3.3.2. Wi-Fi en HAN.....	32
3.3.3. Bluetooth en HAN.....	33
3.3.4. ZigBee en HAN.....	34
3.4. Redes en el dominio de Distribución: NAN, WAN.....	35
3.5. Selección de tecnologías.....	38
3.6. Conclusiones.....	40

- IV. CAPÍTULO 4: ANTENAS EN SG.43
 - 4.1 Radioenlaces en SG.43
 - 4.2 Sistemas radiantes en SG.45
 - 4.3 Definición y funcionamiento de las antenas.48
 - 4.4 Características de las antenas.52
 - 4.4.1 Impedancia y potencia entregada.53
 - 4.4.2 Eficiencia.54
 - 4.4.3 Diagrama de radiación.55
 - 4.4.4 Densidad de potencia radiada.60
 - 4.4.5 Directividad.60
 - 4.4.6 Ganancia.61
 - 4.4.7 Polarización.63
 - 4.4.8 Ancho de banda.64
 - 4.5 Tipos de antena.65
 - 4.6 Arreglos de antenas.66
 - 4.7 Factor de Arreglo.67
 - 4.8 Métodos de síntesis.69
 - 4.9 Métodos de análisis.73
 - 4.10 Conclusiones.76
- V. CAPÍTULO 5: IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO EN EL DOMINIO DE DISTRIBUCIÓN DE SG.79
 - 5.1. Situación actual del sistema eléctrico de la UNRC.80
 - 5.1.1 Localización de las subestaciones.80
 - 5.1.2 Equipamiento del sistema de distribución de la UNRC.82
 - 5.1.3 Elementos de protección y comunicación.85
 - 5.2. Solución Propuesta.88

5.2.1	Configuración de los <i>Gateways</i>	89
5.2.2	Tecnología de comunicación propuesta.	90
5.2.3	Equipamiento.....	92
5.3.	Diseño de sistema de comunicación con topología en cascada.	92
5.3.1	Características y cálculos de radioenlaces.....	92
5.3.2	Diseño del sistema radiante.....	95
5.3.3	Mediciones de las características principales del sistema radiante.	98
5.4.	Diseño de sistema de comunicación con topología estrella.....	101
5.4.1	Características y cálculos de radioenlaces.....	101
5.4.2	Diseño del sistema radiante del nodo concentrador.	104
5.5.	Resultados.....	109
•	VI. CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	111
6.1.	Conclusiones.....	111
6.2.	Contribuciones de la tesis.	113
6.3.	Propuestas para trabajos futuros.	114
•	REFERENCIAS.....	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla III-1: Clases de dispositivos Bluetooth en función de su potencia de transmisión.	25
Tabla III-2: Dispositivos Bluetooth en función de su ancho de banda.	25
Tabla III-3: Tecnologías Inalámbricas en SG.	39
Tabla IV-1: Métodos numéricos en FEKO [51].	75
Tabla V-1: Alturas de ubicación de los sistemas radiantes.	94
Tabla V-2: Dimensiones del sistema radiante de las subestaciones.	96
Tabla V-3: Mediciones y cálculo de ganancia.	100
Tabla V-4: Alturas de ubicación de los sistemas radiantes.	103
Tabla V-5: Valores de alimentación de cada elemento del arreglo.	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II-1: Smart Grid: infraestructura eléctrica + infraestructura de comunicaciones.	13
Figura II-2: Dominios en Smart Grid [22].	14
Figura III-1: Los tres segmentos de SG.	22
Figura III-2: Tipos de redes en las SG.	23
Figura III-3: The Home Area Network.	33
Figura III-4: NAN implementada con Wi-Fi.	35
Figura IV-1: Sistema de comunicación inalámbrico.	44
Figura IV-2: Comunicaciones inalámbricas en los segmentos de SG.	46
Figura IV-3: Línea de transmisión abierta y ondas estacionarias de tensión y corriente.	51
Figura IV-4: Línea de transmisión abierta.	51
Figura IV-5: Antena dipolo de media onda a partir de un tramo de línea.	52
Figura IV-6: Sistema de coordenadas esférico [43].	55
Figura IV-7: Planos H y E y dirección de propagación.	56
Figura IV-8: Diagrama de radiación isotrópico.	56

Figura IV-9: Diagrama de radiación omnidireccional.	57
Figura IV-10: Diagrama de radiación direccional.	57
Figura IV-11: Análisis en el plano vertical de un diagrama de radiación.	59
Figura IV-12: Directividad [43].....	60
Figura IV-13: Ganancia y directividad en los terminales de la antena.	61
Figura IV-14: Onda linealmente polarizada [49].....	63
Figura IV-15: Polarización lineal.	63
Figura IV-16: Polarización circular.	64
Figura IV-17: Ancho de banda para un valor de ROE=1.5.	65
Figura IV-18: Áreas de aplicación de los diversos métodos numéricos [51].	75
Figura V-1: Ubicación geográfica de las subestaciones.	81
Figura V-2: Diagrama unifilar de las subestaciones de la UNRC.	81
Figura V-3: Celda de Protección – Placa de comunicaciones ModBus RTU.	82
Figura V-4: Topográfico de las celdas de Laboratorio IPSEP.	83
Figura V-5: Diagrama unifilar de las celdas.....	83
Figura V-6: Esquema global de comunicación.....	85
Figura V-7: Panel frontal de la aplicación final.....	87
Figura V-8: Perfil de tensión semanal.	88
Figura V-9: Perfil de carga activa semanal.....	88
Figura V-10: Diagrama de la red.	90
Figura V-11: Redes del sistema de comunicaciones.	93
Figura V-12: Perfiles del terreno y alturas de las antenas en cada punto.	94
Figura V-13: Vista panorámica de los enlaces.	95
Figura V-14: Sistema radiante, dipolo con reflector diedro.	95
Figura V-15: Diagrama de radiación de la antena.	96

Figura V-16: Frecuencia vs. ROE.	97
Figura V-17: Ángulo de potencia media.	98
Figura V-18: Medición de Frecuencia vs. ROE.	98
Figura V-19: Diagrama de radiación en los planos ϕ y θ	100
Figura V-20: Requerimiento de cobertura del arreglo.	102
Figura V-21: Perfiles del terreno y alturas de las antenas en cada punto.	103
Figura V-22: Vista panorámica de los enlaces.	104
Figura V-23: Diagrama de radiación buscado.	105
Figura V-24: Arreglo de dipolos.	106
Figura V-25: Comparación de diagramas.	107
Figura V-26: Arreglo de dipolos y diagrama de radiación, obtenidos con Matlab.	108
Figura V-27: Diagrama de radiación en 3D, obtenido con FEKO.	108
Figura V-28: Diagrama de radiación en coordenadas polares, obtenido con FEKO.	109

RESUMEN

Actualmente los sistemas eléctricos necesitan transformarse radicalmente debido a que se están enfrentando a una situación cada vez más crítica: la demanda de energía está creciendo a un ritmo mayor al que lo hace la infraestructura de las empresas proveedoras. Como consecuencia de esto, la cantidad de cortes en la red eléctrica en horarios de alta demanda se ven incrementados.

La solución a esta situación debe provenir de una gestión más eficiente de la red que optimice el consumo y el suministro de energía eléctrica, es por esto que la tendencia actual del mercado eléctrico converge a lo que se denomina Red Inteligente (SG, por sus siglas en inglés Smart Grids).

Una SG es un sistema que permite la comunicación bidireccional entre el consumidor final (usuarios particulares o industriales) y las compañías eléctricas, de esta forma la información proporcionada por los consumidores se utiliza por las compañías para lograr una operación más eficiente de la red, fomentando una operación segura, económica y limpia a través de un conjunto de equipos e infraestructuras de tecnología avanzada que posibilitan que las redes eléctricas sean perfectamente observables, controlables, automatizadas e integrables.

Por lo tanto, para lograr la coordinación y sincronización de todos los agentes de las redes eléctricas, es de mucha importancia un sistema de comunicación óptimo.

Dentro del área de telecomunicaciones existe un abanico de tecnologías disponibles, entre las cuales se destacan principalmente las tecnologías inalámbricas.

El objetivo de este trabajo es estudiar y analizar las diversas tecnologías inalámbricas capaces de satisfacer las necesidades de comunicación de los distintos dominios de SG focalizando el estudio en el dominio de distribución, y en la capa física del protocolo de comunicaciones de las Redes Inalámbricas (WN, por sus siglas en inglés Wireless Networks). Y como aporte principal diseñar sistemas de antenas con el fin de utilizarlos en SG para mejorar la gestión del sistema eléctrico.

ABSTRACT

“Currently, electrical systems need to be radically transformed because they are facing an increasingly critical situation: energy demand is growing at a faster rate than the infrastructure of supplier companies.

As a consequence, the numbers of shut off in the grid at times of high demand are increasing.

The solution to this situation must come from more efficient management of the network to optimize the consumption and electricity supply, which is why the current trend of the electricity market converges to the so called Smart Grid (SG).

A SG system allows a bidirectional communication between the end user (individual or industrial users) and power companies, thus the information provided by consumers is used by companies to achieve a more efficient operation of the network, encouraging economic, clean, and safe operation through a set of equipment and advanced technology infrastructure that enable electricity grids are perfectly observable, controllable, automated and integrated.

Therefore, to achieve the coordination and synchronization of all agents of electrical networks is of great importance an optimal communication system.

Within the telecommunications area there is a range of available technologies, among which mainly include wireless technologies.

The aim of this thesis is to study and analyze the various wireless technologies capable of meeting the communication needs of different domains within SG, focusing the study specifically on the domain of distribution, and on the physical layer of the communications protocol of Wireless Networks (WN). As a main contribution, this thesis is aimed at designing antennas in order to use them in SG to improve the power system management.

I. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

En la actualidad, los sistemas eléctricos necesitan someterse a un proceso de rediseño debido a que el mercado de suministro de energía eléctrica se está enfrentando a una situación cada vez más crítica, pues la demanda de energía está aumentando considerablemente [1]. Esto hace que la calidad de entrega de energía se vea disminuida y que en horarios de alta demanda se produzcan una gran variedad de fallas y cortes en la red eléctrica.

Construir más plantas de generación de energía convencional no representa una solución viable al problema. Esto se debe, en primer lugar, a los elevados costos de infraestructura necesarios para la construcción y operación del sistema, además de los problemas ambientales por el incremento en la producción de gases tóxicos liberados durante la generación.

La solución debe provenir, entonces, de una gestión más eficiente y fiable de la red que optimice el consumo y el suministro de energía eléctrica y que además permita la incorporación de nuevas fuentes de generación que antes eran impensadas, dando lugar a lo que se conoce como generación distribuida. Todo esto puede ser logrado mediante la implementación de sistemas inteligentes, por lo que la tendencia actual del mercado eléctrico converge a lo que se denomina Red Inteligente (SG, por sus siglas en inglés *Smart Grids*) [2].

Uno de los desafíos actuales de las empresas de energía es desarrollar una red inteligente, que transforme las redes existentes en una red bidireccional donde la energía y la información fluyan en ambas direcciones, entre la generación y los consumidores.

Desde el punto de vista de generación, estas redes permitirán una mayor integración de grandes cantidades de energía renovable producida en tierra, en mar y por vehículos eléctricos, manteniendo al mismo tiempo la capacidad de producción de energía convencional y la adecuación del sistema energético, mejorando la fiabilidad y calidad del suministro.

Desde el punto de vista de transmisión, permitirán reducir la congestión del sistema, al poder incluir mayor generación localizada y controlar el consumo.

Desde el punto de vista del usuario final, estas reformas a la operación del sistema, le permitirá reducir los costos, recortar el consumo y le dará más información sobre el tipo

de energía que utiliza, e incluso podrá producir su propia energía y venderla a las compañías distribuidoras [3, 4].

Dentro del área de telecomunicaciones, existen tecnologías que pueden ser utilizadas en los distintos dominios de las redes eléctricas para satisfacer las necesidades de comunicación dentro de una SG.

El objetivo principal de este trabajo es analizar las diversas tecnologías inalámbricas capaces de satisfacer las necesidades de comunicación de los dominios que incumben a las SG y proponer una solución a un escenario dado.

El desarrollo se focalizará en el dominio de distribución, y en la capa física del protocolo de comunicaciones de las redes inalámbricas (WN, por sus siglas en inglés *Wireless Networks*). Como principal aporte se analizan y diseñan antenas y arreglos de antenas, con el fin de utilizarlos en SG para mejorar la gestión del sistema eléctrico. Las antenas utilizadas en SG varían según el dominio, el entorno y la tecnología implementada en cada caso.

En ese sentido y teniendo en cuenta estas características, en este trabajo se desarrolla un sistema de antenas que permite lograr la comunicación eficiente entre los puntos de comunicación de una red eléctrica típica.

1.1. Descripción del problema.

Entre los objetivos principales de las SG se destaca la necesidad de mejorar el control y la comunicación/información de los diferentes actores y equipos implicados en el funcionamiento de la red con objeto de favorecer la integración de tecnologías, presentes y futuras, y de esta manera lograr su optimización.

Actualmente, esto es factible gracias a la integración de sistemas informáticos, tecnologías de comunicación, sensores y dispositivos de medición, que posibilitan a los servicios públicos de electricidad y a los consumidores, controlar con precisión la entrega y el uso de la energía eléctrica. En este contexto las telecomunicaciones juegan un rol fundamental en la implementación de una SG.

Dentro del área de telecomunicaciones, la comunicación inalámbrica es una de las principales alternativas para la comunicación en el dominio de distribución de las SG. Una de las características más importantes de las redes inalámbricas es la posibilidad de la

comunicación sin una conexión física entre los nodos. Por otro lado, cuando se utilizan múltiples saltos, especialmente en WiFi y ZigBee, el rango de comunicación (área de cobertura) puede ser ampliado.

Existen diversas tecnologías inalámbricas capaces de satisfacer las necesidades de comunicación dentro de una SG. Para seleccionar el sistema adecuado es necesario tener en cuenta que las descargas entre los componentes de las líneas de energía por debajo de 70 kV, y el efecto corona que surge en las líneas de energía de más de 110 kV, tienen influencia dominante en el intervalo del espectro de frecuencia de 10 a 30 MHz [5]. Por lo tanto, la selección de un sistema de comunicación que opere en frecuencias superiores a éstas, permitiría minimizar la interferencia. En este trabajo se analizarán los estándares, “*Wireless Fidelity*” (Wi-Fi / IEEE 802.11) e “*Interoperabilidad Mundial para Acceso Microondas*” (WiMAX / IEEE 802.16) los cuales podrían ser utilizados en el dominio de distribución con una interferencia mínima [6].

Los sistemas de antenas utilizados por estas tecnologías en SG, dependen de diversos factores como, la topología, el tipo de red, si es una estación base o un dispositivo de medición inteligente, etcétera. Estas características son consideradas para el caso de estudio presentado en este trabajo, con el objeto de diseñar un sistema de comunicación inalámbrico adecuado a la red eléctrica en cuestión.

Una red inteligente integra las redes de comunicaciones con la red de transporte y distribución de energía para crear una nueva vía de comunicaciones y de electricidad, capaz de controlar su propio estado y de auto-recuperarse cuando fuera necesario; también logra que las notificaciones de problemas sean más eficientes.

Conceptualmente, SG es la unión de la infraestructura eléctrica con la infraestructura de comunicaciones. Como consecuencia de esto, se requiere de nuevas herramientas en el área de las telecomunicaciones que se adapten a las distintas necesidades de las SG. Los posibles medios de comunicación para el sistema de distribución incluyen la comunicación a través de las líneas de potencia (PLC, por sus siglas en inglés *Power Line Carrier*), tecnología inalámbrica y por cable dedicado. Tanto el PLC y la comunicación inalámbrica son tecnologías prometedoras para la comunicación en el nivel de distribución de las SG. Basándose en la necesidad y la disponibilidad de la tecnología, una combinación de ambos podría utilizarse para mejorar la infraestructura de comunicación [6].

PLC es una técnica que utiliza las líneas eléctricas para transmitir señales de datos de alta velocidad de un dispositivo a otro. Es una de las principales opciones, ya que es un medio que está disponible a través del mismo sistema y ofrece muy buenas prestaciones usando la infraestructura ya existente. Esto disminuye el costo de instalación de la infraestructura de comunicaciones, mientras que otras alternativas de comunicación deben instalar nuevas infraestructuras [7].

No obstante, existen algunos problemas técnicos debido a la naturaleza de las redes de líneas de alta tensión, que fueron diseñadas para transmitir señales eléctricas de baja frecuencia (50 y 60 Hz) y de poco ancho de banda, y además son un medio sujeto a fuertes interferencias provenientes de los dispositivos eléctricos y de radiaciones externas (radio, telefonía, etc.)[7].

Los estándares de tecnologías de comunicación inalámbricas como por ejemplo: IEEE 802.15 ZigBee, IEEE 802.11 Wi-Fi, IEEE 802.16 WiMAX, son apropiados para los diferentes ambientes de las SG. Con el fin de seleccionar la tecnología óptima se analizan estos ambientes y las diferentes variables a considerar en el momento de realizar la transmisión de datos, como por ejemplo: los rangos de cobertura, las distancias entre los puntos de conexión, la topología de la red, etcétera [8].

Los estándares mencionados anteriormente, son referidos a tecnologías de comunicación inalámbricas que requieren de sistemas radiantes, conocidos como antenas, tanto para la transmisión como para la recepción de la información, a través de ondas electromagnéticas.

Para seleccionar el sistema de antenas adecuado a cada caso, hay que tener en cuenta varios aspectos fundamentales, como la distancia entre los puntos, si existe línea de vista, la frecuencia en la que se va a transmitir, la cobertura, la potencia del transmisor, la polarización, la confiabilidad del medio, los costos, etcétera.

1.2. Objetivo.

Basado en este escenario, el objetivo principal de esta tesis ha sido analizar las diversas tecnologías de comunicación inalámbricas que pueden aplicarse en las SG, focalizando el estudio en el dominio de distribución, seleccionando la tecnología apropiada

para el mismo y optimizando su funcionamiento mediante la implementación del sistema radiante adecuado.

Los objetivos particulares, en tanto, son los siguientes:

- Analizar el estado del arte en el área de redes inteligentes de energía eléctrica, en el área de redes de comunicaciones inalámbricas, y en el área de sistemas radiantes de ondas electromagnéticas.
- Comparar y analizar las tecnologías de comunicación inalámbricas, con el objeto de encontrar la tecnología óptima que pueda aplicarse en el dominio de distribución de las SG.
- Analizar y diseñar sistemas radiantes, comparar sus principales características, y en base a los resultados obtenidos, escoger el sistema que presente el mejor comportamiento.
- Proponer y desarrollar un modelo que permita optimizar la comunicación en las redes eléctricas, mediante el uso de sistemas inalámbricos con antenas diseñadas convenientemente para cada aplicación, y su proyección a una SG real.

1.3. Organización de la tesis.

La presente tesis se organiza de la siguiente manera. En el primer capítulo se presentó una introducción sobre el tema transversal de este trabajo, se planteó el problema sobre el cual se basa la investigación, se realizó una revisión bibliográfica, y finalmente se plantearon los objetivos y los resultados esperados.

En el capítulo 2, se abordan los aspectos más sobresalientes con respecto al estado actual de redes de energía eléctrica. Se presentan las principales motivaciones que están impulsando la transición de los sistemas eléctricos hacia lo que se conoce como redes inteligentes. Seguidamente, se define conceptualmente el término “Smart Grid” en base a los principales entes y organismos que trabajan en su estandarización. Posteriormente se analiza un nuevo modelo conceptual para la infraestructura de las redes inteligentes de energía eléctrica. Finalmente, se presentan los desafíos, referentes al área de comunicación, que surgen de la necesidad de mejorar el control y la comunicación/información entre los diferentes actores y equipos de la red.

En el capítulo 3, se realiza un análisis de los tipos de redes que conforman una SG, posteriormente se presentan las tecnología basadas en los estándares: IEEE 802.11-Wi-Fi, IEEE 802.15.1-Bluetooth, IEEE 802.15.4-ZigBee, IEEE 802.16-WiMAX. Finalmente se consideran sus posibles aplicaciones en los diferentes dominios de SG.

En el capítulo 4, se analizan las características de los enlaces inalámbricos y de las antenas. Luego se presentan los tipos de antenas que pueden utilizarse en las tecnologías de SG haciendo hincapié en sistemas conformados por arreglos de antenas diseñados mediante los métodos de síntesis. Finalmente se menciona cuáles son los métodos numéricos con los que opera el programa de simulación de antenas utilizado en este trabajo.

En el capítulo 5, se presenta una solución de comunicación inalámbrica que contempla el diseño de un arreglo de antenas adecuado a la distribución geográfica de las subestaciones del dominio de distribución de un sistema eléctrico real, y la proyección del mismo hacia un sistema de distribución inteligente considerando específicamente la comunicación entre las celdas de media tensión y la adquisición de datos entre estas, para el análisis y la operación del sistema.

Finalmente, en el capítulo 6 son plasmadas las conclusiones generales, así como las propuestas para trabajos futuros.

II. CAPÍTULO 2: SMART GRID.

En este capítulo se abordan los aspectos más sobresalientes con respecto al estado actual de redes de energía eléctrica. Se presentan las principales motivaciones que están impulsando al proceso de cambio y transición de los sistemas eléctricos hacia lo que se conoce como redes inteligentes. Seguidamente, debido a la variedad de interpretaciones que existen, se define conceptualmente el término “*Smart Grid*” consultando las definiciones de los principales entes y organismos que más han avanzado en la investigación y en la estandarización de las SG. Posteriormente, se analizan los dominios de las SG según el Instituto Nacional de Estándares y Tecnologías, (NIST, por sus siglas en inglés *National Institute of Standards and Technology*) que define un nuevo modelo conceptual para la infraestructura de las redes inteligentes de energía eléctrica. Finalmente se presentan los desafíos, referentes al área de comunicación, a los cuales se enfrentan las redes inteligentes de energía, que surgen de la necesidad de mejorar el control y la comunicación/información de los diferentes actores y equipos implicados con objeto de favorecer la integración de tecnologías, presentes y futuras, y poder optimizar la red.

2.1. Motivación.

Debido a que la demanda de energía está creciendo constantemente y a un ritmo mayor que el crecimiento de las instalaciones de las empresas proveedoras el suministro de energía eléctrica se está enfrentando a una situación cada vez más crítica. Esto motiva a la transformación de los sistemas eléctricos actuales, los cuales poseen una infraestructura que fue pensada, diseñada y construida en tiempos en que el interés principal era expandirse en términos de cobertura geográfica, ya que la cantidad de energía era relativamente abundante y económica, los problemas del medioambiente no eran considerados y los consumidores no formaban parte del diseño.

En la actualidad, el aumento de productos eléctricos y electrónicos presentes en los hogares (aires acondicionados, microondas, televisores, computadoras, vehículos eléctricos, etcétera) y el crecimiento demográfico, han incrementado considerablemente la demanda, al punto de presentar una gran variedad de fallas y cortes en el servicio, en los horarios de mayor consumo de energía.

Las redes de distribución eléctrica se encuentran cerca de sus límites de capacidad, por lo que es evidente la necesidad de renovación y ampliación a la que se enfrentan los sistemas eléctricos en la actualidad.

Otro aspecto importante a considerar de estas redes es que la energía eléctrica no puede almacenarse, por lo tanto el desafío diario consiste en lograr producir y proveer la cantidad que se va a consumir. Esto se logra mediante la supervisión en tiempo real de las instalaciones de generación y transporte, de manera que la producción de las centrales sea coherente con la solicitud real de los consumidores, manteniendo en equilibrio constante la producción con la demanda. En caso de variaciones se debe aumentar o disminuir la producción de energía en las centrales para equilibrarse al consumo del momento. Actualmente, el sistema opera mediante la previsión de curvas de demanda para cada día, que se van ajustando a las necesidades reales de consumo. Estas curvas poseen una forma típica, en la que se observan picos en horas cercanas al mediodía y a la tarde, y valles en el intermedio y la noche. El mayor inconveniente se da en los casos de picos de demanda, donde la necesidad de transferir mayor potencia a la red debido al incremento del consumo eléctrico, implica que las plantas de generación de energía se vean obligadas a incrementar la producción o bien ingresar al sistema generación de reserva que en general son las más costosas y que utilizan combustibles fósiles. Resultando esto, no sólo, un aumento de costos, sino que además trae consecuencias ambientales por el tipo de combustible utilizado, el cual genera la emisión de gases de efecto invernadero.

La variación de la demanda, de forma tal de que la curva de consumo resulte más plana, implica una gran ventaja para las compañías eléctricas ya que una generación más constante a lo largo del día reduce los costos. Pero para esto es necesario que los consumidores puedan ser participantes activos en el manejo de la energía, por ejemplo, monitoreando su utilización de forma tal de decidir utilizarla en función de distintas variables, como por ejemplo su precio, llevando a cabo medidas de ahorro energético. Y para esto es imprescindible contar con la información y los medios apropiados que aporta una red inteligente.

Con respecto al daño ambiental que genera la emisión de gases de efecto invernadero, algunos países ya están desarrollando políticas y reglamentaciones para el cuidado del medio ambiente, buscando otras alternativas para reducir la dependencia de los

combustibles fósiles [9]. Además, teniendo en cuenta el incremento de fuentes renovables, se espera que las compañías de energía, den los pasos necesarios para lograr la integración con estas fuentes de generación de bajas emisiones, dando lugar al tipo de generación de energía distribuida. Para lo cual también es imprescindible contar con una nueva red que permita administrar de forma óptima este tipo de generación, principalmente porque la producción es de forma irregular o intermitente, ya que depende del sol y el viento que no son fenómenos que estén presentes todo el tiempo.

También existe interés por parte de las compañías, en acceder a la gestión de las cargas de la red eléctrica para tener control sobre la demanda, y de esta forma proveer el suministro con mayor calidad, confiabilidad y seguridad, de forma tal que la energía fluya por más tiempo y de manera más continua, reduciendo los cortes o fallas, y reaccionando mucho más rápido a la restitución del servicio. La gestión de la demanda de energía eléctrica también favorece al medioambiente ya que posibilita la incorporación de fuentes de generación de energía renovables.

Es inminente, entonces, poder lograr una gestión más eficiente de la red, optimizando el consumo y el suministro de energía eléctrica. Por lo tanto, la tendencia actual del mercado eléctrico converge a lo que se denomina SG [10]. Para llegar a esto la infraestructura eléctrica necesita transformarse, ya que es notable la necesidad de modernizar y mejorar las condiciones de operación de las redes de potencia, para que pueda responder a los desafíos actuales y futuros, como por ejemplo: la eficiencia energética, la reparación de fallas en forma instantánea, el uso de fuentes de energía limpias (renovables y tecnología a baja emisión de carbono), la generación distribuida, la implementación de un sistema eficiente de medición y tarifación del servicio, el nuevo rol del consumidor mediante el control del consumo en tiempo real, y la implementación de vehículos eléctricos. Todas estas cuestiones son importantes en muchos sectores, pero particularmente para las Tecnologías de Comunicación e Información, ya que su desarrollo permitirá a las redes de energía eléctrica poder desempeñarse como redes inteligentes.

En resumen, la implementación de las SG es impulsada, por un lado, por las necesidades actuales del sistema eléctrico, como por ejemplo, reducir las pérdidas técnicas y comerciales, reducir interrupciones, minimizar el impacto que generan los fallos del sistema, etcétera; y por otro lado, también es impulsada por una serie de motivaciones

como por ejemplo, aumentar la eficiencia operativa, reducir los consumos de energía y potencia en horarios picos, posibilitar la generación distribuida, proveer más y mejores servicios a los consumidores y proporcionarles información en tiempo real del precio de la energía. Estas necesidades y motivaciones apuntan a obtener una red de energía eléctrica eficiente, confiable y sostenible, para lo cual, es imprescindible contar con un adecuado sistema de comunicaciones que permita la interacción de los diversos agentes de la red eléctrica. Es por este motivo que el objetivo de esta tesis es diseñar un sistema de comunicaciones adecuado para una red eléctrica real, prototipo de SG, para lo cual se analizan las tecnologías de comunicación inalámbricas que se pueden utilizar en SG, con el objeto de seleccionar la más adecuada y posteriormente se diseña un sistema de antenas conforme a la tecnología seleccionada y a la topología de la red, de forma tal de optimizar las comunicaciones y el funcionamiento del sistema analizado.

2.2. Definición de *Smart Grid*.

Los organismos que más han avanzado en la investigación y en la estandarización de las redes inteligentes, han elaborado sus propias definiciones al respecto de las SG.

La Comisión Electrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission's*, IEC), define a SG como, “*una red eléctrica que puede integrar de forma inteligente las acciones de todos los usuarios conectados a ella (generadores, consumidores y aquellos que hacen ambas cosas) con el fin de entregar eficientemente el suministro de electricidad sostenible, económico y seguro. Las SG, facilitan la conexión y el funcionamiento de los generadores de todos los tamaños y tecnologías, permiten que los consumidores desempeñen un papel importante en la optimización de la operación del sistema, proporcionándoles una mayor información y la elección de la oferta. Permiten reducir significativamente el impacto medioambiental de todo el sistema de suministro de electricidad. Brindan mayor fiabilidad y seguridad del suministro*” [11].

El Departamento de Energía de los Estados Unidos (*United States Department of the Energy*, DOE) define a SG como, “*la red eléctrica del 2030, con una red de distribución de la energía completamente automatizada, que monitorea y controla todo cliente y nodo, asegurando un flujo bidireccional tanto de informaciones como de electricidad entre la central y el dispositivo final, y todos los puntos incluidos*”[12]. Las

Redes Inteligentes utilizan *“tecnología digital para mejorar la fiabilidad, la seguridad y la eficiencia del sistema eléctrico”* [4].

El Instituto de Investigación de Potencia Eléctrica (*Electric Power Research Institute, EPRI*) especifica que, *“el término “Smart Grid” hace referencia a la modernización del sistema de entrega de energía eléctrica de manera que este pueda monitorear, proteger y optimizar automáticamente las operaciones de sus elementos interconectados (desde los generadores centralizados y distribuidos a través de la red de alto voltaje y el sistema de distribución, hasta los usuarios industriales y los sistemas de automatización de edificios, las instalaciones de almacenaje de energía y los usuarios finales con sus termostatos, vehículos eléctricos, electrodomésticos y otros aparatos”* [13].

Mientras que en Europa el Grupo de Reguladores Europeos de la Electricidad y el Gas (*European Regulators' Group for Electricity and Gas, ERGEG*) define a SG como, *“la red eléctrica que puede integrar de forma eficiente y económica los comportamientos y acciones de todos los recursos de generación, sistemas de transporte, distribución e instalaciones de consumidores, para asegurar un sistema eléctrico sostenible con bajas pérdidas y altos niveles de calidad, seguridad y confiabilidad de suministro”* [14].

La Plataforma Tecnológica Europea de Redes Inteligentes (*Smart Grids European Technology Platform*), define a SG como, *“la red eléctrica capaz de integrar de manera inteligente las acciones de todos los usuarios conectados a ella (generadores, consumidores y aquellos actores que llevan a cabo ambas operaciones) con la finalidad de distribuir eficientemente un suministro eléctrico que sea sustentable, económicamente competitivo y seguro”* [15].

Por otra parte en un estudio realizado por el Foro Económico Mundial (*World Economic Forum*) en colaboración con *Accenture*, que es una compañía global de consultoría y tecnología, se han identificado siete características claves de una SG, estas son: *“auto operación y flexibilidad, integración de tecnologías avanzadas y de baja emisión de carbono, mejor capacidad de respuesta a las variaciones de la demanda, optimización de los recursos y de la eficiencia operacional, inclusión del consumidor, mejor calidad de la energía, expansión y surgimiento de nuevos mercados”* [16].

De toda esta variedad de definiciones y terminologías correspondientes a los entes que llevan a cabo la normalización y el desarrollo de las redes eléctricas, se puede resumir

que el término de “*Smart Grids*” hace referencia a redes que pueden integrar de manera inteligente la operación de las redes de distribución con las acciones tanto de los consumidores como de los generadores, fomentando una operación segura, económica y limpia a través de un conjunto de equipos e infraestructuras de tecnología avanzada que posibilitan que las redes eléctricas sean perfectamente observables, controlables, automatizadas e integrables [17].

Una SG es una red de energía avanzada, acorde con los avances de la era digital y los adelantos y tendencias del siglo XXI, que incorpora los servicios y beneficios de las nuevas Tecnologías de Comunicación e Información y se caracteriza por un flujo bidireccional de energía e información que va desde la generación hasta los equipos instalados en la parte de la red del cliente [18].

De las definiciones anteriores se puede afirmar que las redes eléctricas tradicionales para llegar a ser una SG requieren de un conjunto de soluciones tecnológicas orientadas a la optimización de todos los segmentos de la red, desde la generación hasta el consumo domiciliario. Esto surge de la aplicación de las nuevas tecnologías de comunicación e información digital con el fin de gestionar en forma eficiente los recursos de la generación, de los sistemas de transmisión y distribución y de las instalaciones de los clientes. La incorporación de un sistema de comunicaciones, que provea la conectividad permite la automatización, la coordinación entre los proveedores, el reconocimiento del estado de las redes de transmisión y distribución en tiempo real y el control del consumo por parte de los usuarios finales y de las empresas proveedoras. También permite incorporar un nuevo sistema de control encargado de realizar la medición de la electricidad que fluye por la red. Y además posibilita la integración de fuentes de energía alternativa renovable no convencional [19].

Puede apreciarse gráficamente, en la Figura II-1[20], que una SG es la unión de la infraestructura eléctrica con una infraestructura de comunicaciones, la cual le permite ser más eficiente y fiable y además mejorar la seguridad y calidad del suministro a los usuarios finales, mediante estrategias de inclusión de energías distribuidas.



Figura II-1: Smart Grid: infraestructura eléctrica + infraestructura de comunicaciones.

En el punto siguiente se define un modelo conceptual de SG, que posibilita estudiar y analizar el sistema de forma parcial, por dominios.

2.3. Dominios de SG.

El NIST, define un modelo conceptual para la infraestructura general descrita en la Figura II-1, el cual está representado por siete dominios en los que hay diferentes aplicaciones y equipamientos que hacen al funcionamiento de la red inteligente. En la Figura II-2, se observan los dominios interconectados a través de interfaces ubicadas en cada extremo que son de carácter eléctrico o de comunicaciones. Se han representado con líneas continuas las interfaces de comunicación, las cuales pueden ser conexiones del tipo físicas o lógicas, y con líneas punteadas las eléctricas. Ambos tipos de interfaces pueden ser bidireccionales.

Tradicionalmente, las redes eléctricas se han subdividido en cuatro áreas (dominios) comprendidas por: generación, transporte, distribución y consumo, como se ha representado en la parte inferior del esquema, entre los cuales la energía fluye desde el punto de generación hacia el usuario final en un solo sentido. No obstante, con la implementación de SG, el modelo de la red tendrá un esquema bidireccional, debido a que es un sistema que interactúa con los usuarios finales, que incorpora generación distribuida y energías renovables y además prevé la implementación de los vehículos eléctricos [21], los cuales al estar conectados a la carga de un usuario pueden convertirse en carga o generador de acuerdo a los requerimientos del sistema, mejorando la operación del mismo aplanando la curva de carga.

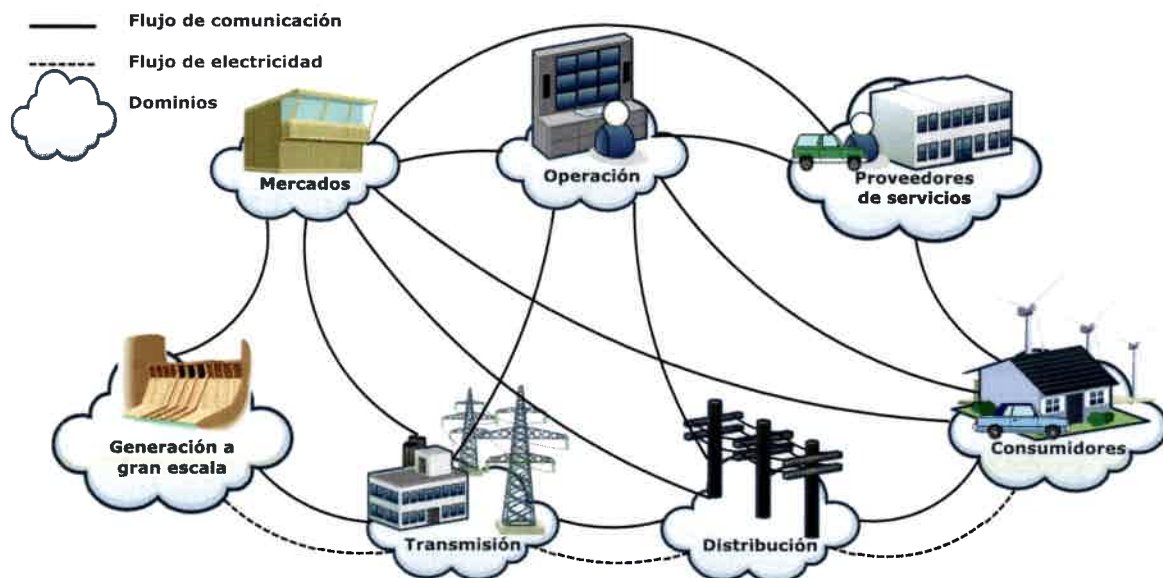


Figura II-2: Dominios en Smart Grid [22].

La descripción de cada dominio, proporcionada por el NIST [22], es la siguiente:

- Mercados: operadores y participantes en los mercados de electricidad, permite establecer compras y ventas del producto eléctrico entre generadores y consumidores.
- Operación: gestores del movimiento de la electricidad. Este dominio es el encargado de operar la red eléctrica de manera tal de garantizar la energía a los usuarios y que el sistema no opere fuera de sus límites.
- Proveedores de servicios: organizaciones que proporcionan servicios eléctricos a los clientes. Son los encargados de distribuir la energía desde el sistema de transmisión a los usuarios finales.
- Generación a gran escala: generadores de electricidad en grandes cantidades. También pueden almacenar energía para su posterior distribución.
- Transmisión (o transporte): portadores de la electricidad en grandes cantidades y largas distancias. También pueden almacenar y generar electricidad a menor escala.
- Distribución: distribuidores de energía eléctrica desde y hacia los clientes. También puede almacenar y generar electricidad a menor escala.
- Consumidores: usuarios finales de electricidad. También pueden generar electricidad a menor escala, además de almacenar y gestionar su uso.

Tradicionalmente, existen tres tipos de clientes según su propio dominio: residencial, comercial e industrial.

De acuerdo a las características y topologías de cada dominio existen distintas tecnologías de comunicaciones aplicables a los mismos. En este trabajo, se focalizará el análisis en las tecnologías inalámbricas con el fin de identificar cual es la más adecuada para ser aplicada en los dominios de distribución de las SG.

2.4. Desafíos.

Los desafíos que actualmente se presentan a las redes de energía eléctrica impulsan a la implementación de nuevas tecnologías que transforman el sistema en lo que se denomina una red inteligente, integrando las redes de comunicaciones con la red de transporte y distribución de energía para crear una novedosa red de comunicaciones y de electricidad, capaz de controlar su propio estado y de auto-recuperarse.

Lo que se busca con la implementación de SG es mejorar ampliamente la eficiencia de las redes de transmisión y distribución, para lo cual se requiere la capacidad de entender, elaborar y procesar la información adecuadamente, mediante las tecnologías de información y comunicación, mejorando el monitoreo, protección, y optimización de los sistemas, partiendo desde la generación hasta el consumidor final. Para lograr esto debe proveer de las herramientas necesarias, (combinación de hardware y software diseñados para mejorar la infraestructura de comunicación) tanto a consumidores como a generadores, para manejar, monitorear y responder a los requerimientos de energía. De esta manera, se integra de forma eficiente y económica los comportamientos y acciones de todos los recursos de generación, transmisión, distribución e instalaciones de consumidores, logrando un sistema eléctrico sostenible con bajas pérdidas y altos niveles de calidad, seguridad y confiabilidad en el suministro.

Para el alcanzar estos objetivos, a diferencia de las redes eléctricas tradicionales, es imprescindible contar con canales de comunicación bidireccionales entre el consumidor final (usuarios particulares o industriales) y las compañías eléctricas, lo que implica la integración de sistemas informáticos, tecnologías de comunicación y control, sensores, dispositivos de medición inteligentes y equipos instalados en los hogares de los clientes. Esto permite que tanto la empresa proveedora de energía como los consumidores puedan

consultar el consumo y otras variables de forma continua para lograr una operación más eficiente de la red eléctrica. De esta manera, se puede controlar con precisión la entrega y el uso de la energía eléctrica, posibilitando reducir el consumo en horarios de demanda pico a través de políticas de precios, y producir un balance del consumo de potencia, beneficiando tanto a las empresas como a los consumidores [23]. Además, este sistema donde la comunicación fluye en ambas direcciones permite, por un lado, la integración y uso eficiente de recursos naturales; y por otro, ofrecer a los clientes de forma complementaria a la propia energía eléctrica nuevos servicios como telefonía, internet y video. También posibilita cambiar el modelo de generación a un esquema bidireccional, donde los consumidores pueden ser a la vez productores de electricidad e introducir sus excedentes en la red [24, 25].

Por estos motivos, como se planteó desde el comienzo del capítulo, las redes eléctricas tienen la necesidad de transformarse dejando de ser redes centralizadas, con puntos de generación alejados de los centros de demanda, y sin conexión entre ellos, en una red más interactiva con los clientes, donde la información circule de forma bidireccional, y con puntos de generación descentralizados. Esto implica la incorporación al sistema de Recursos de Energía Distribuidos (DER, por sus siglas en inglés, *Distributed Energy Resources*), los cuales requieren de mayor capacidad de control del sistema dando lugar a la automatización de la red eléctrica mediante sistemas de comunicación utilizados en las subestaciones, que son conocidos como SAS (Sistemas de Automatización de Subestaciones).

Los SAS, inicialmente utilizaban protocolos y arquitecturas propietarias, esto dio lugar a diversos protocolos de comunicaciones, que presentaban una gran limitación por la falta de interoperabilidad entre los dispositivos de diferentes fabricantes.

Para solucionar esta problemática, en 1994, la EPRI, comienza a trabajar en el proyecto de comunicaciones de subestaciones UCA (por sus siglas en inglés, *Utility Communications Architecture*). En 1996 el Comité Técnico 57 (TC 57, por sus siglas en inglés, *Technical Commiteé 57*) de la IEC continuó con el proyecto y en el año 2004 se lanzó el estándar internacional IEC 61850. El objetivo de este estándar es lograr la interoperabilidad entre los distintos dispositivos electrónicos inteligentes (IED, por sus siglas en inglés, *Intelligent Electronic Device*) que componen un sistema de automatización

de una subestación eléctrica (SAS), pudiendo ser dichos equipos de distintos fabricantes [26].

Por otra parte la norma define a los Recursos de Energía Distribuidos (DER, por sus siglas en inglés, *Distributed Energy Resources*), como un sistema de generación distribuida en donde los usuarios también son agentes del mismo; ya que se permite la generación hasta el nivel de los consumidores. Por lo tanto los Sistemas de Gestión de Energía eléctrica (EMS, por sus siglas en inglés, *Energy Management System*), o más específicamente los Sistemas de Gestión de Distribución eléctrica (DMS, por sus siglas en inglés, *Distribution Management System*), no sólo se deben ocupar de las subestaciones principales, como ocurre en los sistemas actuales, sino también de los puntos de generación distribuida y de consumo domiciliario. Esto requiere de un sistema de comunicación que admita el acceso de usuarios con diferentes tecnologías, para incluir en el DMS a agentes ubicados en los diferentes puntos de la red [23].

Este es uno de los desafíos principales de las SG, que destaca la necesidad de la interoperabilidad de los equipamientos y dispositivos de diferentes fabricantes, con el fin de mejorar el control y la comunicación/información de los diferentes actores y equipos de la red. Esto requiere introducir nuevos sistemas de Tecnologías de Comunicación e Informática en la gestión y el control de la red de distribución; y además, potenciar la bidireccionalidad del sistema eléctrico, para que los consumidores puedan ser a la vez productores de electricidad e introducir sus excedentes de energía eléctrica a la red.

Consecuentemente con esto, es necesaria para la toma de decisiones, una red de distribución activa donde el control no esté centralizado, sino que se realice en forma distribuida a través de los nodos dispersos en el sistema. Esto genera la aparición de micro-redes, que son redes de baja tensión con fuentes de generación distribuida, dispositivos locales de almacenamiento y cargas controlables, las cuales operan conectadas a la red de distribución pero en caso de fallas son capaces de funcionar independientemente del sistema. Desde el punto de vista de la red principal una micro-red es como una única carga o generador [27].

Para la correcta coordinación y funcionamiento de este sistema inteligente, son necesarias nuevas herramientas en el área de las telecomunicaciones que se adapten a las distintas necesidades de las SG. Así, las nuevas Tecnologías de Comunicación e

Informática juegan un rol fundamental en la gestión y el control de la red [2]. Los posibles medios de comunicación para el sistema de distribución incluyen PLC, tecnologías inalámbricas y por cable dedicado. Tanto el PLC y la comunicación inalámbrica son tecnologías fundamentales para la comunicación en el nivel de distribución de las SG. Basándose en la necesidad y la disponibilidad de la tecnología, una combinación de ambos podría utilizarse para mejorar la infraestructura de comunicación [6].

2.5. Conclusiones.

Por todo lo expuesto, queda claro que la arquitectura de la red eléctrica con la tradicional, subdivisión en las cuatro áreas funcionales: generación, transporte, distribución y consumo, con un flujo de energía en un sólo sentido, queda obsoleta. Esto da lugar a la arquitectura basada en los dominios definidos por el NIST con interfaces eléctricas y de comunicaciones bidireccionales, que favorezcan a la implementación de una SG con las tecnologías de comunicaciones adecuadas que proporcionen el control y el conocimiento de toda la red en cualquier momento.

A pesar de que la generación y el transporte convencional seguirán existiendo en este nuevo modelo, una parte de la generación será remplazada por la generación distribuida, las fuentes renovables, la gestión activa de la demanda y los sistemas de almacenamiento. En este contexto, los usuarios ya no serán sólo consumidores de electricidad sino que también tendrán parte en la generación de la energía [27].

Es bastante evidente que a nivel de comunicaciones son necesarias diversas tecnologías que se adapten a las características de los tipos de redes que aparecen en los dominios de las redes eléctricas; uno de los objetivos fundamentales de este trabajo de tesis es analizar las tecnologías de comunicación inalámbricas que se pueden utilizar en los distintos dominios de las SG.

En el capítulo siguiente se analizarán detenidamente cuáles son los tipos de redes que conforman el sistema de comunicaciones de las SG y qué tecnologías inalámbricas son aplicables a cada uno en particular.

La masiva implementación de tecnologías inalámbricas en los últimos años, ha motivado el desarrollo de diversos estándares que tratan de solucionar, principalmente, el escaso y limitado espectro de frecuencia, el desvanecimiento provocado por el ambiente y

la interferencia debido a la presencia de otros usuarios, de forma tal de proporcionar una elevada velocidad de transmisión y ofrecer un servicio de calidad garantizada.

Una forma de solucionar estos problemas es mediante la utilización de sistemas radiantes adecuados a cada aplicación en particular. Es por esto que en este trabajo se presentan las principales características de las antenas y se diseña un sistema de antenas apropiado a una red eléctrica típica.

El diseño de un sistema de antenas no sólo debe satisfacer las especificaciones técnicas, sino también las restricciones en sus costos de fabricación. Un buen diseño permite el correcto funcionamiento de las tecnologías inalámbricas y consecuentemente permitirá el eficiente desempeño del sistema en donde se utilice.

En este trabajo se focalizará el análisis en las redes de comunicación inalámbricas basadas en el protocolo IP, ya que se puede lograr un sistema fiable, de alta velocidad, baja latencia, de dos vías (bidireccional). La estructura de la red eléctrica actuando en forma simultánea con esta red de comunicaciones permite la comunicación de los estados eléctricos, lo que posibilita tomar decisiones de acuerdo a datos actuales y efectuar algún tipo acción oportuna. La incorporación de estas tecnologías también permite a las empresas proveedoras del servicio poder reducir aún más los gastos de funcionamiento debido a la auto-recuperación, las posibles medidas preventivas, la disminución de la generación a gran escala, etcétera.

III. CAPÍTULO 3: TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN.

Las nuevas tecnologías de comunicación e informática juegan un rol fundamental en la gestión y el control de las SG [2]. Dentro del abanico de tecnologías disponibles, se consideran principalmente las tecnologías inalámbricas, ya que son de aplicación en los diferentes ambientes de las SG, incluyendo plantas de generación, sistemas de transmisión, subestaciones, sistemas de distribución, y las comunicaciones locales de los clientes [22]. El NIST ha definido 18 planes prioritarios de acción, entre los cuales se encuentra el plan número 2 referido a las comunicaciones inalámbricas para las SG, este grupo de trabajo encargado de la interoperabilidad de las SG (SGIP, por sus siglas en inglés, *Smart Grid Interoperability Panel*) tiene como responsabilidad definir cuáles son los estándares adecuados, basados en los ya existentes y priorizando el desarrollo de nuevas normativas.

La elección de la tecnología de comunicación apropiada, debe hacerse teniendo en cuenta que cada dominio posee diferentes tipos de redes, dentro de las cuales existen varias opciones de comunicación. Por lo tanto, es necesario analizar los requerimientos técnicos de cada dominio, con el fin de seleccionar cuál es la tecnología que más se adapta a la necesidad del mismo y que permita que la generación, distribución y consumo de energía se gestionen a través de una misma red de datos, donde, las diferentes aplicaciones puedan coexistir, con diferentes niveles de prioridad. Por ejemplo, los datos de medición pueden recibir menor prioridad que las notificaciones de fallas. La capacidad de controlar y gestionar activamente el tráfico permite a las empresas de energía hacer frente a las múltiples aplicaciones que buscan optimizar las operaciones del sistema [28].

Para determinar las tecnologías de comunicación adecuadas a cada segmento de las SG, al comienzo de este capítulo se efectúa un análisis de los tipos de redes que conforman una SG, posteriormente se presentan las tecnología de comunicaciones basadas en estándares de comunicaciones inalámbricas como por ejemplo: IEEE 802.11-Wi-Fi, IEEE 802.15.1-Bluetooth, IEEE 802.15.4-ZigBee, IEEE 802.16-WiMAX, que son apropiados para cubrir las necesidades de comunicaciones en diferentes ambientes de las SG. Finalmente se analizan sus posibles aplicaciones en los diferentes dominios de SG, mediante la evaluación de las fortalezas, debilidades, capacidades y limitaciones, con el objetivo de vislumbrar cuál o cuáles son las tecnologías óptimas que pueden utilizarse en cada dominio.

Una vez definidas las tecnologías de comunicación inalámbrica utilizadas en SG, en el siguiente capítulo se presenta un análisis de los sistemas de antenas que pueden utilizarse en cada implementación, para lograr el óptimo funcionamiento de la tecnología.

3.1. Tipos de redes en SG.

A nivel de comunicación las SG requieren de varios tipos de redes. Como puede apreciarse en la Figura III-1, las SG son divididas en tres segmentos: Red de Área Doméstica (HAN, por sus siglas en inglés, *Home Area Network*), Rede de Área de Barrio (NAN, por sus siglas en inglés, *Neighborhood Area Network*), y Red de Área Amplia (WAN, por sus siglas en inglés, *Wide Area Network*) [29]. En las HAN se establece la comunicación entre los electrodomésticos y dispositivos del hogar con el medidor inteligente del lugar en cuestión. En las NAN las comunicaciones se efectúan entre las empresas proveedoras y los medidores inteligentes, varias NAN pueden ser agrupadas bajo las denominadas Redes de Área de Campo (FAN, por sus siglas en inglés, *Field Area Network*). Por último las WAN son el *backhaul* de comunicaciones de las SG, ya que son responsables de la conectividad nivel de distribución, transmisión o generación [30, 31]. Un *backhaul* se define como la conexión entre equipamiento de telecomunicaciones que permite interconectar redes utilizando diferentes tipos de tecnologías alámbricas o inalámbricas.

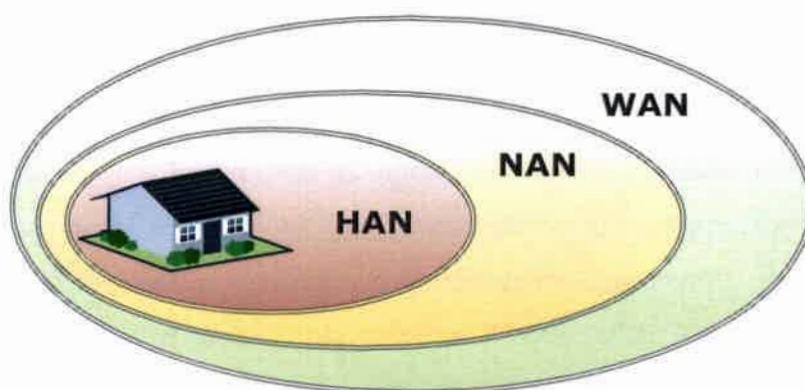


Figura III-1: Los tres segmentos de SG.

Como se puede observar en la Figura III-2, en el dominio de los consumidores, además de la mencionada HAN, aparecen la Red de Área de Edificio (BAN, por sus siglas en inglés, *Building Area Network*) y la Red de Área Industrial (IAN, por sus siglas en

inglés, *Industrial Area Network*), cuya denominación depende del lugar en el que se implementen. En general, los tres tipos de redes son abarcados por la denominación HAN. Estas redes son las encargadas de gestionar todos los dispositivos inteligentes presentes en la vivienda, edificio o empresa, como contadores, termostatos, electrodomésticos o vehículos eléctricos, mediante una Infraestructura de Medición Avanzada (AMI, por sus siglas en inglés, *Advanced Metering Infrastructure*).

En el dominio de distribución es posible la creación de micro-redes, para lo cual es necesario que una NAN o una FAN sea combinada con una WAN encargada de recopilar la información provista por: las micro-redes, las Unidades de Medidas Fasoriales (PMUs, por sus siglas en inglés, *Phasor Measurement Units*) y los dispositivos de medida dispersos por la red, para posteriormente establecer la comunicación con los centros de control, que en algunos casos pueden estar a cientos de kilómetros.

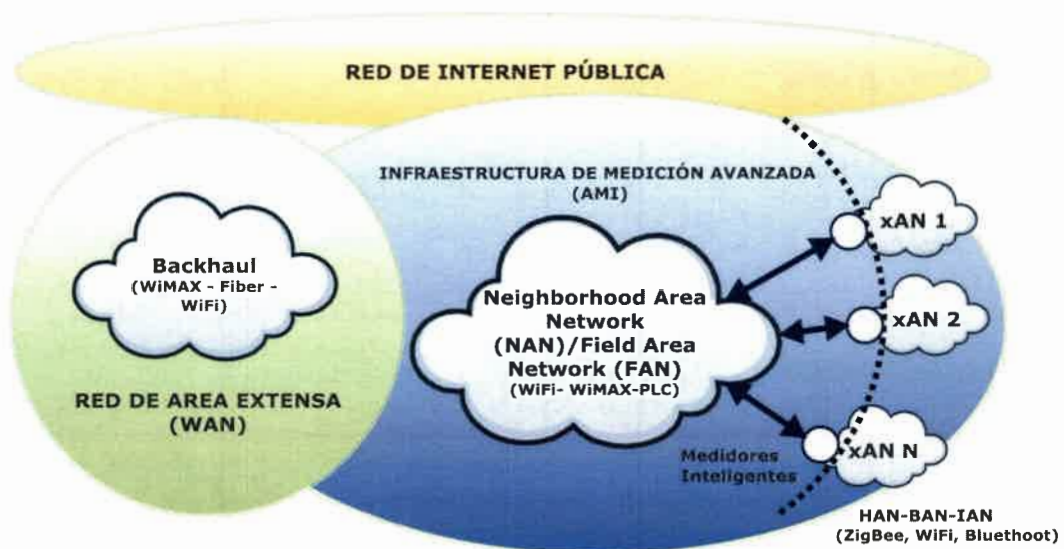


Figura III-2: Tipos de redes en las SG.

En cada segmento de las SG se utilizan diversas tecnologías de comunicación que pueden ser alámbricas o inalámbricas. En este trabajo, como ya se mencionó, se focalizará el análisis en las comunicaciones inalámbricas (*wireless*). En primera instancia, se presentará individualmente cada tecnología con el fin de conocer sus principales características de funcionamiento. Posteriormente, se analizarán las posibilidades de implementación, en cada uno de los segmentos de las SG, se realizará una comparación entre las diversas opciones y se seleccionará la aplicación óptima para cada caso.

3.2. Tecnologías de comunicación inalámbricas.

Las tecnologías inalámbricas son fundamentales en las aplicaciones de SG, ya que permiten un flujo de comunicaciones bidireccional, de alto rendimiento y de buena calidad en toda la red, que es lo que requieren actualmente las SG. Además, poseen la ventaja de ser fáciles y rápidas de implementar y a un bajo costo de instalación, proporcionando amplias áreas de cobertura y movilidad. Los principales desafíos a los que se enfrentan estas tecnologías para ser implementadas en las redes eléctricas, son el desarrollo de protocolos interoperables y la identificación de la infraestructura más adecuada en cada dominio del modelo conceptual de SG. Teniendo en cuenta estos desafíos y la gran variedad de opciones de comunicación inalámbrica que pueden ser implementadas, se presenta a continuación un análisis de cada tecnología con el fin de conocer sus principales características de funcionamiento y, posteriormente, describir cuáles son las posibles implementaciones en cada dominio de las SG.

Las diversas tecnologías que se presentan se basan en los estándares correspondientes al Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica (IEEE, por sus siglas en inglés, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), conocidas como Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi, y WiMAX.

3.2.1 Bluetooth.

En las Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN, por sus siglas en inglés, *Wireless Personal Area Networks*) se encuentran implementaciones de la tecnología de Bluetooth, que está basada en el estándar IEEE 802.15.1-2002 (actualizado por el IEEE 802.15.1-2005) que tiene el objetivo de especificar el acceso inalámbrico en las redes de área personal (PAN), mediante la definición de los dos niveles inferiores del modelo OSI: el nivel físico (PHY) (capa física) y nivel de control de acceso al medio (MAC) (capa de enlace). También especifica que el rango de frecuencia de operación en la banda de 2,4 GHz está entre 2,4 y 2,48 GHz con una velocidad de transmisión de 1 Mb/s (*Basic Data Rate*) y 2 ó 3 Mb/s (*Enhanced Basic Data Rate*)[32].

Estas redes tienen la característica de transmitir información entre un grupo de dispositivos a distancias relativamente cortas, pero con la ventaja de no requerir ninguna infraestructura, ya que permiten la configuración de redes *ad hoc* de bajo consumo. Emplea

FHSS (por sus siglas en inglés, *Frequency Hop Spread Spectrum*) y provee conexiones punto a punto o punto multipunto, utilizando un esquema TDD (por sus siglas en inglés, *Time-Division Duplex*).

Como las comunicaciones se establecen por radiofrecuencia, no es necesario que los dispositivos se encuentren alineados, como es en el caso de los dispositivos infrarrojos, e incluso, dependiendo de la potencia de transmisión, pueden encontrarse en diferentes habitaciones. Según la potencia máxima permitida, se define tres clases de dispositivos, compatibles entre sí, los cuales tendrán obviamente diferentes rangos de cobertura en función de la potencia. En la tabla siguiente se observan las tres clases de dispositivos:

Tabla III-1: Clases de dispositivos Bluetooth en función de su potencia de transmisión.

Clase	Potencia máxima	Rango aproximado
1	100mW	100m
2	2,5mW	25m
3	1mW	1m

Por otra parte, se encuentran dispositivos Bluetooth clasificados según su ancho de banda, lo que va modificando la versión de los mismos como puede verse a continuación:

Tabla III-2: Dispositivos Bluetooth en función de su ancho de banda.

Versión	Ancho de Banda
1.2	1Mbps
2.0	3Mbps
UBW	53-480Mbps

Las tablas anteriores denotan que una de las principales características de Bluetooth es que permite comunicaciones inalámbricas a través de conexiones de corta distancia y de alta velocidad.

3.2.2 ZigBee.

En las redes inalámbricas de área personal también se encuentran implementaciones de la tecnología ZigBee, que se basa en estándar IEEE 802.15.4-2003 (actualizado por el IEEE 802.15.4-2007), que especifica el acceso inalámbrico en las redes de área personal (PAN) mediante la definición de los dos niveles inferiores del modelo OSI: el nivel físico (PHY) y nivel de control de acceso al medio (MAC). Se especifica que las frecuencias de

operación son en las bandas de 902-928 MHz y 2,4 GHz, y la velocidad de transmisión de datos está entre 20 Kbps y 250 Kbps [33].

El estándar trabaja sobre las bandas ISM de uso no regulado de 2,4 GHz, en la que se definen hasta 16 canales en el rango con anchos de banda de 5 MHz. Utiliza modulación QPSK (por sus siglas en inglés, *Quadrature Phase-Shift Keying*), que transmite dos bits por símbolo, lo cual permite alcanzar tasas de transmisión de hasta 250 Kbps con alcances aproximados a los 75 metros. Permite maximizar la vida útil de las baterías por su bajo consumo.

3.2.3 Wi-Fi.

Las redes inalámbricas de área local (WLAN, por sus siglas en inglés, *Wireless Local Area Networks*) son definidas mediante el estándar IEEE 802.11, publicado en el año 1997 con el objetivo de definir el acceso inalámbrico a las redes de área local (LAN). El estándar define los dos niveles inferiores del modelo OSI: el nivel físico (PHY) y nivel de control de acceso al medio (MAC) [34].

Las WLAN se encuentran principalmente implementadas por tecnologías basadas en Wi-Fi, una marca de la Wi-Fi Alliance (que inicialmente era conocida como WECA: por sus siglas en inglés, *Wireless Ethernet Compatibility Alliance*), organización comercial que prueba y certifica que los equipos cumplan los estándares del IEEE 802.11 relacionados a redes inalámbricas de área local, cuyo objetivo es fomentar más fácilmente la implementación de la tecnología inalámbrica y asegurar la compatibilidad entre los equipos de WLAN.

En la familia de estándares IEEE 802.11x, se encuentran las diferentes versiones que han sido denominadas 802.11a, 802.11b, 802.11g y la más reciente especificación que es la 802.11n. Inicialmente, se utilizaron para brindar la conectividad inalámbrica en espacios físicos de tamaño reducido en el ámbito de las LAN, como por ejemplo: viviendas, oficinas, empresas, etcétera. Actualmente y como consecuencia de los últimos avances, las implementaciones de Wi-Fi han mejorado su desempeño ya que poseen mayor velocidad de transmisión y se están utilizando en otros ámbitos, como por ejemplo, el caso de las ciudades que brindan el servicio de Internet Wi-Fi.

A continuación, se resumen las características principales de cada denominación del estándar de las WLAN.

802.11a:

Es la especificación referida a WN que operan en el rango de frecuencia de los 5 GHz y alcanza velocidades de hasta 54 Mbps y soporta hasta 64 usuarios por punto de acceso.

Las principales ventajas son su velocidad, y la ausencia de interferencias en la frecuencia de trabajo. Las desventajas son la incompatibilidad con los estándares 802.11b y 802.11g, la no incorporación de calidad de servicio (QoS, por sus siglas en inglés, *Quality of Service*), la no disponibilidad de esta frecuencia en Europa y la parcial disponibilidad en Japón.

802.11b:

Es la especificación referida a WN que operan en el rango de frecuencia de los 2,4 GHz y alcanza velocidades de hasta 11 Mbps soportando hasta 32 usuarios por punto de acceso.

Al igual que el 802.11a, no incorpora QoS, y además la principal desventaja está dada por las interferencias producidas en la banda de frecuencia de trabajo por la masificación de equipos y tecnologías que la utilizan. Sin embargo, tuvo rápida incorporación por parte de los usuarios, dada por el bajo costo de sus dispositivos y la gratuidad de la banda que utiliza.

802.11g:

Es la especificación referida a WN que operan en el rango de frecuencia de los 2,4 GHz y alcanza velocidades de hasta 54 Mbps. Es compatible con el estándar 802.11b y posee las mismas características, con la ventaja de poseer mayor velocidad. Es la unión de los estándares 802.11 a y b, con la única diferencia que el 802.11a opera en la banda de los 5 GHz, mientras que los otros dos operan en la de los 2,4 GHz.

802.11n:

Es especificación referida a WN que utilizan simultáneamente las dos bandas de frecuencia, 2,4 GHz y 5 GHz, es una modificación al estándar IEEE 802.11-2007 que incrementa la velocidad máxima de transmisión, pasando de 54 Mbps (en 802.11b y 802.11g) a un máximo teórico de 600 Mbps, esto mejora significativamente el desempeño

de las redes Wi-Fi. Estas mejoras están relacionadas con la incorporación de sistemas de comunicación con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO, por sus siglas en inglés, *Multiple-Input Multiple-Output*) y la tecnología de unión de interfaces de red (*Channel Bonding*), propias del nuevo estándar.

Los sistemas MIMO poseen arreglos de antenas tanto en el lado transmisor como en el lado receptor, esto implica un mejor aprovechamiento en el desempeño del sistema, ya que mediante los arreglos se pueden combinar señales muestreadas espacialmente en ambos extremos del enlace de radio mejorando la calidad de la comunicación.

Esta tecnología, permite mejorar la recepción de las señales en las comunicaciones inalámbricas; ya que entre otros aspectos se aprovecha la recepción de señales por multicaminos, que son señales que se reflejan y llegan al receptor un tiempo después de la llegada de la señal de línea de vista (LoS, por sus siglas en inglés, *line of sight*). En cambio, en una red no basada en MIMO, como son las redes 802.11a/b/g, las señales recibidas por multicaminos son percibidas como interferencia degradando la habilidad del receptor para recuperar el mensaje.

Otras de las ventajas de los sistemas MIMO, están dadas por la implementación de las tecnologías de Multiplexado de División Espacial (SDM) y la de unión de interfaces de red o *Channel Bonding* (CB). SDM multiplexa espacialmente múltiples flujos de datos independientes, esto permite transmitir varios flujos de datos por las distintas antenas transmisoras, produciéndose una considerable ganancia en la capacidad del sistema mientras se emplea el mismo ancho de banda. Cada flujo espacial requiere una antena tanto en el transmisor como el receptor. CB utiliza dos bandas adyacentes de 20 MHz cada una (por esto también es conocido como 40 MHz), esto le permite poder transmitir datos simultáneamente utilizando dos canales separados que no se solapan, incrementando la cantidad de datos que pueden ser transmitidos ya que duplica la velocidad de la capa física disponible en un solo canal de 20 MHz [35].

Otra de las ventajas está dada por la concentración de la energía irradiada por el arreglo en una dirección deseada, por ejemplo mediante el uso de *beamforming*, que son técnicas de procesamiento de señales utilizadas para controlar el patrón de radiación de las antenas, con el fin de concentrar su energía en una dirección particular. En recepción, esta técnica se utiliza para incrementar la sensibilidad en la dirección de la señal deseada y

disminuir la sensibilidad en las restantes direcciones, reduciendo así interferencias y ruidos. En transmisión, se emplea para configurar el patrón de radiación de la antena. Cambiando la forma del haz, se puede aumentar la directividad de la antena en una determinada dirección, y minimizar la ganancia de la antena para el resto de direcciones.

Uno de los factores que posibilitó la incorporación masiva de Wi-Fi es la compatibilidad entre las distintas versiones de 802.11x, así los productos de la especificación b o g, son compatibles con los productos del estándar 802.11n que elevan el límite teórico hasta los 600 Mbps.

3.2.4 WiMAX.

Interoperabilidad mundial para acceso por microondas (WiMAX, por sus siglas en inglés, *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) es una tecnología de banda ancha inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.16, para redes de comunicación inalámbrica de área metropolitana (WMAN, por sus siglas en inglés, *Wireless Metropolitan Area Networks*). Dicho estándar especifica las primeras dos capas del modelo OSI, la capa física (PHY) y la capa de enlace o acceso al medio (MAC), permitiendo independencia de las capas superiores[36].

A pesar de que fue pensado para redes WMAN, el constante desarrollo de esta tecnología ha logrado que actualmente también sea implementada en Redes Inalámbricas de Área Amplia (WWAN, por sus siglas en inglés, *Wireless Wide Area Networks*), un ejemplo concreto es en el caso de las SG, donde WiMAX es implementado como *backhaul* dentro de la WAN.

Originalmente fue concebido como un estándar para el acceso inalámbrico fijo con bandas de ondas milimétricas (11-60 GHz), sin embargo se ha concentrado cada vez más en la prestación de movilidad, convirtiéndose en una competencia a la tercera y cuarta generación (3G y 4G) de sistemas celulares [37].

WiMAX surgió en 2001, inicialmente abarcaba aplicaciones LoS y operaba en las bandas de frecuencia licenciadas de 10 y 66 GHz y con tasas de 70 Mbps. Esta norma, basada en una sola portadora de modulación tuvo poco impacto. Uno de los principales problema fue que la operación en el rango superior a los 10 GHz requiere línea de vista entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx), de modo que no sólo la estación base (BS), sino

también las antenas del equipo del usuario tiene que estar situado al aire libre, y con buena altura. Por esta razón, se desarrollaron estándares para la operación entre 2 y 11 GHz. En este rango, no es necesario LoS, sin embargo, aparece la necesidad de hacer frente a la dispersión del retardo, por lo que la multiplexación por división ortogonal de frecuencia (OFDM, por sus siglas en inglés, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) es adoptada como una alternativa a la modulación de portadora única. Por otro lado, en las frecuencias más bajas menos ancho de banda está disponible, en consecuencia la eficiencia espectral se convirtió en otro problema, el cual fue resuelto mediante la implementación de sistemas MIMO. El nuevo estándar que se consolida en 2004 (IEEE 802.16-2004, también conocido como WiMAX fijo o IEEE 802.16d) posee mejoras en Radio Frecuencias (RF) y mediante técnicas avanzadas de antenas se alcanzan velocidades de 75Mbps para un ancho de banda de 20 MHz en buenas condiciones de propagación [37].

Esta tecnología está diseñada para proporcionar un acceso inalámbrico a las redes con altas velocidades de transferencia de datos, permitiendo un área de cobertura amplia (con un alcance de más de 50 km en condiciones óptimas). Se presenta también como una solución para conectar a entornos rurales donde las redes de cable resultan demasiado costosas o muy complejas.

Actualmente el estándar posee dos variantes:

- El 802.16d, especifica el acceso fijo mediante un enlace de radio establecido entre la estación base y un equipo del usuario. Con velocidades teóricas máximas de 70 Mbps con un ancho de banda de 20 MHz compartidos entre todos los usuarios conectados a la estación base. Utilizando como sistema de modulación OFDM.
- El 802.16e, especifica el acceso móvil que permite a los usuarios su desplazamiento como en el caso de las tecnologías GSM/UMTS. Con velocidades teóricas máximas de 75 Mbps, con modulación SOFDMA (por sus siglas en inglés, *Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), que permite hasta 2048 subportadoras con canales de ancho variable de entre 1,25 y 20 MHz. La norma, también conocida como WiMAX móvil, se aprobó en 2005.

Otra mejora, que proporciona la posibilidad de movilidad completa, así como una mayor tasa de datos y eficiencias espectrales, es desarrollada por el grupo IEEE 802.16m, conocido como WiMAX 2.

La última versión del estándar pertenece a la revisión de la norma IEEE 802.16 aprobada en el año 2012, incluyendo al 802.16h, 802.16j y 802.16m.

3.3. Implementación de tecnologías de comunicación inalámbricas en SG.

Siguiendo uno de los objetivos de este trabajo de seleccionar las tecnologías inalámbricas óptimas para cada dominio y segmento de las SG a continuación se presenta un análisis concreto de cada caso. La elección depende de las características y de las circunstancias de cada segmento de las SG.

3.3.1. Redes en el dominio de los Clientes. Home Area Network (HAN).

Como ya se había mencionado la denominación HAN abarca a las BANs, y a las IANs. Este tipo de redes son de corto alcance y permiten la conexión de electrodomésticos y otros dispositivos con el medidor inteligente perteneciente al lugar en cuestión, ya sea una vivienda, empresa o edificio. El lugar natural para centrar la información es en el medidor de electricidad de cada residencia, que tiene las funciones de recopilar y enviar la información de los sensores de los dispositivos del hogar, para un mejor control del consumo de energía, actuando como un puente a la red de área de barrio, NAN.

Una aplicación típica que se encuentra en las HAN de SG, es el uso de termostatos que permiten, por parte de los clientes, la programación de la calefacción, la ventilación, el aire acondicionado, etcétera, en función del precio de la energía. Por lo tanto, el consumo puede ser medido y controlado a través de una red de termostatos. La implementación de estas redes junto con la AMI, permite a los consumidores monitorear el uso de la energía de forma tal de poder decidir utilizarla en función de su precio, logrando así disminuir la demanda en las horas picos. Por otro lado, las compañías pueden acceder a las cargas, lo que les permitirá gestionar de forma más eficiente la demanda. El hecho de que las empresas proveedoras del servicio de energía, por un lado, posean una vía de comunicación directa con los consumidores y por otro, tengan información de lo que está ocurriendo en la red (como por ejemplo sobreproducción no prevista de energía renovable, problemas de fiabilidad de transitorios de la red, etcétera) permite informar las variaciones instantáneas en el precio de la energía, lo que significa un importante cambio en el modelo tradicional

de consumo de energía. Incluso las políticas de promoción de un menor consumo en horas pico, también favorecen a este cambio.

Con este flujo de información bidireccional entre las compañías eléctricas y los clientes, los contadores, termostatos y demás electrodomésticos que ocasionan el mayor consumo de energía, pueden adaptar automáticamente su patrón de funcionamiento en función de una planificación previamente diseñada por el usuario o por la propia compañía. Como consecuencia, es posible obtener una curva de cargas más plana por la disminución de la demanda en los horarios picos, lo que implica que la generación es más continua a lo largo del día [3].

Las tecnologías inalámbricas más relevantes para implantar a nivel de HAN en una SG se conocen como: Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee.

3.3.2. Wi-Fi en HAN.

Wi-Fi es la tecnología que podría adoptarse más rápidamente en las HAN, ya que actualmente está presente en un gran número de hogares (millones) debido a su fácil instalación y a que brinda la posibilidad de estar conectado en cualquier punto del hogar sin la necesidad de utilizar cables.

Por otra parte, esta tecnología viene incluida en varios equipos y dispositivos electrónicos, portátiles y fijos, que son de uso cotidiano por parte de los consumidores. En la Figura III-3 se puede observar cómo sería una vivienda tipo de SG con una amplia variedad de dispositivos que ya poseen esta tecnología incorporada. El hecho de estar masivamente instalado en muchos hogares edificios y empresas, facilita la implementación de SG por parte de los proveedores de energía, ya que puede conectar su red de comunicaciones con la red Wi-Fi interna del cliente y de esta manera lograr gestionar de manera eficiente la demanda máxima. Basado en este escenario, se puede pensar que Wi-Fi es una de las tecnologías que, además de permitir el fácil acceso a Internet, se presenta como opción principal para ser utilizada en el segmento de las HAN de SG para la gestión del consumo de energía de los consumidores [30].

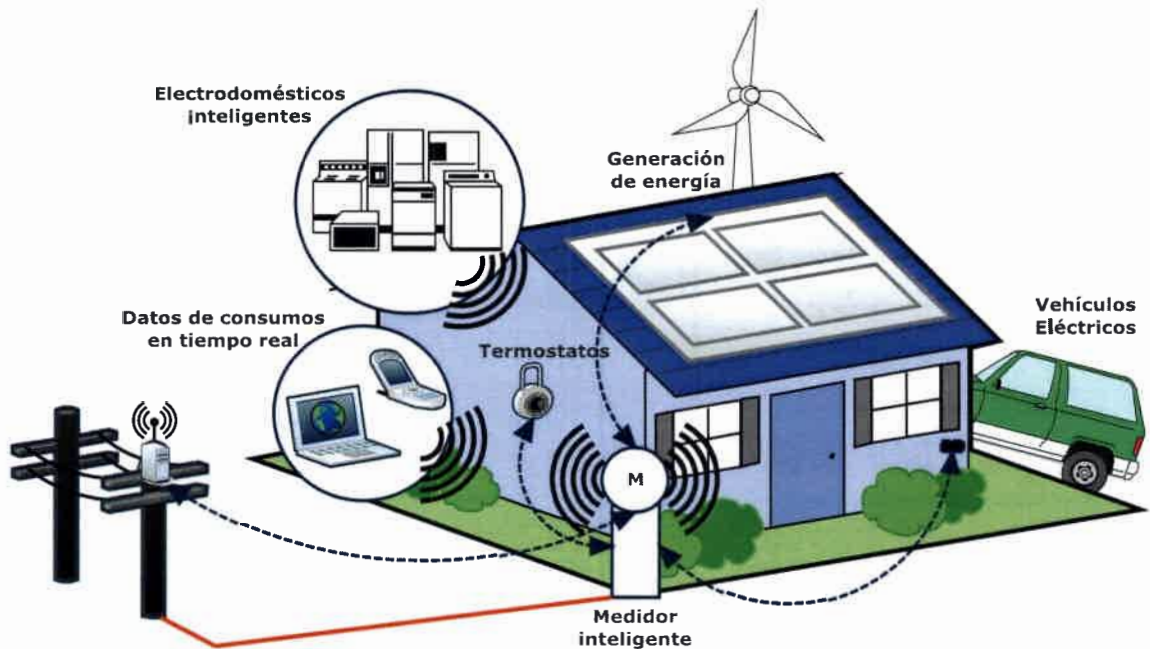


Figura III-3: The Home Area Network.

Una desventaja que presenta es que posee consumos muy superiores comparados con otras tecnologías como Bluetooth o ZigBee, esto está estrechamente relacionado con el área de cobertura, ya que estas últimas tecnologías tienen menor alcance con respecto a Wi-Fi. No obstante, según el programa de certificación Wi-Fi Alliance se están efectuando continuas innovaciones en la administración de energía, logrando grandes mejoras al respecto [30].

3.3.3. Bluetooth en HAN.

Bluetooth es otra de las posibles tecnologías a implementar en las redes de área personal inalámbricas (WPAN) o sea que es aplicable al segmento de las HAN de SG.

Esta tecnología, a diferencia Wi-Fi posee la característica de no requerir prácticamente ninguna infraestructura para conformar una red que permita la transferencia de información en distancias cortas a un grupo privado de dispositivos ya que permite establecer redes *ad hoc* sencillas de bajo costo y bajo consumo.

Dado que las comunicaciones se realizan por radiofrecuencia utilizando modulación espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS), proporciona una HAN segura, confiable y robusta.

Las principales desventajas de ésta tecnología son: por un lado, el limitado radio de cobertura, esto se incrementa en una HAN debido a la cantidad de paredes y obstáculos que puede haber entre los dispositivos. Por otro lado, posee un limitado número de dispositivos que pueden conformar una red.

3.3.4. ZigBee en HAN.

ZigBee también es una especificación que se utiliza en las WPAN. Es un estándar de nivel de aplicación para las HAN de SG, que es utilizado por dispositivos de bajo costo y bajo consumo de energía. Esta tecnología permite comunicaciones seguras de corto alcance, con baja tasa de transmisión de datos y poco consumo energético.

Entre las principales ventajas que presenta esta tecnología, se encuentra la posibilidad de configurar las redes con una topología mallada, lo que permite que la comunicación entre todos los nodos se mantenga, aún en el caso de que un nodo del camino falle. Por otro lado, la implementación de este tipo de redes coincide con el espíritu de las SG que es proporcionar comunicaciones que utilicen muy poca cantidad de energía y que permita integrar una diversidad de dispositivos, incluidos los diversos tipos de alarmas del hogar, termostatos de comunicación programables, dispositivos de control de carga (por ejemplo, bombas de piscinas, calentadores de agua, etcétera), plug-in de vehículos eléctricos y dispositivos de domótica, entre otros.

Desde el punto de vista de las empresas de energía ZigBee es capaz de ofrecer una tecnología basada en estándares abiertos para la implementación segura y rentable de la HAN. Desde la perspectiva del cliente, pueden elegir dispositivos interoperables de distintos fabricantes y monitorear el consumo de energía en tiempo real, lo que proporcionará información precisa para ayudar a reducir el consumo de energía.

ZigBee ofrece una tecnología global de estándar abierto y facilita las especificaciones de diversas normas. Además favorece a la implementación de medidores inteligentes avanzados que permiten la gestión de la demanda de las SG [38].

Las principales desventajas de esta tecnología es la baja inserción que tiene en el mercado y la baja tasa de transferencia, comparado con WiFi y Bluetooth.

3.4. Redes en el dominio de Distribución: NAN, WAN.

La AMI facilita las comunicaciones entre los consumidores finales y el *backhaul* de la red. Las NAN tienen la importante función de dar soporte a la AMI, permitiendo interconectar las instalaciones del consumidor con la WAN de la empresa de servicios públicos.

3.4.1. Wi-Fi en NAN.

Las NAN dentro de las SG son las encargadas de recopilar la información de los hogares de un barrio y de conectarse a una red WAN. Como se muestra en la Figura III-4 los extremos de la NAN pueden ser los medidores montados en el exterior de casas unifamiliares o de viviendas múltiples, o alternativamente pueden ser puntos que sean interfaz entre la NAN y las instalaciones del cliente. El alcance de transmisión es de al menos 500 metros y potencialmente puede incorporar método multi-salto mediante una topología mallada [30].

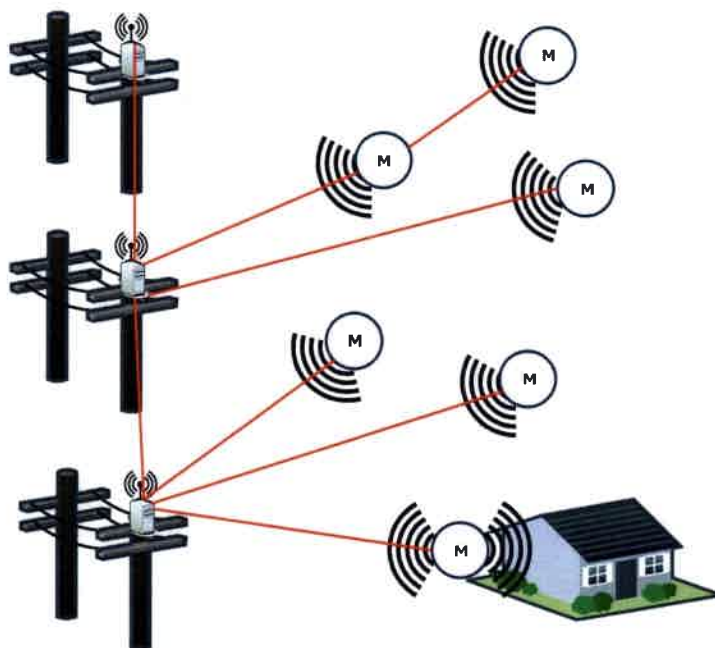


Figura III-4: NAN implementada con Wi-Fi.

Wi-Fi puede soportar la AMI, ya que es capaz de proporcionar la conectividad de un medidor inteligente a un dispositivo central encargado de recoger datos en cada barrio.

Basado en una NAN-IP, y también mediante el uso de antenas de alta ganancia y directividad, puede proporcionar enlaces con puntos de acceso superiores a un kilómetro.

Las investigaciones realizadas por los grupos de trabajo del IEEE que aportan mejoras a las NAN, por un lado están plasmadas en el estándar 802.11s, en función de definir un protocolo de sistemas mallados; y por otro, en el estándar IEEE 802.11ah que tiene como fin estandarizar el funcionamiento en las bandas 902-928 MHz para extender el rango de cobertura a más de 1 km [30].

3.4.2. Wi-Fi en WAN.

Las WAN, en comparación con las NAN, poseen un rango de cobertura mucho mayor y normalmente integran varias NAN.

Las WAN en SG tienen como función tomar los datos de las NAN y transmitirlos por la red de distribución, lo que implica que estas redes requieran grandes capacidades de transmisión. Este *backhaul* puede ser implementado mediante configuraciones de enlaces inalámbricos punto a punto y/o punto a multipunto, los cuales pueden cubrir desde metros hasta varios kilómetros.

En varias ciudades del mundo existen grandes despliegues de redes Wi-Fi, que no sólo se utilizan para el acceso a las NAN, sino que también forman parte del *backhaul* de la WAN del sistema, dejando evidencia clara de su aplicabilidad en este tipo de redes de mayor rango de cobertura y demostrando que la gestión de una SG puede ser implementada mediante la tecnología Wi-Fi en el marco de la comunicación de las WAN.

Esto también se sustenta en las implementaciones de redes Wi-Fi como por ejemplo en distintas localidades de nuestro país que se ofrece el servicio de acceso a la red de Internet. Otro ejemplo se da en EE UU donde se han implementado modernas redes Wi-Fi en la frecuencia de 4,9 GHz para redes de acceso de seguridad pública que también se basan en la tecnología 802.11. Analizando estos escenarios, los cuales tienen un rango de cobertura similar al de una WAN, se puede pensar que Wi-Fi es una tecnología apropiada para satisfacer las necesidades de las WAN en SG.

El hecho de que existan, a nivel mundial, ciudades que ofrecen grandes áreas de cobertura del servicio de Wi-Fi, aumenta las oportunidades para que estos sistemas se

conecten a las aplicaciones SG y esta implementación pueda ser incorporada en el futuro estándar de comunicación de las SG.

Una ventaja de Wi-Fi en las WAN, o en cualquier tipo de red de SG, es el uso de espectro en la banda de frecuencias no licenciada. Esto es práctico para la implementación de una gran red privada inalámbrica. Las redes de datos celulares pueden prestar el servicio requerido, pero habitualmente son propiedad de las grandes compañías que pagan por las licencias de frecuencia [30].

Sin embargo, la desventaja al respecto del uso de esta banda de frecuencia es la cantidad de equipos que actualmente la utilizan, lo que implica que pueden encontrarse zonas con gran cantidad de interferencias.

3.4.3. WiMAX en NAN y en WAN.

En el título de esta sección se descarta la aplicación de WiMAX en las PAN, esto es debido a que esta tecnología está pensada para proveer servicios con mayores rangos de cobertura como en el caso de las NAN o WAN.

WiMAX es una tecnología que combina alto rendimiento con baja latencia y amplia cobertura, esto le permite atender e integrar todas las aplicaciones de las SG, pudiendo actuar como un *backhaul* seguro y fiable que proporcione la conectividad de otras redes inalámbricas como ZigBee o Wi-Fi, utilizadas en los diferentes segmentos de las SG.

Actualmente, las redes de energía están desplegadas en amplias zonas de coberturas debido a que tienen que llegar a todas las empresas, industrias y hogares ubicados tanto en zonas urbanas como remotas. En las zonas rurales (remotas), la cobertura y la disponibilidad de *backhaul* son los principales problemas; en cambio, en ambientes urbanos, los problemas más importantes son la disponibilidad del espectro, la reducción de la interferencia, y la necesidad de mayor capacidad. En este aspecto WiMAX, cuenta con la tecnología MIMO, lo que le permite operar en ambos ambientes, proporcionando amplia cobertura en las zonas rurales y alta capacidad en las urbanas.

Las ventajas de utilizar WiMAX sobre la NAN y la WAN de SG están dadas por el hecho de que es una tecnología apta para redes de banda ancha, por lo tanto poseen un enlace ascendente y descendente de alto rendimiento y baja latencia (<100 ms ida y vuelta). Esto permite soportar aplicaciones en tiempo real con un flujo de la información

bidireccional, ambas cuestiones claves en SG. Por otro lado, al ser una tecnología basada en IP, WiMAX soporta QoS y herramientas de gestión de tráfico que le permiten llevar a cabo políticas de priorización. De forma tal que, las empresas de energía pueden gestionar activamente el ancho de banda y optimizar el uso de los recursos de la red, por ejemplo los datos de medición de consumo pueden recibir una prioridad menor que las comunicaciones de emergencia o de fallas de la red. Otro aspecto importante es que WiMAX proporciona comunicaciones seguras ya que soporta varios estándares de seguridad.

Si bien WiMAX puede estar presente tanto en las NAN como en las WAN, la elección de esta tecnología va a estar sujeta al tipo de implementación de SG, el cual depende de los requerimientos de la empresa de energía, de la infraestructura existente, de la disponibilidad de conectividad por cable, y del área de cobertura de la red. Según estos parámetros WiMAX puede implementarse como:

- *Backhaul*: en este caso transporta los datos desde y hacia los dispositivos terminales de las NAN que están conectados con los medidores inteligentes de los clientes y con las estaciones base WiMAX pertenecientes a la WAN.
- Conectividad de última milla: en este caso la conexión es directamente con los medidores inteligentes de los usuarios. Se utiliza en aplicaciones que requieren un considerable ancho de banda de subida. Inicialmente, esto se da en zonas rurales o áreas de baja densidad, donde las estaciones base WiMAX pueden cubrir amplias zonas.

3.5. Selección de tecnologías.

En primera instancia se tomó como criterio para la selección de la tecnología inalámbrica óptima, no optar por estándares propietarios debido a que se restringe el número de desarrolladores y podría elevar los costos de forma innecesaria; lo cual no es la política de implementación de SG, al contrario, se busca la estandarización del sistema. Por este motivo en los puntos anteriores se presentaron y analizaron tecnologías estandarizadas por el IEEE. Se resumen en la siguiente tabla las velocidades alcanzadas por cada tecnología, el área de cobertura y en qué sector de las SG pueden ser utilizadas:

Tabla III-3: Tecnologías Inalámbricas en SG.

<i>Tecnología Inalámbrica</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Cobertura</i>	<i>Aplicación en SG.</i>
WiMAX (IEEE 802.16)	75 Mbps	50 Km	NAN / WAN
Wi-Fi (IEEE 802.11)	b/g: 54 Mbps n: 600 Mbps	100 m 500 m	HAN / NAN / WAN
ZigBee (IEEE 802.15.4)	20-250 Kbps	10-75 m	HAN
Bluetooth (IEEE 802.15.1)	1-3 Mbps	100 m	HAN

Del análisis de esta tabla, que resume las características que se describieron en los puntos anteriores sobre las tecnologías inalámbricas estandarizadas por el IEEE, se puede obtener rápidamente una idea de cuáles son las tecnologías adecuadas para cada segmento de las SG. No obstante, es importante resaltar que no existe una única solución, debido a que unas serán mejor que otras en función de las características de la red.

En síntesis, dada la amplia difusión de Wi-Fi en el entorno doméstico, ya que ha sido implementado en millones de hogares, edificios y empresas, esta tecnología es una de las primeras opciones a tener en cuenta para integrar la SG a nivel de HAN. Es evidente que se presenta con mayor ventaja debido a que es rentable, escalable y permite llegar puntos lejanos. Algunos autores afirman que Wi-Fi debe ser la principal tecnología implementada en las HAN de SG ya sea como una red separada o integrada en las redes domésticas existentes. Sin embargo, en las implementaciones de SG que se están llevando a cabo, se ha optado por la tecnología ZigBee debido a que posibilita el control de sensores y la lectura inalámbrica de los contadores de forma eficiente, con bajo costo y bajo consumo, lo cual encaja perfectamente con la filosofía de eficiencia energética de SG. A pesar de tener poco alcance, y velocidad, son suficientes para los requisitos de una HAN.

ZigBee también resultó mejor frente a Bluetooth, que a pesar de ser una tecnología más madura y con mayores tasas de transferencia y alcances, es descartada por el hecho de que sólo puede direccionar 8 dispositivos [39].

Por otro lado, en el segmento de las NAN y las WAN, la elección de la tecnología apropiada está entre Wi-Fi y WiMAX. Una de las principales diferencias entre estas tecnologías es que WiMAX es un sistema de largo alcance, mientras que Wi-Fi es propio de redes de área local, lo que lleva a elegir la tecnología según el lugar en el que se implemente la red. En las redes WAN, a pesar de los avances que se están dando en el

estándar 802.11n, la tecnología adoptada es WiMAX justamente por el amplio rango de cobertura. En tanto en las NAN la elección puede ser por una u otra, la decisión va a estar dada en función de los costos y del nivel de interferencias. Aquí cabe mencionar que, si bien los equipos de Wi-Fi son más económicos, estos utilizan la banda de frecuencias sin licencia, mientras que WiMAX opera en bandas espectrales con y sin licencia.

Una situación particular se da en el caso de zonas remotas, como las rurales, donde la solución es utilizar WiMAX como tecnología de comunicación entre la WAN y el medidor inteligente, en estos casos la NAN no forma parte de la estructura de la red.

3.6. Conclusiones.

Las SG cambiarán totalmente la forma de operar de las empresas de energía, poniendo a las telecomunicaciones en el centro de sus actividades. Las tecnologías inalámbricas serán una parte clave de la infraestructura que permitirán la comunicación bidireccional entre los usuarios finales y las empresas de energía.

La elección de una u otra tecnología de comunicación inalámbrica para cada segmento de las SG depende de diversos factores y de cada situación particular. En cada caso se deben analizar los costos, la estructura de la red, la infraestructura ya disponible y las condiciones geográficas. No es óptimo adoptar una única tecnología, ya que las SG poseen diferentes ambientes con diferentes características, por lo tanto se necesitan varias opciones que permitan la flexibilidad necesaria para cualquier situación. En este sentido, se puede pensar que la red de comunicaciones de SG será una red heterogénea basada en diversos estándares.

Las tecnologías inalámbricas seleccionadas durante este capítulo, se adaptan perfectamente a las necesidades de cada segmento de las SG. La implementación de ZigBee en las HAN implica bajos costos y bajos consumos de energía, mientras que Wi-Fi o WiMAX son adecuados para proveer la cobertura en las NAN ya que ambos utilizan técnicas MIMO que mejoran sus características de cobertura. Finalmente, en las WAN la implementación de un *backhaul* WiMAX proporciona baja latencia, alto rendimiento, soporte para los protocolos de seguridad más avanzados, y las herramientas de gestión del tráfico, incluyendo QoS. Estas características permiten la ejecución de una amplia gama de

aplicaciones en la red y el control total sobre la asignación de los recursos a través de diferentes niveles de prioridad.

La implementación de estas tecnologías ha incrementado el desarrollo de diversos estándares y ha generado la necesidad de diseñar nuevas antenas que se adapten a éstos. Tal es el caso de Wi-Fi y WiMAX que sus última modificaciones incorporan la utilización de sistemas MIMO, los cuales requieren de nuevos diseños de arreglos de antenas para su funcionamiento. Por otro lado, la tecnología ZigBee también posee diferentes diseños de antenas según la aplicación. Los nuevos diseños de sistemas radiantes no sólo deben satisfacer las especificaciones técnicas, sino que también las restricciones en sus costos de fabricación. Un buen diseño es el que permite el correcto funcionamiento de las tecnologías inalámbricas y consecuentemente permitirá el eficiente desempeño de las SG. Debido a esto, en el capítulo siguiente se analizan los sistemas radiantes (antenas o arreglos de antenas) que pueden utilizarse en los sistemas de comunicaciones inalámbricas, se presentan las características básicas de las antenas y posteriormente se trata el tema de arreglos de antenas con el fin de diseñar el sistema radiante para ser utilizado en el dominio de distribución de un sistema eléctrico real.

IV. CAPÍTULO 4: ANTENAS EN SG.

El desarrollo de aplicaciones basadas en sistemas de telecomunicaciones inalámbricas se ha incrementado considerablemente en los últimos años, provocando un gran impacto en nuevas redes y en las ya existentes. En estos escenarios surge la necesidad de proyectar redes que den soporte adecuado a las nuevas necesidades, permitiendo una optimización de los sistemas y mejorando sus rendimientos con menores costos.

En el capítulo anterior se analizaron los estándares de tecnologías de comunicación inalámbrica que pueden aplicarse a los diferentes ambientes de las SG. Estos utilizan el espacio libre como medio de transmisión, a través de ondas electromagnéticas; por lo tanto, requieren de sistemas de antenas para la transmisión y recepción de la información.

En este capítulo se analizan las características de los enlaces inalámbricos y de los sistemas radiantes con el objetivo de identificar los criterios de selección de antenas de acuerdo con las principales aplicaciones. Posteriormente, se presentan los tipos de sistemas radiantes que pueden utilizarse en las tecnologías de SG haciendo hincapié en sistemas conformados por arreglos de antenas, y en los métodos de síntesis. Seguido a esto, se presentan los métodos numéricos utilizados en el análisis de campos electromagnéticos mediante software. Todo este análisis será la base para la implementación de un sistema de comunicación inalámbrico en una red de energía eléctrica real y su proyección a un sistema SG que se presentará en el siguiente capítulo.

4.1 Radioenlaces en SG.

La interconexión entre terminales de telecomunicación efectuada por ondas radioeléctricas por medio de sistemas de antenas, recibe el nombre de radioenlace. En el caso de SG se utilizan radioenlaces terrestres, que se definen como sistemas de comunicaciones entre puntos fijos situados sobre la superficie terrestre, que proporcionan una capacidad de información, con características de calidad y disponibilidad determinadas.

Para un correcto funcionamiento del sistema de microondas es necesario analizar el trayecto que sigue la onda de radio entre los puntos del enlace y considerar los obstáculos (por construcciones o vegetación), accidentes geográficos, la curvatura de la Tierra, las pérdidas en el espacio libre y las zonas de Fresnel.

Pérdidas en el espacio libre:

A medida que las ondas de radio se alejan del transmisor se produce un fenómeno de dispersión que reduce la densidad de potencia. Esto es conocido como las pérdidas en el espacio libre (L_{fs}) y son una medida de la dispersión de la potencia en el espacio sin obstáculos [40].

El cálculo de L_{fs} se obtiene de la ecuación de transmisión de Friis en el espacio libre, la cual para determinar la potencia recibida en un radioenlace, considera las antenas transmisora y receptora y el espacio que las separa de la siguiente forma [40].

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{G_T G_R \lambda^2}{16\pi^2 r^2} \quad (4.1)$$

Dónde:

P_R = potencia recibida en W.

P_T = potencia transmitida en W.

G_T = ganancia de la antena transmisora.

G_R = ganancia de la antena receptora.

λ = longitud de onda, en m.

r = distancia entre antenas en m.

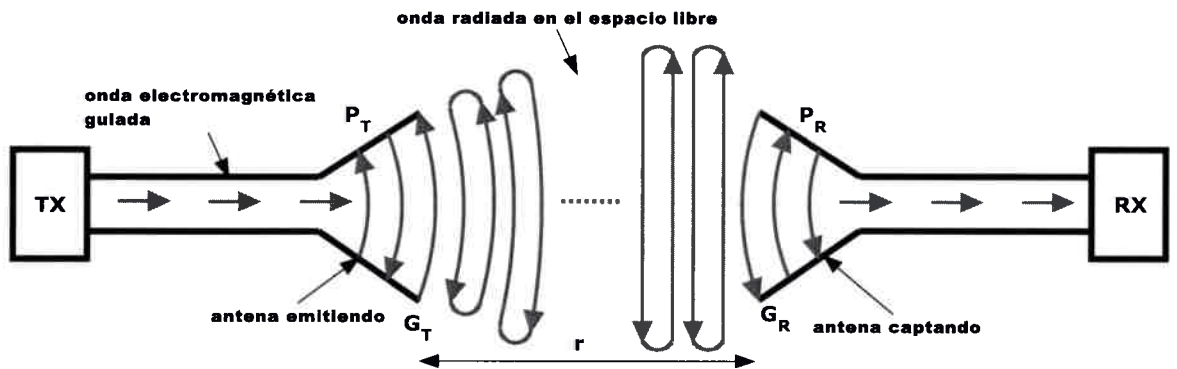


Figura IV-1: Sistema de comunicación inalámbrico.

La ecuación de Friis en términos de pérdida en el espacio libre (L_{fs}) o pérdida de trayectoria, y expresada en dB con el signo cambiado (ya que es una atenuación) es:

$$L_{fs}(\text{dB}) = -10 \log \frac{P_R}{P_T} \quad (4.2)$$

O bien:

$$L_{fs}(\text{dB}) = 92,4 + 20 \log r (\text{km}) + 20 \log f (\text{GHz}) - G_T(\text{dBi}) - G_R(\text{dBi}) \quad (4.3)$$

Esta ecuación es también conocida como ecuación del enlace. La misma es utilizada por una gran variedad de programas que agilizan los cálculos y permiten visualizar gráficamente los enlaces analizados. En este trabajo se utiliza el software *Radio Mobile*, [41] que permite, entre otras cosas, obtener el perfil del terreno entre cada punto, la altura en que debe ubicarse cada antena y las zonas de Fresnel.

4.2 Sistemas radiantes en SG.

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos, como el de la Figura IV-1, poseen tanto en el transmisor como en el receptor un elemento radiante conocido como antena. El IEEE define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas [42]. Si bien sus formas son muy variadas, todas ellas tienen en común el ser una región de transición entre una zona donde existe una onda electromagnética guiada y una onda en el espacio libre (Figura IV-1), a la que además puede asignar un cierto carácter direccional, que dependerá de la aplicación concreta.

En definitiva, una antena tiene la capacidad de transmitir y recibir, esto impone para cada aplicación una serie de condiciones particulares sobre:

- Direccionalidad.
- La frecuencia o banda de frecuencias de trabajo.
- Los niveles de potencia que debe soportar.
- La eficiencia de la antena.
- La polarización.
- El ancho de banda.
- El coeficiente de reflexión.
- La Relación de Onda Estacionaria, (ROE).
- La impedancia.

Esta diversidad de situaciones da origen a un gran número de tipos de antenas [43]. Es por esto que cuando se va a transmitir información de un lugar a otro mediante ondas electromagnéticas, surgen diferentes alternativas. Por lo tanto, para seleccionar el sistema

correcto en cada caso, hay que tener en cuenta varios aspectos fundamentales, como la distancia entre los puntos, si existe línea de vista, la frecuencia en la que se va a transmitir, la potencia del transmisor, la polarización, los costos, la topología de la red, las características del medio, etcétera.

Por otro lado, debido a la variedad de aplicaciones de comunicación inalámbrica, es importante analizar y diferenciar los diversos tipos de sistemas de antenas que pueden utilizarse en cada caso, de forma tal de poder identificar cuál es el apropiado para optimizar la comunicación por el medio inalámbrico.

En una SG las antenas cumplen la función de comunicar los datos entre los dispositivos que pertenecen a los diversos segmentos de la red. En la Figura IV-2 se observa que la utilización de antenas permite la comunicación inalámbrica entre: los dispositivos del hogar con el medidor inteligente en el entorno de la HAN; el medidor inteligente y las estaciones base de la NAN, entre las estaciones base de la NAN, entre las estaciones base de la NAN con las de la WAN y también con las centrales de generación, etcétera.

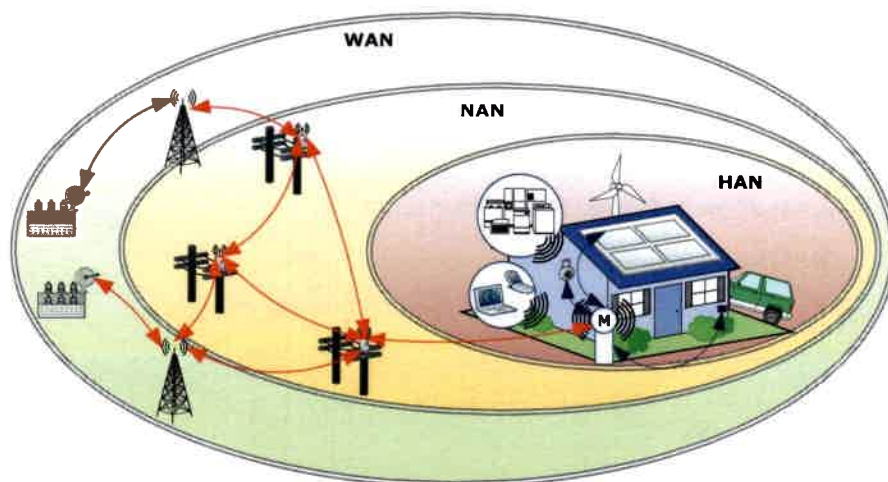


Figura IV-2: Comunicaciones inalámbricas en los segmentos de SG.

Como ya se mencionó, las comunicaciones inalámbricas actualmente son utilizadas en una gran variedad de aplicaciones y sistemas, entre los cuales están presentes las SG. Esto ha incrementado notablemente el desarrollo de diversos estándares y ha generado la necesidad de diseñar nuevas antenas que se adapten a estos estándares y a los servicios de comunicaciones inalámbricas. Puntualmente, el crecimiento de la tecnología inalámbrica en

las comunicaciones de SG ha hecho necesario el desarrollo de nuevos sistemas de antenas que se adapten a las necesidades de los diversos escenarios que conforman las redes eléctricas. Los nuevos diseños de antenas, además de las restricciones en sus costos de fabricación, también deben satisfacer nuevas especificaciones técnicas impuestas por cada aplicación en particular. En SG las características de las antenas van a depender del entorno en que se encuentren inmersas; por ejemplo, en la referencia [44] se presenta una antena compacta y de amplio ancho de banda para ser utilizada en los medidores inteligentes de las HAN de SG. Sus funciones son, por un lado, establecer los enlaces para recolectar los datos de los dispositivos inteligentes del hogar; y por otro, comunicar la información recopilada con las unidades de recolección de datos, ubicadas en las NAN.

En estos sistemas de comunicación la antena es un elemento fundamental, ya que influye directamente en el rendimiento y el tamaño del equipamiento utilizado. Para una implementación eficaz, los medidores inteligentes deben estar provistos de una antena de reducidas dimensiones y que posea un robusto ancho de banda para la conexión entre los dispositivos de la HAN y la NAN.

En la referencia [45], se presenta el diseño de una antena de doble banda para la optimización de la comunicación de ciertas partes de la red de comunicación de SG. Esta antena presenta un diseño de bajo peso, reducido tamaño, alto rendimiento y bajo costo. Opera en bandas de WLAN centradas a 2,45 y 5.2GHz.

En la referencia [46], se presenta un nuevo diseño de antena que puede ser utilizado eficientemente como *backhaul* y *backbone* de transporte para diversas aplicaciones en SG. El diseño de la antena consta de un parche microstrip coplanar para aplicaciones de ultra banda ancha (UWB), diseñado sobre un sustrato dieléctrico y alimentados por una guía de ondas coplanar. Posee un diseño compacto, opera en tres bandas de frecuencia y con gran ancho de banda. La estructura de antena diseñada con 5,68 dBi de ganancia es plana, sencilla y compacta, por lo que puede ser fácilmente integrada en sistemas de comunicación inalámbrica e integrados con circuitos de microondas con bajo costo de fabricación.

En la referencia [47], se diseña y mide un arreglo de antenas para ser utilizado en las redes de potencia. En este trabajo se diseña y desarrolla un arreglo de antenas con polarización circular, que opera en 5,8 GHz. Además posee alta ganancia, en el orden de

los 13.9 dBi, y mediante modulación espacial obtiene las características de lóbulos principales y laterales deseadas.

Los trabajos anteriores hacen referencia a la utilización de antenas en SG. En las HAN las antenas están ubicadas en el medidor inteligente, por lo tanto el objetivo es obtener un sistema radiante de reducidas dimensiones. En el caso de la NAN y la WAN, el sistema de antenas utilizado va a depender principalmente de la topología de la red, ya que la ubicación de la estación base (nodo concentrador) con respecto a los consumidores finales (hogares, empresas, industrias, etcétera) va a ser fundamental para determinar si es necesario un sistema de antenas que provea una cobertura omnidireccional, sectorial o en múltiples sectores. Para cada uno de estos tipos de coberturas, en las estaciones bases, se utilizan arreglos de antenas que permiten dar las características de radiación deseadas al sistema.

En SG, al igual que en el caso de sistemas de celulares y de acceso a internet de banda ancha, es necesario hacer previamente un análisis de la topología de la red y en función de esto determinar cuál es sistema de antenas óptimo a utilizar. En este trabajo se focaliza el análisis y la aplicación de un arreglo de antenas en un sistema de SG.

En los puntos siguientes se explica el funcionamiento básico de una antena y se resumen las principales características que deben tenerse en cuenta en la etapa de diseño. Al final del capítulo se presentan los conceptos relacionados con la teoría de arreglos de antenas.

4.3 Definición y funcionamiento de las antenas.

La antena, como se vio en la Figura IV-1, es el elemento que permite la transición entre una onda guiada y una onda radiada en el espacio, emitiendo o captando ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz (300.000 km/s).

A diferencia de las líneas de transmisión, que son diseñadas para minimizar la radiación, en el diseño de cualquier tipo de antena se busca que la energía radiada sea lo mayor posible, para esto es necesario conocer cómo funciona y cuáles son los principales parámetros que las caracterizan.

Para analizar el funcionamiento de las antenas, se considera el caso típico de un sistema de transmisión, compuesto por una fuente de tensión conectada a una línea de dos

conductores, que están conectados a una antena. La aplicación de un voltaje a través de la línea de transmisión, crea un campo eléctrico entre los conductores (Figura IV-1).

La señal emitida por una fuente generadora viaja a través de una línea, la cual tiene la función de guiar los campos eléctricos y magnéticos hasta la antena. Posteriormente, la onda electromagnética se propaga en el espacio libre a una velocidad de propagación constante de aproximadamente 3×10^8 m/s, la cual es conocida como la velocidad de la luz, “ c ”, y está relacionada con la longitud de onda y la frecuencia por la siguiente ecuación:

$$c = \lambda f = 3 * 10^8 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (4.3)$$

La longitud de la onda es inversamente proporcional a la frecuencia, y por lo tanto es un dato fundamental para el diseño y el dimensionamiento de cualquier tipo de antena.

La antena también se puede definir como un adaptador entre el medio guiado y el espacio libre. Por lo tanto puede haber efectos de reflexión ocasionados por la desadaptación entre la impedancia característica de la línea de transmisión (Z_0) y la impedancia de antena (Z_A).

Estos efectos de reflexión por la desadaptación se representan a través del coeficiente de reflexión (Γ_L), el cual se define como la relación entre la tensión reflejada y la incidente, y puede expresarse en módulo y ángulo de la siguiente manera:

$$\Gamma_L = \frac{V_{reflejada}}{V_{incidente}} = \rho_L \angle \theta \quad (4.4)$$

Con el objetivo de evitar reflexión de ondas estacionarias se busca el acoplamiento entre las impedancias de los elementos del sistema, de esta manera se logra la máxima transferencia de energía. Cuando el sistema está desadaptado una parte de la energía es absorbida por la antena y la otra parte es reflejada en la línea de transmisión, de esta manera en la línea están presentes dos ondas electromagnéticas viajando en direcciones opuestas. Esto genera un patrón de interferencia definido como onda estacionaria, el cual distorsiona la señal emitida en la onda electromagnética, y produce pérdidas en los diversos componentes del sistema línea-antena. La relación de onda estacionaria comúnmente denominada ROE o bien SWR (por sus siglas en inglés, *Stationary Wave Ratio*) es una medida del grado de adaptación entre la antena y la impedancia del sistema conectado a

ella. Se define como la relación entre el voltaje máximo y el voltaje mínimo, o bien, entre la corriente máxima y la corriente mínima de una onda estacionaria en una línea de transmisión. A su vez, también puede expresarse en función del coeficiente de reflexión de la siguiente forma:

$$\text{ROE} = \frac{V_{\text{máximo}}}{V_{\text{mínimo}}} = \frac{1+|\Gamma_L|}{1-|\Gamma_L|} = \frac{1+\rho_L}{1-\rho_L} \quad (4.5)$$

El valor obtenido de este cociente es una medida de la desadaptación que existe entre la impedancia característica de la línea de transmisión (Z_0) y la impedancia de carga, que en este caso es la impedancia de la antena (Z_A).

Operando la ecuación anterior, el coeficiente de reflexión resulta:

$$|\Gamma_L| = \frac{\text{ROE}-1}{\text{ROE}+1} \quad (4.6)$$

Para explicar el principio de funcionamiento de una antena básica, y a la vez poder determinar la longitud del elemento resonante se analiza una línea en circuito abierto. En la Figura IV-3 se muestra cómo es la distribución de corriente en una línea de transmisión de dos hilos sin pérdida con una fuente que entrega una tensión variable en el tiempo de forma sinusoidal. Esto a su vez produce un campo eléctrico por la distribución de las cargas que es también sinusoidal, y los conductores se comportan como una guía de onda. Por otra parte, el movimiento de las cargas en cada conductor crea corrientes variables en el tiempo en sentidos opuestos, que generan campos magnéticos variables en el tiempo que se desplazan entre los conductores con un desfase de 90° respecto al campo eléctrico [48].

En este caso, la impedancia en la carga es infinita; ya que posee un máximo de tensión y un mínimo de corriente, y por lo tanto, la onda es reflejada en su totalidad con igual magnitud y con un cambio de 180° en la fase. Como consecuencia del avance de la onda incidente hacia la carga y del retroceso de la onda reflejada hacia el generador, se forma en cada cable un patrón de onda sinusoidal pura, denominada onda estacionaria. Si la separación entre los conductores de la línea es muy pequeña, los campos radiados por la corriente de cada alambre se cancelan entre ellos y por lo tanto, si se trata de una línea sin pérdidas, toda la energía de los campos electromagnéticos regresará a la fuente sin producirse radiación en línea de transmisión [48].

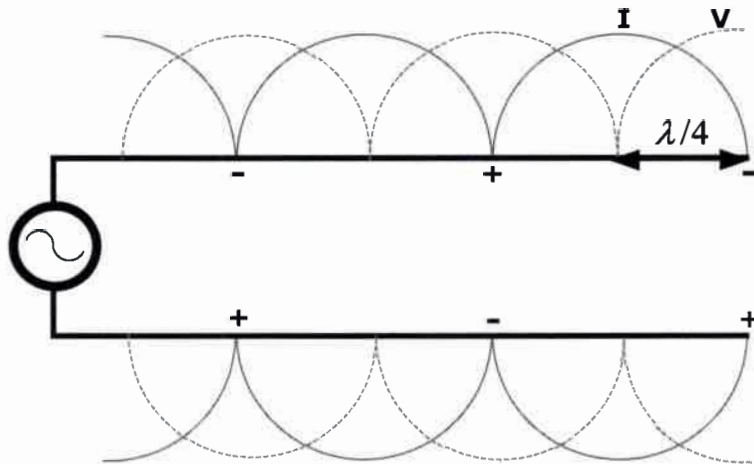


Figura IV-3: Línea de transmisión abierta y ondas estacionarias de tensión y corriente.

Si se abre la línea de transmisión a una distancia de $\lambda/4$ desde los extremos, como se muestra en la Figura IV-4, se puede considerar que la distribución de corrientes es prácticamente inalterada en cada uno de los cables. Sin embargo, la distancia entre los cables en la parte abierta de la línea ya no es pequeña como en el caso anterior y por lo tanto los campos eléctricos ya no se cancelan debido a que ya no pueden interactuar entre ellos y, consecuentemente, se produce una radiación por la línea de transmisión abierta.

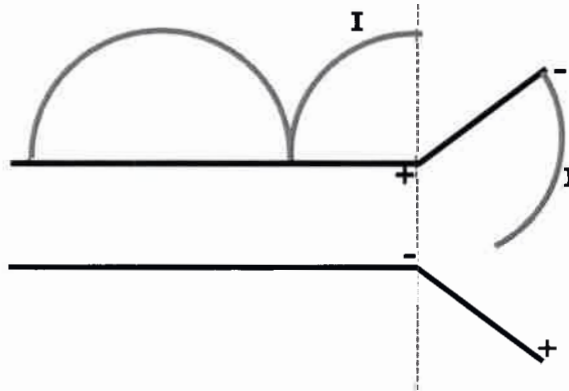


Figura IV-4: Línea de transmisión abierta.

Si ahora cada una de los conductores es doblado a una distancia de $\lambda/4$, de forma tal que se forme un ángulo de 90° respecto a la línea, como se observa en la Figura IV-5, en los extremos de cada conductor la onda de tensión es la misma, mientras que los campos eléctricos se distribuyen en forma colineal en cada uno de los nuevos segmentos. Los

campos magnéticos en estos tramos no se anulan ya que las corrientes en cada segmento tienen la misma dirección. La disposición de estos dos segmentos de $\lambda/4$ colineales recibe el nombre de dipolo de media longitud de onda o antena de Hertz, y es la geometría de la antena dipolo ampliamente utilizada. Los campos irradiados por los dos tramos se refuerzan entre sí, estos campos alineados en fase se convierten en ondas electromagnéticas que se desplazan por el dipolo y se transfieren al espacio libre [48].

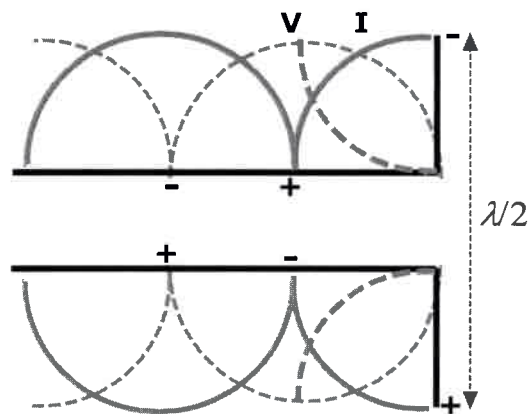


Figura IV-5: Antena dipolo de media onda a partir de un tramo de línea.

4.4 Características de las antenas.

Las antenas poseen una serie de parámetros como por ejemplo la impedancia, el diagrama de radiación, la ganancia, la polarización, el ancho de banda, etcétera, que son dependientes del tipo y forma de la antena diseñada.

Las antenas son fabricadas para ser utilizadas en cierta frecuencia o rango de frecuencias, de este parámetro se obtiene la longitud de onda que es lo que permite el diseño de la antena, influyendo directamente en el tamaño de la antena y en su aplicación.

En tecnologías como ZigBee, WiFi o WiMAX se utilizan antenas que trabajan en el rango de las microondas, si puntualmente se analizan las frecuencias de 2,4 GHz y 5 GHz, utilizando la ecuación (4.3), se obtiene que la longitud de onda para cada caso es de:

$$\lambda_{2,4} = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{2400 * 10^6} [m] = 0.125 [m] = 12,5 [cm]$$

$$\lambda_5 = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{5000 * 10^6} [m] = 0.06 [m] = 6 [cm]$$

En el caso de utilizar un dipolo como el visto en la Figura IV- 5 el tamaño del elemento activo de la antena será de media longitud de onda ($\lambda/2$), por lo tanto la longitud del dipolo será de 6.25 cm y de 3 cm respectivamente.

4.4.1 Impedancia y potencia entregada.

Se define la impedancia de una antena (Z_A) como la relación entre la tensión y la corriente en sus terminales de entrada. Esta impedancia es en general compleja y su parte real (R_A) representa la resistencia de la antena, mientras que la parte imaginaria o reactiva (X_A), representa la reactancia de la antena.

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (4-7)$$

Generalmente, la relación tensión-corriente a la entrada de la antena depende de la frecuencia, por lo tanto Z_A , R_A , y X_A dependen también de la frecuencia [43], quedando la ecuación (4-7):

$$Z_A(\omega) = R_A(\omega) + jX_A(\omega) \quad (4-8)$$

Al conectar una antena a un transmisor, con el objetivo de establecer una comunicación inalámbrica, es necesario que exista adaptación entre el equipo y la antena para que se obtenga la máxima transferencia de energía, lo que implica que se irradia la potencia máxima. Para esto es necesario que la impedancia de la antena esté acoplada (sea idéntica) a la impedancia de la línea, la cual posee la característica de ser resistiva pura. Esto está directamente relacionado con el coeficiente de reflexión definido en el 4.3 y por lo tanto otra forma de calcular este coeficiente es a través de los valores de impedancia de la línea y de la antena, como se muestra en la ecuación siguiente:

$$\Gamma_L = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (4-9)$$

Donde Z_A es la impedancia de entrada de la antena y Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión conectada a la antena.

La parte resistiva de la impedancia de entrada de la antena (R_A), está constituida por dos componentes: la resistencia de radiación (R_r), que es la resistencia que disiparía la

misma potencia que la radiada por la antena, y la resistencia de pérdidas (R_{Ω}), que es la resistencia que disiparía la misma potencia que se pierde en la antena, esta es también llamada resistencia óhmica.

$$R_A(\omega) = R_r(\omega) + R_{\Omega}(\omega) \quad (4-10)$$

A partir de estas resistencias se definen la potencia radiada y la potencia de pérdidas como:

$$P_{radiada} = |I|^2 R_r \quad (4-11)$$

$$P_{pérdidas} = |I|^2 R_{\Omega} \quad (4-12)$$

Donde I es la intensidad suministrada por el generador a la antena, y se define como:

$$|I| = \frac{|V_g|}{|Z_t|} = \frac{|V_g|}{|Z_A + Z_g|} \quad (4-13)$$

Donde V_g y Z_g son la tensión y la impedancia interna del generador. Dado que parte de la potencia entregada a una antena se pierde en la propia antena y otra parte es radiada por la misma, se define la potencia entregada a la antena como la suma de estas dos.

$$P_{entregada} = P_{radiada} + P_{pérdidas} = |I|^2 R_r + |I|^2 R_{\Omega} \quad (4-14)$$

4.4.2 Eficiencia.

La potencia radiada en relación a la potencia entregada es una medida de cuán eficiente es una antena, esto está estrechamente relacionado con la resistencia de la antena, la cual como se mencionó anteriormente está formada por dos resistencias en serie, una de valor R_r (resistencia de radiación), y otra de valor R_{Ω} (resistencia de pérdidas). Como el objetivo de una antena es radiar la mayor cantidad de potencia posible, es importante que la potencia de pérdidas sea lo menor posible, de esta forma la antena es más eficiente. Por lo tanto, la eficiencia de una antena, cuyo valor está comprendido entre 0 y 1, se define como:

$$\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{R_r}{R_r + R_{\Omega}} \quad (4-15)$$

4.4.3 Diagrama de radiación.

Las ondas electromagnéticas radiadas se componen de un campo eléctrico E (V/m) y un campo magnético H (A/m), ambos son magnitudes vectoriales. El patrón o diagrama de radiación de una antena representa la distribución espacial del campo electromagnético generado por la misma en función de la dirección angular, se define como la representación gráfica en forma cartesiana o polar (utilizando para ello coordenadas esféricas, según θ y ϕ) de la forma en que la energía electromagnética se distribuye en las distintas direcciones del espacio [48].

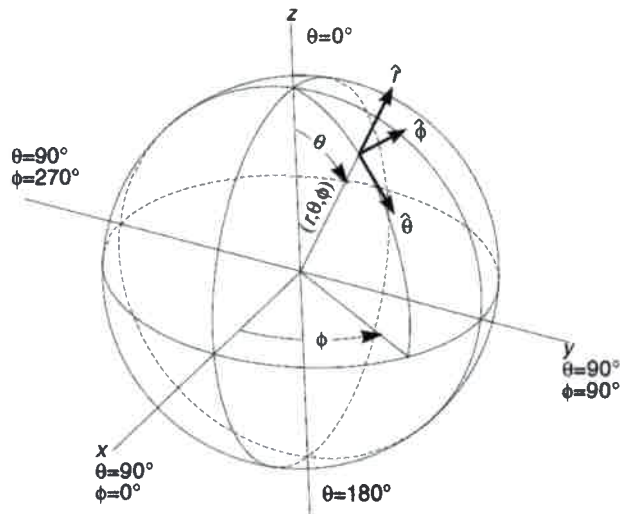


Figura IV-6: Sistema de coordenadas esférico [43].

Por lo general, se sitúa la antena en el centro de coordenadas y se miden sus características en todas las direcciones espaciales con un mismo radio. Las principales características que se pueden analizar de un diagrama de radiación son, la densidad de potencia radiada, la polarización, la directividad y la ganancia que son propiedades de la antena que se describen en los puntos siguientes.

Si bien un diagrama de radiación puede representarse en forma tridimensional o en escalas lineal o logarítmica, también es común el análisis de los cortes en los planos de ϕ constante o de θ constante. Estos cortes se pueden representar en coordenadas polares o cartesianas.

Para grandes distancias el campo magnético H es ortogonal y directamente proporcional al campo eléctrico E . Se define el plano E como el plano que forma la

dirección de máxima radiación con el campo eléctrico en dicha dirección. Del mismo modo el plano H es el plano formado por la dirección de máxima radiación y el campo magnético. La intersección de estos planos perpendiculares define la dirección de máxima radiación de la antena. Las características de radiación de una antena normalmente se analizan en estos planos, ya que por ejemplo, en el lóbulo principal del diagrama de radiación se definen los ángulos de media potencia y de máxima ganancia, los cuales son definidos más adelante.

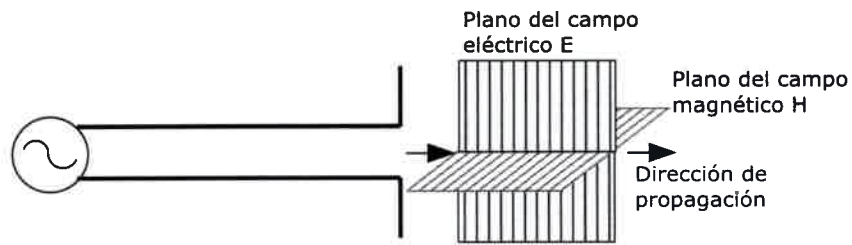


Figura IV-7: Planos H y E y dirección de propagación.

4.4.3.1. Patrones de radiación isótropos, omnidireccionales y direccionales.

Se define como radiador isótropico a una antena ideal que irradia en forma uniforme y con la misma intensidad en todas las direcciones en el espacio libre, es decir que la potencia aplicada a dicha antena se repartirá uniformemente, sin pérdidas; por lo tanto, su diagrama de radiación tiene forma de esfera como se muestra en la Figura IV-8.

Tipo de antena	Diagrama tridimensional	Diagrama Vertical o de Elevación	Diagrama Horizontal o de Azimuth
Radiador Isótropico	G=0dBi G=2,5dBd	Plano Eléctrico	Plano Magnético

Figura IV-8: Diagrama de radiación isótropico.

Se define una antena con diagrama omnidireccional, como el de la Figura IV-9, a aquella que posee un patrón con forma circular en el plano de mayor radiación, como es el caso de un dipolo de media longitud de onda ($\lambda/2$).


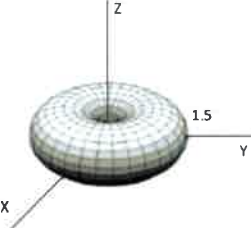
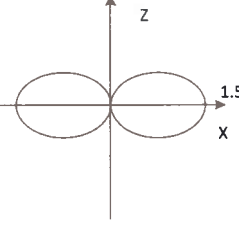
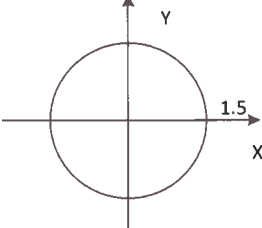
Tipo de antena	Diagrama tridimensional	Diagrama Vertical o de Elevación	Diagrama Horizontal o de Azimuth
			
Dipolo de media onda	G=2,5dBi G=0dBd	Plano Eléctrico	Plano Magnético

Figura IV-9: Diagrama de radiación omnidireccional.

Una antena direccional concentra el diagrama de radiación en una dirección, como se muestra en la Figura IV-10, de esta manera puede irradiar o recibir ondas electromagnéticas más eficientemente en algunas direcciones que en otras. Este tipo de diagrama es de gran utilidad para la configuración de los enlaces del sistema que se presenta en el capítulo siguiente. El término de direccional o directiva se aplica generalmente a una antena cuya directividad máxima es significativamente mayor que la de un dipolo de media longitud de onda.

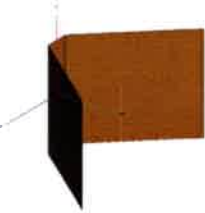
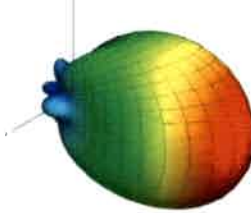
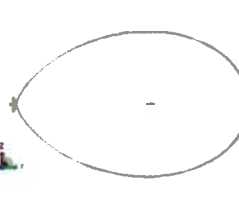
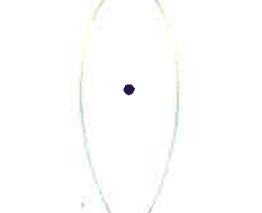
Tipo de antena	Diagrama tridimensional	Diagrama Vertical o de Elevación	Diagrama Horizontal o de Azimuth
			
Dipolo con reflector diédrico	G=12,15 dBi G=10 dBd	Plano Eléctrico	Plano Magnético

Figura IV-10: Diagrama de radiación direccional.

4.4.3.2. Ancho del haz.

Este es un parámetro característico de las antenas con diagramas directivos o direccionales, según la definición del punto anterior y la correspondiente Figura IV-11.

Aquí, la mayor parte de la potencia radiada está presente en el lóbulo principal y una menor parte está dispersa en los lóbulos laterales. Entre los lóbulos existen nulos, en los cuales la potencia radiada está en un mínimo.

El ancho de haz está dado por la separación angular entre los puntos de potencia media del lóbulo principal del patrón de radiación. El ángulo de potencia media es el punto en el cual la potencia en el lóbulo principal se reduce a la mitad desde el punto de máxima radiación, o ángulo de máxima ganancia.

Este parámetro puede obtenerse rápidamente de la observación del diagrama de radiación en decibeles (como en la Figura IV-11), ya que la mitad de la potencia se corresponde a un valor de -3dB. Por lo tanto, se localizan los puntos que representan la mitad de la potencia a ambos lados del pico radiación, y la distancia angular entre estos puntos se define como el ancho del haz. Se puede obtener tanto el ancho de haz vertical como horizontal.

Otras características que pueden observarse en un diagrama de radiación, como el de la Figura IV-11 son:

- Nulos: son los puntos en los cuales la potencia radiada está en un mínimo, en general poseen un ángulo estrecho comparado con el del haz principal. En sistemas avanzados los nulos suelen utilizarse para la supresión de señales interferentes en una dirección dada.
- Lóbulos laterales o secundarios: son los puntos en los cuales se irradia parte de la energía, por lo general representa radiación o recepción no deseada.
- Lóbulos traseros o posteriores: son los lóbulos cuya dirección es totalmente opuesta al principal.

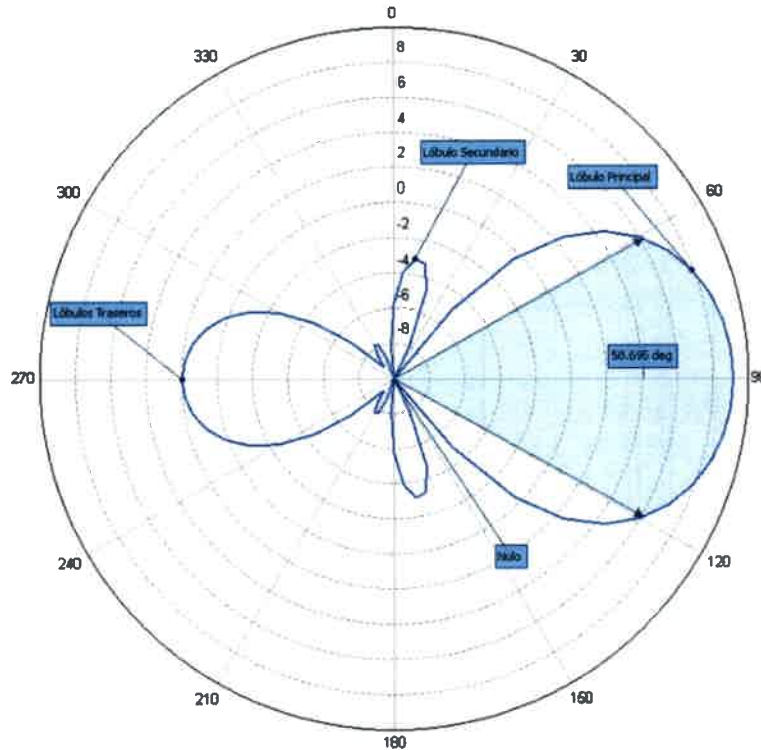


Figura IV-11: Análisis en el plano vertical de un diagrama de radiación.

4.4.3.3. Relación lóbulo principal a secundario.

La relación lóbulo principal a secundario se define como el cociente entre el valor máximo del lóbulo principal y el valor máximo del lóbulo secundario. Este parámetro es adimensional y se expresa en decibeles [dB].

4.4.3.4. Relación frente espalda.

Es la relación entre la ganancia del lóbulo principal con respecto al lóbulo de radiación hacia atrás, en general se expresa como F/B (por sus siglas en inglés, *Front-to-Back*), y está dada en decibeles de la siguiente forma:

$$F/B[dB] = 10 \log_{10} \frac{P_m}{P_{op}} \quad (4-16)$$

Dónde, P_m es la energía irradiada en la máxima en la dirección de propagación y P_{op} es la energía irradiada hacia atrás.

4.4.4 Densidad de potencia radiada.

La densidad de potencia radiada se define como la potencia por unidad de superficie en una determinada dirección. Se puede calcular a partir de los valores eficaces del producto vectorial de los campos eléctrico y magnético, a través de:

$$P(\theta, \phi) = \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (4-17)$$

4.4.5 Directividad.

La directividad es la propiedad que tiene una antena de transmitir o recibir la energía irradiada en una dirección particular. En enlaces inalámbricos con antenas directivas se utiliza esta característica para concentrar la energía radiada en una determinada dirección.

En cambio, cuando no se trata de enlaces fijos (no se puede predecir dónde van a estar las antenas) se irradia en todas las direcciones del plano horizontal y para ello se utiliza una antena omnidireccional.

Se define la directividad como la relación entre la densidad de potencia radiada, en una dirección dada (desde la antena), y la intensidad de radiación que radiaría una antena isótropa con la misma potencia [43].

$$D(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_r/4\pi r^2} \quad (4-18)$$

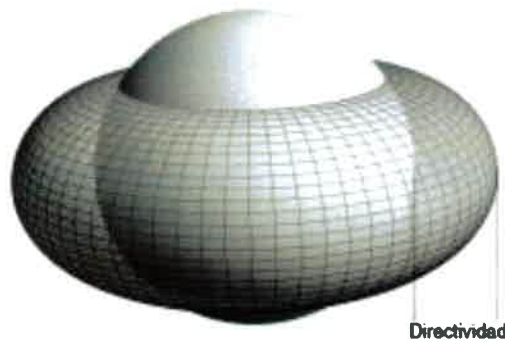


Figura IV-12: Directividad [43].

4.4.6 Ganancia.

La definición de ganancia es similar a la de directividad, sólo que en el caso de la ganancia la comparación se hace con la potencia entregada a la antena y no con la potencia radiada [43]. Por lo tanto, la ganancia de una antena es igual a:

$$G(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_{entregada}/4\pi r^2} \quad (4-19)$$

En la Figura IV-13, puede apreciarse que el punto de referencia para el cálculo de la ganancia se corresponde con los terminales de entrada a la antena mientras que para la directividad se toma como referencia a los terminales de salida.

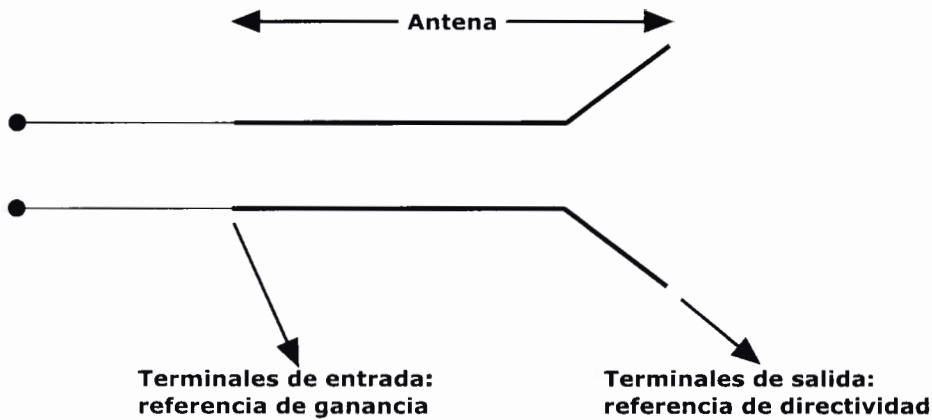


Figura IV-13: Ganancia y directividad en los terminales de la antena.

Es decir, que la diferencia entre ambos parámetros radica en las pérdidas en la antena (pérdidas óhmicas), ya que no toda la potencia entregada a la misma es radiada al espacio. Esto está directamente relacionado con la eficiencia de la antena definida anteriormente, de modo que la ganancia puede expresarse en función de la directividad de la siguiente manera:

$$G(\theta, \phi) = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} \cdot \frac{P(\theta, \phi)}{P_{radiada}/4\pi r^2} = \eta D(\theta, \phi) \quad (4-20)$$

Dado que la eficiencia es un número comprendido entre 0 y 1, la única forma de que la ganancia sea igual a la directividad se da cuando una antena no tiene pérdidas óhmicas.

Es importante destacar que la ganancia es un número adimensional, ya que se obtiene de la relación entre dos magnitudes físicas iguales (energías, potencias, tensiones, etcétera) y normalmente es expresada en decibeles si se toma como referencia la potencia radiada de una antena estándar. Las dos referencias más comunes son la antena isotrópica (en este caso se expresa en dBi) y la antena dipolo resonante de media longitud de onda en este caso se expresa en dBd).

Una antena isotrópica, a pesar de ser físicamente irrealizable, es utilizada como patrón de comparación para antenas reales, que irradian más en algunas direcciones que en otras. Esta comparación parte de la base de que la potencia total irradiada es la misma para ambas antenas, ya que la energía concentrada en una dirección implica que haya menos energía en otra dirección.

Por lo tanto, cuando la ganancia de una antena está expresada en dBi, se refiere a la cantidad de energía radiada en una dirección comparada con la energía irradiada por una antena isotrópica en la misma dirección. Matemáticamente está dada por:

$$G_{dBi} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_A}{P_i} [dBi] \quad (4-21)$$

De la misma forma, pero referido a las intensidades de campo eléctrico:

$$G_{dBi} = 20 \cdot \log_{10} \frac{E_A}{E_i} [dBi] \quad (4-22)$$

Si en cambio la ganancia está expresada en dBd, se refiere a la cantidad de energía radiada en una dirección comparada con la energía que irradia un dipolo de media onda en la misma dirección. Matemáticamente está dada por:

$$G_{dBd} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_A}{P_d} [dBd] \quad (4-23)$$

O bien, referido a las intensidades de campo eléctrico:

$$G_{dBd} = 20 \cdot \log_{10} \frac{E_A}{E_d} [dBd] \quad (4-24)$$

La ganancia de un dipolo de media longitud de onda es de 1,64 respecto a un radiador isotrópico, esto representa una ganancia de 2,15 dBi, por lo tanto tiene la

capacidad de concentrar 2,15 dB en la dirección de máxima radiación comparado con una antena isotrópica.

4.4.7 Polarización.

En cada punto del espacio del diagrama de radiación de una antena habrá un vector de campo eléctrico, función del tiempo y de la distancia con respecto a la antena. La polarización es una indicación de la orientación del vector de campo en un punto fijo del espacio al transcurrir el tiempo [43].

Normalmente la polarización se describe por una elipse. Hay dos casos especiales de la polarización elíptica: la polarización lineal y la polarización circular. En la Figura IV-14, se observa una onda polarizada linealmente:

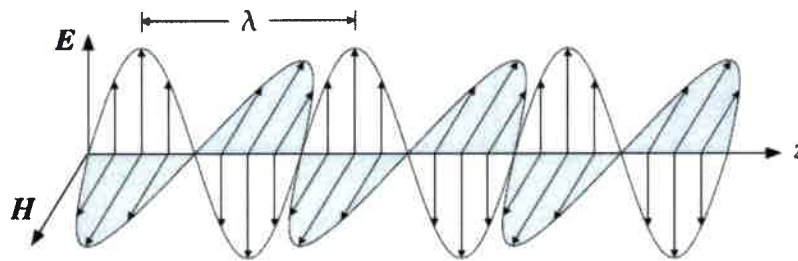


Figura IV-14: Onda linealmente polarizada [49].

En el caso de polarización lineal, el vector del campo eléctrico se mantiene en el mismo plano del eje de la antena durante todo el tiempo. La antena puede estar en posición vertical, horizontal o en algún ángulo intermedio entre los dos.

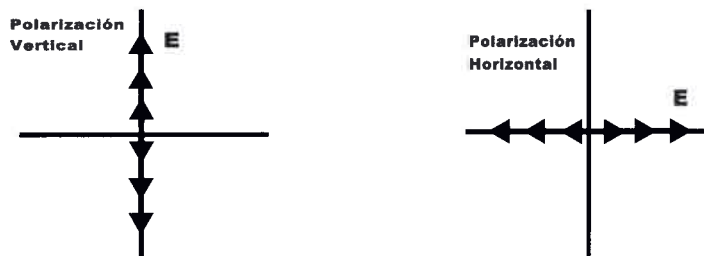


Figura IV-15: Polarización lineal.

En el caso de polarización circular el vector del campo eléctrico rota con un movimiento circular en la dirección de la propagación. Dependiendo del sentido de giro del campo eléctrico la rotación puede ser hacia la derecha o hacia la izquierda.

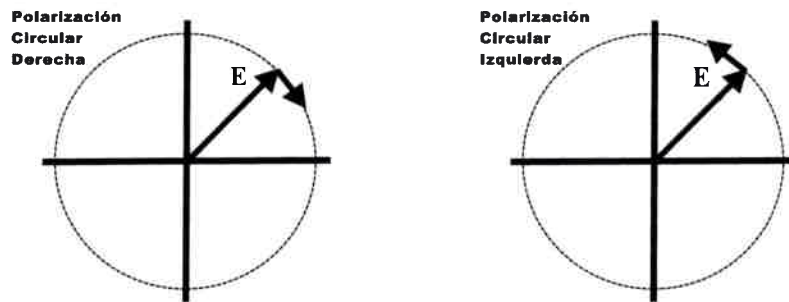


Figura IV-16: Polarización circular.

4.4.8 Ancho de banda.

El ancho de banda es un rango de frecuencias determinado y limitado donde una antena funciona satisfactoriamente bajo ciertas especificaciones. En este rango el comportamiento de la antena es similar, es decir, para un parámetro dado, como por ejemplo el coeficiente de reflexión o el ROE, la antena no sobrepasa un límite prefijado. Un cálculo directo se obtiene de:

$$BW = f_{max} - f_{min} \quad (4-25)$$

Donde f_{max} y f_{min} son las frecuencias que delimitan el rango de frecuencias donde se cumplen las especificaciones, otra forma de calcular el ancho de banda en función de la frecuencia central (f_0) es:

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \quad (4-26)$$

Este parámetro también suele ser presentado como en términos de porcentaje como sigue:

$$BW[\%] = 100 \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \quad (3-27)$$

En la siguiente figura puede observarse el concepto de ancho de banda en relación al ROE.

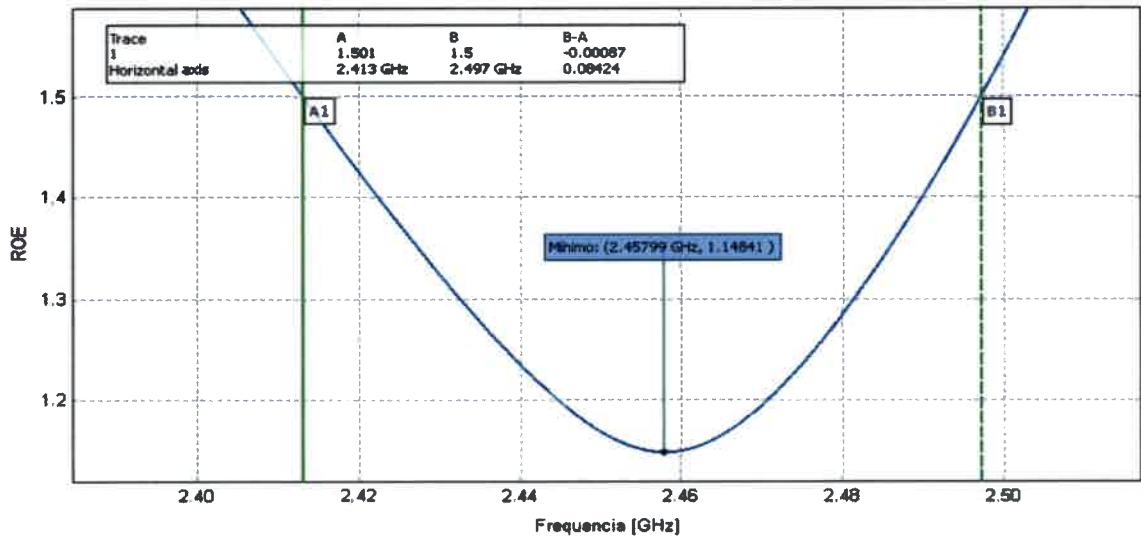


Figura IV-17: Ancho de banda para un valor de ROE=1.5.

4.5 Tipos de antena.

Existen diversas formas de clasificar a las antenas. Una primera clasificación básica de las antenas está dada por el lugar que ocupan en el sistema de comunicación, en este caso se tienen dos tipos de antenas: las que emiten (antenas transmisoras) y las que captan la señal (antenas receptoras). Las transmisoras tienen la función de convertir señales eléctricas en ondas electromagnéticas e irradiarlas, mientras que las receptoras hacen lo contrario, convierten las ondas electromagnéticas recibidas en señales eléctricas.

Otra clasificación común está dada por su forma geométrica, se pueden agrupar como:

- a) Antenas de cable: dipolos, monopolos, espiras, helicoides.
- b) Antenas de apertura: bocinas, ranuras y las antenas microstrip.
- c) Reflectores: sistemas formados por un reflector, generalmente con perfil parabólico, y la antena situada en el foco del reflector.
- d) Arreglos de antenas: cuando se agrupa más de una antena para conseguir determinadas características de radiación.

También según su comportamiento o funcionamiento se pueden clasificar como:

- a) Antenas de banda ancha: pueden trabajar en un margen muy amplio de frecuencias.
- b) Antenas miniatura: presentan dimensiones inferiores que la longitud de onda.

- c) Antenas multifrecuencia: pueden operar en varias frecuencias, conocidas también como antenas multicanal. Por ejemplo: antenas de estación base y terminales móviles [50].

En función de la directividad las antenas pueden clasificarse como:

- a) Omnidireccionales: irradian aproximadamente con la misma intensidad en todas las direcciones (en los 360°) del plano horizontal. Por ejemplo dipolos.
- b) Sectoriales: irradian en un área determinada. El ancho del haz puede ser amplio o angosto según la aplicación.
- c) Directivas son antenas en las cuales el ancho del haz es mucho más angosto que en las antenas sectoriales. Tienen la ganancia más alta y por lo tanto se utilizan para enlaces a larga distancia. Ejemplos: Yagi, biquad, bocina, helicoidales, patch, platos parabólicos, etcétera.

De todos los tipos de antenas existentes, en este trabajo se focalizará el estudio en arreglos de antenas, y en la modificación del diagrama de radiación mediante los métodos de síntesis. Es por esto que en los puntos siguientes se abordan estos temas.

4.6 Arreglos de antenas.

Las agrupaciones de antenas, o arreglos de antenas son utilizados en diversas aplicaciones ya que pueden proporcionar diagramas de radiación con determinadas características de directividad, adecuado a la necesidad del sistema de comunicación. Mediante el método de síntesis de antenas es posible ubicar los máximos y mínimos de radiación en cualquier dirección del espacio. Por otro lado, el uso de técnicas de barrido electrónico de agrupaciones o *phased-array*, permiten la modificación del diagrama de radiación variando electrónicamente la amplitud y la fase de las alimentaciones de las antenas básicas que conforman el arreglo.

Un arreglo o agrupación se define como un conjunto de N antenas iguales que irradian o reciben simultáneamente. El diagrama de radiación del conjunto se obtiene como la interferencia de los campos radiados por cada una de las antenas, mientras que en recepción la señal recibida es una combinación lineal de las señales que capta cada antena. Por reciprocidad, si los pesos y desfases de la combinación lineal en recepción son iguales

a los de la alimentación en transmisión, los diagramas de radiación en transmisión y recepción son iguales [43].

Las principales características que se analizan en un arreglo de antenas son: ancho de haz, nivel de lóbulos secundarios, posición del haz de la antena y la directividad. Estas dependen de:

- El tipo (o geometría) del arreglo, el cual está dado por la ubicación de las antenas que lo componen y puede ser lineal, circular o planar.
- La cantidad de elementos que constituyen al arreglo y la separación entre elementos adyacentes.
- La amplitud y la fase de la corriente de excitación de cada elemento individual.
- El diagrama de irradiación de cada elemento individual.

4.7 Factor de Arreglo.

Según el desarrollo que se presenta en [Capítulo 5, 36] el campo total de un arreglo de antenas se obtiene mediante la expresión:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r}) \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi} = \vec{E}_0(\vec{r}) FA(\psi) \quad (4-28)$$

Dónde:

- $\vec{E}_0(\vec{r})$: es el diagrama del campo radiado por la antena básica del arreglo.
- a_n : son coeficientes de la serie de Fourier, que son a su vez los coeficientes de alimentación de cada elemento del arreglo.
- ψ : es el ángulo eléctrico, que se define más adelante.

En la ecuación anterior se observa que dada una agrupación de elementos iguales y orientados en la misma dirección, el diagrama de radiación total se obtiene del producto del diagrama del elemento básico multiplicado por el factor de la agrupación.

Por lo tanto, el análisis de un arreglo se centra en las características del factor de agrupación, específicamente en el número de elementos, sus amplitudes y fases de excitación.

El factor de arreglo ($FA(\psi)$), es definido como “*el diagrama de radiación de una agrupación de elementos isotrópicos que depende de la separación entre los elementos de*

la agrupación, de la alimentación y de la frecuencia de trabajo, y tiene en cuenta la interferencia de las N ondas generadas por las N antenas" [43].

La expresión para el factor de arreglo de una agrupación de N elementos excitados con unos coeficientes a_n resulta:

$$FA(\psi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi} \quad (4-29)$$

El ángulo eléctrico ψ , representa la diferencia de fase en campo lejano de dos antenas consecutivas, por lo que será igual al desfase por diferencia de caminos $kd \cos(\theta)$ más la fase progresiva de la alimentación α .

$$\psi = kd \cos(\theta) + \alpha \quad (4-30)$$

En la ecuación 4-29 se observa que el factor del arreglo es la suma de los pesos de la contribución de cada elemento, siendo a_n el peso en amplitud y $e^{jn\psi}$ la fase del elemento n . Esto es una función periódica del ángulo eléctrico ψ , de periodo 2π , tal que los coeficientes de su serie de Fourier son los coeficientes de la alimentación a_n . Esta propiedad permite sintetizar diagramas de radiación de agrupaciones, escogiendo los coeficientes de la alimentación iguales a los coeficientes del desarrollo en serie de Fourier del factor de la agrupación deseado.

Por tanto, el factor de la agrupación es la transformada de Fourier de la secuencia discreta de los coeficientes de la alimentación, a_n . Esto es coherente con el hecho de que el diagrama de radiación de una antena es la transformada de Fourier de su distribución de corriente, y de que el factor de la agrupación puede interpretarse como el diagrama de radiación de una agrupación de antenas isótropas [43].

$$FA(\psi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n * e^{jn\psi} \stackrel{TF}{\Leftrightarrow} a_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} FA(\psi) * e^{-jn\psi} d\psi \quad (4-31)$$

Físicamente, el máximo del diagrama de radiación se encuentra en la dirección en que los campos radiados por cada antena se suman en fase, una situación particular se da cuando los coeficientes de la alimentación (a_n) son reales y positivos, ya que esto implica un desfase nulo ($\psi = 0$) en la interferencia, por lo tanto el máximo del factor de la agrupación se encuentra en el origen $\psi = 0$.

El intervalo de variación de ψ representa el margen visible e indica que parte de $FA(\psi)$ pertenece al diagrama de radiación. Este intervalo se obtiene a partir de la ecuación (4-30), en donde el ángulo θ indica la dirección de radiación en el espacio, por lo tanto sólo toma valores reales entre 0 y π . La longitud del margen visible es $2kd$ y está centrado en $\psi=\alpha$. Por lo tanto, su tamaño es proporcional al espaciado (d) de la agrupación, normalizado con respecto a la longitud de onda, y su posición en el eje ψ varía con la fase progresiva (α) [43].

$$\psi \in [-kd + \alpha, kd + \alpha] \quad (4-32)$$

Para coeficientes de alimentación reales y positivos, cuando el margen visible incluye el origen $\psi = 0$, y $|\alpha| \leq kd$, el máximo del diagrama de radiación se encuentra en la dirección del espacio:

$$\psi = kd \cos(\theta_{m\acute{a}x}) + \alpha = 0 \quad (4-33)$$

$$\theta_{m\acute{a}x} = \arccos\left(-\frac{\alpha}{kd}\right); \quad |\alpha| \leq kd \quad (4-34)$$

Por lo tanto se puede controlar la dirección del máximo de radiación variando la fase progresiva α . Ya que una fase lineal en las corrientes provoca un desplazamiento en su transformada de Fourier, que es el diagrama de radiación.

Desarrollando el factor de arreglos puede expresarse en forma polinómica como:

$$FA(\psi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \cdot e^{jn\psi} = a_0 + a_1 \cdot e^{j\psi} + a_2 \cdot e^{j2\psi} + \dots + a_{N-1} \cdot e^{j(N-1)\psi} \quad (4-35)$$

Haciendo un cambio de variables se obtiene:

$$FA(z) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \cdot z^n = a_0 + a_1 \cdot z + a_2 \cdot z^2 + a_3 \cdot z^3 + \dots + a_{N-1} \cdot z^{(N-1)} \quad (4-36)$$

4.8 Métodos de síntesis.

La capacidad de las agrupaciones para modificar el diagrama de radiación de la antena básica puede aprovecharse para sintetizar un diagrama de radiación para que cumpla con determinadas especificaciones. Para ello deben determinarse los fasores de corriente en

todos los elementos de la agrupación de forma que el diagrama de los campos radiados se aproxime al diagrama deseado.

Los procedimientos de síntesis de agrupaciones más usuales son:

- **Método de Schelkunoff:** Es útil cuando se desea ubicar ciertos nulos en el factor de arreglo. Mediante la especificación del número de ceros y su posición en el margen visible del plano Z, se obtiene el número de elementos y su amplitud de excitación. Con la incorporación de más elementos en el arreglo, se obtiene un mayor control sobre la forma del factor de arreglo.
- **Síntesis de Fourier:** Permite obtener el diagrama de error cuadrático medio mínimo respecto a las especificaciones. Se aplica cuando se conoce una expresión matemática del factor de la agrupación deseado.
- **Síntesis de Woodward:** Permite obtener un diagrama que coincide con las especificaciones en un número finito de puntos. Es útil cuando el diagrama especificado no puede expresarse matemáticamente, pero sí puede muestrearse.
- **Síntesis de Chebychev:** obtiene el diagrama con mínimo ancho de haz principal para el nivel de lóbulo principal a secundario especificado.
- **Síntesis de Taylor:** está basada en los mismos principios que la de Chebychev pero con menor radiación en direcciones alejadas del haz principal a costa de empeorar ligeramente el ancho de haz y la directividad.
- **Agrupaciones adaptativas:** permite sintetizar diagramas en tiempo real, capaces de adaptarse automáticamente al entorno, por ejemplo, colocando nulos en las direcciones en las que aparecen interferencias.
- **Agrupaciones superdirectivas:** permiten sintetizar agrupaciones con una directividad, en teoría, tan elevada como se desee, a costa de enormes problemas en su realización práctica.

El método de Schelkunoff (síntesis de ceros) sólo se fija en los ceros del diagrama de radiación, sin controlar ninguna otra especificación.

Los métodos de Fourier y Woodward, poseen la característica de permitir sintetizar cualquier tipo de diagrama de radiación. Para utilizar Fourier es necesario conocer la expresión analítica del diagrama que se va a sintetizar.

Chebyshev y Taylor son métodos que permiten sintetizar un determinado nivel de lóbulo principal a secundario (NLPS) y directividad.

En el capítulo siguiente se presenta un arreglo de antenas con lóbulos direccionados para ser aplicado en la red eléctrica perteneciente a la UNRC, de los métodos mencionados anteriormente, se elige el de Fourier debido a que el diagrama del arreglo posee la característica de tener dos lóbulos principales y es posible determinar su expresión analítica, además el hecho de que el método permite sintetizar cualquier tipo de diagrama, posibilita la modificación del diagrama de radiación para la incorporación de nuevos puntos de la red en trabajos futuros.

El modelado mediante el método de síntesis de Fourier consiste básicamente en llevar a cabo los siguientes pasos:

- i) Escoger un tipo de antena básica y obtener el factor de la agrupación como el cociente entre el diagrama de radiación deseado y el de la antena básica.
- ii) A partir de la especificación del diagrama en el espacio real $FA(\theta)$, obtener el $FA(\psi)$, a través de la transformación $\psi = kd \cos(\theta) + \alpha$. Para lo cual, es necesario definir el espaciado d y la fase progresiva α , lo que determinará el margen visible.

Para desarrollar la Serie de Fourier es necesario conocer el factor de la agrupación en un período 2π en ψ . En función de la distancia entre elementos, puede ocurrir que al hacer la transformación, $FA(\psi)$ no quede definido en un período entero, condición necesaria para hacer el desarrollo. En estos casos se debe completar la función fuera del margen visible para lo cual existen varias soluciones. El criterio que habitualmente se utiliza para completar la función es aquél que resulta en una señal de menos ancho de banda. De esta manera, se necesitarán menos términos para sintetizar el diagrama.

- iii) Desarrollar la serie de Fourier y truncar. El truncado se efectúa cuando el error entre la aproximación y el desarrollo es menor que un cierto valor prefijado, o bien cuando se ha alcanzado un máximo número de elementos.

Para obtener el coeficiente de la agrupación que sintetizará el diagrama deseado, matemáticamente se opera de la siguiente forma:

Sea un polinomio en z , $FA(z)$ de la forma:

$$FA(z) = a_0 + a_1 \cdot z + a_2 \cdot z^2 + \dots + a_m \cdot z^m + a_{2M} \cdot z^{2M} \quad (4-37)$$

$$FA(z) = z^M (a_0 \cdot z^{-M} + a_1 \cdot z^{-(M-1)} + \dots + a_m + \dots + a_{2M} \cdot z^M) \quad (4-38)$$

Si solamente se sintetiza el módulo del diagrama (caso habitual) se obtiene:

$$|FA(z)| = |a_0 \cdot z^{-M} + a_1 \cdot z^{-(M-1)} + \dots + a_m + \dots + a_{2M} \cdot z^M| \quad (4-39)$$

Ya que $|z|=1$. Entonces,

$$|FA(z)| = \sum_{n=-M}^M c_n * e^{jn\psi} \quad (4-40)$$

Donde,

$$a_0 = c_{-M}; a_1 = c_{-(M-1)} \dots a_M = c_0 \dots a_{2M} = c_M$$

Si el $FA(\psi)$ pertenece a R se cumple que $c_n = c_{-n}^*$ es decir, hay simetría compleja conjugada. Como $FA(\psi)$ será una función periódica de periodo 2π (si no lo es, se impone añadiendo el tramo de función que resta siguiendo el criterio de mínimo ancho de banda), los c_n son los coeficientes de la serie de Fourier y que además representan las excitaciones de la agrupación. Para el caso en que $FA(\psi)$ pertenece al dominio de los R , se obtiene:

$$FA(\psi) = \sum_{n=-M}^M c_n * e^{jn\psi} \quad \text{donde} \quad c_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} FA(\psi) * e^{-jn\psi} d\psi \quad (4-41)$$

Esto se puede relacionar con la expresión más familiar del desarrollo en serie de una función periódica de periodo 2π :

$$FA(\psi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\psi) + b_n \text{sen}(n\psi) \quad (4-42)$$

Donde,

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} FA(\psi) * \cos(n\psi) d\psi \quad (4-43)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} FA(\psi) * \text{sen}(n\psi) d\psi \quad (4-44)$$

$$c_n = \frac{a_n - jb_n}{2} ; \quad c_{-n} = c_n^* = \frac{a_n + jb_n}{2} ; \quad c_0 = \frac{a_0}{2} \quad (4-45)$$

Por lo tanto, dado el $FA(\psi)$, el problema es encontrar los coeficientes a_n y b_n y a partir de estos, las excitaciones de la agrupación que son los c_n [50]. Estos son los coeficientes con los que se alimenta a cada elemento del arreglo diseñado, y determinan la ubicación de los nulos y máximos deseados en el diagrama de radiación.

Existen dos casos particulares en los que el cálculo puede simplificarse:

- i) si $FA(\psi) = FA(-\psi)$, es decir, es una función par, entonces $b_n=0$.
- ii) si $FA(\psi) = -FA(-\psi)$, es decir, es una función impar, entonces $a_n=0$.

Es importante remarcar que para que el método de Fourier funcione correctamente los elementos deben estar regularmente espaciados e idealmente este espaciamiento debe ser de $\lambda/2$. Espaciamientos menores a este causarían una transformación del mapa de coeficientes a un espacio no visible (es decir que el plano θ tendría valores complejos). Mientras que si el espaciado es mayor a $\lambda/2$ comenzarán a aparecer mayor cantidad de lóbulos laterales [48].

4.9 Métodos de análisis.

El análisis de sistemas de antenas básicamente trata de resolver las ecuaciones de Maxwell, con determinadas condiciones de contorno dadas por los conductores o dieléctricos de los que está formada la antena. En el caso de estructuras sencillas como las antenas tipo cable, dipolos, monopolos, los métodos analíticos son suficientes. En cambio, cuando se trata de antenas estructuralmente más complejas o cuando el medio que la rodea presenta características como anisotropía, no-homogeneidad, etcétera, la resolución del problema por métodos analíticos es más complicada e incluso en algunas ocasiones imposible. Por lo tanto, es necesario recurrir a los métodos numéricos para la resolución de problemas de campos electromagnéticos. Los métodos más conocidos aplicados a este campo de estudio son: el método de los momentos (MoM, por sus siglas en inglés Method of Moments), el método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD, por sus

siglas en inglés *Finite Difference Time Domain*) y el Método de los Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés *Finite Element Method*).

El uso de los métodos numéricos en el campo de antenas requiere un profundo conocimiento de electromagnetismo y una fuerte carga matemática [50]. Sin embargo, en la actualidad existen herramientas (programas) de simulación que resuelven estos problemas eficientemente y en tiempos relativamente cortos de acuerdo a la complejidad de cada sistema.

Estas herramientas que han sido desarrolladas para modelar y evaluar sistemas de antenas, en general, poseen una interfaz de CAD (diseño asistido por computadora) que permite el diseño de los sistemas radiantes, y una interfaz de simulación, que mediante la utilización de los métodos numéricos permite analizar sus principales características.

En este trabajo se utilizó el software de la Suite FEKO, que es una herramienta de cálculo basada en el método de los momentos (MoM), que además es capaz de utilizar el método multipolar rápido multinivel (MLFMM, por sus siglas en inglés *Multi-level Fast Multipole Method*) que es una formulación alternativa para la solución de problemas extensos (aplicable a grandes estructuras).

Por otro lado, FEKO usa el MoM en conjunto con las técnicas de cálculo conocidas como: Método de los Elementos Finitos (FEM), Óptica Física (PO), Óptica Geométrica (GO) basada en la teoría del haz y Teoría de la Difracción Uniforme (UTD) dando como resultado métodos híbridos. Estos amplían la gama de aplicaciones que pueden tratarse con la herramienta, ya que permiten obtener la solución de problemas que no pueden tratarse con métodos individuales. Los métodos híbridos optimizan la solución tanto en tiempo como en exactitud ya que la utilización de estas técnicas puede ser aplicada a diferentes partes de un mismo modelo. A continuación se presenta una gráfica de los rangos relativos de aplicabilidad de los diversos métodos.



Figura IV-18: Áreas de aplicación de los diversos métodos numéricos [51].

En la tabla siguiente se observan los métodos numéricos que pueden utilizarse en FEKO, cada uno adecuado para un rango específico de aplicaciones.

Tabla IV-1: Métodos numéricos en FEKO [51].

Métodos	Aplicaciones
Método de los Momentos (MoM)	- Análisis de corrientes en estructuras metálicas y dieléctricas, eléctricamente pequeñas. - Análisis de radiación en el espacio libre.
Método multipolar rápido multinivel (MLFMM)	- Análisis de estructuras eléctricamente grandes que no son resolubles de manera eficiente con el método de los MoM.
Método de los Elementos Finitos (FEM)	- Problemas con varios dieléctricos y guías de onda. - Modelización de cuerpos eléctricamente grandes o dieléctricos no homogéneos, que no son resolubles de manera eficiente con el método de los MoM.
Óptica Física (PO)	- Análisis de estructuras metálicas o dieléctrico eléctricamente muy grandes que no son resolubles de manera eficiente ni con MoM ni con MLFMM.
Óptica Geométrica (GO)	- Análisis de estructuras metálicas o dieléctrico eléctricamente muy grandes que no son resolubles de manera eficiente ni con MoM ni con MLFMM.
Teoría Uniforme de la Difracción (UTD)	- Análisis de estructuras extremadamente grandes - Análisis de estructuras PEC (<i>Perfect Electric Conductor</i>).

En la Tabla IV-2, se observa que FEKO utiliza métodos en el dominio de la frecuencia y no del tiempo, como lo es el FDTD. El cual es un método orientado al campo, por lo tanto es necesario mallar la totalidad del dominio de simulación. Por ejemplo, si se busca el diagrama de radiación de una antena, se debe mallar la estructura de la antena y el entorno de la misma para ver como son los campos electromagnéticos irradiados. En cambio, con los métodos que utiliza FEKO sólo basta con mallar la estructura de la antena.

Como FEKO es una herramienta pensada para el estudio de problemas de radiación, usa el MoM cuya formulación contiene las propiedades de radiación implícita en sí misma, ya que se calculan corrientes sobre las superficies conductoras, o usando los principios de equivalencia sobre las superficies o volúmenes de discontinuidades del medio. Esta es una forma de contener también en el entorno de simulación elementos dieléctricos. Por tanto, esta es la ventaja fundamental de FEKO, frente al FDTD y al FEM, ya que no necesita el mallado del espacio libre.

También tiene como ventaja que no se necesita imponer condiciones de borde ideales (fronteras con condición de absorción perfecta) en el caso de estudios de radiación. Esto sí es imprescindible en el FDTD y el FEM, ya que de no existir esta frontera perfecta en el límite del mallado (entorno de simulación) estos métodos lo interpretarían como una discontinuidad del medio. Y podrían aparecer, en el comportamiento del campo en esa zona, ondas reflejadas distorsionando el resultado.

Los métodos de campo, resuelven las formas diferenciales de las ecuaciones de Maxwell, y por tanto calculan los componentes del campo en cada punto del espacio discreto en que se divide el elemento bajo estudio. El MoM, en cambio, resuelve las formas integrales de las ecuaciones de Maxwell, basándose en los potenciales y tomando como expansiones las funciones de Green, para el cálculo discreto. Por tanto, los resultados con FDTD y FEM, son campos y en MoM, son corrientes. Ambos son métodos de onda completa. Esto significa que no se simplifica el modelo matemático para obtener el resultado mediante el método numérico [51].

4.10 Conclusiones.

En este capítulo se han presentado las características básicas de los sistemas radiantes, las cuales son importantes en la etapa de diseño y desarrollo de las antenas.

Se focalizó el análisis en los sistemas constituidos por arreglos de antenas y en el método de síntesis de Fourier que permite direccionar los haces del diagrama de radiación, de esta forma se optimiza el uso de la potencia radiada en los puntos de interés.

También se resumieron las principales características de los métodos numéricos utilizados para la simulación de campos electromagnéticos, principalmente el MoM y las combinaciones híbridas que pueden implementarse con la herramienta de simulación de la Suite Feko que es utilizada para el diseño de los sistemas de antenas de este trabajo.

En el capítulo siguiente se analiza una red real, prototipo de SG, en la que se implementa un sistema de comunicación inalámbrico, mediante el diseño un sistema radiante formado por un arreglo de dipolos, al cual se la aplica el método de síntesis de Fourier para la distribución de los lóbulos principales en los puntos de interés.

En SG existe una gran diversidad de escenarios en las que se requiere del análisis y el diseño de un sistema de antenas adecuado para proporcionar un mayor rendimiento y confiabilidad de toda la red.

Para cada caso o aplicación, es importante identificar y definir qué parámetros deben ser considerados como principales al momento de diseñar las antenas. Dependiendo de la situación, el parámetro principal de diseño puede ser la cobertura, la directividad, el ancho de banda, o el tamaño de la antena, como se puede apreciar en los trabajos [44-47].

Encontrar el parámetro principal es el primer paso para lograr un buen diseño, luego se debe diseñar la antena que cumpla este requisito y posteriormente evaluar si las propiedades secundarias de la aplicación son satisfechas. En general, el primer factor de diseño está dado por el diagrama de radiación, principalmente cuando se trata de arreglos de antenas, donde se busca proveer cobertura a una zona determinada, como corresponde al caso que se presenta en el siguiente capítulo.

V. CAPÍTULO 5: IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICO EN EL DOMINIO DE DISTRIBUCIÓN DE SG.

En los capítulos previos se presentaron los últimos avances tecnológicos en cuanto a las redes inteligentes de energía eléctrica y su relación con las nuevas Tecnologías de Comunicación. En este contexto se focalizó el estudio en las tecnologías inalámbricas, que podrían utilizarse en SG y se efectuó un análisis y comparación de las mismas en función de seleccionar cuales son las más adecuadas para cada dominio de las SG.

Posteriormente, se estudiaron los sistemas de antenas o arreglos de antenas que pueden utilizarse en los sistemas de comunicaciones inalámbricas de las SG. Finalmente, en este capítulo, se presenta una solución de comunicación inalámbrica que contempla el diseño del sistema de antenas adecuado para el dominio de distribución de un sistema eléctrico real, y la proyección del mismo hacia un sistema de distribución inteligente considerando específicamente la comunicación entre las celdas de media tensión y la adquisición de datos entre estas, para el análisis y la operación del sistema.

Actualmente, este sistema está constituido por 6 subestaciones que se encuentran totalmente aisladas (sin ningún vínculo de comunicación), por lo tanto, para realizar el control y el relevamiento de mediciones se debe acceder localmente a cada punto para descargar la información y luego poder analizarla. Con el objeto de realizar un control más eficiente y en tiempo real, se propone la implementación de una red inalámbrica que permita conectar estos puntos aislados para lograr la comunicación de los parámetros de la red mejorando la gestión del sistema eléctrico.

En primera instancia se analizaron las características del equipamiento del sistema de distribución con el propósito de definir el sistema de comunicación adecuado; y posteriormente, se analizaron las características del entorno de propagación, para lo cual se tuvo en cuenta el perfil del terreno y la presencia de estructuras edilicias y de vegetación, entre los puntos en cuestión, con el fin de definir la altura de ubicación de cada sistema radiante.

Con el objetivo de optimizar las comunicaciones a través de los enlaces, se diseñó y desarrolló un sistema de antenas para ser utilizado en cada punto de transmisión y recepción. Debido a las características del equipamiento utilizado en cada subestación, los cuales poseen una forma de comunicación en guirnalda, "*Daisy Chain*" (conexión en

cascada), se presenta una solución de comunicación inalámbrica que mantiene esta topología; para ello se definió el camino de comunicación más conveniente dando prioridad en primera instancia a los puntos más importantes de la red.

Posteriormente se propone la modificación de esta topología de conexión de forma tal de poder realizar un esquema de conexión punto multipunto con topología estrella, que favorece a las comunicaciones ya que cada punto posee su propio vínculo de conexión con el centro de control sin tener que depender de otro y además se reduce el retardo (*delay*) del sistema en general.

5.1. Situación actual del sistema eléctrico de la UNRC.

El sistema eléctrico de la Universidad Nacional de Río Cuarto actualmente está constituido por dos infraestructuras como lo son: por un lado el Instituto de Protecciones de Sistemas Eléctricos de Potencia (IPSEP), conformado por un grupo de celdas empleadas para la acometida principal de la UNRC. Estas celdas tienen la posibilidad de ser energizadas por dos alimentadores de la red de distribución eléctrica provincial. Esta selección de alimentadores se realiza de manera manual, pero aun así permite mejorar la disponibilidad del suministro eléctrico.

Por otro lado, se encuentra la infraestructura desplegada en el campus universitario, conformada por una serie de subestaciones emplazadas en distintos puntos de la red eléctrica. Estas subestaciones realizan mediciones de manera autónoma estando incomunicadas entre sí.

Con el objeto de presentar una solución de comunicación para el sistema de distribución de esta red eléctrica, se realiza un relevamiento del mismo y se detalla la ubicación de las diferentes subestaciones. Posteriormente se presenta el equipamiento primario y secundario instalado.

5.1.1 Localización de las subestaciones.

El sistema de distribución eléctrica actual de la UNRC está compuesto por 6 subestaciones, ubicadas en: IPSEP, Planta Piloto, Plazoleta San Martín (Anfiteatro), Jardín, Residencia estudiantil universitaria y área de Deportes (Pileta). La distribución geográfica de las mismas puede apreciarse en la Figura V-1.



Figura V-1: Ubicación geográfica de las subestaciones.

El diagrama unifilar del sistema, donde se puede observar que el sistema es del tipo radial, se describe en la Figura V-2,

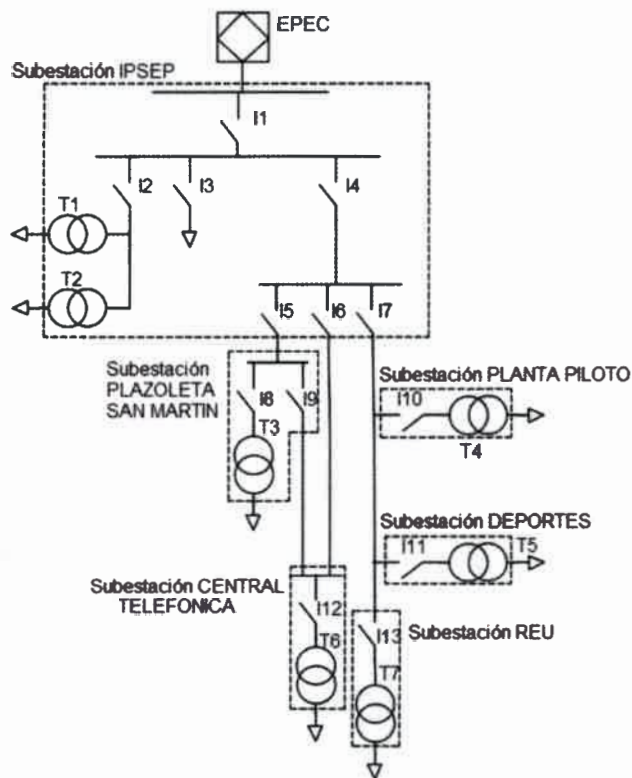


Figura V-2: Diagrama unifilar de las subestaciones de la UNRC.

5.1.2 Equipamiento del sistema de distribución de la UNRC.

En este punto, haciendo referencia a las Figuras V-1 y V-2, se detalla en primer lugar el equipamiento que se encuentra en el IPSEP y posteriormente se describe cada subestación del campus de la UNRC.

- *Laboratorios IPSEP*

En la subestación IPSEP está ubicada la acometida en 13,2 kV que es donde se realiza la interconexión con la Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC) a través del interruptor I1. Como se observa, hay tres ramas en la subestación. Cada una de ellas está compuesta, siguiendo la Figura V-2 de izquierda a derecha, de la siguiente manera: la primer rama está provista por el interruptor I2 y dos transformadores de 1 MVA – 13,2/0,4-0,231 kV (T1 y T2) que alimentan el Laboratorio de Ensayos en BT del IPSEP; la segunda rama tiene un interruptor (I3) para la alimentación del Laboratorio de Ensayos de Media Potencia en 13,2 kV del IPSEP; y finalmente, la tercer rama tiene el Interruptor General de alimentación de la UNRC (I4). A través de seccionadores en SF₆ (que son seccionadores que utilizan el gas hexafluoruro de azufre para extinguir rápidamente el arco eléctrico), se generan 3 alimentadores que energizan las distintas subestaciones distribuidas geográficamente como se muestra en la Figura V-1. Dos de ellos, a través de cables subterráneos de cobre, que pueden trabajar en anillo, alimentan en conjunto o en forma independiente las subestaciones del Anfiteatro y del Jardín (I5 y I6). Y el tercero (I7), a través de una línea aérea con conductor de aluminio alimenta las subestaciones Planta Piloto, y Residencia estudiantil universitaria y Pileta.

En la Figura V-3 se puede apreciar la celda de protección instalada en el IPSEP y la placa de comunicaciones serie que interconecta dos relés.



Figura V-3: Celda de Protección – Placa de comunicaciones ModBus RTU.

Las celdas instaladas son de marca SCHNEIDER Electric modelo SM6. La Figura V-4 muestra la ubicación de las mismas.



Figura V-4: Topográfico de las celdas de Laboratorio IPSEP.

La figura V-5 muestra el diagrama unifilar de los principales elementos del sistema:

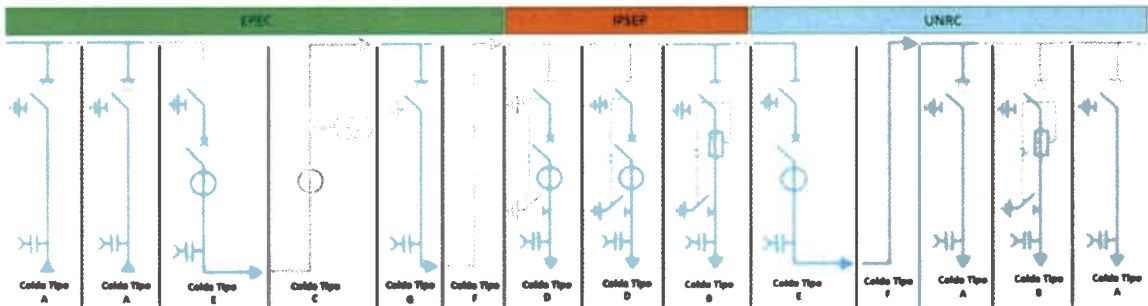


Figura V-5: Diagrama unifilar de las celdas.

Elementos existentes en cada celda:

CELDA TIPO “A”: Equipo para entrada o salida de cable con elemento de maniobra (seccionador bajo carga en SF6 con seccionador de puesta a tierra).

CELDA TIPO “B”: Equipo para protección de transformador con seccionador tripolar bajo carga en SF6, con portafusibles y seccionador de puesta a tierra integrado al anterior.

CELDA TIPO “C”: Equipo para medición. Tres transformadores de tensión y tres transformadores de corriente.

CELDA TIPO “D”: Equipo con interruptor para cable subterráneo, con un seccionador de aislamiento con puesta a tierra e interruptor automático, ambos en SF6.

CELDA TIPO “E”: Equipo con interruptor para barra, con un seccionador de aislamiento de tres posiciones e interruptor automático, ambos en SF₆, y seccionador de puesta a tierra integrado al anterior.

CELDA TIPO “F”: Para acoplamiento de barras. Su función es permitir vincular la salida de una celda con la de otra que no comparta la misma configuración de salidas con entradas. En nuestro caso una celda tipo E con salida inferior es conectada con una tipo A con entrada superior. La única manera de llegar desde abajo hasta arriba es mediante una celda de acoplamiento.

CELDA TIPO “G”: Equipo para salida de barra, con un seccionador tripolar bajo carga en SF₆ y un seccionador de puesta a tierra integrado al anterior.

- *Campus Universitario*

La subestación del anfiteatro es a nivel y cerrada. En la misma se encuentra un transformador de 1 MVA (T3), con el que se provee energía a distintas facultades y edificios colindantes. Su protección primaria es a través de un seccionador trifásico (I8) con fusibles HH (que son fusibles utilizados para proteger sistemas de media tensión (13.2 kV)), el seccionador I9 alimenta a la subestación del Jardín.

La subestación del Jardín es a nivel, abierta, y tiene un transformador de 630 KVA (T6), es alimentada a través del seccionador I12 y es la encargada de brindar energía al sector oeste de la UNRC (Facultad de Veterinaria y Agronomía, Jardín Maternal, Rectorado y Pabellón 1).

En Planta Piloto hay una subestación a nivel y cerrada, que posee un transformador de 630 kVA (T4) y un interruptor en SF₆ (I10), es la encargada de alimentar al edificio de Planta Piloto del departamento de Ingeniería Química, al edificio de Microbiología y otros edificios aledaños a la misma.

La subestación de la Pileta, posee un transformador de 16 kVA del tipo rural (T5), sobre poste y alimenta al campo de deportes, piletas y quincho. Su protección primaria se realiza a través de seccionadores autodesconectores tipo XS (I11) y fusibles de expulsión.

Por último, la subestación de las residencias está ubicada en el sur oeste de la UNRC sobre plataforma aérea en un biposte. La misma alimenta el complejo de residencias estudiantiles universitarias con un transformador de 315 KVA (T7). Su protección primaria

se realiza a través de seccionadores autodesconectores tipo XS (I13) y fusibles de expulsión.

5.1.3 Elementos de protección y comunicación.

Las celdas tipo D y E que actualmente están en el IPSEP poseen interruptores de protección comandados por sus respectivos relés de sobrecorriente. Estos elementos son marca Merlin Gerin, modelo Sepam 1000 – S20 y T20. Se incorpora a los elementos anteriores, un equipo de monitoreo Power Logic, de la serie CM 4250, con el módulo de comunicación ECC21 que posee un puerto Ethernet con protocolo TCP/IP y otro RS-485 para la comunicación de los relés de protección.

La Figura V-6 muestra cómo interactúan los elementos de protección. La comunicación entre los relés SEPAM está dada por el protocolo RS-485 en guirnalda, conectados al equipo de monitoreo CM 4250 mediante su módulo de comunicación. Por otro lado, este mismo equipo se conecta a la red LAN con protocolo TCP/IP, lo que permite el acceso mediante Ethernet desde una computadora ubicada en el centro de control, en donde se ha instalado un sistema SCADA con la función de monitorear y adquirir datos.

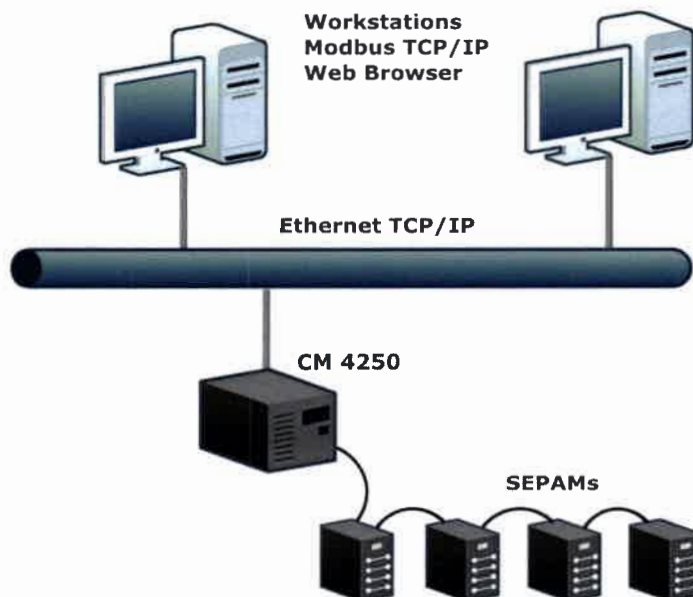


Figura V-6: Esquema global de comunicación.

La comunicación entre los dispositivos se realiza mediante el protocolo ModBus serie (Modbus RTU). Este protocolo permite leer o escribir datos en los registros de cada SEPAM haciendo que sea posible, por ejemplo, coleccionar información de las mediciones realizadas por el dispositivo o bien la activación/desactivación de las protecciones del relé. La topología que se utiliza para interconectar los equipos se conoce como “*Daisy Chain*” (conexión en guirnalda). Para poder realizar una consulta al Sepam 3, el dispositivo maestro envía un mensaje a la red utilizando el protocolo Modbus Serie a través de su interfaz RS-485. Esta consulta está conformada por una trama que contiene la dirección de esclavo perteneciente al SEPAM 3 y el tipo de función que se desea realizar. Esta consulta es enviada al Sepam 1 quien, a su vez, la renvía al SEPAM 2, Esta operación se repite hasta que el mensaje alcanza el dispositivo destino. El SEPAM 3, en este caso, recibe el mensaje, interpreta el campo dirección, el campo función y conforma una respuesta con la información requerida. El paquete es enviado nuevamente a la red siguiendo el proceso inverso.

Como ya se explicó anteriormente, la interfaz de conexión entre los equipos utiliza el estándar RS-485. Dicho estándar está definido como un sistema en bus de transmisión multipunto diferencial, el cual resulta ideal para transmitir a altas velocidades sobre largas distancias y a través de canales ruidosos, ya que su configuración reduce los ruidos que aparecen producto de los ruidos presentes en las líneas de transmisión.

El medio físico de transmisión es un par entrelazado que admite hasta 32 estaciones en 1 solo hilo, con una longitud máxima de 1.200 metros operando entre 300 y 19.200 bps y la comunicación half-duplex. El mismo soporta 32 transmisiones y 32 receptores. La transmisión diferencial permite múltiples drivers dando la posibilidad de una configuración multipunto. Al tratarse de un estándar bastante abierto permite diferentes configuraciones y utilidades.

La posibilidad de interconectar los dispositivos sirviéndose de este estándar se logra por medio de la implementación de placas de comunicaciones denominadas ACE 959-2 las cuales sirven de interfaz entre el SEPAM y el bus de comunicación.

En resumen, los SEPAM son dispositivos que cumplen el rol de esclavos dentro de la red. Estos dispositivos son gobernados por un equipo maestro que, para el caso de estudio, se trata de un equipo “Power Logic CM 4250” que es capaz de supervisar de forma

remota una instalación eléctrica a través de consultas TCP/IP (vía web), interconectando (traduciendo) el protocolo Modbus TCP/IP con el Modbus RTU de otros equipos que se encuentran conectados en cascada utilizando RS-485.

Como ya se describió el sistema en cuestión cuenta con una subestación en el laboratorio de prueba del IPSEP y cinco subestaciones más conectadas al sistema eléctrico del campus universitario. Actualmente, todas operan de forma aislada, es decir que no poseen comunicación con la red de control del sistema eléctrico y para obtener información de las mediciones realizadas, se debe acudir al sitio donde se encuentran emplazadas y descargar la información para su posterior análisis.

En trabajos previos, se realizó el desarrollo de una interfaz gráfica que cuenta con funcionalidades para realizar consultas a los dispositivos de monitoreo conectados a la red cableada. El entorno utilizado para la programación de la interfaz fue Lab-View.

La Figura V-7, muestra el panel frontal del entorno gráfico. En esta figura se pueden observar algunos indicadores visuales y sonoros para las diferentes alarmas.

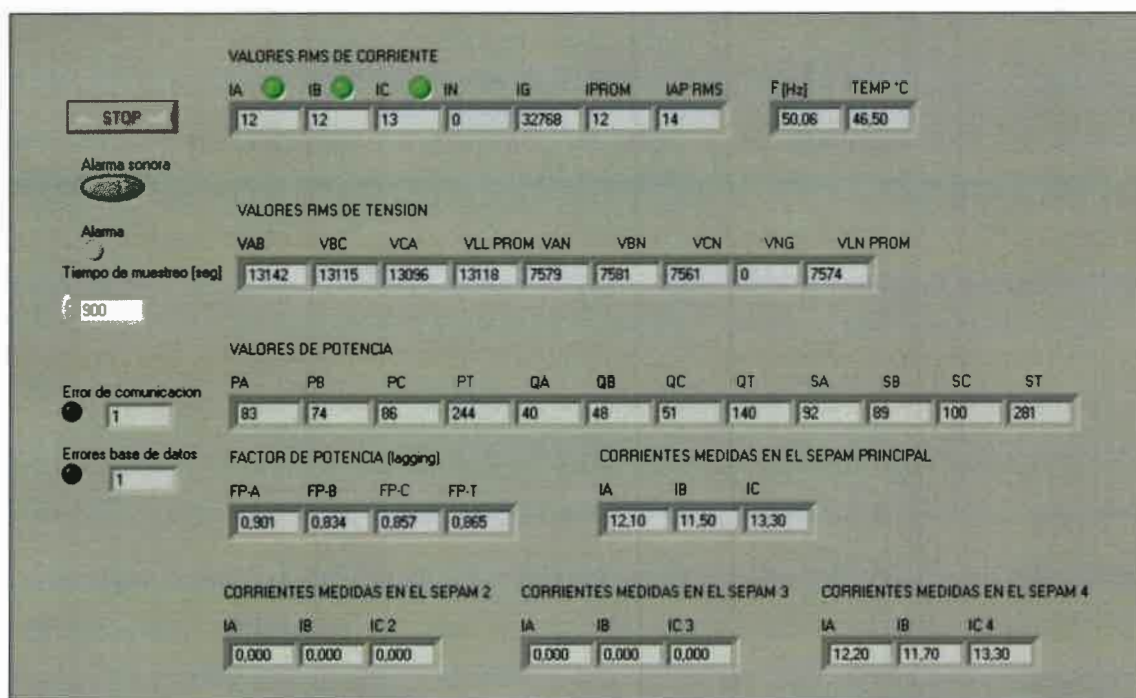


Figura V-7: Panel frontal de la aplicación final.

Las Figuras V-8 y V-9 muestran en forma gráfica los resultados adquiridos en una semana típica.

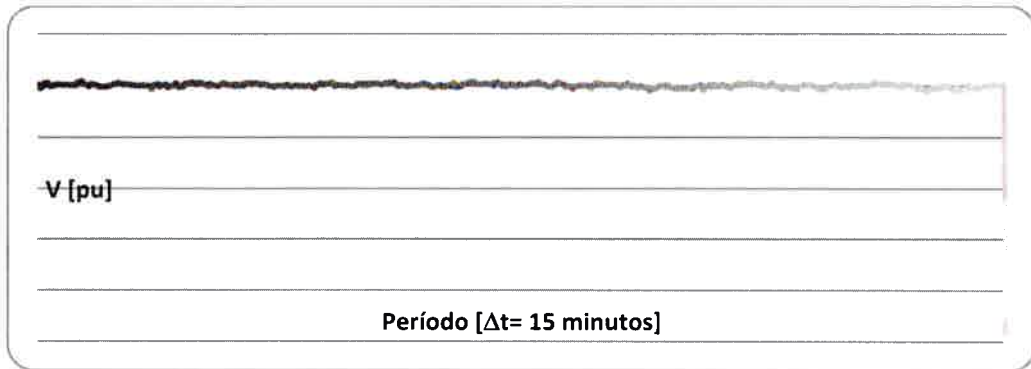


Figura V-8: Perfil de tensión semanal.

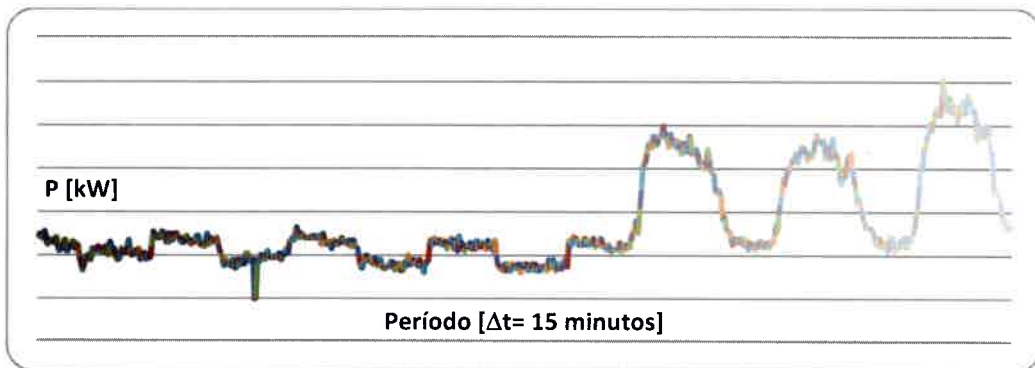


Figura V-9: Perfil de carga activa semanal.

Dado este contexto, se plantea en los puntos siguientes una solución de comunicación inalámbrica para el sistema de distribución de energía eléctrica de la UNRC.

5.2. Solución Propuesta.

El escenario presentado en la sección anterior presenta varias aristas que resultan de interés para justificar la implementación de un sistema de comunicación inalámbrico.

En primer lugar, el cableado serial empleando interfaces RS-485 es poco práctico si las distancias a cubrir son muy grandes. Si bien el cableado es una opción robusta, su implementación es viable sólo cuando se trata de distancias no muy extensas. El interconectar equipos a través de un cable serial resulta económica y técnicamente ineficiente cuando los dispositivos no se encuentran geográficamente próximos. Tal es el caso de varios de los puntos a interconectar en el Campus Universitario, donde se encuentran los equipos de monitoreo de la red eléctrica.

En segundo lugar, si bien el proveedor de los equipos, posee equipamiento para proveer conectividad inalámbrica, los mismos resultan ser extremadamente costosos.

En este contexto, se propone la implementación de una solución económica y flexible para poder conectar los nodos de medición en el campus de la UNRC. La propuesta consiste en la implementación de *gateways* genéricos (que son dispositivos que permiten interconectar redes con protocolos diferentes) que adecuan el estándar RS-485 a protocolos IP, lo que permite utilizar la infraestructura de datos de la UNRC o, alternativamente, crear enlaces inalámbricos dedicados, que resultan menos costosos que el cableado por ser de instalación más simple.

Realizar un despliegue de enlaces inalámbricos como infraestructura de datos propia para el sistema de control no sólo permite independencia del *backbone* de datos de la Universidad, limitando todos los posibles problemas de calidad que este puede traer aparejado (congestión en la red, tráfico no diferenciado de información, problemas de conectividad físicos como lo son cortes de suministro eléctrico, falta de mantenimiento en los nodos, etcétera) sino también, posibilita un control y monitoreo de la red de manera continua, pudiendo solucionar cualquier tipo de problema de forma rápida y efectiva. Además permite aplicar políticas de tráfico dando prioridad a algún tipo de información. En consecuencia, se justifica la implementación de una infraestructura inalámbrica como solución de conectividad integral.

Para poner en funcionamiento este sistema de comunicación sobre la red eléctrica, en primer lugar se configuran los *gateways* que permiten la implementación de una red con topología IP y posteriormente se definen la tecnología y el equipamiento a utilizar. Finalmente, la contribución principal de este trabajo consiste en el diseño del sistema radiante óptimo que permita la comunicación eficiente entre los diversos nodos de la red.

5.2.1 Configuración de los *Gateways*.

Como ya se explicó, para establecer los enlaces inalámbricos sobre IP es necesario utilizar *gateways* capaces de convertir la norma RS-485 a Ethernet. En el mercado existe una gran variedad de interfaces de adaptación de este tipo. La Figura V-10 muestra un esquema de conexión de la red con las interfaces de adaptación empleadas en la implementación de la red inalámbrica.

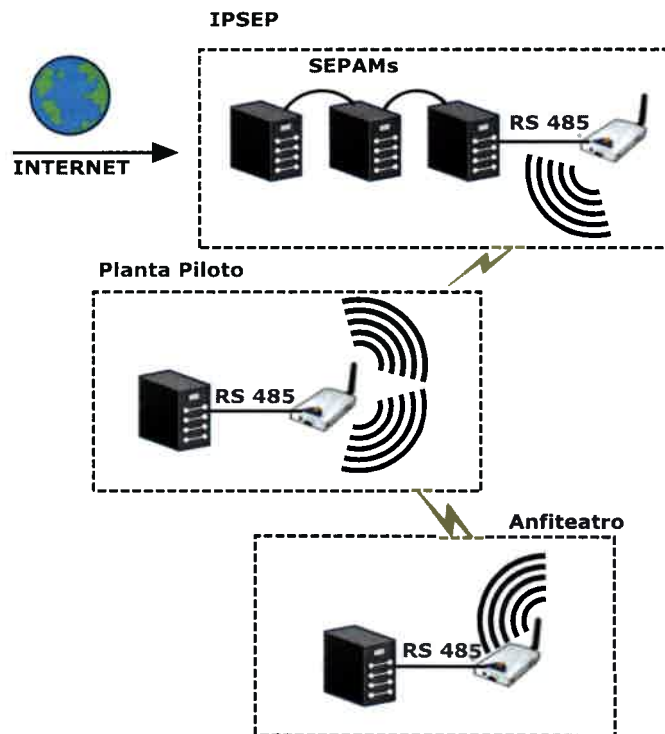


Figura V-10: Diagrama de la red.

Los equipos adquiridos son de marca Zollae. La elección de los mismos se debió a la versatilidad y capacidad de manejo de múltiples protocolos de comunicación (RS-422, RS-485, RS-232 y Ethernet).

5.2.2 Tecnología de comunicación propuesta.

La elección de la tecnología de comunicación inalámbrica apropiada, se realizó teniendo en cuenta la ubicación de los nodos y los requerimientos técnicos propios del sistema de medición con el fin de seleccionar la tecnología que más se adapte a las necesidades de comunicación. En este caso, se pretende establecer la comunicación inalámbrica entre los relé de protección digital ubicados en cada una de las subestaciones que constituyen el sistema, con un Dispositivo Electrónico Inteligente (IED) ubicado en la subestación principal (IPSEP). En este punto se conecta el sistema a internet para ser monitoreado desde el centro de control, no obstante puede plantearse como trabajo futuro la conexión del centro de control en forma inalámbrica.

Como ya se mencionó, la comunicación entre los dispositivos se realiza mediante el protocolo ModBus serie (Modbus RTU), el cual para interconectar los equipos utiliza una

topología que se conoce como “*Daisy Chain*” (conexión en guirnalda), que fue explicada anteriormente. Debido a esto y con el objetivo de lograr un eficiente control en tiempo real de los parámetros de la red eléctrica, lo que permite mejorar la gestión del sistema eléctrico, se propone la implementación de una red inalámbrica punto a punto, basada en el protocolo IP, que permita la comunicación en forma de cascada (guirnalda), entre el IED y cada relé. Para ello se utilizan *gateways* que convierten el estándar RS-485 de los equipos de las subestaciones a protocolos IP. En primera instancia se implementa el sistema de comunicación manteniendo la topología de conexión de los equipos en cascada; no obstante, dado lo ineficiente que resulta este tipo de topología se propone una implementación punto multipunto.

Dentro del abanico de tecnologías disponibles, se consideran principalmente las que permiten la utilización de las bandas de frecuencia no licenciadas definidas por la Comunicación Nacional de Comunicaciones (CNC) como *“las bandas de frecuencias en las que se permite la operación de dispositivos de radiocomunicaciones sin una planificación centralizada por parte de la Autoridad de Comunicaciones, es decir, sin una autorización individual de cada estación tal que asegure la asignación de una frecuencia o canal para uso exclusivo de la misma. La banda se destina íntegramente a tales dispositivos, sin subdivisión de canales, estableciéndose ciertos requerimientos básicos de convivencia, tales como límites de potencia o de densidad de potencia radiadas, anchura de banda mínima, etcétera. La coordinación corre por cuenta de los usuarios, pero se apoya principalmente en la inmunidad contra interferencias, propia de la tecnología empleada, y el modo de acceso múltiple a la banda”* [52].

Por lo tanto, se selecciona la banda de frecuencia que abarca desde 2,400 a 2,500 MHz con frecuencia central en 2,450 MHz, que se utiliza ampliamente por los equipos que permiten la conectividad de internet inalámbrico y es conocida como la banda de 2,4 GHz. Es importante tener en cuenta que en esta banda pueden presentarse interferencias por la masiva implementación de redes Wi-Fi. No obstante, se opta por esta frecuencia por la disponibilidad de equipamiento y se plantea como trabajo futuro la migración a otro equipamiento en otro rango de frecuencias superiores.

5.2.3 Equipamiento.

Al momento de seleccionar el equipamiento para implementar los vínculos inalámbricos, se considera el hecho de contar con enlaces con línea de vista y de corta distancia, lo que implica que en estas condiciones los valores de atenuación son despreciables, por lo tanto se disminuyen los requerimientos de potencia transmitida de los equipos transeptores. Por otro lado, teniendo en cuenta la característica de la topología *Daisy Chain* que utilizan los equipos a conectar, se requiere la instalación de dos transeptores en cada uno de los puntos intermedios de la red, con lo cual la optimización de los costos totales es también un factor que influye en la decisión.

Otro aspecto que se considera importante, es utilizar un equipamiento flexible que permita evaluar el desempeño de los enlaces considerando diferentes patrones de radiación.

Debido a estas condiciones se optó por la utilización de un equipo transeptor que opera en la banda de frecuencias seleccionada de 2,4 GHz. El mismo está disponible en nuestro país y es homologado por la CNC, opera según los estándares de la IEEE 802.11b y 802.11g OFDM. Este sistema es una radio inalámbrica con un conector RF integrado tipo N que se puede conectar directamente a cualquier sistema radiante. El mismo se puede utilizar tanto en el sistema punto a punto como en el punto a multipunto. En este último caso se reduce a la mitad la cantidad de equipos que se necesitan para la implementación.

5.3. Diseño de sistema de comunicación con topología en cascada.

En este caso se presentan los cálculos de los enlaces y el diseño del sistema radiante para la aplicación de un sistema con topología en cascada, típico de las redes eléctricas.

5.3.1 Características y cálculos de radioenlaces.

Para el cálculo de los radioenlaces se analizan las características propias del entorno de propagación, para lo cual se tiene en cuenta, el perfil del terreno y la presencia de estructuras edilicias y de árboles entre los puntos en cuestión con el fin de definir la altura de ubicación de cada sistema radiante.

Los cálculos de los enlaces inalámbricos se efectúan a través de la herramienta *Radio Mobile* [41], mediante la cual se obtiene el perfil del terreno entre cada punto y la altura en que debe ubicarse cada sistema radiante.

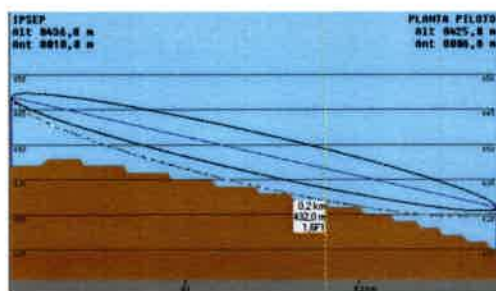
En este caso los enlaces son punto a punto, como se observa en el diagrama de interconexión de redes de la Figura V-11 (obtenida con Radio Mobile), y conectan a los dispositivos del sistema eléctrico en forma de cascada.



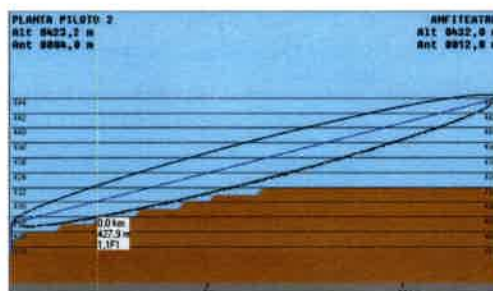
Figura V-11: Redes del sistema de comunicaciones.

En las imágenes de la Figura V-12 (obtenidas con Radio Mobile) se observan: los perfiles del terreno entre cada punto a enlazar, el primer radio de Fresnel, la curva de despeje (que es el radio que se traza desde la antena hasta el punto más alto del perfil del terreno) y la altura a la que se colocan las antenas en cada punto, esto último también se presenta en la Tabla V-1. Debido a la frecuencia de operación seleccionada, es conveniente que los enlaces tengan línea de vista, por lo tanto se elevan las antenas de forma tal de garantizar el despeje necesario, considerando la estructura edilicia y la vegetación involucrada entre los puntos de cada enlace.

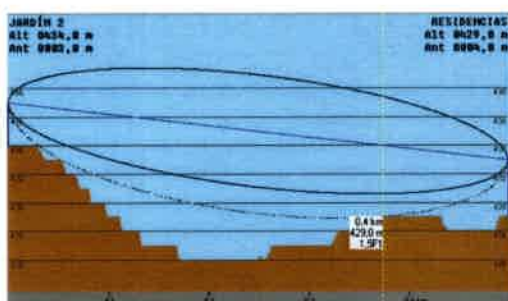
En el caso correspondiente al enlace entre Anfiteatro - Jardín, debido a la cercanía de los puntos del enlace, la obstrucción por la presencia de árboles y edificaciones en la zona, es más relevante que los niveles del terreno. Es por esto que se elevan considerablemente las alturas de ubicación de las antenas de forma tal de lograr línea de vista, y evitar los efectos destructivos que pueden producir las edificaciones de la zona sobre las señales.



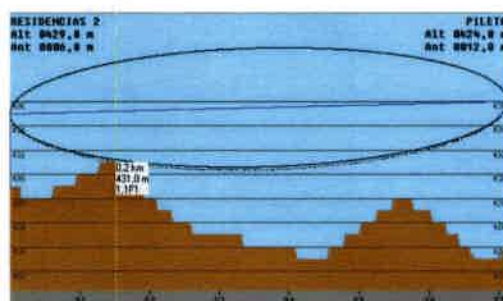
(a) Perfil IPSEP - Planta Piloto



(b) Perfil Planta Piloto - Anfiteatro



(c) Perfil Jardín - Residencias



(d) Perfil Residencias - Pileta

Figura V-12: Perfiles del terreno y alturas de las antenas en cada punto.

En la Tabla V-1 se observan las alturas expresadas en metros de la ubicación de los sistemas radiantes, para lo cual se consideran los resultados obtenidos mediante el uso del software y el análisis de edificación y vegetación de cada zona.

Tabla V-1: Alturas de ubicación de los sistemas radiantes.

Enlaces	Altura punto 1	Altura punto 1
IPSEP – Planta Piloto	10 m	6 m
Planta Piloto – Anfiteatro	4 m	12 m
Anfiteatro – Jardín	6 m	3 m
Jardín – Residencias	3 m	4 m
Residencias – Pileta	6 m	12 m

Los enlaces del sistema evaluado con Radio Mobile, se exportan al Google Earth y se obtiene la siguiente imagen panorámica:



Figura V-13: Vista panorámica de los enlaces.

5.3.2 Diseño del sistema radiante.

Dadas estas características, se diseña un sistema radiante directivo adecuado para comunicaciones punto a punto, como el que observa en la Figura V-14. Este sistema, que está constituido por un elemento radiante (dipolo) y un reflector tipo diedro, opera en la banda de 2,4 GHz a 2,5 GHz, y se diseñó a una frecuencia de trabajo de 2,45 GHz. Dentro del abanico de posibilidades se opta por esta antena con reflector tipo diedro, debido a que permite obtener un patrón de radiación con un ancho de haz estrecho y, además, es simple de diseñar y construir.

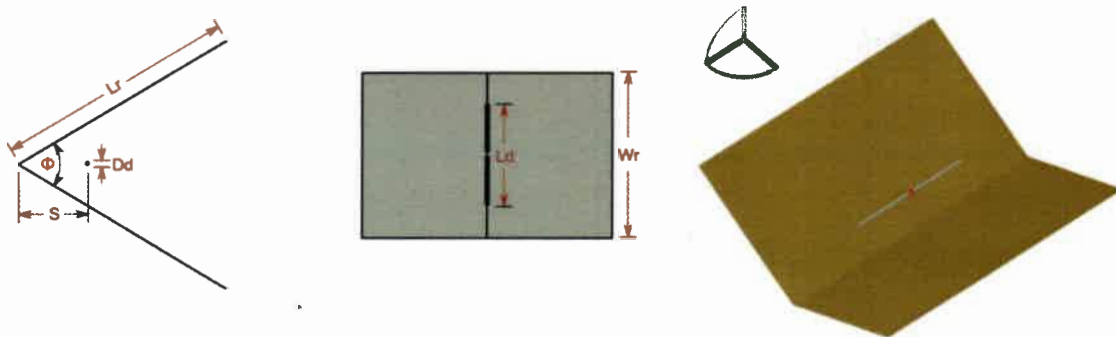


Figura V-14: Sistema radiante, dipolo con reflector diedro.

Para el diseño se utiliza la herramienta Antenna Magus [53], que permite obtener el CAD del modelo de la antena con las dimensiones adecuadas al valor de la frecuencia de

trabajo previamente ingresado. A este modelo se lo exporta a la Suite FEKO [51] con el propósito de simular su comportamiento electromagnético y analizar las características de la antena. De los resultados obtenidos en la simulación, se obtienen los parámetros que caracterizan la antena, los que permiten corroborar si el diseño es el apropiado, o bien si deben realizarse correcciones.

Mediante estas herramientas es posible ajustar las dimensiones, tanto del dipolo, como del reflector y la distancia entre ambos elementos de manera de obtener la mejor relación de onda estacionaria en la frecuencia intermedia de trabajo del sistema (2,45 GHz.). Las dimensiones obtenidas se resumen en la Tabla V-2:

Tabla V-2: Dimensiones del sistema radiante de las subestaciones.

Lr	Dd	S	ϕ	Ld	Wr
14 cm	0,6 cm	8 cm	90°	6 cm	12 cm

En la Figura V-15 se observa el diagrama de radiación tridimensional con el dipolo dispuesto en polarización vertical. En este diagrama se demuestra que el sistema radiante posee la característica de ser directivo y con una ganancia de aproximadamente 12 dBi.

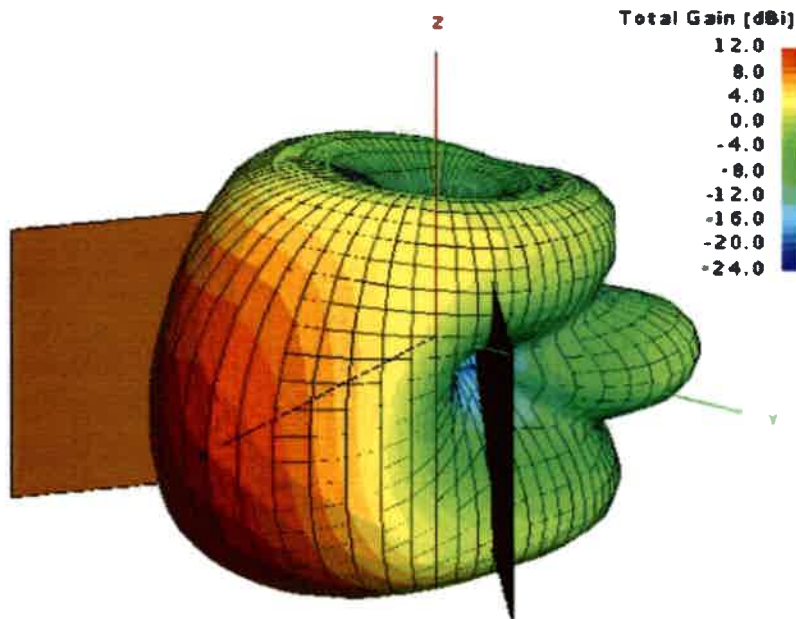


Figura V-15: Diagrama de radiación de la antena.

En la Figura V-16 se muestra un gráfico de frecuencia vs. ROE. En él, se aprecia el comportamiento de la antena en el rango de frecuencias comprendido entre 2,3 GHz y 2,6 GHz.

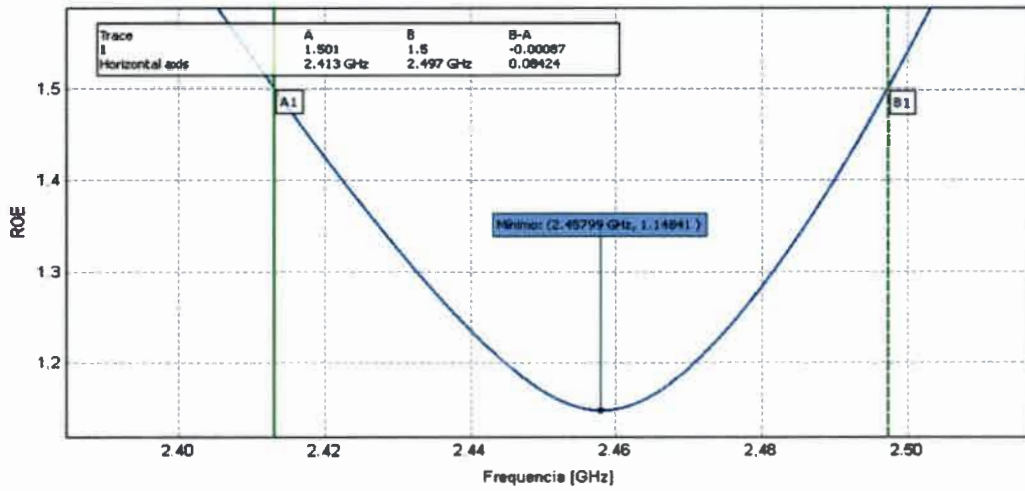


Figura V-16: Frecuencia vs. ROE.

Se observa que el valor de la ROE para la frecuencia de operación de 2,45 GHz. es de 1,14 aproximadamente, lo que se considera como una muy buena adaptación de impedancias, ya que esto implica un bajo porcentaje de ondas reflejadas, garantizando el máximo aprovechamiento de la potencia transmitida y recibida. Un valor de ROE de 1,5 es aún aceptable, y es el parámetro utilizado para definir el ancho de banda de la frecuencia de resonancia de los sistemas radiantes. En este caso el ancho de banda de la antena es superior a 80 MHz y está en el rango de frecuencias que va desde los 2,41 GHz a los 2,49 GHz, comprendiendo este rango, la frecuencia de diseño de 2,45 GHz.

En la Figura V-17 se observa que el ángulo de media potencia de la antena es aproximadamente de 33°, lo que implica que se trata de sistema muy directivo.

Una vez obtenido el diseño óptimo de la antena se procede a su desarrollo e implementación. Posteriormente, se realizan las mediciones para corroborar los resultados obtenidos, como se presenta en el siguiente punto.

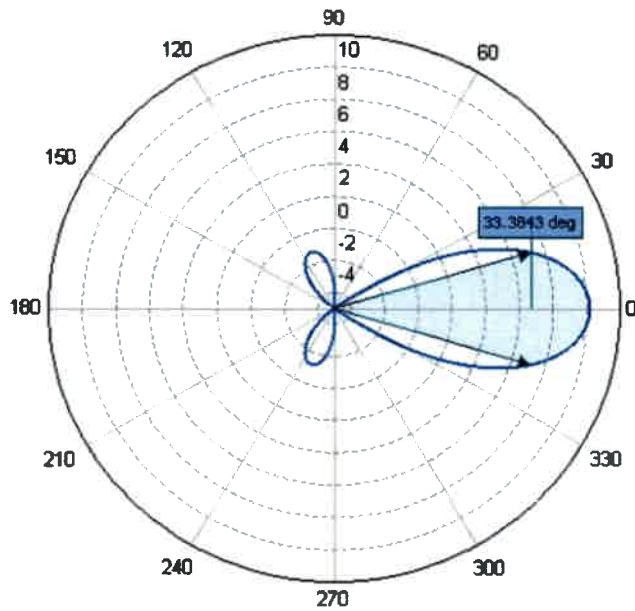


Figura V-17: Ángulo de potencia media.

5.3.3 Mediciones de las características principales del sistema radiante.

Las mediciones del sistema radiante se realizan con un analizador de redes vectoriales. Principalmente se analiza que el sistema esté adaptado en el rango de la frecuencia de operación, en la Figura V-18 se observa una imagen extraída del analizador.



Figura V-18: Medición de Frecuencia vs. ROE.

El eje cartesiano muestra la relación entre el valor de ROE con respecto a la frecuencia; en este caso se calibra el equipo para hacer un análisis entre 2,3 GHz y 2,7 GHz.

Mediante una observación visual se concluye rápidamente que el sistema está adaptado en la frecuencia de trabajo. Se observa también un punto de resonancia en 2,6 GHz, lo cual está asociado a que en la simulación no se tienen en cuenta algunos fenómenos físicos, como por ejemplo la forma de adaptación de la antena.

Para determinar el ancho de banda se recurre al uso de dos marcadores, los cuales se colocan en los puntos donde el valor de ROE es de 1.5, Posteriormente se puede observar en la tabla ubicada por debajo del eje horizontal que el ancho de banda del sistema se encuentra entre 2,39 GHz y 2,63 GHz, lo que arroja que el ancho de banda es de 240 MHz aproximadamente; es decir, se cumple ampliamente con las expectativas planteadas en la etapa de diseño en la que se buscaba un sistema radiante con un ancho de banda de 80 MHz. Es importante mencionar que un ancho de banda mayor que el necesario podría introducir problemas de ruido, e incluso también complicar la adaptación, sin embargo todos los receptores tienen un filtro a la entrada que limita el ancho de banda del ruido que ingresa al sistema, limitando también su potencia.

Para determinar la ganancia de la antena, se realiza la medición del diagrama de radiación. Para ello se utiliza un generador con una antena patrón en la banda de 2,4 a 2,5 GHz y un analizador de espectro con la antena a medir conectada en la entrada de RF, esta antena se va girando en dirección de θ y ϕ para obtener los niveles de potencia recibida en cada ángulo, posteriormente se aplica la ecuación 5-1, y se obtienen los valores de ganancia.

$$G_{ar} = P_r - P_t - G_{at} + A_0 \quad (5-1)$$

Donde, P_r es el valor medido por el analizador, $P_t = 0\text{dBm}$, es el valor de la potencia de transmisión al que se ajusta el generador, $G_{at} = 2,15\text{ dB}$, es la ganancia de la antena patrón y A_0 es la atenuación en el espacio libre que se calcula con la ecuación 5-2.

$$A_0 = 32,4 + 20 * \log_{10} f(\text{MHz}) + 20 * \log_{10} d(\text{km}) \quad (5-2)$$

Para un valor de frecuencia expresado en MHz de 2450 y de distancia expresado en km de 0,005, se obtienen los valores mostrados en la Tabla V-3, en donde se observa que la ganancia de la antena en la dirección de máxima directividad ($\phi=0^\circ$ y $\theta=0^\circ$) es de 10 dB, y el ángulo de media potencia de la antena es de 35° .

Tabla V-3: Mediciones y cálculo de ganancia.

Pr (dBm)	θ	ϕ	Gar (dBi)
-42	0	0	10
-45	0	18	7
-53	0	45	-1
-60	0	90	-8
-70	0	135	-18
-70	0	180	-18
-66	0	-135	-14
-60	0	-90	-8
-55	0	-45	-3

Pr (dBm)	θ	ϕ	Gar (dBi)
-42	0	0	10
-45	17	0	7
-50	45	0	2
-72	90	0	-20
-68	135	0	-16
-70	180	0	-18
-66	-135	0	-14
-62	-90	0	-10
-47	-45	0	5

También se pueden observar gráficamente estos valores en la Figura V-19.

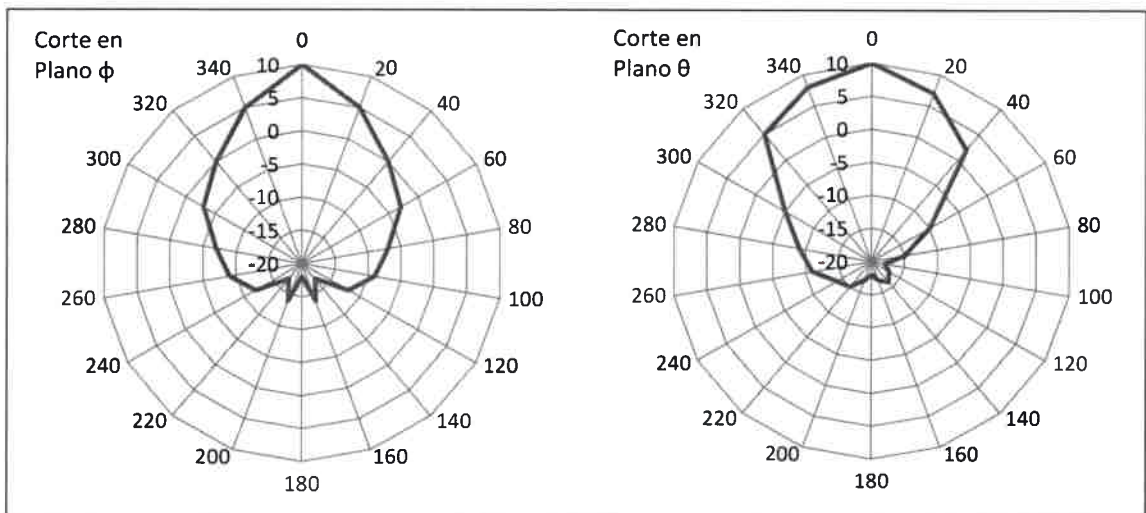


Figura V-19: Diagrama de radiación en los planos ϕ y θ .

Comparando los valores simulados con los medidos se observa que la antena cumple ampliamente con las expectativas planteadas en la etapa de diseño, ya que posee la misma ganancia y un mayor ancho de banda.

5.4. Diseño de sistema de comunicación con topología estrella.

Se observa que el sistema diseñado en los puntos anteriores tiene una forma de operar en cascada, propia de las redes eléctricas, pero que resulta ineficiente para las comunicaciones ya que el nodo central no posee una conexión directa con cada subestación, como es en el caso de un sistema con topología estrella donde los enlaces son punto a multipunto. En este caso un nodo central tiene la posibilidad de conexión con cualquier subestación de la red, sin depender del resto de las subestaciones.

Por lo tanto, con el objetivo de optimizar las comunicaciones a través del vínculo inalámbrico, se planteó un sistema con topología estrella, punto multipunto, en el que se colocó en el nodo concentrador un arreglo de antenas con el fin de distribuir la energía radiada en dos lóbulos principales que abarquen los puntos de interconexión de la red, que son los puntos donde se encuentran ubicadas las subestaciones.

Para este caso se utiliza el mismo equipamiento, la misma frecuencia de trabajo e incluso los mismos sistemas radiantes directivos que fueron diseñados para cada subestación, sólo se diseña un arreglo de antenas para el nodo concentrador mediante el método de síntesis de Fourier que fue abordado en el Capítulo 4.

5.4.1 Características y cálculos de radioenlaces.

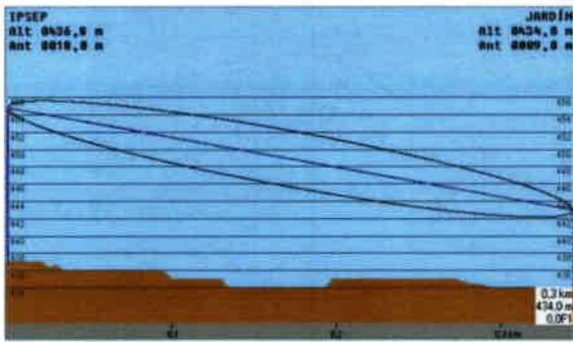
La solución que se propone contempla la utilización de enlaces punto multipunto (PMP), entre cada una de las subestaciones y un nodo concentrador, ubicado en el IPSEP. Aquí se coloca el arreglo de antenas que fue diseñado de forma tal que posea dos lóbulos principales, de los cuales, un lóbulo abarca las subestaciones ubicadas en anfiteatro, jardín y residencias, y el otro las subestaciones de planta piloto y pileta como se observa en la Figura V-20.



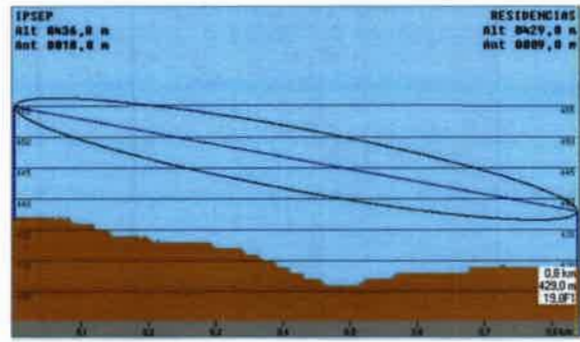
Figura V-20: Requerimiento de cobertura del arreglo.

Del mismo modo que se realizó en el caso anterior, aquí también los cálculos de los enlaces inalámbricos se efectúan a través de la herramienta Radio Mobile, con la que se obtiene el perfil del terreno entre cada subestación y el nodo concentrador, ubicado en el IPSEP. También se obtiene la altura en que debe ubicarse cada sistema radiante, de forma tal de garantizar la conectividad de todos los puntos. Y del mismo modo que en el caso anterior, se elevan las antenas en cada punto de forma tal de garantizar el despeje necesario, considerando la estructura edilicia y la vegetación involucrada en cada enlace.

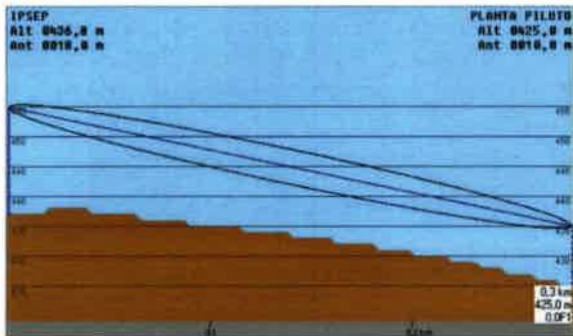
En la Figura V-21 se presentan las imágenes (obtenidas con Radio Mobile) donde se observan: los perfiles del terreno entre cada punto a enlazar, el primer radio de Fresnel, y la altura a la que se colocan las antenas, esto último también se presenta en la Tabla V-4.



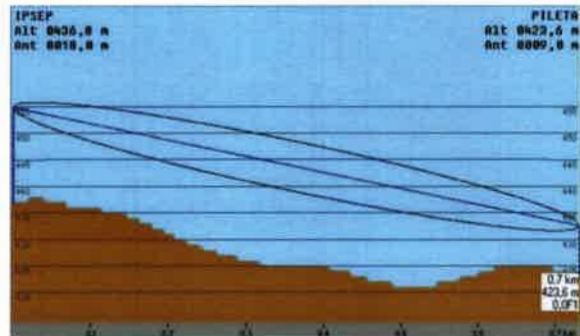
(a) Perfil IPSEP - Jardín



(b) Perfil IPSEP - Residencias



(c) Perfil IPSEP - Planta Piloto



(d) Perfil IPSEP - Pileta

Figura V-21: Perfiles del terreno y alturas de las antenas en cada punto.

En la Tabla V-4 se observan las alturas, expresadas en metros, de la ubicación de los sistemas radiantes, para lo cual se consideran los resultados obtenidos mediante el uso del software y el análisis de edificación y vegetación de cada zona.

Tabla V-4: Alturas de ubicación de los sistemas radiantes.

Puntos	Alturas
IPSEP (nodo concentrador)	18 m
Anfiteatro	9 m
Jardín	9 m
Residencias	9 m
Planta Piloto	9 m
Pileta	9 m

Los enlaces del sistema calculados con Radio Mobile, se exportan al Google Earth y se obtiene la siguiente imagen:

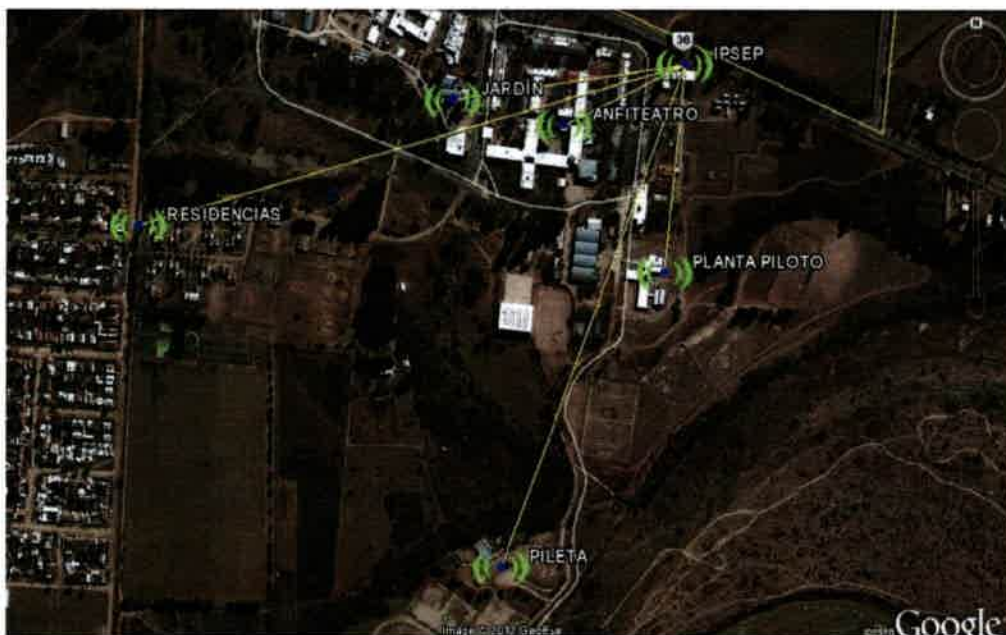


Figura V-22: Vista panorámica de los enlaces.

5.4.2 Diseño del sistema radiante del nodo concentrador.

El sistema radiante que se utiliza en el nodo principal corresponde a un arreglo de antenas en la banda de 2,4 GHz a 2,5 GHz, por lo tanto se diseña en la frecuencia central de trabajo de 2,45 GHz, posee la característica de ser selectivo, y está constituido por doce elementos radiantes (12 dipolos) y un plano reflector.

Teniendo en cuenta las ubicaciones de las estaciones con respecto al punto de concentración (IPSEP), se propone la implementación de un sistema radiante con un patrón de radiación que concentre la energía radiada en los puntos de interés, como se observa en la Figura V-20. A fin de obtener el diagrama de radiación que brinde cobertura geográfica de forma selectiva, al arreglo de antenas conformado por doce dipolos se le aplica el método de síntesis de Fourier.

Se elige como antena básica a un dipolo porque posee un diagrama de radiación omnidireccional en el plano horizontal, esto implica que el diagrama de radiación del arreglo, en dicho plano, va a tener la forma del factor de arreglo, según la ecuación 4-28:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r}) FA(\psi) \quad (4-28)$$

Por otra parte se optó por el método de Fourier debido a que es posible determinar la expresión analítica del diagrama que se desea alcanzar y además, el hecho de que el

método permite sintetizar cualquier tipo de diagrama, posibilita la modificación del diagrama de radiación para la incorporación de nuevos puntos de la red en trabajos futuros.

En primera instancia se ubican en un plano polar los ángulos en los que se desea maximizar las ganancias de los lóbulos de radiación, y posteriormente se procede a determinar el diagrama de radiación al que se desea aproximar. Para esto se debe definir el factor de agrupación ($FA(\theta)$). La metodología empleada, para obtener el $FA(\theta)$ que proporcione la más eficiente distribución del diagrama, consistió en ir modificando los valores en dB para cada rango de ángulos y al mismo tiempo la cantidad de elementos del arreglo, se probaron distintas configuraciones y se obtuvieron los mejores resultados con 12 dipolos y para los siguientes valores de $FA(\theta)$:

$$\begin{aligned} FA(\theta) &= 0 \text{ dB} & -60^\circ < \theta < -30^\circ \\ FA(\theta) &= -20 \text{ dB} & -30^\circ < \theta < 40^\circ \\ FA(\theta) &= 0 \text{ dB} & 40^\circ < \theta < 60^\circ \\ FA(\theta) &= -50 \text{ dB} & \text{cc} \end{aligned}$$

La Figura V-23 muestra una representación de la expresión que se desea obtener mediante la síntesis.

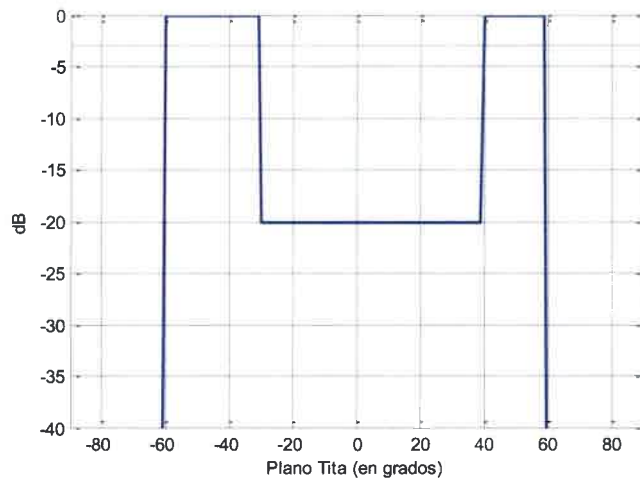


Figura V-23: Diagrama de radiación buscado.

Una vez definida la función que se desea aproximar, se realiza la síntesis de Fourier que permite obtener los valores de los coeficientes de alimentación de cada uno de los elementos que conforman el arreglo. Para la misma se utilizará un arreglo de 12 dipolos de longitud $\lambda/2$ que se encuentran ubicados a una distancia $\lambda/4$ de una superficie conductora

(perfecta) y espaciados entre sí, $\lambda/2$, En la Figura V-24 se ilustra la disposición de los mismos.

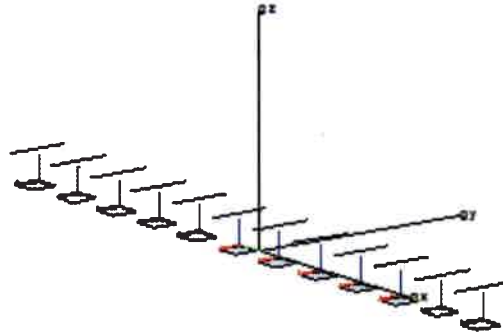


Figura V-24: Arreglo de dipolos.

Para realizar el proceso de síntesis de Fourier se utilizó la herramienta Matlab. Los scripts más importantes que se utilizan para la configuración y simulación del sistema son los siguientes:

- **Sintesis.m**

Dicho script es el encargado de definir el perfil de diagrama buscado, así como los parámetros de configuración (frecuencias de trabajo, cantidad de elementos, geometría del arreglo, etcétera). Básicamente este lanzador llama a tres funciones:

- `rect_array`: para realizar la configuración geométrica del arreglo.
- `fourier_sint`: para calcular los coeficientes de Fourier de amplitud y fase utilizados para alimentar el arreglo.
- `Plot`: para representar gráficamente los resultados de la síntesis obtenida.

Es importante recordar que para que el método de Fourier funcione correctamente los elementos deben estar regularmente espaciados e idealmente este espaciamiento debe ser de $\lambda/2$. Espaciamientos menores a este causarían una transformación del mapa de coeficientes a un espacio no visible (es decir que el plano θ tendría valores complejos). Mientras que si el espaciado es mayor a $\lambda/2$ comenzarán a aparecer mayor cantidad de lóbulos laterales.

Aplicando este método con todas las consideraciones previamente mencionadas, los resultados (coeficientes) arrojados por el proceso de síntesis de Fourier con los cuales se alimentarán los dipolos son los que se presentan en la Tabla V-5.

Tabla V-5: Valores de alimentación de cada elemento del arreglo.

Elemento	Amp (dB)	Fase (Deg)	Real	Imag
1	-13,66	-19,79	0,195	0,07
2	-10,28	141,74	-0,24	-0,19
3	-28,57	-178,83	-0,037	0,001
4	-3,42	-17,86	0,642	0,207
5	0	175,18	-0,996	-0,084
6	-2,72	15,63	0,704	-0,197
7	-2,72	-15,63	0,704	-0,197
8	0	-175,18	-0,996	0,084
9	-3,42	17,86	0,642	-0,207
10	-28,57	178,83	-0,037	-0,001
11	-10,28	-141,74	-0,24	0,19
12	-13,66	19,79	0,195	-0,07

En la Figura V-25 se presenta el diagrama propuesto (en azul) vs el diagrama alcanzado tras el proceso de síntesis (en rojo). Se puede apreciar que los resultados se ajustan a los requerimientos.

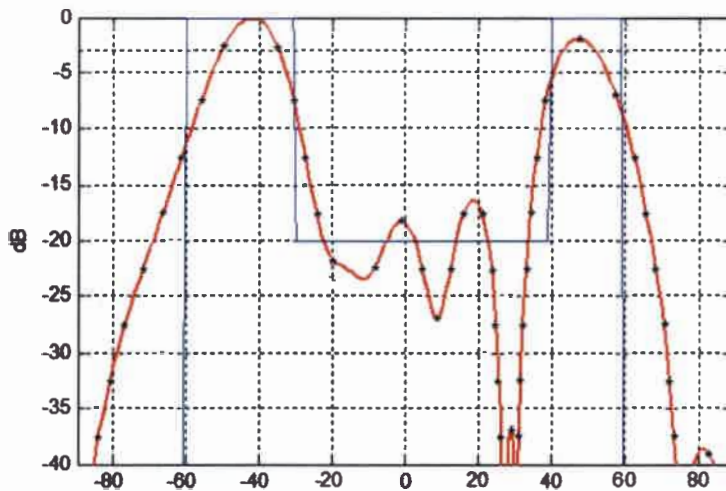


Figura V-25: Comparación de diagramas.

En la Figura V-26 se muestra el arreglo tal como se ha diseñado en 3D, con un corte en el plano x-z del diagrama de radiación obtenido con Matlab. También se representa al diagrama de radiación en coordenadas polares.

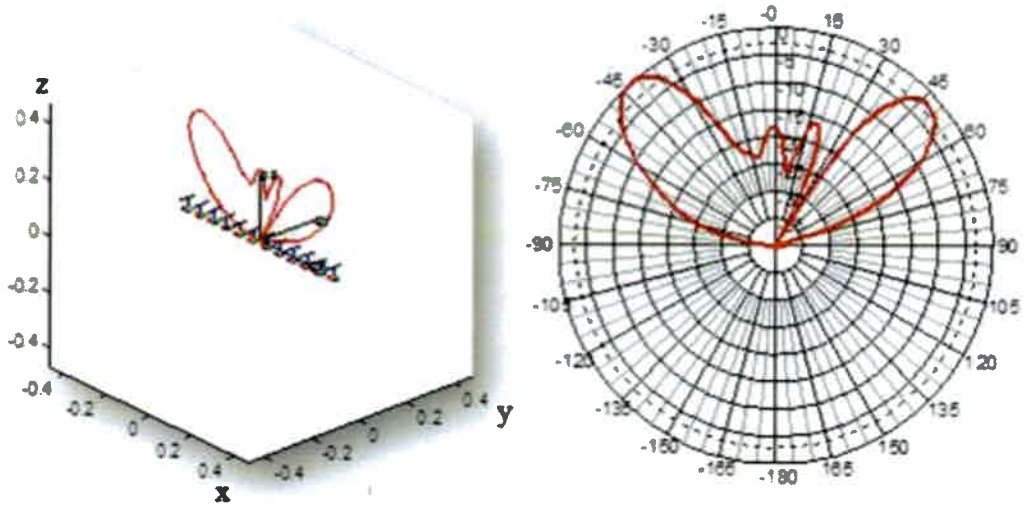


Figura V-26: Arreglo de dipolos y diagrama de radiación, obtenidos con Matlab.

Para constatar estos resultados se utilizó la herramienta de la Suite FEKO, que permite la simulación del diagrama de radiación del arreglo propuesto. Para esto se diseñó en el CAD de la herramienta un arreglo de 12 dipolos y a cada elemento se lo alimenta con los valores de magnitud y fase obtenidos por la síntesis de Fourier en Matlab.

Las Figuras V-27 y V-28 muestran el diagrama de radiación obtenido mediante la simulación, en 3D y en coordenadas polares, respectivamente.

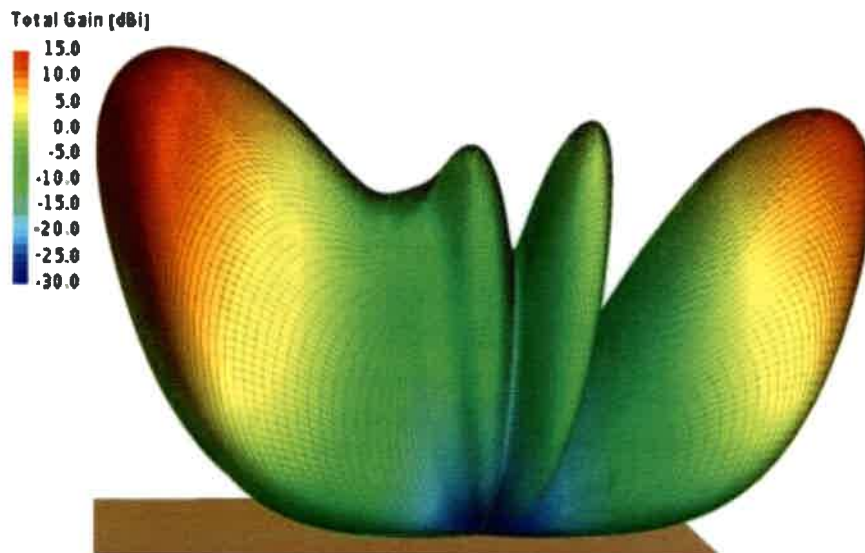


Figura V-27: Diagrama de radiación en 3D, obtenido con FEKO.

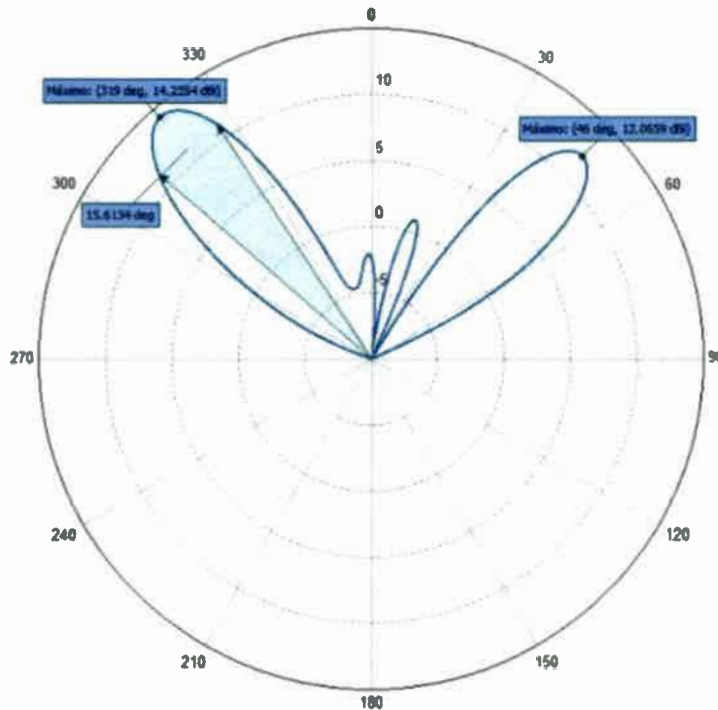


Figura V-28: Diagrama de radiación en coordenadas polares, obtenido con FEKO.

Se observa que los resultados son similares a los arrojados por Matlab, por lo tanto se valida lo obtenido por la síntesis de Fourier mediante la simulación. De esta forma se obtiene un sistema radiante constituido por un arreglo de 12 dipolos que posee dos lóbulos principales para ser ubicado en el nodo concentrador. Este arreglo provee la cobertura a las subestaciones ubicadas en el campus de la UNRC, las cuales poseen un sistema radiante directivo.

5.5. Resultados.

En este trabajo se presentó una solución de comunicación para la gestión de un sistema eléctrico de potencia. Se logró conectar las subestaciones de medición con el centro de control en forma inalámbrica, lo que permite su automatización.

Para esto se adaptó la interfaz serial (RS-485) de los relés de protección digital al estándar Ethernet, con el fin de utilizar una red basada en el protocolo IP. Posteriormente se diseñaron y calcularon los enlaces de radio entre las subestaciones y el nodo concentrador con el fin de determinar el equipamiento a utilizar y la altura de ubicación de cada antena.

Finalmente, para lograr optimizar la comunicación por el medio inalámbrico de forma tal de aumentar el rendimiento del sistema, se diseñó un sistema radiante conformado por un arreglo de doce dipolos, este posee un diagrama de radiación constituido por dos lóbulos principales que cubren la zona en la que se ubican las subestaciones. Para estas, se diseñó un sistema radiante directivo, permitiendo lograr una conexión eficiente entre los puntos de la red.

Esta implementación inalámbrica además de mejorar la eficiencia, la gestión y el control de los recursos disponibles, presenta la característica de ser rentable y escalable, permitiendo la cobertura de grandes áreas geográficas y de puntos lejanos, sin la necesidad de cableado. Por otra parte, estas características también facilitan la futura la incorporación de nuevas fuentes de energía renovables.

Como conclusión de este trabajo se encontró el sistema radiante adecuado, que junto con una infraestructura de comunicación inalámbrica, permitirá establecer de manera eficiente la conectividad entre las subestaciones de la red eléctrica propuesta.

VI. CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

6.1. Conclusiones.

En este trabajo de tesis se analizaron las características de las redes eléctricas actuales, vislumbrando la necesidad de convergencia hacia lo que se denomina Smart Grid, frente a la cual la arquitectura tradicional de la red eléctrica con la subdivisión en las cuatro áreas funcionales: generación, transporte, distribución y consumo, con un flujo de energía en un sólo sentido, queda obsoleta. Se da lugar a una arquitectura basada en los dominios definidos por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnologías, (NIST, por sus siglas en inglés *National Institute of Standards and Technology*), con interfaces eléctricas y de comunicaciones bidireccionales, que favorece la implementación de una SG con las tecnologías de comunicaciones adecuadas que proporcionan el control y el conocimiento de toda la red en cualquier momento. Este modelo permite la incorporación de la generación distribuida, las fuentes renovables, la gestión activa de la demanda y los sistemas de almacenamiento. También favorece a la participación de los consumidores como generadores de energía.

A nivel de comunicaciones aparecen diversas tecnologías que se adaptan a las características de los dominios de las redes eléctricas, entre las cuales se destacan las redes inalámbricas basadas en el protocolo IP, que proporcionan un sistema fiable, de alta velocidad, baja latencia, de dos vías (bidireccional). La estructura de la red eléctrica actuando en forma simultánea con la red de comunicaciones permite la información de los estados eléctricos en forma instantánea, lo que posibilita tomar decisiones de acuerdo a datos actuales y efectuar algún tipo acción oportuna. La incorporación de estas tecnologías también permite a las empresas proveedoras del servicio, reducir aún más los gastos de funcionamiento debido a la auto-recuperación, posibles medidas preventivas, y a la disminución de la generación a gran escala.

De este modo las SG cambiarán totalmente la forma de operar de las empresas de energía, poniendo a las telecomunicaciones el centro de sus actividades. Y las tecnologías inalámbricas serán una parte clave de la infraestructura ya que permitirán la comunicación bidireccional entre los usuarios finales y las empresas de energía.

La elección de una u otra tecnología de comunicación inalámbrica para cada segmento de las SG depende de diversos factores y de cada situación particular. En cada caso se deben analizar los costos, la estructura de la red, la infraestructura ya disponible y las condiciones geográficas. No es recomendable adoptar una única tecnología, ya que las SG poseen diferentes ambientes con diferentes características, por lo tanto se necesitan varias opciones que permitan la flexibilidad necesaria para cualquier situación. En este sentido, se puede pensar que la red de comunicaciones de SG será una red heterogénea basada en diversos estándares.

Las tecnologías inalámbricas que se han presentado en este trabajo se adaptan perfectamente a las necesidades de cada segmento de las SG. La implementación de ZigBee en las HAN implica bajos costos y bajos consumos de energía, no obstante, Wi-Fi por más de consumir mayor energía toma ventaja porque ya está presente en las HAN. En las NAN las tecnologías Wi-Fi y WiMAX son apropiadas para proveer la cobertura ya que ambos utilizan técnicas MIMO que mejoran sus características de cobertura. Finalmente, en las WAN la implementación de un *backhaul* WiMAX proporciona baja latencia, alto rendimiento, soporte para los protocolos de seguridad más avanzados, y las herramientas de gestión del tráfico, incluyendo QoS. Estas características permiten la ejecución de una amplia gama de aplicaciones en la red y el control total sobre la asignación de los recursos a través de diferentes niveles de prioridad.

La implementación de estas tecnologías ha incrementado el desarrollo de diversos estándares y ha generado la necesidad de diseñar nuevas antenas que se adapten a éstos. Tal es el caso de Wi-Fi y WiMAX que sus última modificaciones incorporan la utilización de sistemas MIMO, los cuales requieren de nuevos diseños de arreglos de antenas para su funcionamiento. Por otro lado, la tecnología ZigBee también posee diferentes diseños de antenas según la aplicación, en este caso las líneas de investigación apuntan a la miniaturización del sistema radiante debido a que se ubican dentro de los medidores inteligentes y dentro de los dispositivos eléctricos o electrónicos del hogar. Los nuevos diseños de antenas no sólo deben satisfacer las especificaciones técnicas, sino también las restricciones en sus costos de fabricación. Un buen diseño es el que permite el correcto funcionamiento de las tecnologías inalámbricas y consecuentemente permitirá el eficiente desempeño de las SG.

Para cada caso es importante identificar y definir qué parámetros deben ser considerados como principales al momento de diseñar las antenas. Dependiendo de la situación, el parámetro principal de diseño puede ser la cobertura, la directividad, el ancho de banda, el tamaño de la antena, etcétera.

Encontrar el parámetro principal es el primer paso para lograr un buen diseño, luego se debe diseñar la antena que cumpla este requisito y posteriormente, evaluar si las propiedades secundarias de la aplicación son satisfechas.

En general, el primer factor de diseño está dado por el diagrama de radiación, principalmente cuando se trata de arreglos de antenas, donde se busca proveer cobertura a una zona determinada.

6.2. Contribuciones de la tesis.

En base al estudio y el análisis realizado en este trabajo, se propuso una solución de comunicación para la gestión de un sistema eléctrico de potencia, mediante la cual se logra conectar a las subestaciones de medición con el centro de control en forma inalámbrica, permitiendo de esta forma su automatización.

Se planteó optimizar la comunicación por el medio inalámbrico de forma tal de aumentar el rendimiento del sistema mediante un sistema de antenas conformado por un arreglo de doce dipolos que posee un diagrama de radiación constituido por dos lóbulos principales que cubren la zona en la que se ubican las subestaciones. Para estas, se diseñó un sistema radiante directivo, lo que permitió lograr una conexión eficiente entre los puntos de la red.

Se implementó una red inalámbrica que además de mejorar la eficiencia, la gestión y el control de los recursos disponibles, presenta la característica de ser rentable y escalable, permitiendo la cobertura de grandes áreas geográficas y de puntos lejanos, sin la necesidad de cableado. Por otra parte, estas características también facilitan la futura la incorporación de nuevas fuentes de energía renovables.

Como aporte principal de este trabajo se diseñó un sistema de antenas que junto con una infraestructura de comunicación inalámbrica adecuada, permite establecer de manera eficiente la conectividad entre las subestaciones de la red eléctrica propuesta.

6.3. Propuestas para trabajos futuros.

De esta tesis surge como principal propuesta de trabajo a futuro: el desarrollo y la implementación del arreglo de antenas diseñado para el nodo concentrador.

También es importante considerar el rediseño la red inalámbrica en una banda de frecuencias superiores debido a las posibles interferencias que pueden aparecer por la masiva implementación de redes Wi-Fi.

Otro aspecto interesante, sería considerar algún servicio de respaldo, el cual podría operar en otra frecuencia o sobre la línea cableada, para darle robustez a la red en caso de presentarse alguna falla en el sistema de comunicaciones propuesto.

Por otro lado, en SG existe una gran diversidad de escenarios en los que se requiere del análisis y el diseño de un sistema de antenas adecuado para proporcionar un mayor rendimiento y confiabilidad en toda la red. Por ejemplo, para los sistemas que deben proveer la cobertura en las HAN, es decir en los hogares, donde las tecnologías ZigBee o Wi-Fi son las que resultan apropiadas. En este caso, el sistema de antenas es ubicado en los medidores inteligentes y en los dispositivos eléctricos o electrónicos del hogar, en este sentido las líneas de investigación apuntan a la miniaturización del sistema de antenas y a la optimización en el uso del espectro para evitar interferencias. Esta implementación en el dominio del consumidor, implica un nuevo diseño de antenas que estaría en la línea de antenas impresas.

REFERENCIAS.

- [1] "Technology Action Plan on Smart Grids," *Report to the Major Economies Forum on Energy and Climate*, 2009.
- [2] U. Alexandria, "Smart Grid," *TheCapitol.Net*, 2009.
- [3] "The Smart Grid: An Introduction," U.S. Department of Energy & Litos Strategic Communication, 2008.
- [4] "Smart Grid: Enabler of the New Energy Economy," The Electricity Advisory Committee, 2008.
- [5] R. B. J. M. Echeverry. J. I. Huertas, "Wireless Data Transmission from Inside Electromagnetic Fields," presented at the Electric Power Conference," 2009.
- [6] V. Aravinthan, al., "Wireless communication for smart grid applications at distribution level — Feasibility and requirements," presented at the Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2011.
- [7] C. Vehbi et al., "Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2011.
- [8] P. Palak et al., "Opportunities and challenges of wireless communication technologies for smart grid applications," presented at the Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2010.
- [9] "Smart Grids y la evolución de la Red Eléctrica," Ametic, Observatorio Industrial del Sector de la Electrónica, Tecnologías de la Información y Telecomunicaciones. Ed., España, 2010.
- [10] E. Santacana, et al., "Getting Smart," *Power and Energy Magazine, IEEE*, 2010.
- [11] *IEC Smart Grid Standardization Roadmap*, IEC - International Electrotechnical Commission. SMB Smart Grid Strategic Group (SG3), 2010.
- [12] "GRID 2030: A National Visionfor Electricity's Second 100 Years," U.S. DOE, Office of Electric Transmission and Distribution," 2003.
- [13] "Technology Action Plan on Smart Grids," Electric Power Research Institute, EPRI. Report to NIST on the Smart Grids Interoperability Standards Roadmap, Report to the MEF on Energy and Climate, 2009.
- [14] "Position Paper On Smart Grid, An ERGEG Conclusions Paper," European Regulators' Group for Electricity and Gas, ERGEG, 2010.

- [15] "Smart Grids," European Technology Platform, 2008.
- [16] "Accelerating Smart Grid Investments," World Economic Forum, Accenture, 2009.
- [17] I. J. Pérez-Arriaga, "Regulatory instruments for deployment of clean energy technologies," presented at the MIT Center for Energy and Environmental Policy Research, 2009.
- [18] Hiskens, I.A. "*What's smart about the Smart Grid?*," Design Automation Conference (DAC), 2010.
- [19] "Redes inteligentes de energía (smart grids) en America Latina y el Caribe: viabilidad y desafíos," *Conferencia Regional sobre Redes Inteligentes de Energía* 2010.
- [20] Tom Oh, "*Resilience Against Single Attacks in Wireless Mesh Networking for the Smart Grid Rochester Institute of Technology*," presented at the 10th KOCSEA Technical Symposium. 2009
- [21] P. P. Parikh, M. G. Kanabar, T. S. Sidhu., "Opportunities and challenges of wireless communication technologies for smart grid applications," *Power and Energy Society General Meeting, IEEE* 2010.
- [22] "Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards," National Institute of Standards and Technology (NIST), U.S. Department of Commerce. 2009.
- [23] R. Prat, F. Magnago y J. Amatti. "Sistemas de Comunicación Adecuados para Redes Inteligentes bajo la Norma IEC61850," presented at the ERIAC XIV, 2011.
- [24] A. P. Johnson, "The history of the Smart Grid evolution at Southern California Edison," *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2010.
- [25] L. Jingjing, X. Da y A. Qian, "Research on smart grid in China," *Proceedings of the Third International Symposium on Electronic Commerce and Security Workshops (ISECS '10)*, 2010.
- [26] R. Prat, F. Magnago, G. Rodriguez, "Implementación de los modelos de información básicos definidos por el estándar IEC 61850," presented at the AADECA 2010- XXII° Congreso Argentino de Control Automático, 2010.
- [27] "Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future," Comisión Europea, European Smart Grids Technology Platform, 2006.
- [28] J.F. Aguirre, R. Prat y F. Magnago, "Evaluación de performance de redes WiMAX para una Smart Grid," *ArgenCon 2012*, 2012.

- [29] C. H. Rodrigues de Oliveira, E. F. Fonseca, "Wi-Fi Technology in the Smart Grid Backhaul," in *World Congress in Computer Science, Computer Engineering, and Applied Computing*, 2011.
- [30] "*Wi-Fi for the Smart Grid: Mature, Interoperable, Security-Protected Technology for Advanced Utility Management Communications.*" Wi-Fi Alliance. 2010
- [31] C. Zhao, U. Topcu, S. H. Low, "*Fast Load Control with Stochastic Frequency*," presented at the Power and Energy Society General Meeting, 2012.
- [32] *IEEE, Local and metropolitan area networks.* IEEE Standard 802.15.1, 2005.
- [33] *IEEE, Local and metropolitan area networks.* IEEE Standard 802.15.4, 2011.
- [34] *IEEE, Wireless local area networks.* IEEE Standard 802.11, 2012.
- [35] L. Marrone, A. Barbieri, M. Robles, "*Tecnologías Wireless y Movilidad en IPv4/IPv6*," Xv Escuela Internacional de Informatica, Universidad Nacional de La Plata, 2011.
- [36] *IEEE, Broadband Wireless Access.* IEEE Standard 802.16, 2012.
- [37] A. F. Molisch, *Wireless Communications.* Ed., 2nd, John Wiley&Sons Ltd., 2011.
- [38] R. Yu, et al., "*Cognitive radio based hierarchical communications infrastructure for smart grid.*" IEEE Network, 2011.
- [39] "Smart Sensor Networks: Technologies and Applications for Green Growth." Organisation for Economic Co-operation and Development, 2009.
- [40] W. Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas.* Ed., 4ta, Prentice Hall, Phoenix Arizona, 2003.
- [41] R. Coudé. (2012). *Radio Mobile.* [Online]. Available: <http://www.cplus.org/rmw>
- [42] *IEEE Definitions of Terms for Antennas,* IEEE Standard 145-1983, 1983.
- [43] A. Cardama Aznar, et al., *Antenas.* Ed.: 2nd ed., Universitat Politècnica de Catalunya, SL, Barcelona, 2002.
- [44] M. Ouda, K. Nigim, H. Reiser, "*Compact wide band antenna for Smart Grid application*," presented at the Electrical & Computer Engineering (CCECE), IEEE, Canadian, 2012.
- [45] V.K.Sharma, H. Kumar, M. Sharma, "*Design and simulation of active antenna for communication in smart grids*," presented at the Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues & Prospects for Asia (ICUE), 2011.

- [46] K.Vyas, A.K. Sharma, P.K. Singhal, "*A novel CPW fed multiband circular microstrip patch antenna for wireless applications,*" presented at the Computational Intelligence and Communication Networks 2012.
- [47] T. Inoue, et al., "*Spatial modulation module consisting of a microstrip array antenna and dual scatterers for wireless power transmission,*" presented at the International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2012.
- [48] C. A. Balanis. *Antenna Theory. Analysis and Design*. Ed., 3rd, 2005.
- [49] S. J. Orfanidis. (2008). *Electromagnetic Waves and Antennas* [Online]. Available: <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa>
- [50] J. Anguera, A. Pérez. Ingeniería La Salle (Estudios Semipresenciales). (2008). *Teoría de Antenas*, [Online]. Available: <http://www.salleurl.edu/semipresencial/ebooks>
- [51] FEKO. *EM Software & Systems-S.A. (Pty) Ltd.* (2013). [Online]. Available: <http://www.feko.info>
- [52] Comisión Nacional de Comunicaciones (CNC). (2009). *Bandas No Licenciadas*. [Online]. Available: <http://www.cnc.gov.ar/infotecnica/espectro/uso/destacados01.asp>
- [53] Magus (Pty) Ltd (2013). [Online]. Available: <http://www.antennamagus.com>

73209

U N R C
Biblioteca Central



73209