

## Diseño de arreglo por síntesis de Fourier aplicado en Smart Grid.

Ezequiel Tardivo<sup>1</sup>, Noelia Veglia<sup>1</sup>, Federico Aguirre<sup>1</sup>

Universidad Nacional de Río Cuarto, Fac. de Ingeniería, Lab. de Radiocomunicaciones, Argentina  
{etardivo,nveglia,faguirre}@ing.unrc.edu.ar

**Resumen.** Una Red Inteligente (SG, por sus siglas en inglés Smart Grid) es una red de energía eléctrica perfectamente combinada con tecnologías de comunicaciones, lo cual permite realizar el procesamiento de la información de los parámetros eléctricos y tomar decisiones oportunas tanto a proveedores como a consumidores. Lo que implica una reducción de costos, mejorando la eficiencia de toda la red y una disminución del impacto ambiental producido por la generación de energía.

El objetivo de este artículo es diseñar un sistema radiante de ondas electromagnéticas con el fin de utilizarlo en una SG para mejorar la gestión del sistema eléctrico. El estudio se focalizó en el dominio de distribución de energía. Como contribución principal de este trabajo se diseñaron dos sistemas radiantes para ser aplicados a la red eléctrica de la UNRC. En primer lugar se diseñó un arreglo de antenas mediante la aplicación del método de síntesis de Fourier, luego se diseñaron las antenas directivas utilizadas en cada subestación.

**Palabras Claves:** Arreglos – Antenas – Síntesis de Fourier – Smart Grid – Comunicación – Wireless – Sistema Eléctrico – Red inteligente.

### 1 Introducción.

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 debe provenir de una gestión más eficiente de la red, que optimice el consumo y el suministro de energía, 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*)[1]. Una SG es un sistema que permite la comunicación bidireccional entre el consumidor 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 posibili-

tan que las redes eléctricas sea observables, controlables, automatizadas e integrables [2].

Este nuevo concepto cambia el paradigma de generación a un esquema bidireccional, donde los consumidores pueden ser a la vez productores de electricidad e introducir sus excedentes en la red [3, 4]. 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, en este sentido, las nuevas Tecnologías de Comunicación e Información (ICT, por sus siglas en inglés *Information and Communication Technology*) juegan un rol fundamental en la gestión y el control de las SG [5].

En el área de telecomunicaciones existen varias tecnologías que pueden utilizarse en SG, entre las que se destacan las tecnologías inalámbricas por su aplicación en los diferentes ambientes de las SG, como plantas de generación, sistemas de transmisión y de distribución, subestaciones, y las comunicaciones locales de los clientes[6].

En este trabajo se presenta una solución de comunicación para el dominio de distribución de un sistema eléctrico real, contemplando específicamente la comunicación entre las celdas de media tensión y la adquisición de datos en las mismas, para el análisis y la operación del sistema. Dicho sistema está constituido por 5 subestaciones totalmente aisladas, por lo tanto, para el control y el relevamiento de mediciones se accede localmente a cada punto para descargar la información y luego analizarla.

La propuesta consiste en implementar una red inalámbrica que permita conectar estos puntos, para la comunicación de los parámetros de la red en tiempo real, con el objetivo de mejorar la gestión del sistema eléctrico.

Para esto, se analizaron las características propias del entorno de propagación, considerando, el perfil del terreno, las estructuras edilicias y la 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 del vínculo inalámbrico, se diseñó un arreglo de antenas basado en el método de síntesis de Fourier, de forma tal de distribuir la energía radiada en dos lóbulos principales que abarquen los puntos de interconexión de la red, en donde se encuentran ubicadas las subestaciones. Para éstas se diseñó un sistema radiante directivo.

## **2 Tecnología de comunicación propuesta.**

La elección de la tecnología de comunicación, se realiza teniendo en cuenta la topología de la red eléctrica y los requerimientos técnicos propios del sistema. En este caso, se pretende establecer la comunicación inalámbrica entre los relé de protección digital ubicados en cada subestación, con un Dispositivo Electrónico Inteligente (IED, por sus siglas en inglés *Intelligent Electronic Devices*) ubicado en la subestación principal. La comunicación entre los dispositivos se realiza mediante el protocolo ModBus serie (Modbus RTU), el cual es un protocolo que permite leer o escribir datos en los registros de cada relé de protección digital 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.

Se implementa una infraestructura de comunicación inalámbrica basada en el protocolo IP, para lo cual se utilizan *gateways* genéricos que convierten el estándar RS 485 de los equipos de las subestaciones a protocolos IP.

Dentro del abanico de tecnologías disponibles, se consideran principalmente las que permiten la utilización de las bandas de frecuencia no licenciadas. Por lo tanto se selecciona la banda de frecuencias que abarca desde 2,400 a 2,500 MHz con frecuencia central en 2,450 MHz, la cual es conocida como la banda de 2,4 GHz.

La solución que se propone contempla la utilización de enlaces punto multipunto, entre cada una de las subestaciones y un nodo concentrador, donde se coloca el arreglo de antenas que posee dos lóbulos principales, de los cuales, un lóbulo abarca tres subestaciones y el otro las dos subestaciones restantes. Esto se observa en la figura 1.

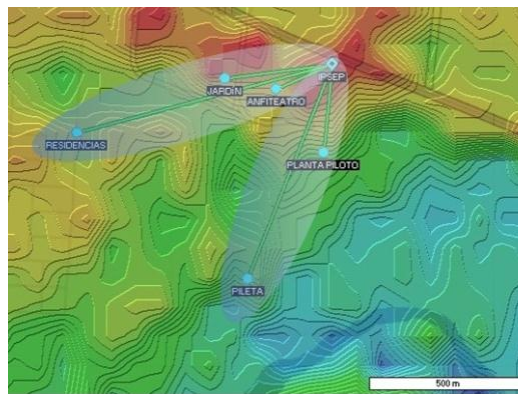


Fig. 1. Requerimiento de cobertura del arreglo.

### 3 Cálculos de radioenlaces.

Para el cálculo de los radioenlaces se analizan las características propias del entorno de propagación, considerando, el perfil del terreno, las estructuras edilicias y la vegetación entre los puntos en cuestión con el fin de definir la altura de ubicación de cada sistema radiante. Se consideró un despeje del 100% del primer elipsoide de Fresnel dado que la tecnología utilizada requiere vínculos con línea de vista (LoS, por sus siglas en *inglés Line of Sight*). En la Tabla 1 se observan las alturas de la ubicación de los sistemas radiantes.

Tabla 1. 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

#### 4 Diseño de sistemas radiantes.

Según las características planteadas, se diseña un sistema radiante formado por un arreglo de doce dipolos, que posee dos lóbulos principales, para el nodo concentrador y se diseña un sistema radiante que permite obtener un patrón de radiación directivo con un ancho de haz estrecho para cada subestación.

##### 4.1 Sistema radiante del nodo concentrador.

El sistema radiante que se utiliza en el nodo principal es un arreglo de doce elementos radiantes y un plano reflector, como se observa en la figura 2 y está diseñado en la frecuencia central de trabajo de 2,45 GHz.

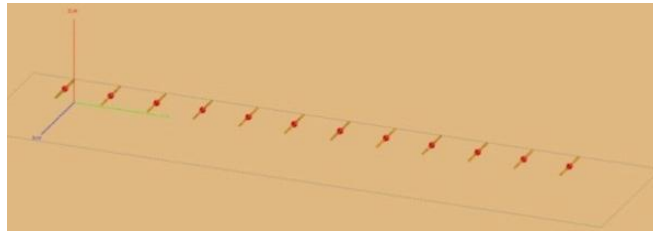


Fig. 2. Arreglo de 12 dipolos

Teniendo en cuenta las ubicaciones de las estaciones, 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 1. Para lograr esto el arreglo de antenas es modelado mediante el método de síntesis de Fourier. Los trabajos [7, 8] fundamentan el uso de síntesis para el desarrollo de arreglos de antenas.

##### 4.2 Método de síntesis de Fourier.

Para obtener los coeficientes de la agrupación que sinteticen el diagrama deseado, matemáticamente se opera al Factor de arreglo (FA) de la siguiente forma:

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

$$FA(z) = a_0 + a_1z + a_2z^2 + \dots + a_mz^m + \dots + a_{2M}z^{2M} \quad (1)$$

$$FA(z) = z^M (a_0z^{-M} + a_1z^{-(M-1)} + \dots + a_m + \dots + a_{2M}z^M) \quad (1)$$

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

$$|FA(z)| = |a_0z^{-M} + a_1z^{-(M-1)} + \dots + a_m + \dots + a_{2M}z^M| \quad (2)$$

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

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

Donde,

$$\begin{aligned} a_0 &= c_{-M} \\ a_1 &= c_{-(M-1)} \\ &\vdots \\ a_m &= c_o \\ &\vdots \\ a_{2M} &= c_M \end{aligned} \quad (3)$$

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

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

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

$$FA(\psi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\psi + b_n \text{senn}\psi \quad (7)$$

Donde,

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} FA(\psi) \cos n\psi d\psi \quad (8)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} FA(\psi) \text{senn}\psi d\psi \quad (9)$$

$$c_n = \frac{a_n - jb_n}{2} \quad c_{-n} = c_n^* = \frac{a_n + jb_n}{2} \quad c_o = \frac{a_o}{2} \quad (10)$$

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  $c_n$ [9]. 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.

### 4.3 Aplicación de síntesis de Fourier.

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, mediante la utilización del método de síntesis de Fourier.

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

La figura 3 muestra una representación de la expresión que se desea obtener mediante la síntesis.

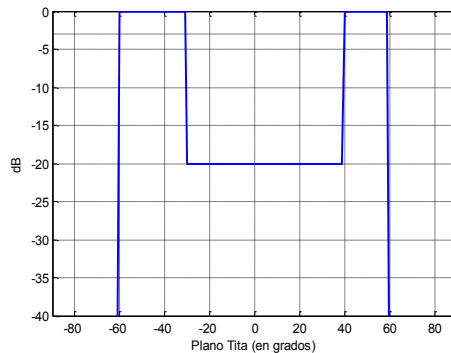


Fig. 3. Diagrama de radiación buscado.

Una vez definida la función que se desea aproximar, utilizando la herramienta Matlab, 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 constituido por 12 dipolos de longitud  $\lambda/2$  ubicados a una distancia  $\lambda/4$  de una superficie conductora y espaciados entre sí  $\lambda/2$ .

### 4.4 Resultados obtenidos

Aplicando este método con todas las consideraciones mencionadas, los resultados (coeficientes) arrojados con los cuales se alimentarán los dipolos son los siguientes:

Tabla 2. Valores de alimentación arrojados por el método de Síntesis de Fourier.

Element	Amp (dB)	Phase (Deg)	Real	Imag
1	-13.66	-19.79	0.195	0.070
2	-10.28	141.74	-0.240	-0.190
3	-28.57	-178.83	-0.037	0.001
4	-3.42	-17.86	0.642	0.207
5	0.00	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	0.00	-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	-0.240	0.190
12	-13.66	19.79	0.195	-0.070

En la figura 4 se presenta el diagrama propuesto (en azul) y el diagrama alcanzado tras el proceso de síntesis (en rojo).

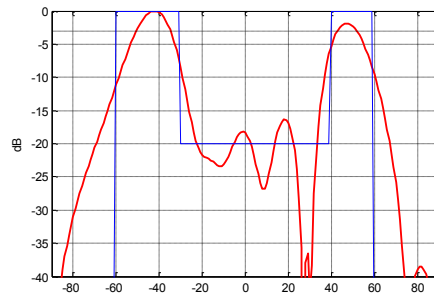


Fig. 4. Comparación de diagramas.

Para constatar estos resultados se utilizó la herramienta *FEKO*[10]. Se diseñó en el CAD de la herramienta un arreglo de 12 dipolos, a los que se alimentó con los valores de magnitud y fase obtenidos por la síntesis de Fourier. Las figuras 5 y 6 muestran el diagrama de radiación simulado, en 3D y en coordenadas polares, respectivamente.

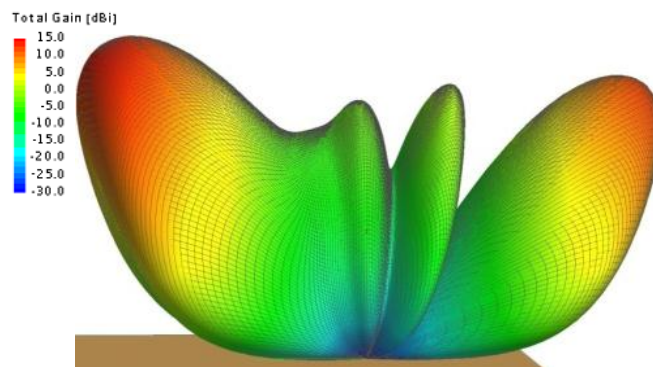


Fig. 5. Diagrama de radiación en 3D, obtenido con Feko.

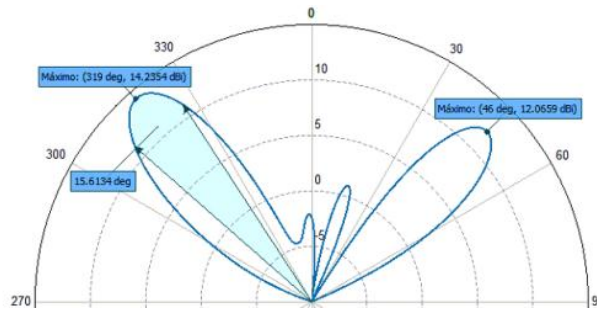


Fig. 6. Diagrama de radiación en coordenadas polares, obtenido con Feko.

Se observa que los resultados son similares a los arrojados por Matlab, por lo tanto se ha diseñado un arreglo con dos lóbulos principales para ser ubicado en el nodo concentrador. Este arreglo provee la cobertura a las subestaciones ubicadas en el campus, las cuales poseen un sistema radiante como el que se presenta a continuación.

#### 4.5 Sistema radiante en las subestaciones.

El sistema radiante que se utiliza en las subestaciones corresponde a una antena 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 directivo y está constituido por un elemento radiante (dipolo) y un reflector tipo diedro como se observa en la figura 7.

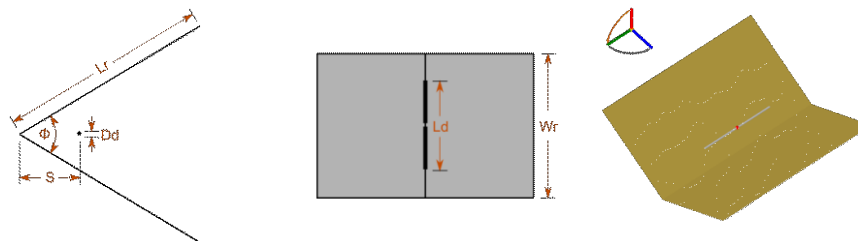


Fig. 7. Sistema radiante, dipolo con reflector diedro.

Se utiliza la herramienta Antenna Magus [11] para obtener el CAD del modelo de la antena, al mismo se lo exporta a la Suite FEKO con el propósito de simular su comportamiento electromagnético y analizar las características de la antena. Mediante estas herramientas se optimizan las dimensiones del dipolo, del reflector y se ajusta la distancia entre ambos elementos de manera de obtener la mejor relación de onda estacionaria (ROE). Las dimensiones obtenidas se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Dimensiones del sistema radiante de las subestaciones.

Lr	Dd	S	$\phi$	Ld	Wr
14 cm	0,6 cm	8 cm	90°	6 cm	12 cm



De los resultados obtenidos en la simulación, se obtienen los parámetros que caracterizan la antena, los cuales permiten corroborar si el diseño es el adecuado.

En la figura 8 se observa el diagrama de radiación, con el dipolo en polarización vertical, en este diagrama se demuestra que el sistema radiante posee la característica de ser directivo y con una ganancia 12 dBi en la dirección de máxima directividad.

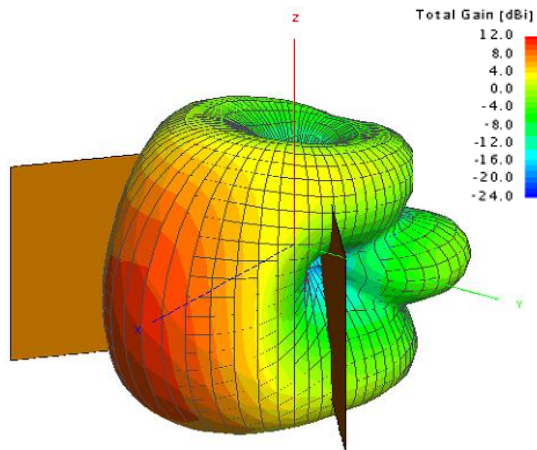


Fig. 8. Diagrama de radiación de la antena

En la figura 9 se muestra el comportamiento de la antena con respecto a la ROE, en el rango de frecuencias entre 2,3 GHz y 2,6 GHz aproximadamente,

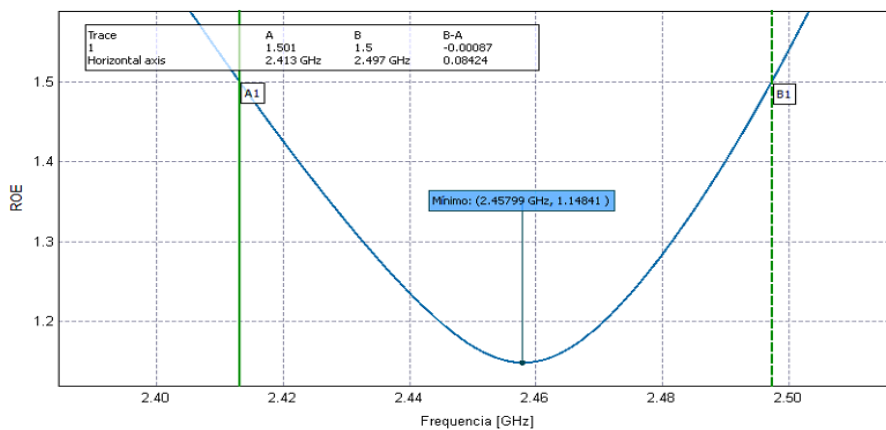


Fig. 9. Frecuencia vs. ROE

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,

que en este caso es superior a 80 MHz y está en el rango de frecuencias que va desde los 2,41 GHz a los 2,49 GHz, el cual comprende la frecuencia de diseño de 2,45 GHz.

En la figura 10 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.

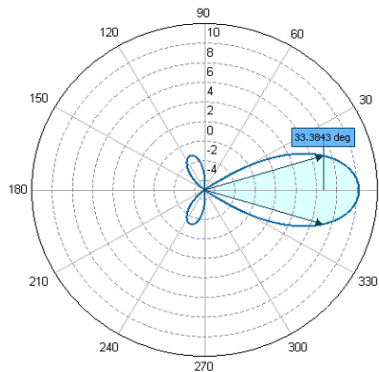


Fig. 10. Ángulo de media potencia.

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.

#### 4.6 Mediciones sistema radiante de las subestaciones.

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. La Figura 11 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 y se tiene en cuenta el de-embedding de cables y conectores.

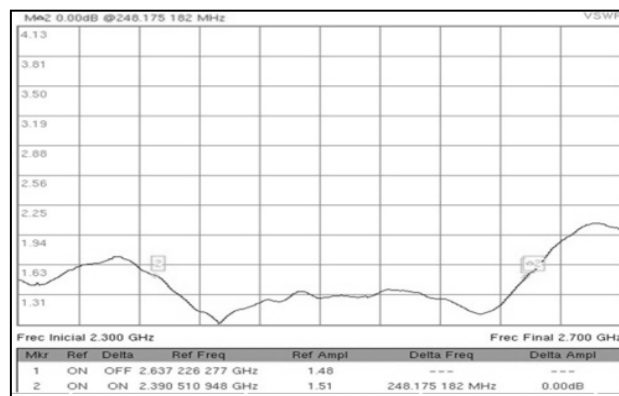


Fig. 11. Medición de Frecuencia vs. ROE (VSWR).

Se observa que el sistema está adaptado en la frecuencia de trabajo. 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, lo cual cumple ampliamente con las expectativas planteadas en la etapa de diseño, en la cual se buscaba un sistema radiante con un ancho de banda de 80 MHz.

Para determinar la ganancia y el diagrama de radiación de la antena 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 Tita y Phi para obtener los niveles de potencia recibida en cada ángulo, posteriormente se aplica la ecuación (11), y se obtienen los valores de ganancia.

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

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  $A_0 = 54,16\text{ dB}$  es la atenuación en el espacio libre que se calcula con la ecuación (12). [12]

$$A_0 = 32,4 + 20 * \log_{10} f(\text{MHz}) + 20 * \log_{10} d(\text{km}) \quad (6)$$

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 4, en donde se observa que la ganancia de la antena en la dirección de máxima directividad ( $\text{Phi}=0^\circ$  y  $\text{Tita}=0^\circ$ ) es de 10 dB, y el ángulo de media potencia de la antena es de  $35^\circ$ .

Tabla 4. Mediciones y cálculo de ganancia

Pr (dBm)	Tita (°)	Phi (°)	Gar (dBi)	Pr (dBm)	Tita (°)	Phi (°)	Gar (dBi)
-42	0	0	10	-42	0	0	10
-45	0	18	7	-45	17	0	7
-53	0	45	-1	-50	45	0	2
-60	0	90	-8	-72	90	0	-20
-70	0	135	-18	-68	135	0	-16
-70	0	270	-18	-70	270	0	-18
-55	0	-45	-3	-47	-45	0	5
-60	0	-90	-8	-62	-90	0	-10
-66	0	-135	-14	-66	-135	0	-14

Comparando los valores simulados con los medidos se observa que la antena cumple con las expectativas planteadas en la etapa de diseño.

## 5 Conclusión.

En este trabajo se presentó una solución de comunicación inalámbrica 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 entre las subestaciones y el nodo concentrador para determinar el equipamiento 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 de las comunicaciones 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 las cuales se diseñó un sistema radiante directivo, que permitió lograr la conexión eficiente entre los puntos de la red. De esta forma se puede acceder en forma remota a los datos provistos por los relés de cada subestación, como así también la manipulación de los mismos a través del IED.

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 incorporación de nuevas fuentes de energía renovables.

Como conclusión de este trabajo se encontró un sistema radiante que cumple con los objetivos propuestos y que junto con una infraestructura de comunicación inalámbrica, permite lograr la comunicación eficiente entre las subestaciones de la red eléctrica propuesta, de esta forma se implementa a menor escala una SG real mediante la utilización de un sistema de comunicación inalámbrico, mejorando así la gestión del sistema eléctrico.

## 6 Referencias.

1. Santacana, E., Le T.y Xiaoming. F. Getting Smart. Power and Energy Magazine, IEEE. 41-48. (2010)
2. Pérez-Arriaga I. J., "Regulatory instruments for deployment of clean energy technologies," MIT Center for Energy and Environmental Policy Research, Cambridge, Mass., (2009)
3. A. P. Johnson, "The history of the Smart Grid evolution at Southern California Edison," Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), pp. 1-3, 19-21, (2010)
4. Jingjing L., Da X.y Qian A."Research on smart grid in China," Proceedings of the Third International Symposium on Electronic Commerce and Security Workshops, pp. 354-357, (2010)
5. Alexandria, U. "Smart Grid," TheCapitol.Net, (2009)
6. National Institute of Standards and Technology (NIST), "Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards," (2009)
7. Andriychuk, M.I.; Zamorska, O.F "Waveguide Antenna Synthesis in the Frequency Band," International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, (2006)
8. Benedetti, M. et al. "A time-based approach for the synthesis of antennas for UWB communication systems,"Antennas and Propagation Society International Symposium, (2008)
9. Anguera J.; Pérez, A. Teoría de Antenas, (2008)
10. EM. software & systems-S.A. (Pty) Ltd. Disponible: <http://www.feko.info>
11. Herramienta de diseño de antenas. Disponible: <http://www.antennamagus.com/>
12. UIT-R. Cálculo de la atenuación en el espacio libre R. UIT-R. PN.525-2, (1994)