



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES



**DESARROLLO DE UN ARREGLO DE ANTENAS PATCH EN LA BANDA 300-650
MHZ**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentada ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como requisito para optar al título de

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

REALIZADO POR:

Rod M. Alvarez D.

Alberto J. Nobrega A.

TUTOR:

Ing. Diana Londoño

FECHA:

Marzo de 2013



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES



DESARROLLO DE UN ARREGLO DE ANTENAS PATCH EN LA BANDA 300-650MHZ

REALIZADO POR: Rod M. Alvarez d.

Alberto J. Nobrega A.

TUTOR: Ing. Diana Londoño.

Caracas, Marzo de 2013



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES



DESARROLLO DE UN ARREGLO DE ANTENAS PATCH EN LA BANDA 300-650MHZ

**Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su
contenido con el resultado:**

JURADO EXAMINADOR

Firma

Firma:

Firma

Nombre: _____

Nombre: _____

Nombre: _____

REALIZADO POR:

Rod Alvarez

Alberto Nobrega

TUTOR: Ing. Diana Londoño.

Caracas, Marzo de 2013

Dedicatoria

“No existe obstáculo insuperable aunque parezca imposible...”

Primeramente este proyecto es dedicado a Dios, por llenarme de paciencia, salud e inteligencia en aquellos momentos en los que más lo necesité.

A mis padres por haberme inculcado una estupenda educación además de estar a mi lado desde el momento en que abrí los ojos al mundo. Y por nunca desampararme y haber estado conmigo incondicionalmente en todo momento. MUCHAS GRACIAS LOS AMO

A mi estrellita que desde el cielo se exalta de emoción y orgullo al cumplirse una gran meta de su nieto. Muchas gracias por llenarme de amor y por haber contribuido con mis padres en mi formación personal. TE AMO Y SIEMPRE TE AMARÉ abuela!

A mis hermanos por regalarme constantemente sonrisas y por darme fuerzas para buscar cada vez ser un ejemplo más a seguir.

A mi abuela paterna y a todos aquellos demás familiares y verdaderos amigos que nunca me han abandonado a pesar de las adversidades.

A mi novia y su familia, por recibirme con los brazos abiertos y permitirme integrarme a ellos.

A todos ustedes,

Mil Gracias

Rod Alvarez

“El tiempo de Dios es perfecto”

Este trabajo es dedicado principalmente a Dios, que el símbolo que me llenó de fuerza y de paciencia para no decaer en los momentos en que los obstáculos parecían insuperables.

A mis padres que nunca perdieron la fe en mí, que siempre me han dado, además de la vida y una familia excelente, la confianza para poder enfrentar todos los obstáculos de la vida y que me han guiado por un buen camino, siempre intentando hacer de mí una mejor persona. De corazón GRACIAS, LOS AMO.

A mis hermanos, que significan una motivación extra para triunfar en la vida, no solo por la amistad y el papel que representan en mí vida, sino también porque ellos complementan una familia perfecta. Siempre con ustedes, LOS AMO.

A todos los seres queridos que por alguna razón ya no están en este mundo pero que fueron y siempre serán un ejemplo para mí de que con esfuerzo y trabajo se te pueden abrir muchas puertas. Te extraño prima.

A todos los familiares y amigos que siempre están allí, en momentos buenos y en momentos malos, y que te enseñan cosas importantes de la vida.

A mi novia y a su familia, por apoyo incondicional y por ser una de las razones que motivan a querer triunfar en la vida.

A todos ustedes

Mil gracias

Alberto Nobrega

Agradecimientos

Agradecemos de todo corazón a:

Carlos Nobrega

Jorge Alvarez

Dalila Alfonso

Samantha del Rio

Daniel Pineda

Luis M. Capriles

Rosmary Pineda

Ing. Luciano Díaz

Félix Ziegler

Alba Zambrano

Natasha Quintela

Mary Carmen Peyre

Y a todos aquellos que de alguna manera estuvieron involucrados en este proyecto.

Gracias.

DISEÑO DE UN ARREGLO DE ANTENAS PATCH CONFIGURABLES EN LA BANDA 300-650MHZ

Alvarez, Rod

rmalvarez.11@gmail.com

Nobrega, Alberto

alberto_nobreg@hotmail.com

Resumen

En las telecomunicaciones siempre se busca mejorar de manera eficiente los sistemas de comunicaciones ya existentes para lograr mejores capacidades y mayores velocidades tratando de mantener o bajar el costo de la misma. Las antenas impresas (o microstrip) por su bajo costo, peso y facilidad de reproducción ha generado un interés notable para su uso como elemento radiador, pero al ser reducidas en ancho de banda se ven desplazadas por otras antenas más efectivas en este aspecto. En el presente trabajo se propone mejorar el desempeño de estas antenas implementando para ello el uso de un arreglo que permita obtener nuevas características que se adapten a los requerimientos de aplicaciones, y de esta manera dar otra opción a esta tecnología para que pueda ser usada en sustitución de otras más costosas, tomando en cuenta que este arreglo podrá trabajar en altas frecuencias, en la banda de UHF, en las cuales se encuentran aplicaciones interesantes (por ejemplo, televisión digital). El arreglo de antenas impresas se probó para transmisión de señales en el rango de 300 a 650 MHz, que corresponde con la banda de frecuencia de UHF, y se obtuvo que el prototipo puede ser implementado de acuerdo a las características de algunos sistemas de transmisión.

Índice General

Resumen	viii
Índice General.....	ix
Índice de Figuras	xi
Índice de Tablas	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.....	2
PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO.....	2
I.1 Planteamiento del problema	2
I.3 Justificación	3
I.4 Alcances/Limitaciones	4
CAPITULO II	5
Marco Teórico.....	5
II.1 Antenas	5
II.2 Parámetros importantes de las antenas.....	6
II.2.1 Diagrama de Radiación	6
II.2.2 Potencia Radiada	8
II.2.3 Directividad	9
II.2.4 Ganancia	9
II.2.5 Impedancia de entrada	10
II.2.7 Factor de calidad.....	10
II.2.8 Eficiencia	10
II.2.9 ROE (Relación de Onda Estacionaria)	11
II.2.10 Polarización	11
II.2.11 Ancho de banda útil	12
II.3 Fuente isotrópica	13
II.4. Regiones del Campo	13
II.5 Agrupaciones de antenas	15
II.6 Antenas Patch	18
II.6.1 Funcionamiento de las Antenas Patch	20

II.6.2 Tipos de Parches	22
II.6.2.1 Parche Cuadrado:	23
II.6.2.2 Parche Circular:	23
II.6.2.3 Parche Ranura:	24
II.6.2.4 Parche Rectangular:	25
II.6.3 Alimentación de un parche	25
II.6.3.1 Sonda Coaxial:	26
II.6.3.2 Línea Microstrip:	27
II.7 Antenas Configurables.....	27
CAPITULO III	28
Metodología.....	28
Fase I: Revisión bibliográfica.	29
Fase II: Cálculo y Diseño de las características de la antena.	29
Fase III: Simulación	29
Fase IV: Construcción, Evaluación y Comparación.....	29
Fase V: Redactar el libro de trabajo especial de grado.	29
CAPITULO IV.....	31
Desarrollo	31
V.3 Aplicación	77
CAPITULO V	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
VI.1 Conclusiones	78
VI.2 Recomendaciones	79
BIBLIOGRAFÍA	80
ANEXOS.....	81
Anexo 1. Tabla de valores de VSWR o ROE y pérdidas por retorno.	81
Anexo 2. Hoja de especificaciones de modulador MO-160/MO-161	82
Anexo 3. Hoja de especificaciones de transmodulador MO-162/MO-163	84
Anexo 4. Transformador de impedancias utilizado.....	86
Anexo 5. Tabla de costos de producción del prototipo.	87
Anexo 6. Fotos de construcción y pruebas del arreglo.....	88

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa resumen para elaboración del marco teórico.....	5
Figura 2. Diagrama de radiación tridimensional.	7
Figura 3. Diagrama de radiación en coordenadas polares.	8
Figura 4. Diagrama de radiación en coordenadas cartesianas	8
Figura 5. Relación entre ancho de banda y perdidas por retorno.	13
Figura 6. Regiones de campo de una antena.	14
Figura 7. Arreglo de N antenas isotrópicas.	15
Figura 8. Arreglo Lineal de N elementos.	18
Figura 9. Antena microstrip con parche rectangular	19
Figura 10. Distribución de los campos eléctricos en antenas patch.	20
Figura 11. Láminas de corrientes magnéticas equivalentes.	21
Figura 12. Equivalente electromagnético.	22
Figura 13. Parche Cuadrado.	23
Figura 14. Parche Circular.....	24
Figura 15. Parche de tipo ranura.....	24
Figura 16. Sonda Coaxial.	25
Figura 17. Línea Microstrip.....	26
Figura 18. Metodología.	28
Figura 19. Base construida para el arreglo.	42
Figura 20. Soporte de una antena.	43
Figura 21. Separación entre antenas.	44
Figura 22. Diagrama de conexión de la alimentación del arreglo (1 y 3: Cable Rg 6, 2: Splitter, 4: transformador de impedancia, 5: Cable RG 58, 6: antena patch).....	45
Figura 23. Arreglo en Configuración vertical.	46
Figura 24. Arreglo en Configuración horizontal.	47
Figura 25. Transmisor empleado para la verificación del funcionamiento de las antenas.	48
Figura 26. Analizador de espectro utilizado para captar las señales de prueba.....	48
Figura 27. Turntable.	49
Figura 28. Antena patch en HFSS.	51

Figura 29. Patrón de radiación de una antena patch rectangular.	51
Figura 30. Parámetro S11 de una sola antena.....	52
Figura 31. Arreglo en simulador, en configuración horizontal.	53
Figura 32. Arreglo en simulador, en configuración vertical.....	53
Figura 33. Patrón de radiación del arreglo en configuración horizontal, obtenido a través del simulador.	54
Figura 34. Parámetro S11 para el arreglo en configuración horizontal.....	55
Figura 35. VSWR o ROE para el arreglo en configuración horizontal.....	55
Figura 36. Patrón de radiación del arreglo en configuración vertical, obtenido a través del simulador.	56
Figura 37. Parámetro S11 del arreglo en configuración vertical.....	57
Figura 38. VSRW o ROE del arreglo en configuración vertical.....	58
Figura 39. Señal captada al transmitir con una sola antena.....	60
Figura 40. Señal captada al transmitir con el arreglo en configuración horizontal.....	61
Figura 41. Señal captada al transmitir con el arreglo en configuración vertical.....	61
Figura 42. Antena Patch sobre Turntable.....	62
Figura 43. Diagrama de Radiación de una sola antena patch.....	64
Figura 44. Arreglo en configuración vertical sobre Turntable.....	64
Figura 45. Diagrama de Radiación del arreglo en configuración vertical.....	66
Figura 46. Arreglo en configuración horizontal sobre Turntable.....	66
Figura 47. Diagrama de Radiación del arreglo en configuración horizontal.....	68
Figura 48. Analizador de redes. Arreglo en puerto 1.....	69
Figura 49. Parámetro S11 de una sola antena.....	70
Figura 50. ROE de una sola antena.....	71
Figura 51. Parámetro S11. Arreglo en configuración horizontal. Alimentación uniforme.....	71
Figura 52. ROE. Arreglo en configuración horizontal. Alimentación uniforme.....	72
Figura 53. Parámetro S11. Arreglo en configuración horizontal. Alimentación no uniforme.....	73
Figura 54. SWR. Arreglo en configuración horizontal. Alimentación no uniforme.....	73
Figura 55. Parámetro S11. Arreglo en configuración vertical. Alimentación uniforme.....	74
Figura 56. SWR. Arreglo en configuración vertical. Alimentación uniforme.....	75
Figura 57. Parámetro S11. Arreglo en configuración vertical. Alimentación no uniforme.....	76

Figura 58. SWR. Arreglo en configuración vertical. Alimentación no uniforme.	76
---	----

Índice de Tablas

Tabla 2. Parámetros del Arreglo.....	59
Tabla 3. Mediciones para diagrama de radiación de una antena patch.	63
Tabla 4. Mediciones para cálculo de diagrama de radiación del arreglo en configuración vertical.	65
Tabla 5. Mediciones para cálculo de diagrama de radiación del arreglo en configuración horizontal.	67

INTRODUCCIÓN

Hoy en día en el mundo de las telecomunicaciones se busca desarrollar los métodos y medios de comunicación ya existentes para lograr mejoras en cuanto a ciertos parámetros de transmisión dependiendo de la aplicación. Por esto se estudian diferentes tecnologías para probar cuál sería mejor en cuanto a calidad y en cuanto a costo para que ésta sea accesible para todo tipo de usuario.

Uno de los grandes avances en la actualidad en el mundo de las telecomunicaciones, es la implementación de la tecnología microstrip como elemento radiante en diversos sistemas. Esto es debido a que dicha tecnología ofrece soluciones a un bajo costo, gracias a la fácil producción de este tipo de antenas.

Sin embargo, las antenas de tipo patch presentan ciertas características desfavorables, por las cuales, en algunos casos, no son competitivas con otras tecnologías. Buscando implementar la tecnología microstrip, se han desarrollado varias soluciones que permitan sacar el máximo provecho de la misma.

Una de las soluciones antes mencionadas, es la realización arreglo de antenas. En el presente proyecto se busca desarrollar dicha alternativa.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

En el presente capitulo se describirá de manera detallada lo referente al planteamiento del problema, los objetivos, limitaciones/alcances y la justificación del proyecto referente a la investigación de este Trabajo Especial de Grado.

I.1 Planteamiento del problema

En la actualidad, un gran número de retos se presentan a la hora de disponer de antenas y dispositivos en las diferentes frecuencias de operación. Una de las mayores necesidades se muestran en la de disponer de uno o más elementos radiantes según sea necesario. Con el fin de operar en un determinado rango de frecuencias en el medio radioeléctrico, se diseñan los llamados arreglos de antenas.

En muchos casos la producción de antenas puede llegar a ser costosa. Al ser la tecnología microstrip una alternativa de bajo costo y de fácil producción, se busca desarrollar antenas basadas en dicha tecnología. Tal es el caso de ciertas instituciones como clínicas, casas de reposo, entre otras, en las que se requiere la difusión de señales de televisión digital pero no se tienen los recursos económicos necesarios para dichos sistemas de transmisión. Es este un caso en donde las antenas patch pueden reducir el costo y lograr los resultados deseados. A pesar de las ventajas económicas que ofrecen este tipo de antenas, es importante resaltar que además presentan ciertas características desfavorables, en cuanto a rendimiento se refiere. Con la intención de mejorar este aspecto de dichas antenas, se busca desarrollar un arreglo de las mismas, y de ésta manera se adapten a los requerimientos de algunas aplicaciones.

I.2 Objetivos

En esta sección se presentan los objetivos que se desean alcanzar, tanto el objetivo general como los específicos, los cuales están enfocados a las pruebas y estudios realizados en el Trabajo Especial de Grado.

I.2.1 Objetivo General

Desarrollo de un arreglo de antenas patch en la banda de 300 a 650 MHz.

I.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar los proyectos anteriores que se hayan realizado sobre el diseño y construcción de antenas configurables en diferentes rangos de frecuencias.
- Determinar los requerimientos necesarios para el prototipo de arreglo de antenas de tipo patch en el rango de 300 a 650 MHz.
- Definir la estructura del prototipo y analizar sus parámetros técnicos haciendo uso del simulador.
- Construir el arreglo de antenas patch y efectuar las mediciones de los parámetros técnicos del mismo.
- Comparar los resultados simulados y los experimentales.

I.3 Justificación

En el área de las Telecomunicaciones existen muchas aplicaciones para los sistemas de transmisión. Las redes inalámbricas dan una solución a lugares en los cuales el acceso mediante cableado se dificulta ya sea por problemas topográficos, de costos o simplemente por querer rapidez en colocar el servicio de redes en dicho lugar. En aplicaciones como la televisión existen diferentes modelos de antenas que llevan años usándose. Se estudia cómo innovar y se buscan soluciones que permitan disponer de elementos radiantes que transmitan y reciban señales más óptimas. Para televisión es necesario disponer de arreglos de antenas que permitan operar en un rango grande de frecuencias del espectro radioeléctrico.

Para este Trabajo Especial de Grado se diseñaron diversos modelos de antenas de tipo parche capaces de trabajar en la banda de 300 a 650 MHz del espectro radioeléctrico. Para

esto, se ha estudiado la teoría de las antenas así como el uso de los simuladores, evaluando cuál era la mejor opción o cuál se adaptaba mejor a nuestra investigación para luego proceder a la construcción de las mismas.

I.4 Alcances/Limitaciones

Con el fin de lograr el desarrollo del proyecto y poder cumplir todos los objetivos planteados, se describen a continuación los alcances y limitaciones presentadas durante la ejecución del trabajo especial de grado.

Limitaciones:

Este proyecto especial de grado se limitará a diseñar y probar el prototipo de arreglo de antenas patch en la banda de 300 a 650 MHz. Se realizará el diseño de las antenas buscando un prototipo que sea sencillo de realizar y a bajo costo, accesible y con materiales de óptima calidad.

Para realizar mediciones de los diagramas de radiación de las antenas es necesario contar con una cámara anecóica que permita lograr un ambiente adecuado. Por lo tanto, debido a la falta de disponibilidad de la misma, en el presente trabajo especial de grado únicamente se simulará el diagrama de radiación de las antenas construidas.

Este trabajo especial de grado no incluye el diseño por separado de los distintos dispositivos que conforman los instrumentos y computadores para probar las antenas.

Alcances:

Este proyecto se limitará al diseño de arreglos de antenas patch en el rango de frecuencia ya mencionado, no descartando que las mismas tengan más de un uso.

En la implementación del proyecto se tomarán en cuenta las funcionalidades y características de los dispositivos presentes en el laboratorio para realizar las pruebas.

CAPITULO II

Marco Teórico

En este capítulo se encuentran todas las bases teóricas de las cuales nos apoyamos para poder realizar el Trabajo Especial de Grado, así como también conocimientos necesarios para el desarrollo de dicho proyecto. En la Figura 1 se muestra un mapa resumen del presente capítulo.

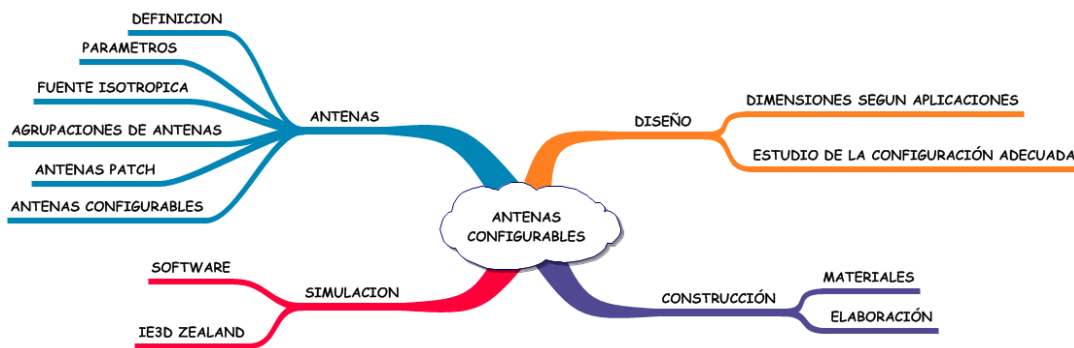


Figura 1. Mapa resumen para elaboración del marco teórico.
Fuente: Elaboración Propia.

II.1 Antenas

Una antena es básicamente un conductor metálico diseñado con el fin de irradiar y/o recibir ondas electromagnéticas por medio del espacio libre. Las antenas transmisoras transforman la corriente eléctrica en ondas electromagnéticas, y una antena receptora realiza la función inversa. Las antenas son elementos indispensables en sistemas de comunicaciones que usan el aire como medio de transmisión, ya que éstas son las responsables de la transición entre una zona donde existe una onda electromagnética guiada y una onda en el espacio libre.

La misión de una antena es radiar la potencia que se le suministra con las características de direccionalidad adecuadas a la aplicación. Cada aplicación impondrá unos requisitos sobre la zona del espacio en la que se desee concentrar la energía. De igual manera, para extraer la información se debe ser capaz de captar en algún punto del espacio la onda radiada, para

absorber energía de ésta y entregarla al receptor. Para transmitir así como para recibir, se imponen condiciones particulares sobre la direccionalidad de la antena, niveles de potencia que debe soportar, frecuencia de trabajo, entre otros. Dicha diversidad de situaciones da origen a un gran número de tipos de antenas (Aznar, 2002).

II.2 Parámetros importantes de las antenas

II.2.1 Diagrama de Radiación

Según (Aznar, 2002) es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena, en función de las distintas direcciones del espacio, a una distancia fija. Normalmente se empleará un sistema de coordenadas esféricas. Con la antena situada en el origen y manteniendo constante la distancia se expresará el campo eléctrico en función de las variables angulares (θ , ϕ). Como el campo es una magnitud vectorial, habrá que determinar en cada punto de la esfera de radio constante el valor de dos componentes ortogonales, habitualmente según θ y ϕ .

Como el campo magnético se deriva directamente del eléctrico, la representación podría realizarse a partir de cualquiera de los dos, siendo norma habitual que los diagramas se refieran al campo eléctrico.

Al observar a gran distancia una antena, se vería su radiación como si proviniera de un punto, es decir, los frentes de onda serían esféricos. A este punto, centro de curvatura de las superficies de fase constante, se le denomina el *centro de fase* de la antena.

El diagrama de radiación se puede representar en forma tridimensional utilizando técnicas gráficas diversas, como las curvas de nivel o el dibujo en perspectiva. La figura 2 muestra el diagrama tridimensional de una antena y los planos E y H. Los niveles se expresan en decibelios respecto al máximo de radiación.

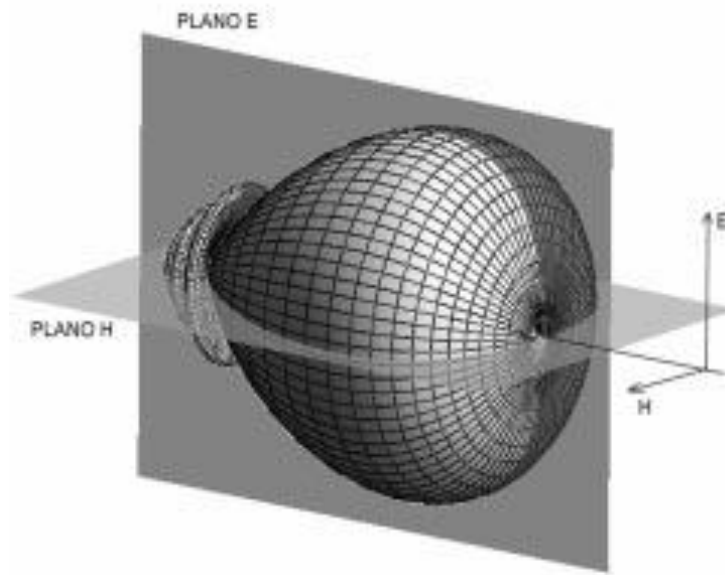


Figura 2. Diagrama de radiación tridimensional.

Fuente: Aznar, A. C. (2002)

Los cortes bidimensionales del diagrama de radiación se pueden representar en coordenadas polares o cartesianas. En el primer caso el ángulo en el diagrama polar representa la dirección del espacio, mientras que el radio representa la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia radiada. En coordenadas cartesianas se representa el ángulo en abscisas y el campo o la densidad de potencia en ordenadas.

La representación en coordenadas cartesianas permite observar los detalles en antenas muy directivas, mientras que el diagrama polar suministra una información más clara de la distribución de la potencia en las diferentes direcciones del espacio. Las figuras 3 y 4 muestran ejemplos de ambas representaciones.

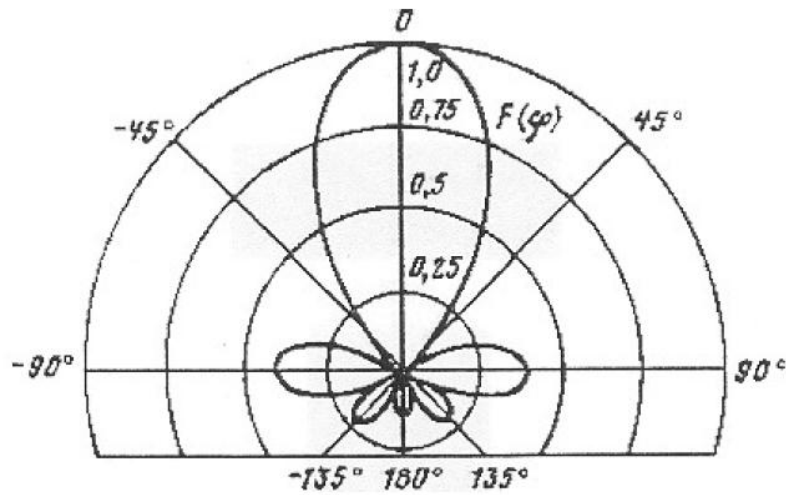


Figura 3. Diagrama de radiación en coordenadas polares.

Fuente: Apuntes del Profesor Luciano Díaz

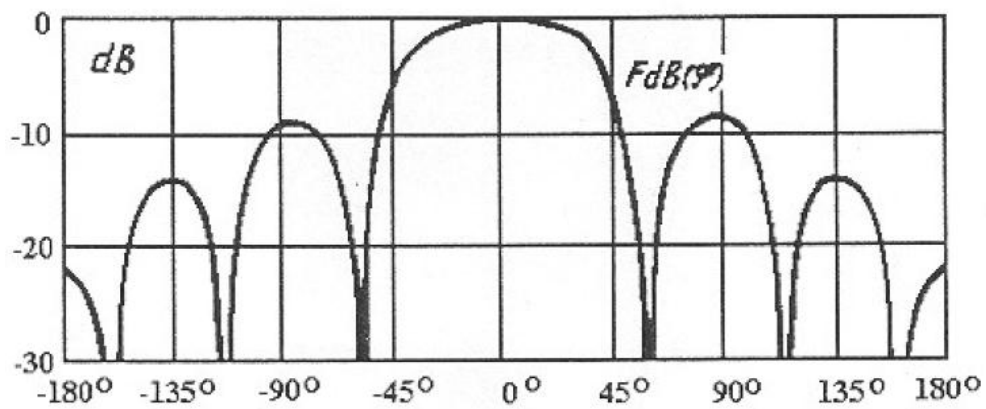


Figura 4. Diagrama de radiación en coordenadas cartesianas

Fuente: Apuntes del Profesor Luciano Díaz

II.2.2 Potencia Radiada

(Br. Cafiero, 2012) Es la potencia total obtenida al integrar la intensidad de radiación sobre un ángulo sólido de 4π , donde Ω es el ángulo sólido y $\sin \theta d\theta d\phi$ es $d\Omega$ (elemento de ángulo sólido)

$$P_{Rad} = \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin \theta d\theta d\phi \quad (1)$$

II.2.3 Directividad

Según (Aznar, 2002) es la relación de la intensidad de radiación en una dirección y la intensidad de radiación promedio en todas las direcciones, a una distancia determinada respecto a la antena. La intensidad de radiación promedio es igual a la potencia total radiada de la antena dividida por un factor de 4π , si la dirección no está especificada, entonces se supone que se está trabajando en la dirección de máxima radiación.

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{AVE}} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{Rad}} \quad (2)$$

donde:

U es la intensidad de radiación (W/unidad de ángulo solido)

U_0 es la intensidad de radiación de una fuente isotrópica (W/unidad de ángulo solido)

P_{Rad} Potencia total radiada (W)

Un dipolo eléctricamente pequeño tiene un diagrama de radiación

$$P(\theta, \phi) = P_{m\acute{a}x} \sin^2 \theta \quad (3)$$

La potencia total radiada se calcula integrando la densidad de potencia en todas las direcciones del espacio

$$P_r = \iint_{4\pi} P_{m\acute{a}x} \sin^2 \theta r^2 \sin \theta d\theta d\phi = P_{m\acute{a}x} r^2 2\pi \frac{4}{3} \quad (4)$$

Sustituyendo este valor en la definición de la directividad se obtiene $D = 3/2 = 1,5$

La directividad de una antena eléctricamente pequeña se aproxima a la constante $D=1,5$ a medida que se disminuye la frecuencia y se mantiene la longitud de la misma igual o si la frecuencia permanece igual y la longitud se disminuye.

II.2.4 Ganancia

(Br. Cafiero, 2012) Es una medida adimensional que está directamente relacionada con la directividad, toma en cuenta la eficiencia de la antena así como su capacidad de directividad. La ganancia de una antena en una dirección dada es definida como la relación

de la intensidad de radiación en una dirección dada y la intensidad de radiación que se obtendría por una antena isotrópica dada la misma potencia de entrada. En forma matemática puede ser expresada como:

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}(\text{Fuente isotrópica sin pérdida})} \quad (5)$$

II.2.5 Impedancia de entrada

(Br. Cafiero, 2012) Es la impedancia que presenta una antena entre sus terminales o la relación entre el voltaje y la corriente en los pares de terminales. La impedancia de entrada medida en los terminales de una antena sin ninguna carga se define como:

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (6)$$

donde:

Z_A Es la impedancia de la antena, medida en ohmios, entre los terminales de la antena

R_A Es la resistencia de la antena entre los terminales de la antena

$$R_A = R_r + R_L \quad (7)$$

X_A Es la reactancia de la antena, medida en ohmios, entre los terminales de la antena

R_r Es la resistencia de radiación de la antena.

R_L Es resistencia de pérdida de la antena.

II.2.7 Factor de calidad

El factor de calidad Q, se refiere al nivel de discriminación entre las frecuencias que debe recibir las antenas y las que no. Entre mejor se discrimine, se dice que tiene un factor de calidad alto. (Br. Cafiero, 2012)

II.2.8 Eficiencia

(Br. Cafiero, 2012) La eficiencia de una antena se refiere la potencia suministrada a la antena y la potencia radiada o disipada por la misma. Una antena de alta eficiencia a la

mayor parte de la energía presente en la entrada de la antena irradia. Una baja eficiencia de antena tiene la mayoría de la potencia absorbida en pérdidas dentro de la antena.

La eficiencia total de radiación puede ser representada como:

$$e_0 = \frac{P_{Rad}}{P_{In}} \quad (8)$$

donde:

e_0 Es la eficiencia total

P_{Rad} Potencia total radiada (W)

P_{In} Potencia de entrada (W)

II.2.9 ROE (Relación de Onda Estacionaria)

(Br. Cafiero, 2012) Es la relación que existe entre la tensión mínima y máxima en la de línea de la antena. Este valor podrá tomar valores entre 1 e infinito. Puede ser expresada de la siguiente manera:

$$ROE = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (9)$$

donde $|\Gamma|$ es el módulo del coeficiente de reflexión que se puede calcular a partir de la impedancia de la antena y de la impedancia de la línea de transmisión o el generador.

II.2.10 Polarización

Según (Aznar, 2002) la polarización de una antena en una dirección es la de la onda radiada por esta en la misma dirección. La polarización de una onda es la figura geométrica descrita, al transcurrir el tiempo, por el extremo del vector campo eléctrico en un punto fijo del espacio en el plano perpendicular a la dirección de propagación. Para ondas con variación temporal sinusoidal esa figura es en general un elipse, pero hay dos casos particulares de interés: si la figura trazada es un segmento, la onda se denomina linealmente polarizada y si es un círculo, circularmente polarizada.

El sentido del giro del campo eléctrico, tanto en las ondas circularmente polarizadas como en las elípticas, se dice que es a derechas si al alejarse la onda de un observador, éste ve rotar el campo en sentido de las agujas del reloj, y a izquierdas si es en el sentido contrario.

II.2.11 Ancho de banda útil

El ancho de banda de una antena, está definido como el rango de frecuencias en el cual el desempeño de una antena respecto a algunas características se adapta a un estándar específico. El ancho de banda puede ser considerado como el rango de frecuencias de cualquier lado de una frecuencia central (usualmente la frecuencia de resonancia para un dipolo), donde las características de la antena (tales como: impedancia de entrada, patrón de radiación, polarización, ganancia, directividad) están dentro de un nivel aceptable comparado con los de la frecuencia central. Para antenas broadband el ancho de banda está expresado usualmente como la relación entre la frecuencia más alta y la frecuencia más baja en la cual la antena presenta una operación aceptable, por ejemplo, una relación 10:1 indica que la frecuencia superior es 10 veces más grande que la inferior. Para antenas narrowband el ancho de banda está expresado como el porcentaje de la diferencia entre la mayor frecuencia y la menor frecuencia sobre la frecuencia central del ancho de banda por ejemplo, un 5% de ancho de banda indicará la diferencia máxima aceptable respecto a la frecuencia central no deberá ser mayor a un 5%.

Una definición de ancho de banda útil es aquella banda de frecuencia para la cual la relación de onda estacionaria es inferior a 2:1. Esto es debido a que para una ROE igual a 2 se refleja un poco más del 10% de la potencia que incide, el cual es el valor máximo permitido para cualquier caso. En la figura 5, se puede apreciar la relación entre ancho de banda con las pérdidas por retorno y el valor del ROE.

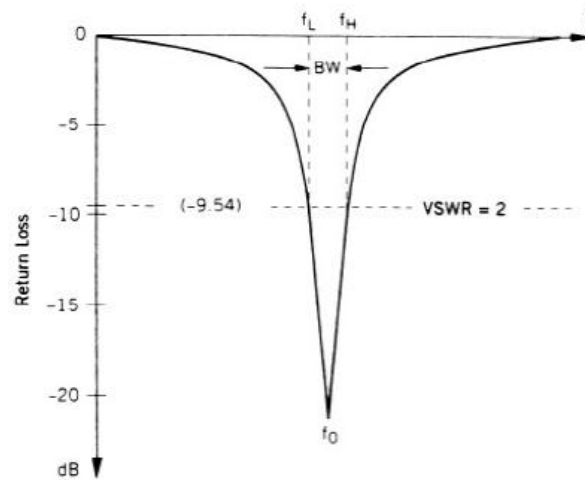


Figura 5. Relación entre ancho de banda y perdidas por retorno.
Fuente: Vielma (2005).

II.3 Fuente isotrópica

La fuente isotrópica es aquella que radia por igual en cualquier dirección del espacio. Aunque en la realidad no existe, su introducción sirve de referencia para propósitos de comparación. La intensidad de radiación de una fuente isotrópica es constante en todo el espacio, e igual a un valor U_{AVE} . (Aznar, 2002).

II.4. Regiones del Campo

El espacio que rodea a una antena es usualmente dividido en tres regiones: región de campo reactivo, región de campo cercano o región de Fresnel, y región de campo lejano o región de Fraunhofer. En cada una de estas tres regiones, el campo radiado tiene distintas características.

- Región de campo reactivo: se refiere a que la impedancia mutua entre antenas transmisoras y receptoras puede ser de naturaleza capacitiva o inductiva. En un supuesto caso en el que se deseen realizar mediciones entre una antena transmisora y una receptora, la distancia entre estas debe ser mayor a la del radio del campo reactivo entre las antenas, debido a que existe un efecto de acople mutuo que altera el campo a medir.
- Región de campo cercano: es aquella región comprendida entre el campo reactivo y el campo lejano, en la que predominan los campos de radiación y la dependencia de los mismos con las coordenadas angulares varían respecto a la distancia con la antena.
- Región de campo lejano: es aquella región en donde la dependencia de los campos radiados con las coordenadas angulares no dependen de la distancia con la antena.

En la figura 6 se observa gráficamente la división de los campos radiados por una antena.

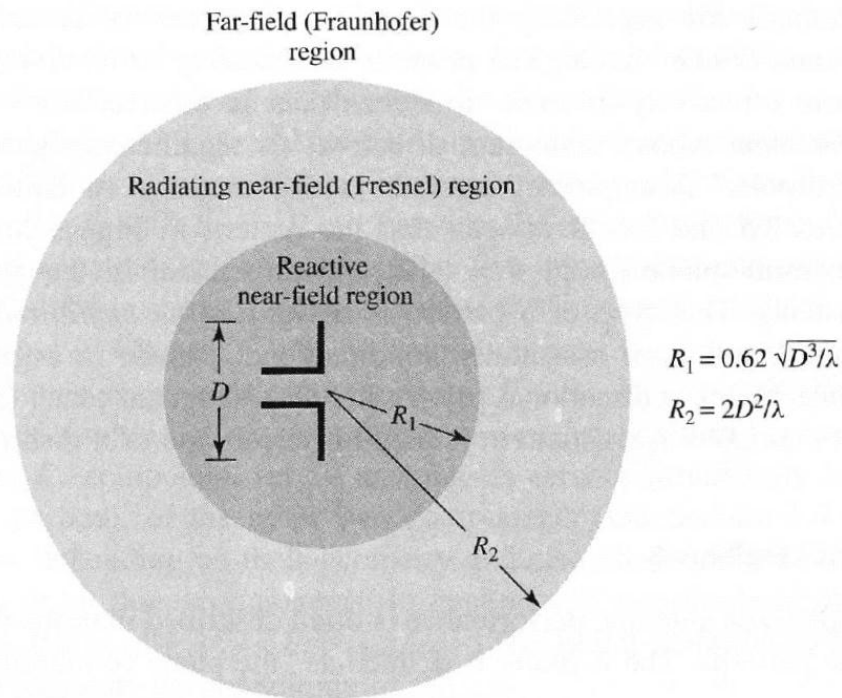


Figura 6. Regiones de campo de una antena.
Fuente: Boix (S/F).

II.5 Agrupaciones de antenas

Según (Aznar, 2002) las antenas básicas proporcionan grandes anchos de haz y por consiguiente, valores de directividad reducidos. En aquellas aplicaciones en las que son necesarias directividades elevadas, deben utilizarse antenas de grandes dimensiones eléctricas con distribuciones de corriente lo más uniformes posibles.

Se define una agrupación o arreglo como un conjunto de N antenas iguales que radian 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 señales que capta cada antena. Por reciprocidad, si los pesos y fases 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.

Los factores que afectan el diagrama de radiación de un arreglo de antenas son:

- El diagrama de radiación particular de cada elemento.
- La distribución geométrica de los elementos radiantes (lineal, circular, etc.).
- La separación entre los elementos radiantes.
- La amplitud y la fase de la señal de excitación de cada elemento.

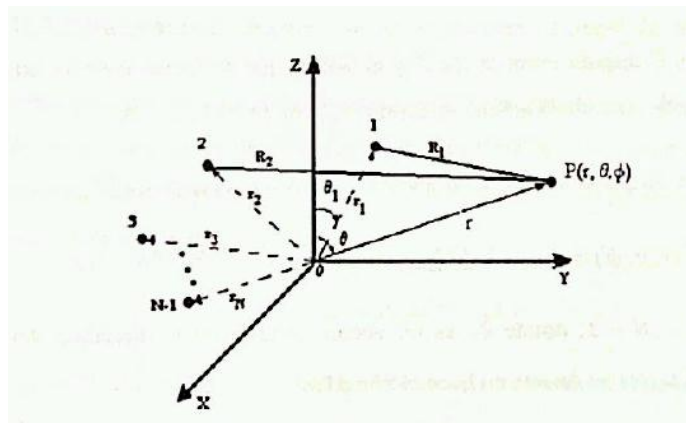


Figura 7. Arreglo de N antenas isotrópicas.
Fuente: González & Navarro (2011)

Como explican en (González Ugarte & Navarro Osuna, 2011), siendo la figura 7, un arreglo compuesto por N antenas iguales con la misma orientación pero alimentadas con diferente amplitud y fase. El campo eléctrico resultante de este arreglo en un punto cualquiera dentro del campo lejano, es igual a la suma de los campos radiados por cada una de las antenas como se representa en (10).

$$\vec{E_t}(r, \theta, \phi) = \sum_{m=1}^N \vec{E_m}(r, \theta, \phi) \quad (10)$$

El campo radiado por la fuente ubicada en el origen de coordenadas es representado por:

$$\vec{E_t}(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{I_o e^{-j\beta r}}{4\pi r} \hat{e}_o \quad (11)$$

En donde, $f(\theta, \phi)$ representa el diagrama de radiación elemental usado en el arreglo, I_o es la corriente de excitación compleja del elemento, r es la distancia al punto de observación, β es la constante de fase siendo $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$, con λ como longitud de onda y $\hat{e}_o$ es un vector en la dirección del vector campo eléctrico.

Haciendo uso de (10) y (11), se llega a la expresión:

$$\vec{E_t}(r, \theta, \phi) = \sum_{m=0}^{N-1} f(\theta, \phi) \frac{I_m e^{-j\beta R_m}}{4\pi R_m} \hat{e}_m \quad (12)$$

donde el sub índice representa al elemento radiante m-ésimo, siendo R_m la distancia del elemento al punto en donde es determinado el campo, $\hat{e}_m$ un vector unitario en la dirección del campo eléctrico radiado e I_m su corriente de excitación, la cual se representa con la siguiente expresión:

$$I_m = A_m e^{j\alpha_m}, m = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (13)$$

Siendo A_m la magnitud y α_m la fase, de la corriente.

Si el punto de observación se encuentra dentro del campo lejano, se cumple que las direcciones de todos los elementos radiantes son paralelas. Es decir:

$$\hat{e}_o = \hat{e}_m = \hat{e} \quad (14)$$

Y además, se cumple que:

$$\frac{1}{R_m} = \frac{1}{r} \quad (15)$$

$$e^{-j\beta R_m} \approx e^{-j\beta(r - r_m \cos(\theta - \theta_m))} \quad (16)$$

donde θ_m es el ángulo que se forma entre el eje Z y el vector que va desde el origen al punto en donde está ubicada la antena m-ésima y r_m la magnitud de éste vector.

Por lo tanto, el campo eléctrico queda denotado por:

$$\vec{E}(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \sum_{m=0}^{N-1} A_m e^{j\alpha_m} e^{j\beta r_m \cos(\theta - \theta_m)} \hat{e} \quad (17)$$

II.5.1 Factor de Arreglo

Conociendo la posición de cada elemento radiante y la amplitud y fase de las corrientes de excitación de los mismos, se puede determinar el diagrama de radiación de N fuentes iguales, haciendo uso del factor de arreglo. Dicho factor es expresado de la siguiente manera:

$$S = \sum_{m=0}^{N-1} A_m e^{j\alpha_m} e^{j\beta r_m \cos(\theta - \theta_m)} \quad (18)$$

Por consiguiente, el modulo del campo eléctrico total es representado por:

$$|\vec{E}(r, \theta, \phi)| = \left| f(\theta, \phi) \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \right| |S| \quad (19)$$

En donde, $\left| f(\theta, \phi) \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \right|$ corresponde a la radiación de una sola de las antenas del arreglo.

Al momento de representar el diagrama de radiación normalizado de un arreglo de antenas, el factor $\frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r}$ es igualado a 1, y el modulo del campo total sería el resultado de la multiplicación del factor de arreglo por el diagrama de radiación de una sola antena. Dicha relación es conocida como principio de multiplicación de diagramas.

II.5.2 Diagrama de Radiación de un arreglo lineal

Dado un arreglo de N elementos tal y como se muestra en la figura 8,

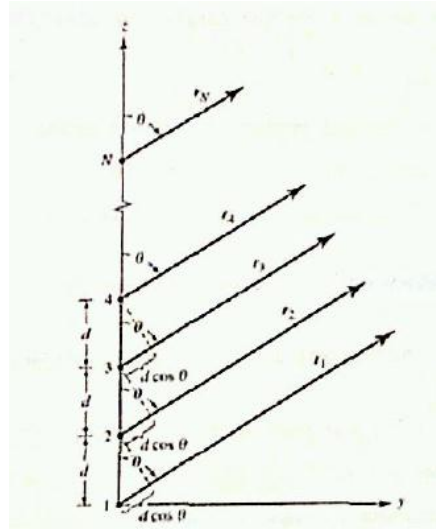


Figura 8. Arreglo Lineal de N elementos.

Fuente: González & Navarro (2011)

En donde todas las antenas tienen una radiación igual a $f(\theta, \phi)$ y estas a su vez están separadas a una misma distancia d . El campo producido por un m -ésimo elemento, para un punto de observación dentro del campo lejano, viene dado por:

$$\vec{E}_m(\theta, \phi) = f(\theta, \phi) A_m e^{j(\alpha_m + \beta d \cos(\theta))} \hat{e}_m \quad (20)$$

Si la corriente de excitación es equivalente en fase para cada elemento, se elimina α_m y el factor de arreglo queda expresado por:

$$S = \sum_{m=0}^{N-1} A_m e^{j\beta d \cos(\theta)} \quad (21)$$

Y por consiguiente, el campo total se expresa de la siguiente manera:

$$\vec{E}(\theta, \phi) = f(\theta, \phi) S \hat{e} \quad (22)$$

II.6 Antenas Patch

Las antenas patch también son conocidas como antenas microstrip ya que se basan en dicha tecnología. Su uso tiene un gran auge para las aplicaciones en las que el tamaño reducido es importante por ejemplo: aeronáutica, aviación, satélites, aplicación de misiles, dispositivos móviles, comunicaciones inalámbricas en general y para frecuencias elevadas principalmente en los rangos de microondas y ondas milimétricas.

Algunas de las ventajas que este tipo de antenas pueden ofrecer son: tendencia a la miniaturización al lograr dispositivos cada vez más pequeños y con componentes livianos, fáciles de integrar tanto superficies planas como no planas, sencillas, de fácil producción en masa, fáciles de adaptar con circuitos integrados de microondas, versátiles en términos de impedancia, patrón, polarización y frecuencia de resonancia. Y entre las principales desventajas de este tipo de antenas se pueden nombrar: bajas potencias de radiación (por su estructura no se pueden soportar altas potencias en los componentes de una antena microstrip), baja eficiencia, ancho de banda angosto, considerables pérdidas y son fácilmente afectadas por el factor térmico.

Las antenas patch están constituidas por un parche de material conductor sobre una base de material dieléctrico. Además, en la parte posterior del sustrato dieléctrico se encuentra un plano metálico. El parche generalmente es rectangular o circular, aunque puede adoptar otros tipos de forma, con dimensiones en el orden de media longitud de onda. (Aznar, 2002)

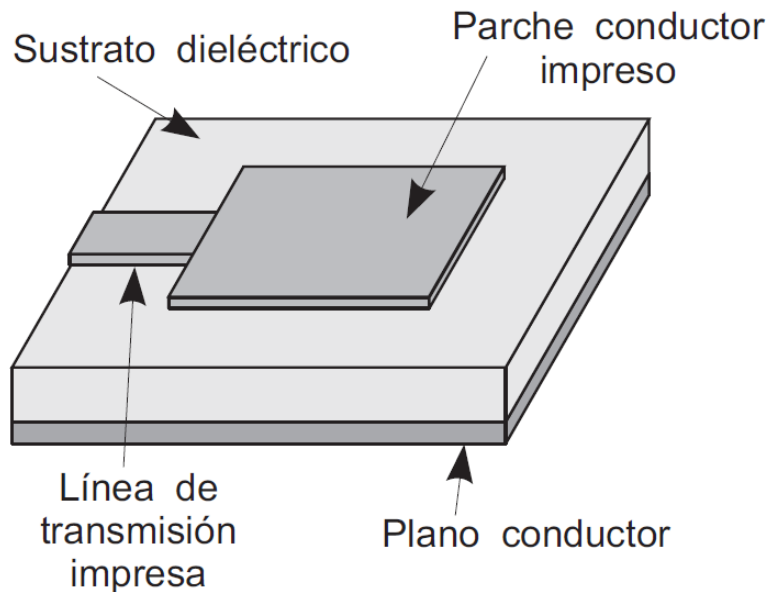


Figura 9. Antena microstrip con parche rectangular

Fuente: Aznar, A. C. (2002)

II.6.1 Funcionamiento de las Antenas Patch

Según (Aznar, 2002) a continuación se dará una breve explicación del principio de funcionamiento de las antenas de tipo patch. Con el fin de analizar la radiación de las antenas de tipo patch, se debe primeramente conocer y analizar la distribución de los campos en el interior de ésta.

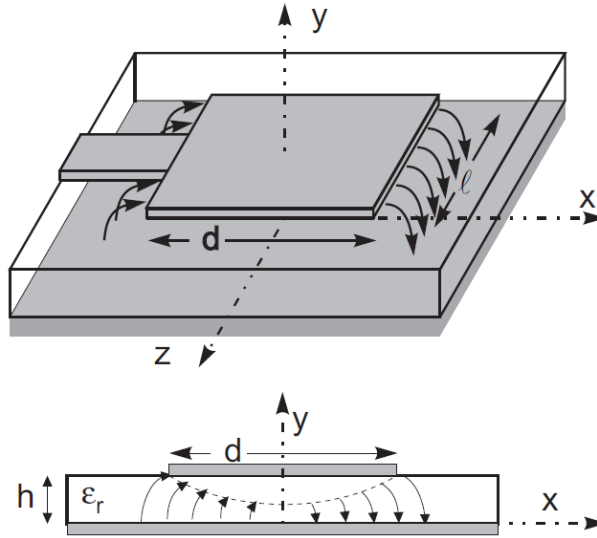


Figura 10. Distribución de los campos eléctricos en antenas patch.

Fuente: Aznar, A. C. (2002)

En la figura 10, se puede observar las líneas de campos en el caso para el cual la longitud d es aproximadamente media longitud de onda en el interior del dieléctrico.

$$d \approx \frac{\lambda_{ef}}{2}$$

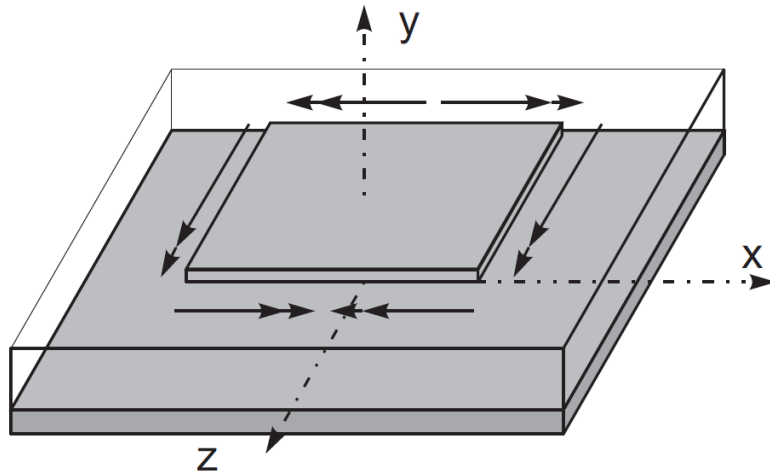


Figura 11. Láminas de corrientes magnéticas equivalentes.

Fuente: Aznar, A. C. (2002)

La antena puede ser modelada como una cavidad la cual es delimitada por el parche y el plano de masa y las cuatro ranuras formadas por las paredes verticales. La radiación de estas antenas será emitida por las cuatro ranuras que cierran la cavidad. Cada ranura puede ser modelada como una lámina de corriente magnética equivalente. Al considerarse la curvatura de las líneas de campo, éstos pueden ser descompuestos en una componente según el eje x y otra componente según el eje y. las componentes según el eje y están en contrafase en $x = \pm \frac{d}{2}$.

Por lo tanto, sus contribuciones se cancelan. Quedando así únicamente las componentes según el eje x. En consecuencia, como puede observarse en la figura 11, las láminas de corriente pueden ser situadas directamente sobre el sustrato dieléctrico.

Por otro lado, se puede apreciar que las corrientes situadas en $z = \pm \frac{l}{2}$, tienen sentidos opuestos y varían de manera que $\sin \frac{\pi x}{d}$ y por ende no producen radiación en la dirección del eje y (plano normal a la antena).

En conclusión, las antenas de tipo patch pueden ser modeladas por dos láminas de corriente magnética de ancho h , longitud l , en dirección al eje z , separadas a una distancia d y situadas sobre el sustrato dieléctrico.

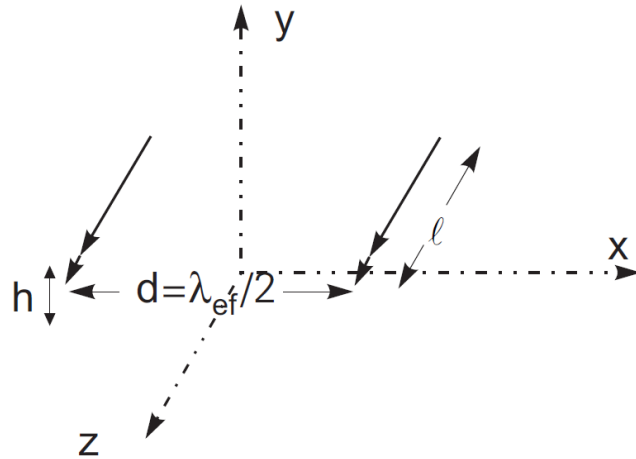


Figura 12. Equivalente electromagnético.

Fuente: Aznar, A. C. (2002)

Suponiendo un conductor infinito, finalmente quedan dos corrientes magnéticas en dirección del eje z y separadas $\frac{\lambda_{ef}}{2}$, tal como puede observarse en la figura 12.

La componente x en las ranuras y las corrientes magnéticas pueden suponerse constantes según z , debido a que comúnmente se eligen las líneas de alimentación para excitar el modo TEM.

II.6.2 Tipos de Parches

En el mercado y aplicación actual, podemos encontrar diversidad en la figura geométrica del parche. Los parches más comunes son: cuadrado, rectangular, dipolo y circular. Además también se pueden encontrar tipos de parches elípticos, triangulares y/o en forma de anillo.

A continuación se enumerarán los parches más habituales y se nombrarán sus principales características según (Ruiz & Masa, 2008) :

II.6.2.1 Parche Cuadrado:

- Polarización: lineal, circular, dual.
- Genera altos niveles de contra-polarización, principalmente en polarización dual o polarización circular.

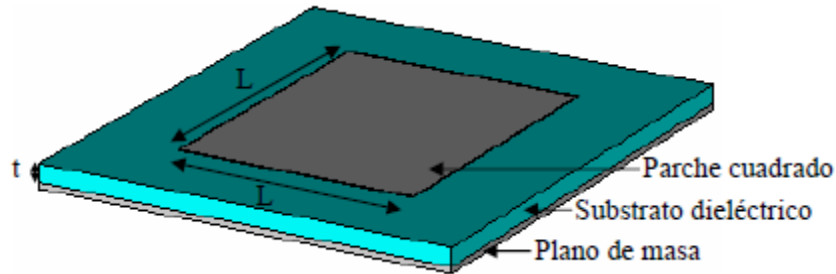


Figura 13. Parche Cuadrado.

Fuente: J. Ruiz, J. Masa (2007-2008)

II.6.2.2 Parche Circular:

- Polarización lineal, circular o dual.
- Al igual que el parche cuadrado, genera altos niveles de contra-polarización en polarización dual o circular.

Aproximación en el diseño de un parche circular:

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f \sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

$$r = \frac{F}{\left\{1 + \frac{2t}{\pi F} \left[\ln\left(\frac{\pi F}{2t}\right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (11)$$

donde, f en (Hz), t y r en (cm).

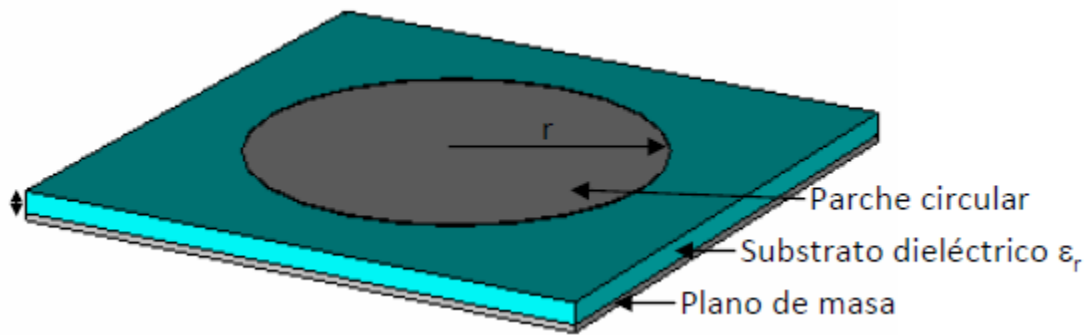


Figura 14. Parche Circular.

Fuente: J. Ruiz, J. Masa (2007-2008)

II.6.2.3 Parche Ranura:

- Polarización: lineal, circular, dual/
- La excitación es producto del acoplo del campo.
- Longitud de la ranura: $l = \frac{\lambda_g}{2}$
- Ancho de ranura: $w = \frac{l}{10}$

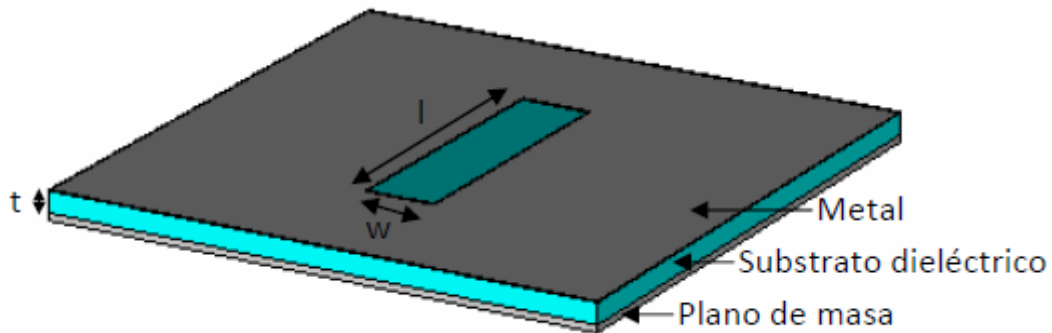


Figura 15. Parche de tipo ranura.

Fuente: J. Ruiz, J. Masa (2007-2008)

II.6.2.4 Parche Rectangular:

Un ejemplo de una antena microstrip con parche rectangular puede ser apreciado en la figura 9.

- El parche radia en la dimensión l (ancho del parche) y resuena en la d (largo del parche).
- Polarización circular, lineal, dual.
- Una impedancia de entrada de, $180\ \Omega$ - $300\ \Omega$ (en el borde) y $0\ \Omega$ (en el centro), aproximadamente.

II.6.3 Alimentación de un parche

Dado que el parche es únicamente el elemento radiante, es necesario además determinar cuál es la forma de alimentación al mismo.

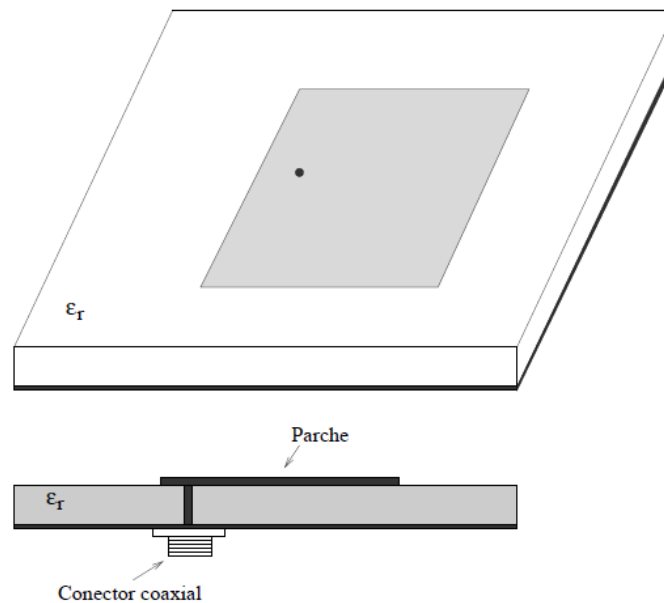


Figura 16. Sonda Coaxial.

Fuente: Jiménez, Rodríguez, González (2011)

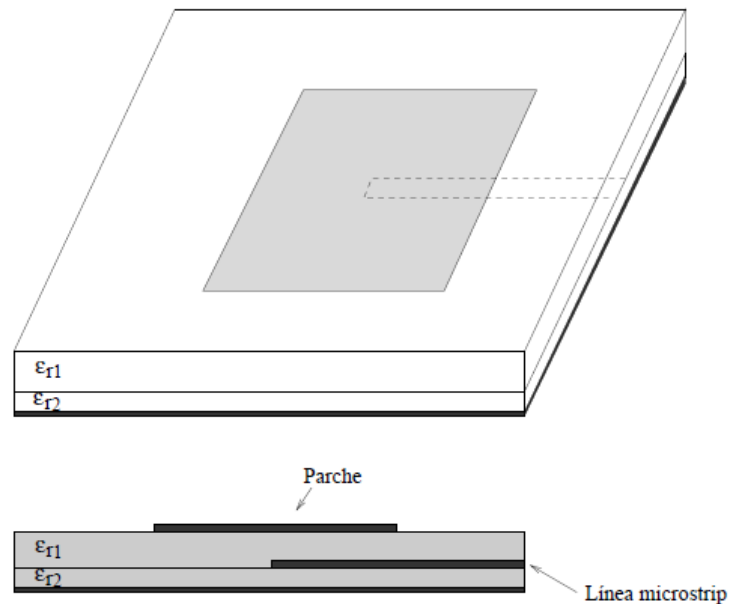


Figura 17. Línea Microstrip.

Fuente: Jiménez, Rodríguez, González (2011)

Existen diversas técnicas de alimentación tales como sonda coaxial, línea microstrip, acoplo por apertura y acoplo por proximidad, pero para efectos del presente proyecto se estudiarán sólo las dos primeras así como las principales características de cada una de ellas (Ruiz & Masa, 2008) :

II.6.3.1 Sonda Coaxial:

Consiste en alimentar el parche por medio de un cable coaxial, un ejemplo de alimentación por sonda coaxial puede verse en la figura 16. En la parte inferior de la antenna (en la placa metálica) se coloca un conector hembra de tipo coaxial y este a su vez, a través de un orificio en el sustrato eléctrico, es conectado al parche conductor. Algunas características de este tipo de alimentación son:

- El ancho de banda es limitado.
- Se elimina la radiación espuria.
- Requiere soldadura.
- Existencia de impedancia inductiva en dieléctricos gruesos.

- En sustratos gruesos, se dificulta la adaptación ($h > 0.02\lambda$), siendo h el grosor del sustrato.

II.6.3.2 Línea Microstrip:

Como puede apreciarse en la figura 17, el parche es alimentado por la tecnología en la que se basan este tipo de antenas. La línea de alimentación es impresa, de igual manera que el parche, sobre el dieléctrico. A continuación se presentan algunas características:

- La impedancia de entrada es controlable.
- Presencia de radiación espuria de la línea y ondas de superficie.
- Se generan altos niveles de contra-polarización entre el parche y la línea.
- Es el método de alimentación más simple.
- El ancho de banda es de 2% y 5%, típicamente.

II.7 Antenas Configurables

Un arreglo de antenas configurables es aquel en el que mediante una cierta colocación de las antenas a emplear, se consigue un nuevo patrón de radiación producto de la suma de cada patrón correspondiente a cada antena. En otras palabras, se consigue emitir más de un patrón de radiación y a su vez la transmisión se puede lograr en diferentes frecuencias.

CAPITULO III

Metodología

En este capítulo podemos encontrar la metodología seleccionada para desarrollar nuestra investigación y con la que fue posible alcanzar los objetivos propuestos.

III.1 Tipo de investigación

III.2 Metodología aplicada

En la siguiente figura 18 se muestra la metodología aplicada en cinco fases necesarias para el desarrollo de nuestra investigación, posteriormente la explicación de cada fase.

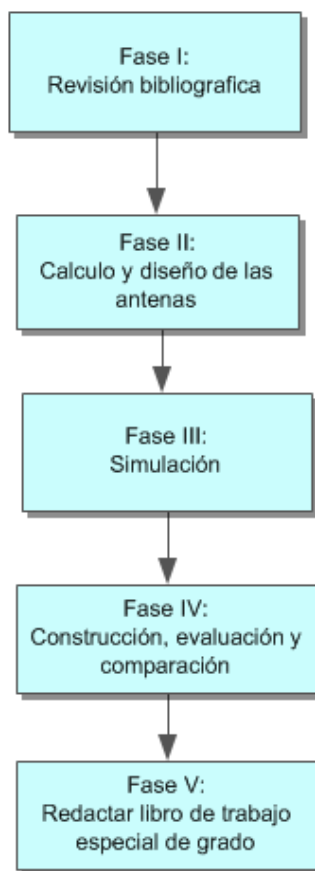


Figura 18. Metodología.
Fuente: Elaboración Propia.

Fase I: Revisión bibliográfica.

La búsqueda de información se realizó a través de libros, algunos proyectos de grado e información en electrónico obtenidos de la web. Con la información recopilada se estudiaron los parámetros necesarios para la realización del diseño de arreglo de antenas configurables del tipo patch en el rango de frecuencias de 300-650 MHz.

Posteriormente se evaluó el uso del software para realizar las simulaciones de las antenas y del arreglo de antenas de tipo patch.

Fase II: Cálculo y Diseño de las características de la antena.

Se determinaron las dimensiones que debería tener cada antena para poder operar dentro del rango de frecuencia de 300 a 650 MHz y también se realizó una investigación para saber qué materiales debían ser utilizados para la construcción del arreglo de antenas, tomando en cuenta que sean de buena calidad y de bajo costo

Fase III: Simulación

Se simularon las antenas mediante las herramientas que ofrece el software de simulación HFSS y se midieron las características principales, rango de operación, potencia y frecuencia.

Fase IV: Construcción, Evaluación y Comparación

Luego de haber estudiado el diseño de las antenas, se procedió a su construcción. Se realizaron las pruebas de las antenas para poder medir sus características principales. Se Compararon los resultados obtenidos con los resultados simulados y luego se realizó un estudio de cuál sería la mejor configuración para nuestro caso.

Fase V: Redactar el libro de trabajo especial de grado.

Se recopiló la información obtenida en los distintos pasos y se documentó para elaborar el libro a entregar.

III.3 Variables

III.3.1 Construcción

El método de soldadura aplicado de manera irregular o errónea podría ocasionar que la tierra de los conectores no haga el contacto suficiente o haga contacto con el positivo del conector.

El cálculo para la ubicación del conector deberá ser muy preciso para que las antenas puedan trabajar en el rango de frecuencias que se desea.

III.3.2 Simulación

El estudio del software de simulación es importante ya que un uso inapropiado del mismo podría arrojar resultados erróneos, y muy lejos de los resultados medidos.

III.3.3 Entorno

Este es un punto muy importante a la hora de realizar las pruebas de las antenas, ya que dependiendo del entorno en que se prueben habrá más o menos reflexión de la señal lo que puede afectar los resultados. Cabe destacar que un entorno ideal, como lo sería una cámara anecoica, no está a nuestro alcance.

III.3.4 Equipos de medición

Los equipos utilizados para realizar las pruebas deben tener una buena calibración y se le debe dar un buen ya que de lo contrario podría afectar de manera notable los resultados del proyecto.

CAPITULO IV

Desarrollo

En este capítulo se exponen todos los estudios, procedimientos y diseños que se realizaron para lograr los objetivos propuestos en este proyecto.

IV.1 Descripción del diseño para la construcción de las antenas de tipo patch

Luego de realizar la investigación acerca de los parámetros que debían tener las antenas y materiales a usar se procedió a la construcción de las mismas. Para ellos se usó una lámina de baquelita (resina fenólica) de aproximadamente un metro cuadrado, esta lámina está hecha de material conductor (cobre) por una de sus caras. De esta lámina se obtuvieron las cinco antenas para el arreglo de antenas.

Se seleccionó una frecuencia de 475MHz, que está dentro del rango de frecuencias de 300 a 650MHz, como frecuencia de trabajo para nuestro arreglo de antenas. Para garantizar que cada antena trabajara en esta frecuencia se realizaron los cálculos para obtener cuanto debería ser el ancho del parche y la longitud del mismo. Obtenidos estos datos se procedió a imprimir en papel tipo transfer el parche, el cual fue planchado sobre la lámina usando una plancha casera, gracias al calor que esta genera, la sombra con la tinta se plasma sobre la superficie conductora, la plancha debe pasarse varias veces durante un tiempo adecuado para que quede impresa la mayor cantidad de tinta.

Para dejar únicamente la forma del parche sobre la lámina de baquelita, se utilizó una especie de ácido llamado Percloruro Férrico, que actúa de manera química eliminando el cobre existente en las zonas donde no hay presencia de tinta, quedando solo en la baquelita la impresión del parche. Este procedimiento debe hacerse de manera cautelosa ya que este ácido es un corrosivo y puede afectar el organismo del individuo que lo manipula.

Fue usado un envase de plástico para colocar el producto (Percloruro Férrico), de un tamaño adecuado de manera que entrara el trozo de baquelita. Se introdujo la lámina en el

envase, se dejó reposar por algunos minutos, posteriormente se retira cuidadosamente la lámina.

Este procedimiento fue realizado varias veces con el fin de obtener una serie de antenas con las cuales se formó el arreglo de antenas.

Una vez ejecutado este procedimiento de las antenas con el cobre en forma del parche rectangular, se lijó el cobre en las láminas para eliminar el óxido que haya quedado sobre el mismo a causa de la manipulación con las manos, lo cual es para evitar algunas pérdidas.

IV.1.1 Calculo del parche

A continuación se presentan las fórmulas para realizar los cálculos necesarios para el diseño de una antena de tipo patch según información recopilada en (Ruiz & Masa, 2008) :

Ancho del Parche:

$$l = \frac{Co}{2f} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \quad (12)$$

donde:

l: el ancho del parche.

Co: velocidad de la luz en el vacío ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

ϵ_r : Constante dieléctrica o permitividad relativa del sustrato dieléctrico.

f: frecuencia de operación.

Vale acotar que la anchura del parche no afecta la frecuencia de resonancia sin embargo, a medida que se disminuye la anchura, disminuye la eficiencia de la antena.

$$d = \frac{Co}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta d \quad (13)$$

donde:

d: longitud del parche.

ϵ_{eff} : Constante dieléctrica efectiva del sustrato dieléctrico.

Producto de la metalización impresa en el sustrato, se puede asegurar que los campos producidos debajo del parche no terminan estrictamente en los bordes del mismo. A los campos encontrados por fuera de los límites del parche se les conocen como fringing fields o campos de franja o borde. Es por ello que, como se puede apreciar en (13), a la longitud del parche longitud del parche se le resta el valor de la longitud efectiva del mismo (Jiménez Martín, Rodríguez Martín, & González Posadas, 2011)

$$\Delta d = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff}+0.3)\left(\frac{l}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{eff}-0.258)\left(\frac{l}{h}+0.8\right)} \quad (14)$$

siendo:

Δd : la longitud efectiva del parche antes mencionada.

h: la altura o el grosor del sustrato dieléctrico.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{l}\right)^{-1/2} \quad (15)$$

Como se puede apreciar en las fórmulas anteriores, para el cálculo de las características de las antenas en el presente proyecto, es necesario conocer además de la frecuencia de operación, el coeficiente de permitividad del sustrato dieléctrico. Es por esto que a continuación se procede a estudiar el material del sustrato dieléctrico a utilizar.

Referente a la cita textual Ruiz y Masa señalan en la siguiente tabla algunos requisitos de la antena según sean las necesidades:

Tabla 1. Compromiso de diseño de una antena patch rectangular.

Compromiso de diseño de un parche rectangular			
Requisito	Espesor del sustrato	Permitividad del sustrato	Ancho del parche
Alta eficiencia de radiación	grueso	baja	ancho
Bajas pérdidas dieléctricas	delgado	baja	-
Bajas pérdidas en conductores	grueso	-	-
Aumentar ancho de banda	grueso	baja	ancho
Baja Radiación espuria	delgado	baja	-
Baja polarización cruzada	-	baja	-
Bajo peso	delgado	baja	-
Robustez	grueso	alta	-
Menor sensibilidad frente a tolerancias	grueso	baja	ancho

Fuente: J. Ruiz, J. Masa (2007-2008)

Como se representa en la tabla 1, tanto el material como el grosor del sustrato a utilizar pueden variar dependiendo de los requisitos necesarios para cumplir con la aplicación a la cual está destinada la antena.

En este proyecto, por cuestiones de ahorrar costos y de existencia en el mercado, se trabajó con una lámina de baquelita, cuyo sustrato tiene un coeficiente dieléctrico de 4, por lo que los cálculos se realizaron en función de dicho coeficiente y con una frecuencia fija de 475 MHz.

IV.1.2 Elección del punto de excitación

Ya construidas las antenas se procedió a la colocación del conector sobre cada lámina, cabe destacar que para su perfecto funcionamiento el conector debe estar ubicado en un punto específico del parche, el cual varía dependiendo de la impedancia de entrada.

Es importante resaltar que la impedancia de entrada vista desde el coaxial no es directamente R_T (Resistencia de la cavidad, que es el paralelo de la resistencia de radiación y la resistencia de pérdidas). Al igual que ocurre en cualquier cavidad resonante la impedancia de entrada depende del acoplamiento de la línea de transmisión, que en nuestro caso es el coaxial, y la cavidad.

El acoplamiento entre la sonda y la cavidad depende de la posición de la sonda coaxial en el parche, siendo máximo en los extremos ($y = \pm b/2$) y nulo en el centro ($y=0$). La variación de la impedancia de entrada del el parche R_{in} con la posición de la sonda es de la forma siguiente:

$$R_{in} = R_T \cos^2\left(\frac{\pi(y+b/2)}{b}\right) \quad (16)$$

En el caso de sustratos altos habría que añadir la impedancia correspondiente a la inductancia de la sonda a la impedancia de entrada de la antena.

Queda elegir entonces, la posición en el eje y, tal que la resistencia de entrada R_{in} corresponda al valor deseado. La posición de la sonda en el eje x se elige en el centro ($x=0$), es decir, la sonda se sitúa en el eje y. De esta manera, se reduce la generación de modos superiores en el parche. Para poder elegir la posición Y es necesario conocer antes el valor de R_T , es decir, el valor de la resistencia de radiación y las pérdidas.

Por lo tanto se debe hallar la resistencia de radiación a partir de la conductancia de radiación G_1 . En la siguiente expresión se muestran los diferentes valores de la anchura eléctrica del parche a/λ_0 .

$$G_1 = \begin{cases} \frac{1}{90} \left(\frac{a}{\lambda_0}\right)^2 & a \ll \lambda_0 \\ \frac{1}{120} \left(\frac{a}{\lambda_0}\right) & a \gg \lambda_0 \end{cases} \quad (17)$$

Una vez obtenida la conductancia de radiación, el valor de la resistencia de radiación viene dado por la siguiente ecuación.

$$R_{rad} = \frac{1}{2G_1} \quad (18)$$

Dado que las dos conductancias son iguales y la distancia entre ambos es de media longitud de onda.

La resistencia de radiación puede calcularse igualmente a partir del factor de calidad de la cavidad formada por el parche. El factor de calidad que interviene es el correspondiente a las pérdidas por radiación, este factor de calidad se denomina como Q.

$$R_{rad} = \frac{Q_r 2h}{2\pi f \epsilon_0 \epsilon_{reff} ab} \quad (19)$$

donde la expresión ϵ_0 denota la permitividad en el vacío.

El factor de calidad Q_r puede estimarse haciendo uso de la siguiente expresión.

$$Q_r = \frac{c\sqrt{\epsilon_{reff}}}{4hf} - \frac{\epsilon_{reff}\Delta b/2}{h} \quad (20)$$

Luego se evalúan las pérdidas de la antena propiamente dichas. Cuantos mayores sean la pérdida menor será la eficiencia de la antena. La eficiencia de la antena se define como la relación entre la potencia radiada por la antena y la potencia total introducida en la antena. Entonces podemos definir la eficiencia de la antena como:

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_p} \quad (21)$$

P_p Se refiere a la potencia disipada en la antena debido a las pérdidas en el dieléctrico y los conductores.

Por otro lado, el efecto de las pérdidas de la antena se refleja también en la impedancia de entrada de la antena y, por tanto, en la elección del punto de excitación.

$$\eta = \frac{G_{rad}}{G_{rad} + G_p} \quad (22)$$

donde se representa la conductancia de radiación como:

$$G_{rad} = \frac{1}{R_{rad}} \quad (23)$$

Y la conductancia de pérdidas como:

$$G_p = \frac{1}{R_p} \quad (24)$$

Dado que R_T es el paralelo de la resistencia de radiación y la resistencia de pérdidas, se tiene que:

$$R_T = R_{rad}\eta \quad (25.1)$$

o equivalentemente

$$R_{rad} = \frac{R_T}{\eta} \quad (25.2)$$

Cabe destacar que la impedancia real de la cavidad formada por el parche R_T *no es* R_{rad} como sucede en el caso sin pérdidas, sino algo menor. Por lo tanto, en nuestro caso la posición Y corresponde a un punto más alejado del centro del parche. De este modo, se puede compensar la disminución de la impedancia real del parche debido a las pérdidas y la impedancia media a la entrada de la antena es la esperada.

El punto de excitación de la sonda Y se elige haciendo uso de la expresión (16) con $R_T = R_{rad}\eta$. Para ello es preciso conocer la resistencia de radiación y la eficiencia. El cálculo para R_{rad} ya se realizó anteriormente por lo que quedaría hallar la eficiencia.

De acuerdo con (21), la eficiencia viene dada por:

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{rad}+P_c+P_d} = \frac{P_{rad}}{P_T} \quad (26)$$

donde P_c y P_d representan los valores de potencia disipada en los conductores y el dieléctrico, respectivamente. P_T es la potencia total introducida en la antena.

Considerando la antena como una cavidad resonante puede escribirse:

$$\eta = \frac{Q_T}{Q_r} \quad (27)$$

donde Q_T se refiere al factor calidad completo:

$$Q_T = \left(\frac{1}{Q_r} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \right)^{-1} \quad (28)$$

Es decir, incluyendo la contribución debida a las pérdidas en los conductores y del dieléctrico.

Para substratos de espesor pequeño en términos de longitud de onda el factor de calidad debido a las pérdidas en los conductores Q_c , es independiente de las dimensiones del parche, e igual a:

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma} \quad (29)$$

donde μ_0 denota la permeabilidad del vacío y σ la conductividad de la metalización.

Por otro lado el factor de calidad debido a las pérdidas en el dieléctrico Q_d , es:

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (30)$$

donde $\tan \delta$ representa la tangente de pérdidas del dieléctrico.

Con el factor de calidad Q_r y los factores Q_c y Q_d se obtiene el factor de calidad completo Q_T (28). La relación entre el factor de calidad debido a la radiación de la antena y el factor de calidad completo proporciona la eficiencia de la antena. Con la eficiencia se calcula la resistencia total y despejando de (16) se obtiene finalmente la posición Y de la sonda en el parche.

IV.2 Diseño del arreglo de antenas

Para diseñar el arreglo de antenas hay que tomar en cuenta la distancia a la que deberían estar separadas cada una de las antenas. Para ellos necesitamos saber el λ (longitud de onda) del arreglo que sería la longitud total del arreglo. Para calcular el valor de λ se hace el uso de la expresión (31).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (31)$$

donde c representa la velocidad a la que viaja la onda en un medio específico, en este caso en el aire que es un valor predeterminado, y f la frecuencia fijada para nuestra investigación.

Luego de obtener la distancia total del arreglo se debe determinar a qué distancia debe estar separada cada una de las antenas. Para garantizar el buen funcionamiento del arreglo la ubicación de cada antena debe ser a una distancia que sea múltiplo de la distancia total, de no cumplirse esto podría existir solapamiento entre las señales emitidas y recibidas por las antenas, lo que dificultaría la eficiencia del arreglo. Por ello, se decidió tomar como separación un cuarto de la distancia total.

$$\lambda_s = \frac{\lambda}{4} \quad (32)$$

donde λ_s es la separación que debería tener cada antena. Por lo que se utilizaron cinco antenas de tipo parche para la construcción del arreglo de antenas.

IV.3 Construcción del Arreglo de Antenas Patch

Los materiales utilizados para la construcción del arreglo fueron:

- 1 trípode para cornetas amplificadoras.
- 1 tubo de PVC de 1".
- 1 tubo de PVC de $\frac{3}{4}$ ".
- 3 bisagras.

- 5 tuercas tipo mariposa.
- Tornillos, tuercas y arandelas de presión.
- 1 cadena de peloticas de 1 m de longitud.
- Remaches.
- 1 splitter de 6 a 1.
- 12 m de cable RG-58.
- 2 m de cable RG-6.
- 11 conectores f para cable RG-6.
- 10 conectores BNC macho para cable RG-58.
- 1 conector BNC macho para cable RG-6.
- 5 conectores BNC hembra dobles.
- 5 transformadores de impedancia de 50-75 ohms, marca viewsonics, modelo VSIT-50-75.
- 1 cajetín de aluminio.
- 1 remachadora.
- 1 fresadora con disco de corte y fresas para lijar metales.
- 1 mecha para metales.
- 1 taladro.
- Estaño.
- 1 cautín.
- 1 m de tubería flexible de plástico.

Haciendo uso de (31) y (32) se obtiene que el arreglo debe ser de longitud de 63.157 cm y la separación entre cada elemento radiante sea de 15.789 cm. Para la base del arreglo se tomó el tubo central del trípode. Se hicieron las mediciones correspondientes para la posición de cada uno de los elementos radiantes y en cada una de ellas se procedió a abrir un orificio haciendo uso de la fresadora y el disco de corte de manera que, en cada una de las perforaciones, encaje perfectamente un tubo de 1". A medida que se fueron haciendo los orificios se utilizaron las fresas para lijar y así eliminar residuos e imperfecciones en la base. Además se realizó un orificio, de igual magnitud a los anteriormente mencionados, en la mitad de la base en el lado contrario a los elementos radiantes; dicho orificio serviría

posteriormente para colocar un tubo que sirva de soporte para cuando la configuración del arreglo sea en posición horizontal.

Se procedió a picar 6 trozos de 14.5 cm del tubo de PVC de 1" y 5 trozos de 16.3 cm del tubo de $\frac{3}{4}$ ", los cuales servirían de soporte de cada elemento radiante. Uno de los trozos del tubo de 1" es el que haría la función de soporte del arreglo.

El uso de tubos de distinto diámetro es debido a que cuando el arreglo estaría en configuración vertical, dada las dimensiones de las antenas, chocarían una con otra. Es por ello que cada antena estaría fijada a un tubo de $\frac{3}{4}$ " y este a su vez pueda desplazarse dentro del tubo de 1" y así evitar que las antenas se obstruyan.

Se realizaron perforaciones al tubo de la base cercanas a los orificios anteriormente hechos, y a cada tubo de 1" en la parte inferior, con un taladro y una mecha para metal, con el propósito de fijar las bases de las antenas a la base del arreglo. Para ello se utilizaron remaches y una remachadora. En la figura 19 se muestran los elementos de la base del arreglo.

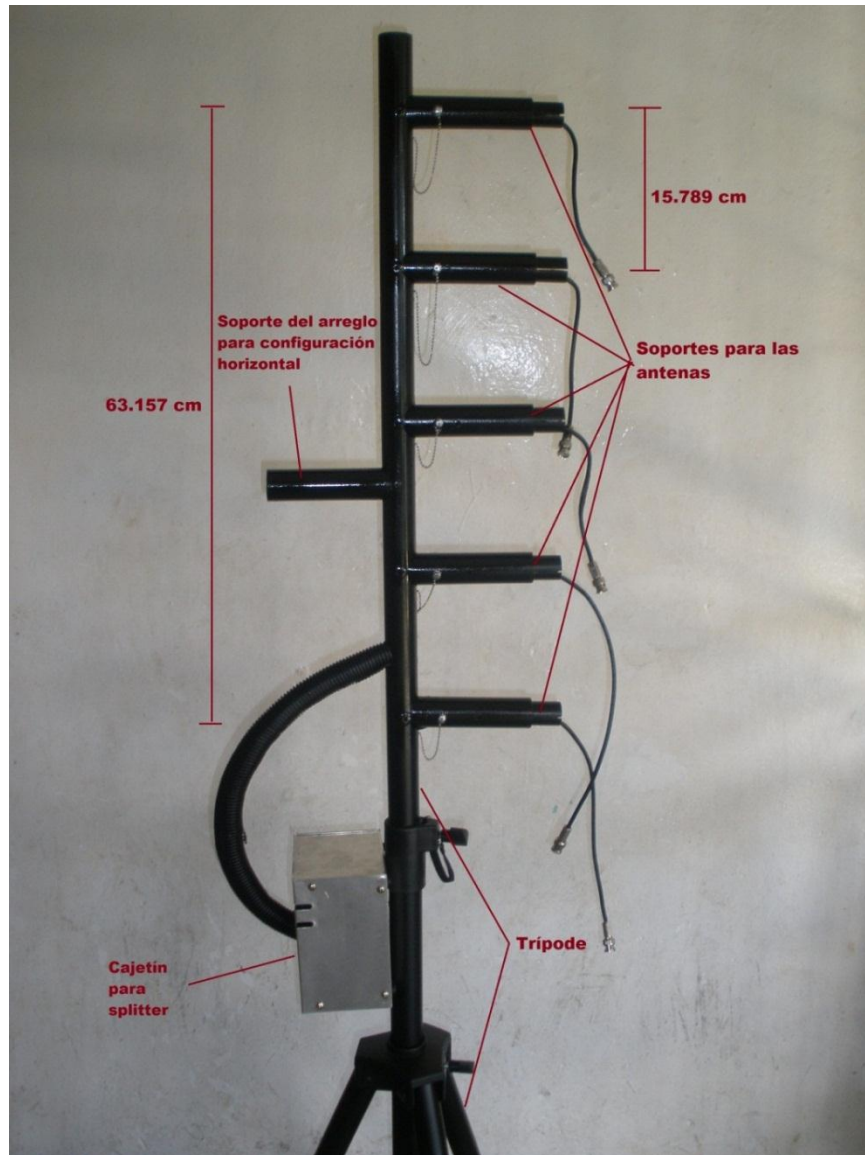


Figura 19. Base construida para el arreglo.
Fuente: Elaboración propia.

Dado que el único fin de las bisagras es el de permitir girar las antenas al momento de cambiar de configuración, cada bisagra fue picada a la mitad y así, de cada una se obtuvieron dos bisagras. Se realizó un pequeño orificio en cada una de las antenas con el fin de poder fijar una pestaña de la bisagra a éstas haciendo uso de tornillos y tuercas. La otra pestaña va fijada al tubo de 3/4" en una ranura previamente hecha al mismo. Como eje de las bisagras se utilizaron tornillos pasantes, de manera que al lado opuesto de estos, se puedan colocar las tuercas mariposas. El uso de las mismas, al igual que el de arandelas de

presión, es con el fin de facilitar la fijación de las bisagras en la posición deseada. En la figura 20 se muestra la implementación de las bisagras al igual que de los pasadores, que se explicará a continuación.



Figura 20. Soporte de una antena.
Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, las bases de las antenas deben tener una determinada separación (horizontalmente) para cuando la configuración es vertical. Dicha separación es de 1 cm una de otra. Para fijar la base de cada antena una vez desplazada, se hicieron orificios en éstas en cada posición correspondiente y para fijarlas se colocó un pasador que a su vez está sujeto con una cadena de pelotitas a la base del arreglo.



Figura 21. Separación entre antenas.
Fuente: Elaboración propia.

Nótese en la figura 21, tal y como se menciona anteriormente, que existe una separación (horizontalmente) entre una antena y otra. De igual manera se puede apreciar que los pasadores de las distintas bases de cada antena, tienen diferentes posiciones si se comparan unas con otras. Esto permite fijar cada antena al momento de desplazarla cuando el arreglo está en configuración horizontal.

Debido a que la impedancia de entrada de cada antena es de 50 ohm, el cable utilizado para la alimentación de las mismas es el RG-58. Para la alimentación del arreglo se utilizaron cables RG 58, cables RG 6, transformadores de impedancia 50-75, splitter 6-1, conectores BNC y conectores F.

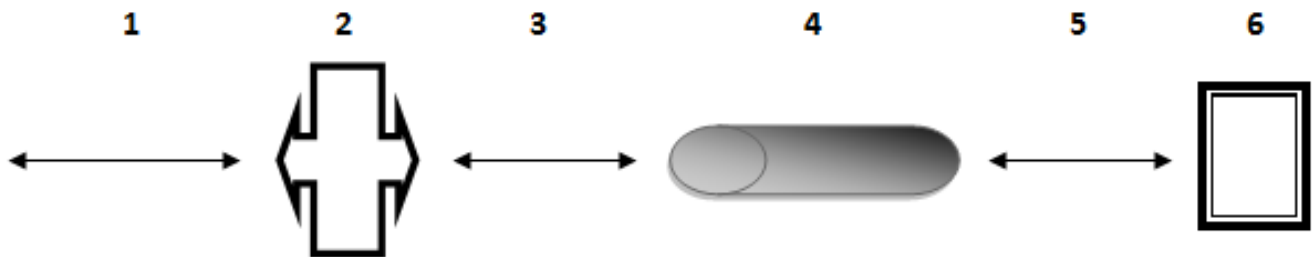


Figura 22. Diagrama de conexión de la alimentación del arreglo (1 y 3: Cable Rg 6, 2: Splitter, 4: transformador de impedancia, 5: Cable RG 58, 6: antena patch).

Fuente: Elaboración Propia.

La conexión de la alimentación del arreglo puede apreciarse en la figura 22. A continuación se explica con mayor detalle cada uno de los elementos:

- 1- Conexión entre transmisor y el splitter: para esta se utilizó un cable RG 6, cuya impedancia característica es de 75 ohms, un conector BNC macho con el fin de ser conectado en la salida del transmisor y un conector F macho para conectar al splitter.
- 2- Splitter 6-1: debido a que no se encontró ningún splitter 5-1 en las tiendas comerciales, se recurrió a utilizar un splitter de 6 salidas y 1 entrada, con una impedancia de 75 ohms en cada uno de sus puertos. Todos los puertos del splitter son conectores F hembra.
- 3- Conexión entre splitter y transformador de impedancia: se usó un cable RG 6 con conectores F macho en ambos terminales debido a que no se dispuso de conectores F macho dobles.
- 4- Transformador de impedancia: dado que los puertos del splitter tienen una impedancia de 75 ohms y la impedancia de entrada de las antenas es de 50 ohms, se vio en la necesidad de utilizar un transformador de impedancias. Con este elemento

se consigue que la conexión esté acoplada en impedancia y por consiguiente exista máxima transferencia de potencia. Consta de un conector F hembra en el terminal de 75 ohms y un conector BNC macho en el de 50 ohms.

- 5- Conexión entre transformador de impedancias y antenas: se utilizó un cable RG 58, cuya impedancia característica es de 50 ohms, un conector BNC hembra doble y dos conectores BNC macho.
- 6- Antena patch: la impedancia de entrada de la antena es de 50 Ohms. Para la alimentación se utilizó un conector BNC hembra para circuitos impresos.

Por último, se utilizó un cajetín de aluminio para ocultar el splitter. Este se fijó a la base haciendo uso de remaches. En la tapa del cajetín se hizo una perforación circular lo suficientemente grande como para que encaje la tubería flexible, con la cual dejan de ser visibles los cables y conectores utilizados. Como producto del presente proyecto y de la construcción anteriormente detallada, se puede observar en las figuras 23 y 24 el arreglo en las distintas configuraciones diseñadas.



Figura 23. Arreglo en Configuración vertical.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 24. Arreglo en Configuración horizontal.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 24 se puede observar que cuando el arreglo está en configuración horizontal, los soportes de las distintas antenas son de igual tamaño, por lo que las antenas se encuentran alineadas.

IV.4 Descripción de los instrumentos de medición

Inicialmente se realizaron las pruebas de las cinco antenas por separado para medir algunos parámetros de interés. En principio, algunas pruebas se realizaron en un laboratorio de la Universidad Católica Andrés Bello.

Se utilizó como fuente un transmisor Elettronica Veneta que trabajaba en la banda de frecuencias de los MHz. Se aproxima la frecuencia de transmisión a la frecuencia fijada para este proyecto, en 469,5 MHz, ya que el instrumento no nos permitía usar la frecuencia de 475 MHz. Se procedió a la conexión de la antena usando un cable coaxial RG58, que posee 50 Ohms de impedancia. Esta conexión puede observarse en la figura 25.



Figura 25. Transmisor empleado para la verificación del funcionamiento de las antenas.
Fuente: Elaboración Propia.

Además de este transmisor, se necesitó un analizador de espectro, mediante el cual se obtuviesen algunos datos de interés para el presente proyecto. El analizador de espectro utilizado es un GSP-827 de la marca GwINSTEK, que es un analizador que cubre un espectro de frecuencias de hasta 2,7GHz. Este dispositivo se le conectó una antena dipolo para que pudiera recibir las señales transmitidas por la antena. La conexión de la antena con el analizador de espectro se muestra en la figura 26.



Figura 26. Analizador de espectro utilizado para captar las señales de prueba.
Fuente: Elaboración Propia.

Luego de montar los dispositivos de transmisión y recepción se procedió a encender el transmisor y posteriormente a buscar las señales en el analizador. Cabe destacar que el enlace fue realizado en un laboratorio y a una distancia aproximada a los 3m por cuestiones de espacio.

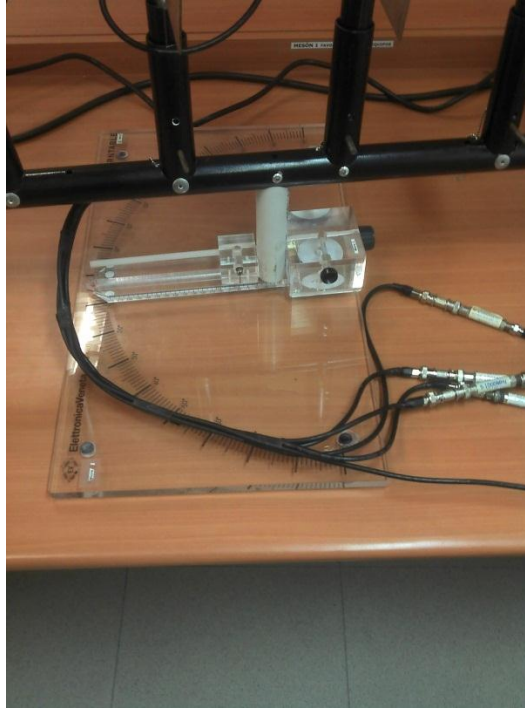


Figura 27. Turntable.
Fuente: Elaboración Propia.

Para la medición del diagrama de radiación del arreglo fue utilizada una Turntable o tabla de giro del fabricante Elettronica Veneta, que puede ser apreciada en la figura 27. Esta consta de una base rectangular, la cual tiene la escala en grados para hacer una correcta lectura del ángulo de giro, y una base giratoria que indica la cantidad de grados en la que esta direccionada la antena. Para efectos de nuestras pruebas, se adaptó el arreglo directamente de la base del mismo a la Turntable, en lugar de utilizar la base del trípode.

CAPITULO V

Análisis de resultados

En el presente capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos de cada una de las simulaciones y construcciones de los diseños realizados a lo largo del proyecto de investigación.

V.1 Resultados simulados

Debido a la necesidad de obtener valores teóricos con los cuales poder comparar los resultados prácticos obtenidos en las mediciones, se hace inevitable la utilización de métodos automatizados para obtener estos puntos de referencia.

Es por eso que se debe disponer de programas informáticos especializados que permite realizar configuraciones para diferentes tipos de antenas y arreglos de antenas, los cuales permitan modificar parámetros importantes como puede ser la alimentación y la fase.

Para este proyecto se contó con el uso de un software de simulación de arreglos de antenas, del cual se pudo obtener los patrones de radiación de la configuración de arreglos introducida. El software de simulación a usar es un simulador 3D llamado HFSS, el cual permite realizar múltiples mediciones sobre el modelo de arreglo de antenas antes diseñado, las cuales nos servirán como punto de referencia para poder analizar los resultados prácticos.

Inicialmente fue simulado un solo parche con el fin de obtener datos importantes como el patrón de radiación y luego poder compararlos con las mediciones realizadas en el laboratorio. En la figura 28 se puede ver un parche realizado en el simulador.

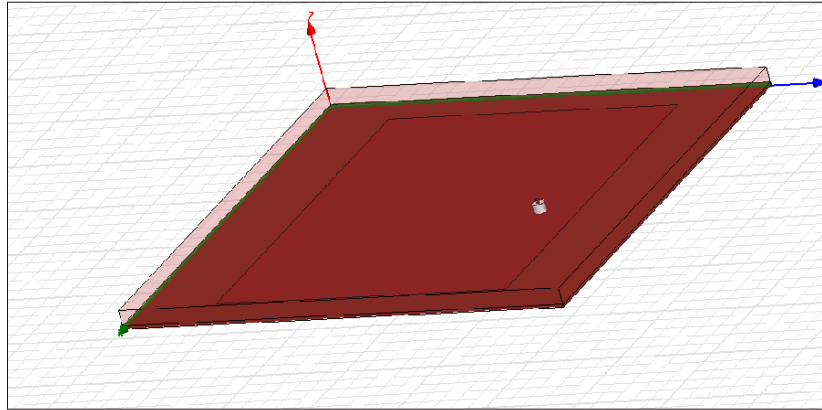


Figura 28. Antena patch en HFSS.
Fuente: Elaboración Propia.

Para la obtención de los resultados fueron modificados algunos parámetros del simulador, luego de obtener el formato de la antena de manera gráfica, se determinó cuál sería la alimentación de la antena y se estableció el puerto de entrada, además de esto se seleccionó también el medio donde debía irradiar la antena. Posteriormente se procedió a seleccionar los tipos de resultados que se necesitaba obtener. Como primeros resultados se obtuvo el patrón de radiación en base a la ganancia de la antena, que se observa en la Figura 29. Además se tiene que el patrón está conformado por un solo lóbulo casi circular, lo que indica que se tiene una antena con una buena cobertura de radiación.

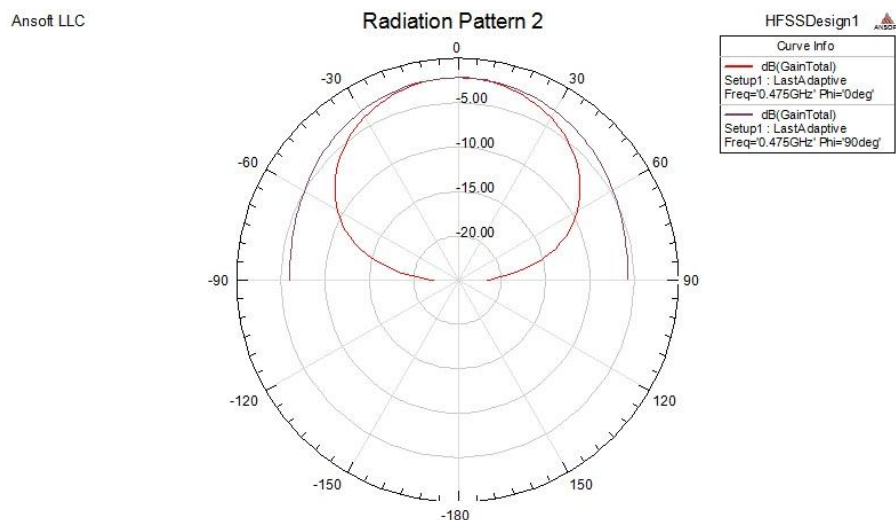


Figura 29. Patrón de radiación de una antena patch rectangular.
Fuente: Elaboración Propia.

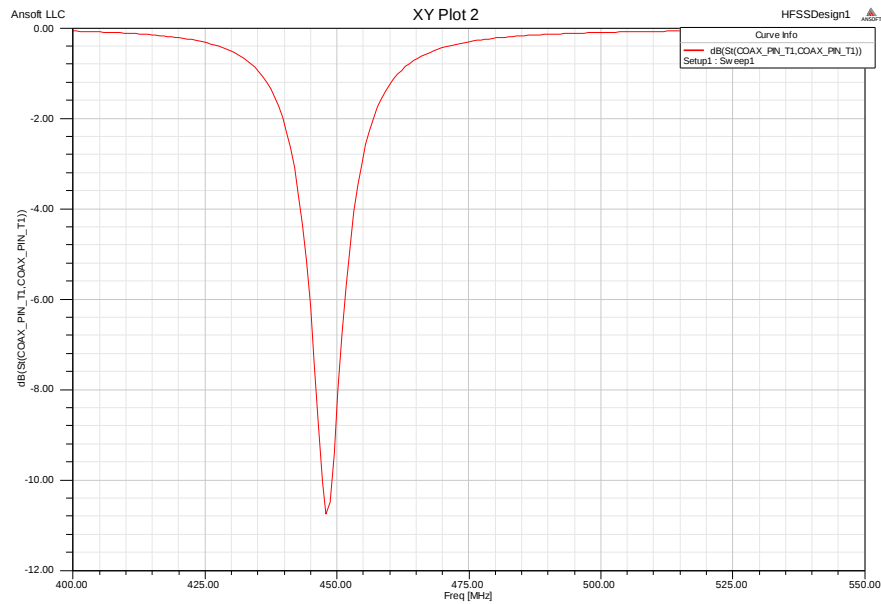


Figura 30. Parámetro S11 de una sola antena.
Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 30 se puede apreciar el parámetro S11 obtenido como resultado de la simulación de una antena de tipo parche haciendo uso del simulador. De dicha figura se tiene que el ancho de banda para estas antenas es menor a 3 MHz, por lo cual se les consideran antenas de banda estrecha.

Para la realización del arreglo de antenas en el simulador se usaron cinco réplicas del formato anterior, tomando en cuenta las condiciones que debía cumplir el simulador para que la imagen o la estructura dibujada en él funcionaran como arreglo. Se tomaron en cuenta dos configuraciones posibles, una horizontal y otra vertical.

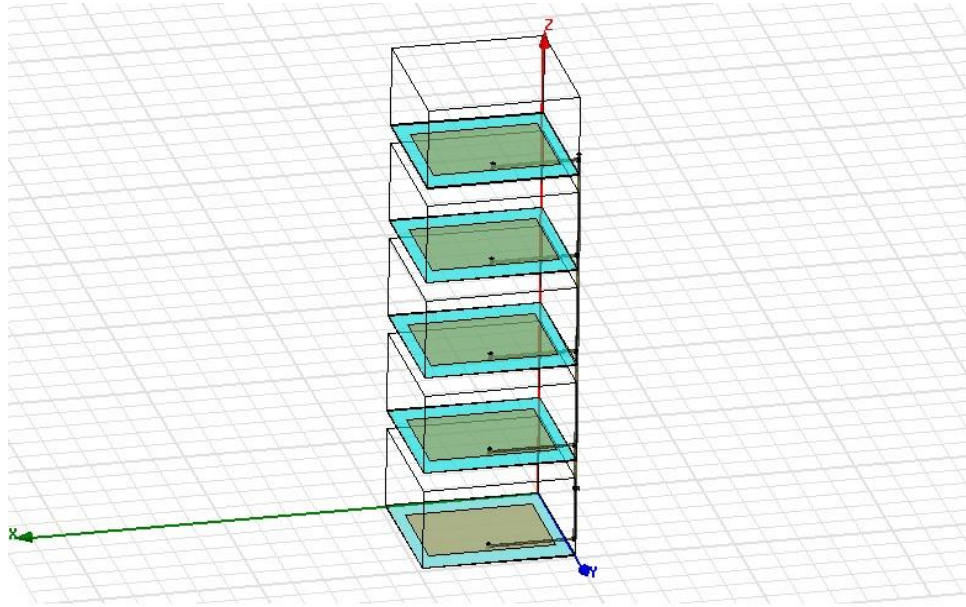


Figura 31. Arreglo en simulador, en configuración horizontal.
Fuente: Elaboración Propia.

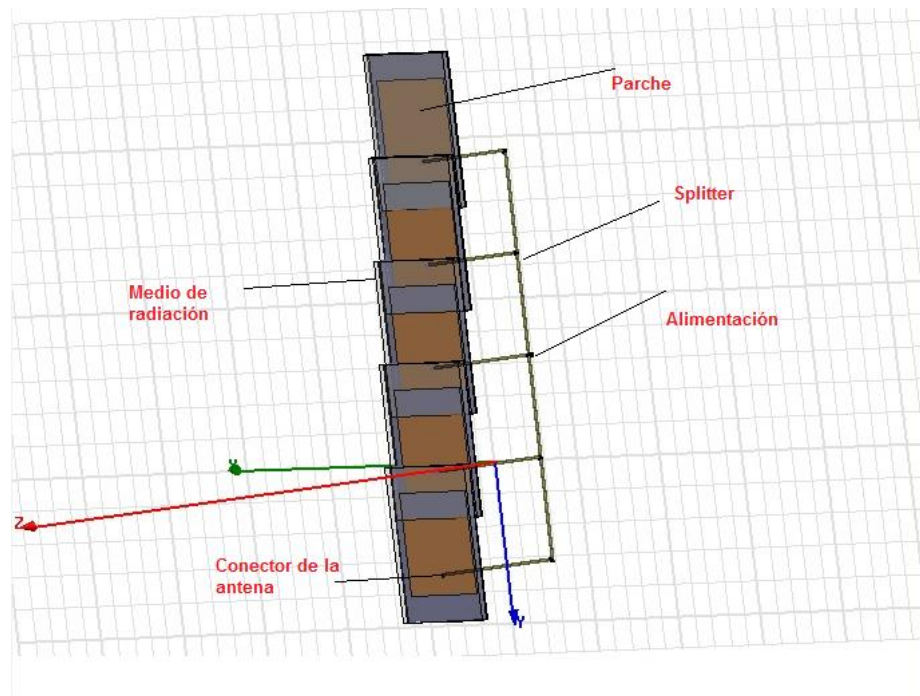


Figura 32. Arreglo en simulador, en configuración vertical.
Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 31 se observa la configuración horizontal y en la figura 32 la configuración vertical, en ambas figuras se indican algunas partes importantes del arreglo, como lo puede ser, las conexiones de los cables coaxiales simulando o realizando la función del splitter, ya que este dispositivo no es posible representarlo de manera idéntica en el simulador, el parche, la alimentación y el medio dónde radiará el arreglo.

A partir de estas configuraciones fueron obtenidos algunos parámetros de interés usando las funciones del simulador. El patrón de radiación fue uno de esos parámetros interesantes, ya que muestra hacia dónde estarán orientadas las ondas radiadas por la antenna.

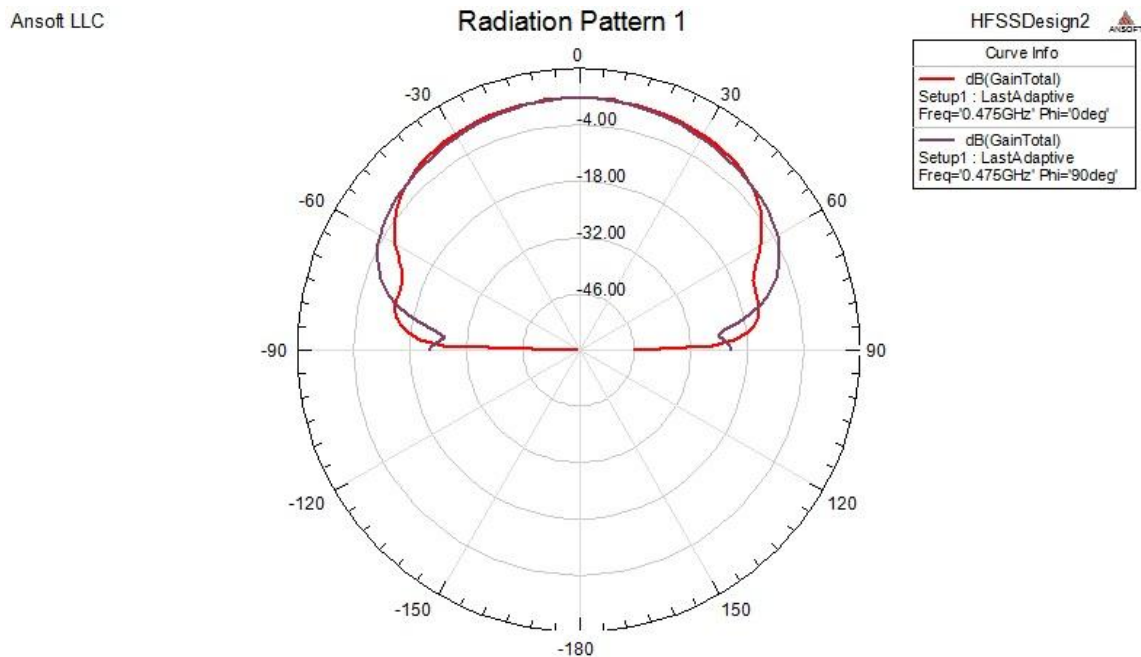


Figura 33. Patrón de radiación del arreglo en configuración horizontal, obtenido a través del simulador.

Fuente: Elaboración Propia.

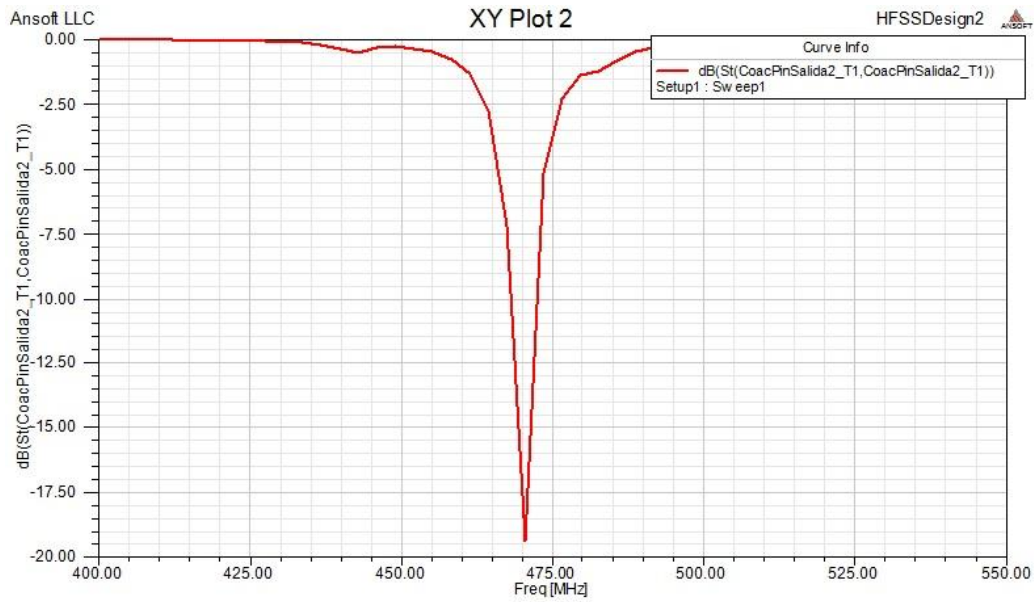


Figura 34. Parámetro S11 para el arreglo en configuración horizontal.
Fuente: Elaboración Propia.

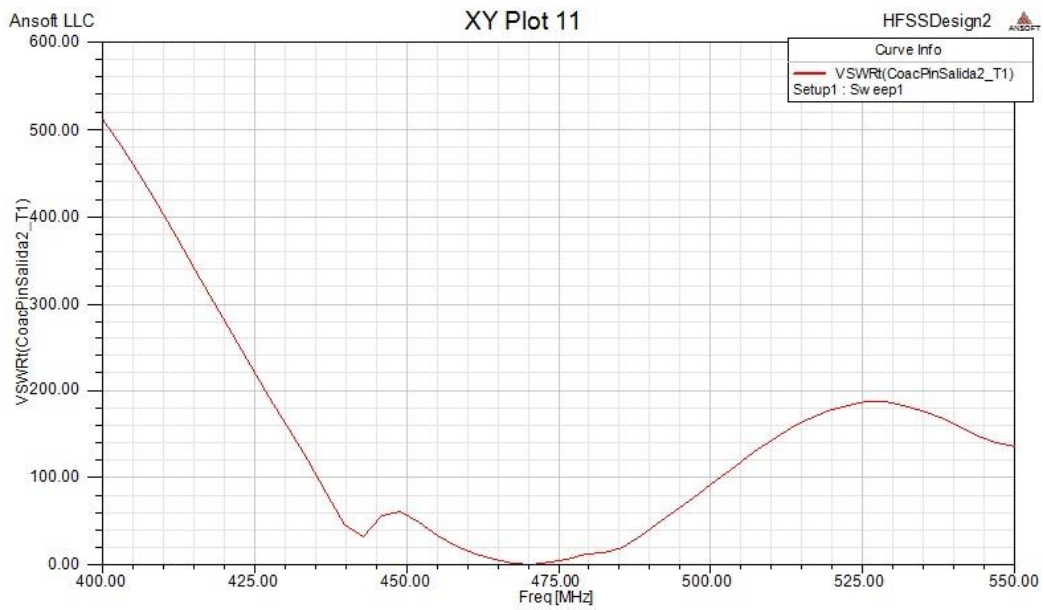


Figura 35. VSWR o ROE para el arreglo en configuración horizontal.
Fuente: Elaboración Propia.

En las figuras 34 y 35 se muestran los resultados simulados obtenidos para el arreglo en configuración horizontal. Se observa que se obtiene un valor de parámetro S_{11} de -19.47 dB para una frecuencia de 470 MHz. Además el valor del ROE para dicha frecuencia es de 1.23 que es considerado adecuado para funcionar en la mayoría de los sistemas de telecomunicaciones. Por otra parte, se puede apreciar, dado el concepto de ancho de banda útil, que se mejora el funcionamiento en cuanto a este aspecto se refiere. En otras palabras, el arreglo para dicha configuración permite afirmar que está cumpliendo con su propósito de mejorar las características de rendimiento de las antenas patch.

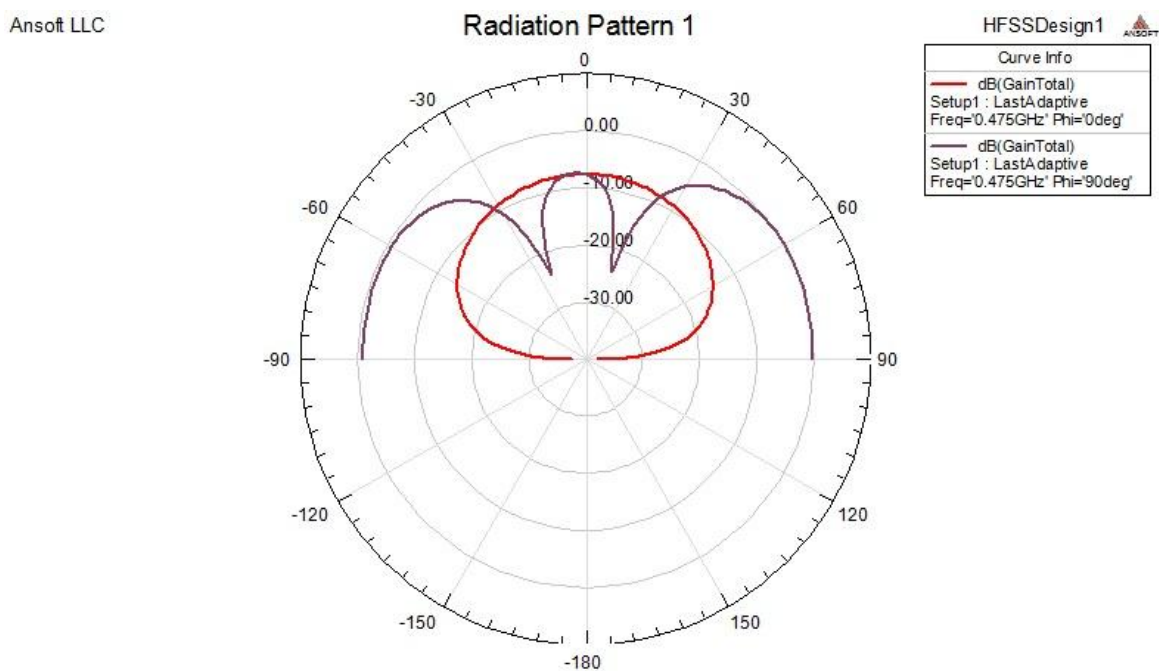


Figura 36. Patrón de radiación del arreglo en configuración vertical, obtenido a través del simulador.

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 36 se observa el patrón de radiación de la configuración horizontal, donde se puede destacar que el patrón tiene una forma muy parecida a un cardiode, es decir, que

estamos hablando de una antena no directiva. Para la configuración vertical obtenemos el patrón de radiación que se muestra en la figura 34, en donde se observa un patrón más directivo, compuesto por tres lóbulos, dos lóbulos semejantes hacia los extremos y uno más pequeño hacia el frente del arreglo.

Además de los patrones de radiación de ambas configuraciones, el simulador permite observar las pérdidas por retorno que existen en dichas configuraciones. El parámetro S es una gráfica que muestra una serie de frecuencias en función de estas pérdidas.

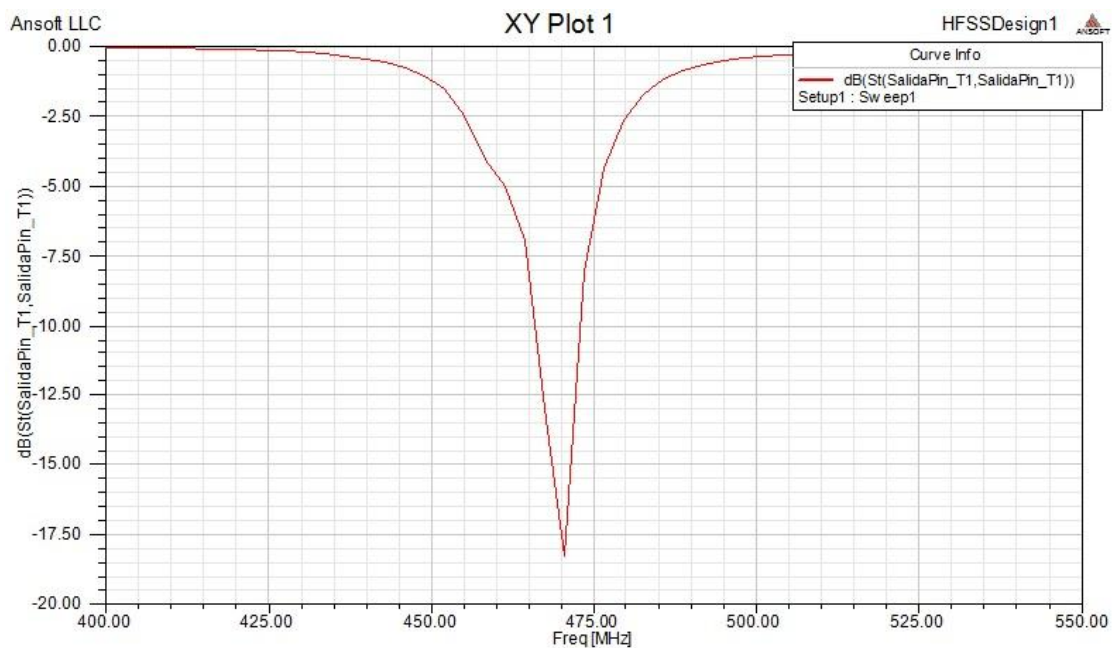


Figura 37. Parámetro S11 del arreglo en configuración vertical.

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 37 se muestra el parámetro S11 del arreglo, en donde se observa que se obtienen menos pérdidas por retorno para frecuencias aproximadas a 470 MHz. Además se puede apreciar que el ancho de banda obtenido es de aproximadamente 8 MHz, con lo cual se puede decir que haciendo uso del arreglo se mejoró la capacidad de ancho de banda respecto al calculado para una sola antena. Sin embargo, el ancho de banda sigue siendo reducido. Estos resultados fueron obtenidos a través de la realización de una aproximación de la conexión de las antenas del arreglo, haciendo uso del simulador. Cabe destacar que

por no contar con los instrumentos de medición adecuados, no se cuenta con información más precisa al respecto.

También fue posible el cálculo del ROE o VSWR, que es la relación entre la potencia irradiada y la potencia entregada. Los resultados para dicho parámetro pueden ser apreciados en la figura 35.

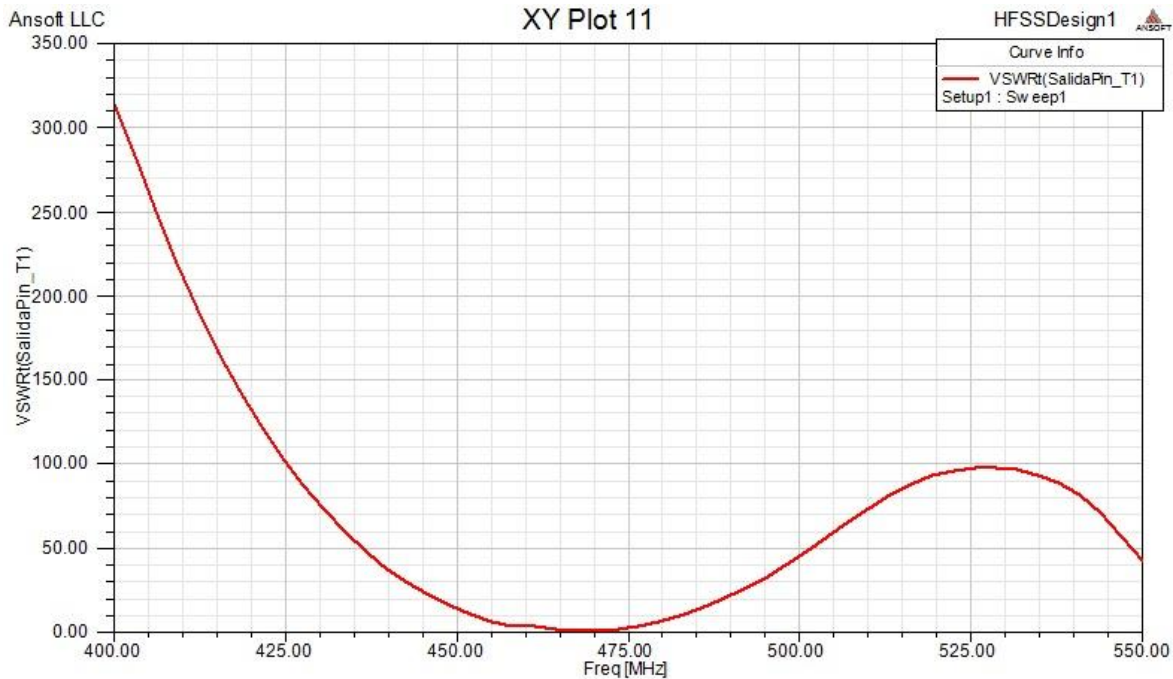


Figura 38. VSRW o ROE del arreglo en configuración vertical.

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa en la Figura 38 el ROE del arreglo en configuración vertical, donde se obtiene que el valor para una frecuencia de 470 MHz, está por debajo de 1.5 lo cual, al igual que el parámetro S11, lo que indica que las pérdidas por retorno son reducidas. Por lo tanto, un gran porcentaje de la potencia entregada al arreglo es radiada.

Como puede apreciarse en las figuras anteriores en donde se grafican el parámetro S11 y el VSWR en un determinado rango de frecuencias, se obtiene como resultado que el arreglo tiene una mejor respuesta para una frecuencia de 470 MHz, a pesar de que las antenas fueron diseñadas para operar en 475 MHz. Esto es ocasionado porque el simulador al

momento de calcular el largo del parche no utiliza ni el margen producido por los fringing fields, ni utiliza la permitividad relativa efectiva del material, tal y como se muestra en la sección teórica del presente proyecto. Por lo tanto, se presentarán los resultados para la frecuencia de 470 MHz:

Tabla 1. Parámetros del Arreglo.

Configuración	Horizontal	Vertical
VSWR	1.3186	1.2321
Parámetro S11 (dB)	-19.4723	-17.5488
Potencia radiada (dB)	-29.138	-26.2835
Eficiencia de radiación	0.5157	0.7174
Ganancia (dB)	27.374	0.2612
Ancho de Haz (dB)	53.842	92.886

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 2 se resumen los valores obtenidos en las simulaciones. Aunque para ambas configuraciones el arreglo cumple con su propósito de mejorar el ancho de banda útil de estas antenas, se puede observar que para una configuración vertical se obtienen mejores resultados lo cual permitiría al arreglo adecuarse de mejor forma a los sistemas de telecomunicaciones.

V.2 Resultados prácticos

Posterior a la construcción de las antenas y del arreglo de antenas se procedió a realizar una serie de pruebas en el laboratorio de microondas de la Universidad Católica Andrés Bello, inicialmente con el fin de comprobar algunos parámetros de calidad.

Se realizó la revisión de cada uno de los conectores adaptados a las antenas. Se encontró con que la soldadura que se usó no era lo suficientemente fuerte para mantener fijo el conector en la lámina, a causa de ello estos fueron reforzados usando una pega especial que los mantenía fijos, tomando en cuenta que los puntos de soldadura no fueron removidos.

Luego de asegurar que los conectores cumplieran su función correctamente se procedió a probar cada antena por separado para verificar su buen funcionamiento. Se estableció un enlace en el laboratorio de pruebas donde utilizamos un transmisor que manejaba

aproximadamente la frecuencia de funcionamiento para la cual fueron diseñadas las antenas, y como receptor se usó un analizador de espectro al cual le fue adaptado una antena dipolo para poder captar las señales. En la figura 37 se muestra la señal obtenida por el analizador de espectro.

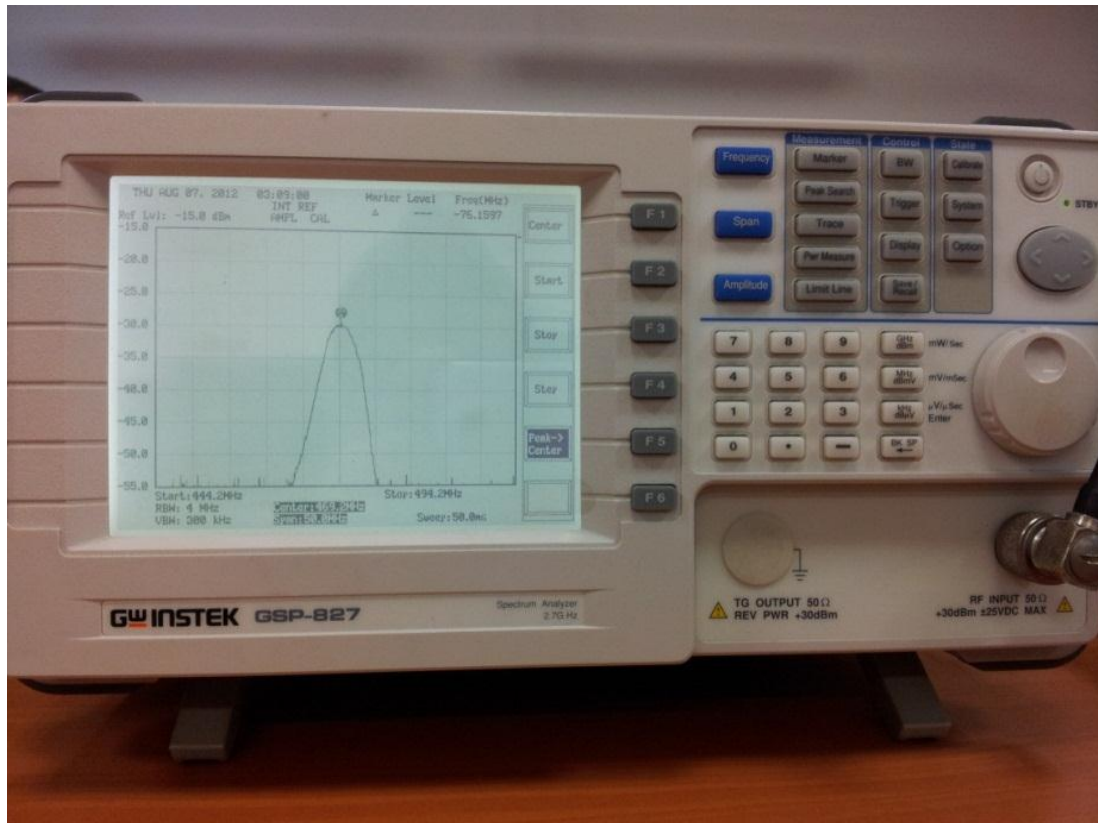


Figura 39. Señal captada al transmitir con una sola antena.
Fuente: Elaboración Propia.

Como se observa, se obtuvo un lóbulo en una frecuencia aproximada a 470 MHz, contra los 475 MHz fijados en la construcción de las antenas, con una potencia cercana a -30 dBm además de un ancho de banda alrededor de los 10 MHz. Estos valores son limitados al funcionamiento del transmisor debido a que a la señal a transmitir no se le permite modificar la potencia ni el ancho de banda.

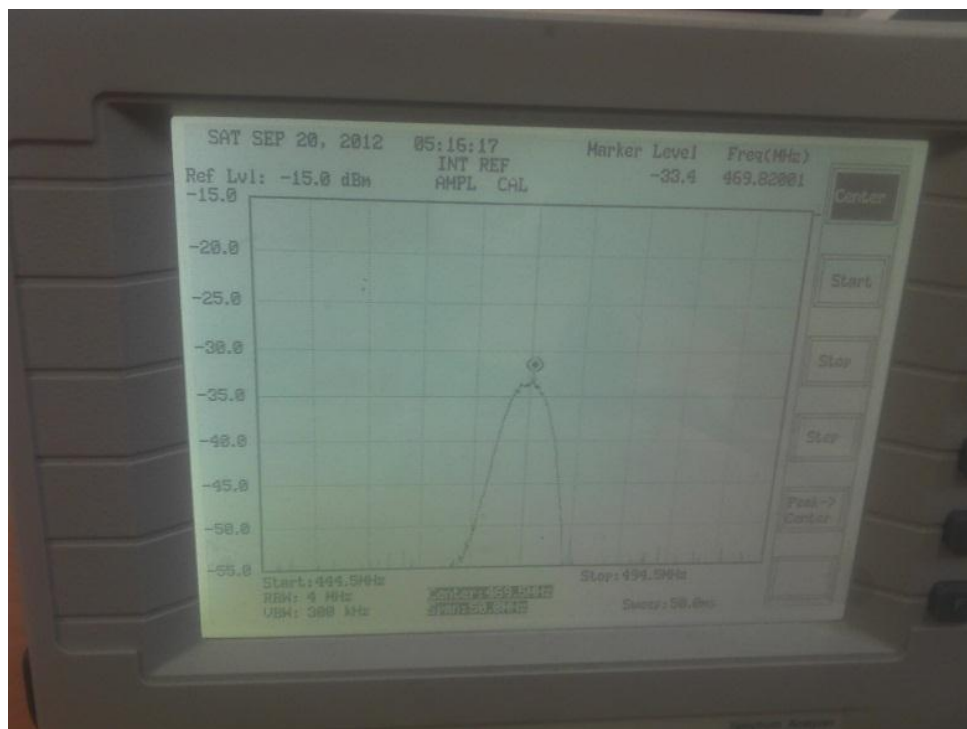


Figura 40. Señal captada al transmitir con el arreglo en configuración horizontal.
 Fuente: Elaboración Propia.

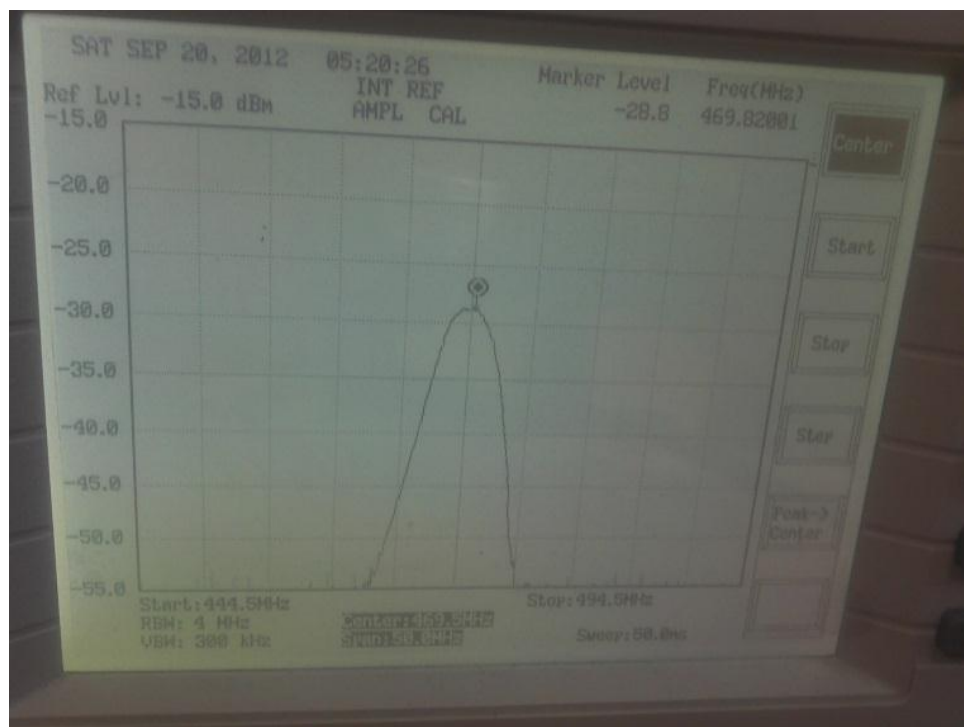


Figura 41. Señal captada al transmitir con el arreglo en configuración vertical.
 Fuente: Elaboración Propia.

En las figuras 40 y 41 se muestran las lecturas en el analizador de espectro al realizar las pruebas en las distintas configuraciones del arreglo. Como puede apreciarse en ambas hay una disminución de la potencia recibida, esto es debido a la inserción de los conectores, cables y splitter que anteriormente no eran utilizados. Las lecturas del ancho de banda siguen siendo limitadas ya que el transmisor utilizado únicamente produce un pulso de 10 MHz, como se mencionó anteriormente. Por lo tanto, con estas pruebas únicamente se puede comprobar que el arreglo radía la señal con que fue alimentado.

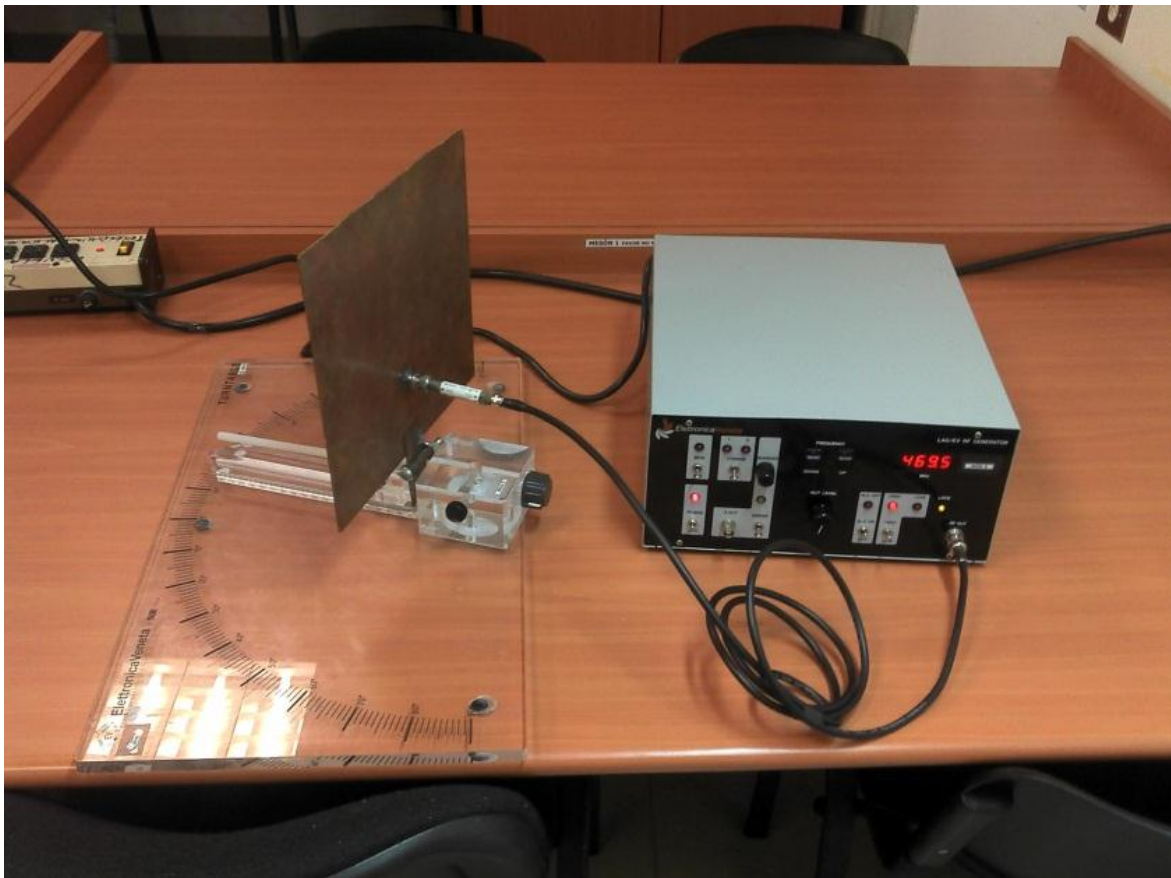


Figura 42. Antena Patch sobre Turntable.
Fuente: Elaboración propia.

V.2.1 Diagrama de radiación

Tabla 2. Mediciones para diagrama de radiación de una antena patch.

Una Antena Patch	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)
Grados	Mínimo	Máximo	Promedio	Norm.
-90	-35	-33	-34	-15.5
-85	-33	-32	-32.5	-14
-80	-35	-33	-34	-15.5
-75	-33	-32	-32.5	-14
-70	-33	-32	-32.5	-14
-65	-33	-31	-32	-13.5
-60	-19	-18	-18.5	0
-55	-24	-23	-23.5	-5
-50	-30	-29	-29.5	-11
-45	-29	-27	-28	-9.5
-40	-28	-27	-27.5	-9
-35	-28	-27	-27.5	-9
-30	-28	-26	-27	-8.5
-25	-28	-27	-27.5	-9
-20	-27	-25	-26	-7.5
-15	-28	-26	-27	-8.5
-10	-27	-26	-26.5	-8
-5	-27	-25	-26	-7.5
0	-27	-26	-26.5	-8
5	-27	-25	-26	-7.5
10	-26	-25	-25.5	-7
15	-27	-26	-26.5	-8
20	-27	-26	-26.5	-8
25	-26	-25	-25.5	-7
30	-26	-24	-25	-6.5
35	-27	-25	-26	-7.5
40	-26	-25	-25.5	-7
45	-27	-25	-26	-7.5
50	-27	-26	-26.5	-8
55	-28	-26	-27	-8.5
60	-28	-26	-27	-8.5
65	-28	-27	-27.5	-9
70	-28	-27	-27.5	-9
75	-30	-28	-29	-10.5
80	-29	-27	-28	-9.5
85	-30	-28	-29	-10.5
90	-32	-28	-30	-11.5

Fuente: Elaboración propia.

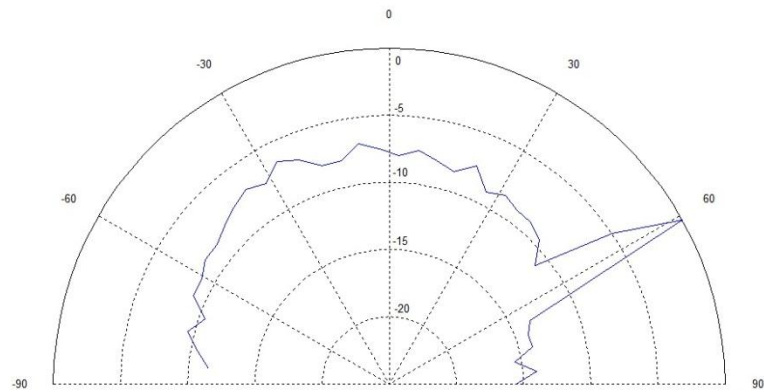


Figura 43. Diagrama de Radiación de una sola antena patch.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 44. Arreglo en configuración vertical sobre Turntable.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3. Mediciones para cálculo de diagrama de radiación del arreglo en configuración vertical.

Conf. Vertical	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)
Grados	Mínimo	Máximo	Promedio	Norm.
-90	-46	-41	-43.5	-18
-85	-50	-47	-48.5	-23
-80	-45	-40	-42.5	-17
-75	-48	-41	-44.5	-19
-70	-44	-41	-42.5	-17
-65	-42	-41	-41.5	-16
-60	-40	-37	-38.5	-13
-55	-38	-37	-37.5	-12
-50	-36	-35	-35.5	-10
-45	-35	-34	-34.5	-9
-40	-31	-33	-32	-6.5
-35	-30	-29	-29.5	-4
-30	-29	-28	-28.5	-3
-25	-27	-28	-27.5	-2
-20	-29	-30	-29.5	-4
-15	-26	-27	-26.5	-1
-10	-26	-26	-26	-0.5
-5	-25	-26	-25.5	0
0	-26	-25	-25.5	0
5	-26	-26	-26	-0.5
10	-28	-26	-27	-1.5
15	-27	-28	-27.5	-2
20	-28	-26	-27	-1.5
25	-26	-26	-26	-0.5
30	-26	-26	-26	-0.5
35	-27	-26	-26.5	-1
40	-27	-28	-27.5	-2
45	-27	-28	-27.5	-2
50	-32	-31	-31.5	-6
55	-31	-31	-31	-5.5
60	-34	-33	-33.5	-8
65	-32	-31	-31.5	-6
70	-34	-33	-33.5	-8
75	-35	-33	-34	-8.5
80	-37	-36	-36.5	-11
85	-39	-37	-38	-12.5
90	-42	-40	-41	-15.5

Fuente: Elaboración Propia.

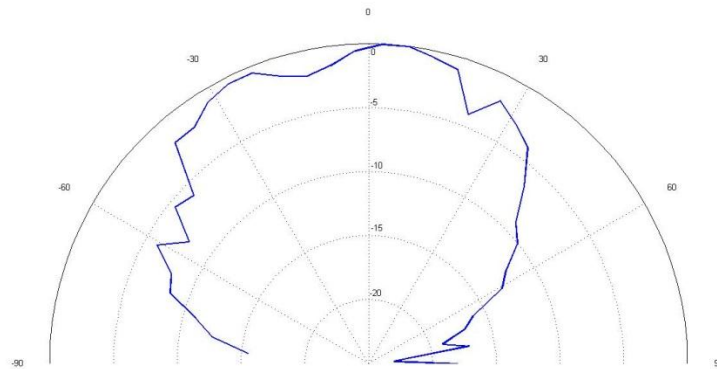


Figura 45. Diagrama de Radiación del arreglo en configuración vertical.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 46. Arreglo en configuración horizontal sobre Turntable.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4. Mediciones para cálculo de diagrama de radiación del arreglo en configuración horizontal.

Conf. Horizontal	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)
Grados	Mínimo	Máximo	Promedio	Norm.
-90	-36	-34	-35	-5
-85	-36	-35	-35.5	-5.5
-80	-37	-35	-36	-6
-75	-37	-34	-35.5	-5.5
-70	-37	-34	-35.5	-5.5
-65	-38	-35	-36.5	-6.5
-60	-40	-38	-39	-9
-55	-40	-37	-38.5	-8.5
-50	-36	-33	-34.5	-4.5
-45	-37	-35	-36	-6
-40	-35	-33	-34	-4
-35	-37	-33	-35	-5
-30	-34	-31	-32.5	-2.5
-25	-36	-33	-34.5	-4.5
-20	-36	-35	-35.5	-5.5
-15	-35	-33	-34	-4
-10	-33	-31	-32	-2
-5	-33	-31	-32	-2
0	-31	-29	-30	0
5	-33	-30	-31.5	-1.5
10	-33	-31	-32	-2
15	-32	-31	-31.5	-1.5
20	-32	-31	-31.5	-1.5
25	-34	-31	-32.5	-2.5
30	-34	-32	-33	-3
35	-34	-32	-33	-3
40	-35	-32	-33.5	-3.5
45	-38	-36	-37	-7
50	-39	-37	-38	-8
55	-37	-34	-35.5	-5.5
60	-36	-34	-35	-5
65	-37	-35	-36	-6
70	-41	-39	-40	-10
75	-37	-34	-35.5	-5.5
80	-35	-34	-34.5	-4.5
85	-35	-34	-34.5	-4.5
90	-40	-37	-38.5	-8.5

Fuente: Elaboración Propia.

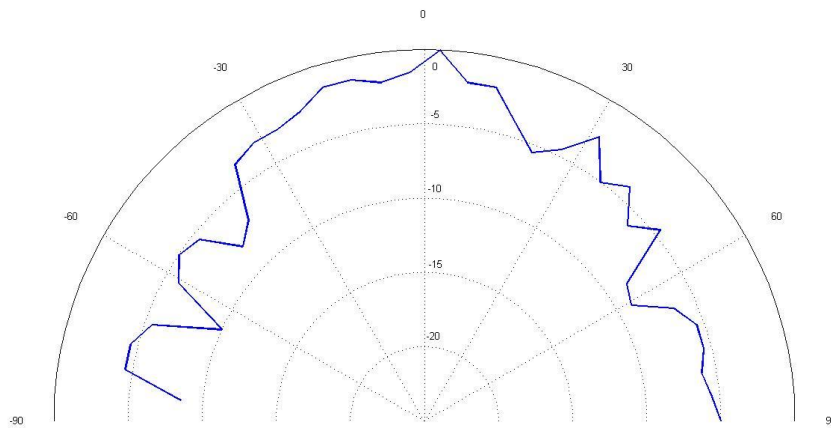


Figura 47. Diagrama de Radiación del arreglo en configuración horizontal.
Fuente: Elaboración Propia.

Para graficar los diagramas de radiación de una antena, así como del arreglo en las distintas configuraciones se tomaron lecturas del analizador de espectro durante 20 segundos para cada posición del turntable, debido a la inestabilidad de la señal recibida, producida por el mal estado de la antena dipolo utilizada en el analizador. Se tomó el valor máximo y el mínimo recibido para cada posición y con estos se hizo una aproximación de la potencia recibida. Las mediciones se hicieron, cada 5 grados, desde -90 hasta 90 grados, como puede ser apreciado en las tablas 3, 4 y 5. Con los valores obtenidos se procedió a graficar el diagrama de radiación en coordenadas polares haciendo uso del software Matlab.

V.2.3 Parámetro S11 y ROE

Con el fin de realizar las mediciones de las principales características del funcionamiento del arreglo, se hizo uso de un analizador de redes. Dado que la Universidad Católica Andrés Bello no dispone de uno de estos dispositivos, se vio en la necesidad de solicitar dicho dispositivo a la Universidad Simón Bolívar. Este dispositivo permite observar de manera gráfica distintos parámetros, dependiendo de la configuración que se utilice. El mismo cuenta con 2 puertos, que pueden hacer funciones de entrada y salida incluso simultáneamente.

La característica de mayor importancia para efecto del presente proyecto, es la frecuencia de resonancia óptima. Para esto es necesario medir el parámetro S11 y el ROE o Relación de Onda Estacionaria del arreglo. Para ello se configura el analizador de redes para que, mediante el uso de un solo puerto, realice tanto la transmisión de una señal de prueba como la lectura de la señal reflejada. Para ello se conecta la alimentación del arreglo al puerto uno del analizador de redes, tal y como se observa en la figura 48, y de esta manera se procede a tomar nota de los resultados obtenidos.

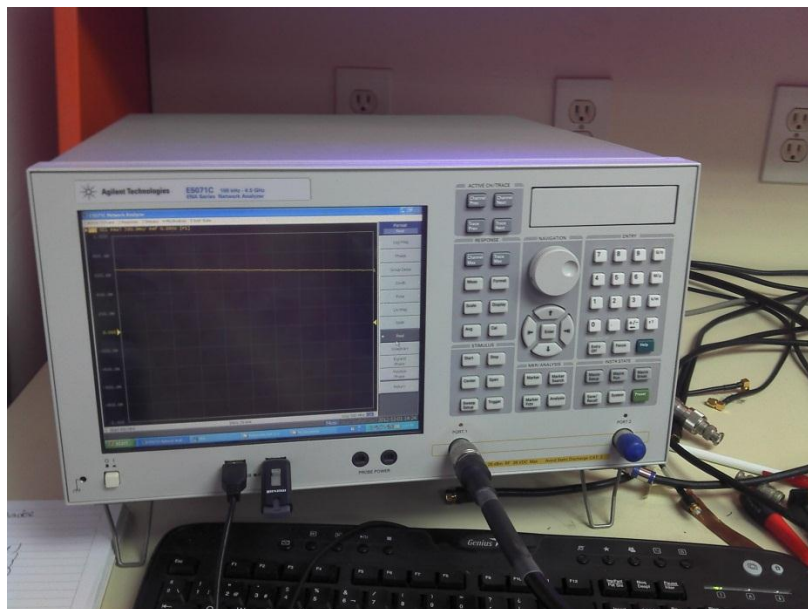


Figura 48. Analizador de redes. Arreglo en puerto 1.
Fuente: Elaboración Propia.

Adicional a las pruebas correspondientes al arreglo en sus distintas configuraciones, se efectuaron variaciones en la alimentación del mismo y así mismo las pruebas a dichas variaciones únicamente con el fin de observar lo obtenido a partir de estas. A continuación se muestran los resultados obtenidos haciendo uso del analizador de redes:

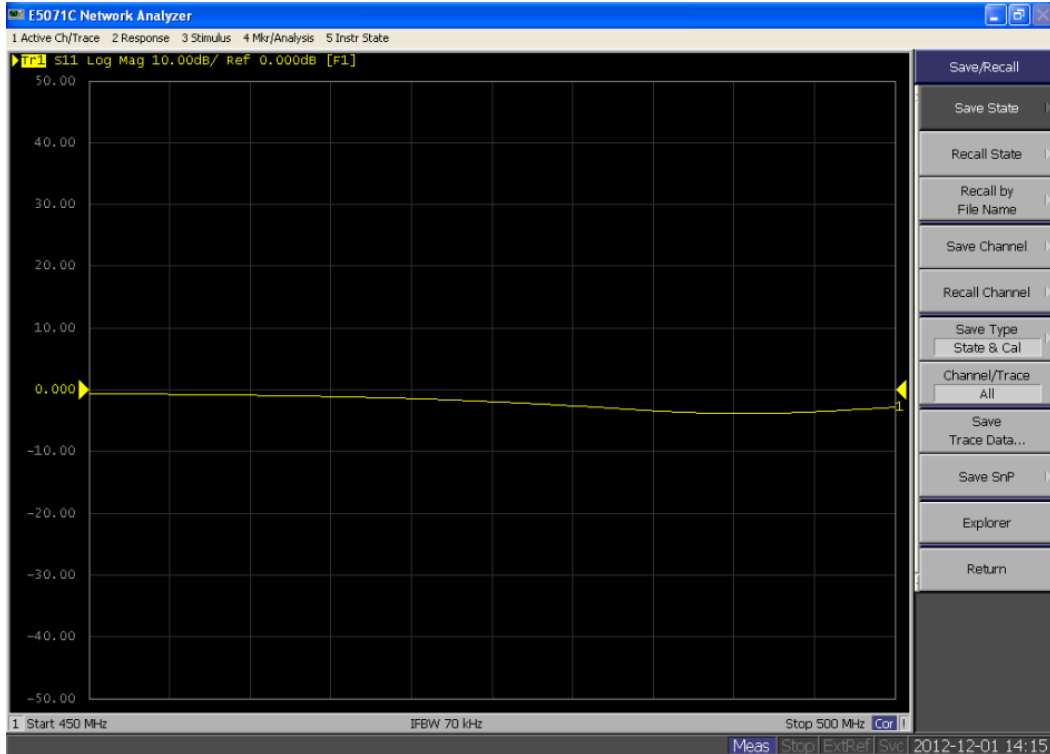


Figura 49. Parámetro S11 de una sola antena.
Fuente: Elaboración Propia.

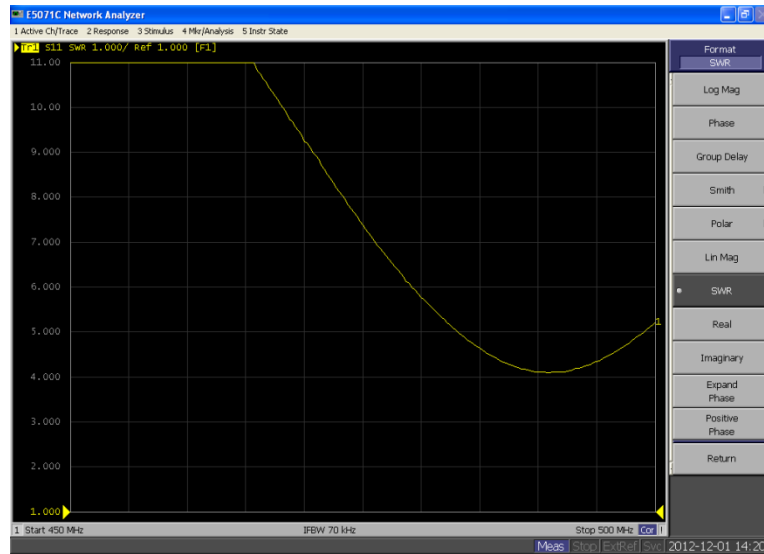


Figura 50. ROE de una sola antena.
Fuente: Elaboración Propia.

En las figuras 49 y 50 se pueden observar los resultados obtenidos del parámetro S11 y el ROE medidos con una sola antena. Se puede apreciar los valores no son deseables dado que no se adaptarían para ningún sistema de telecomunicaciones. Es por ello que se lleva a cabo la realización del arreglo con el fin de mejorar estos aspectos.

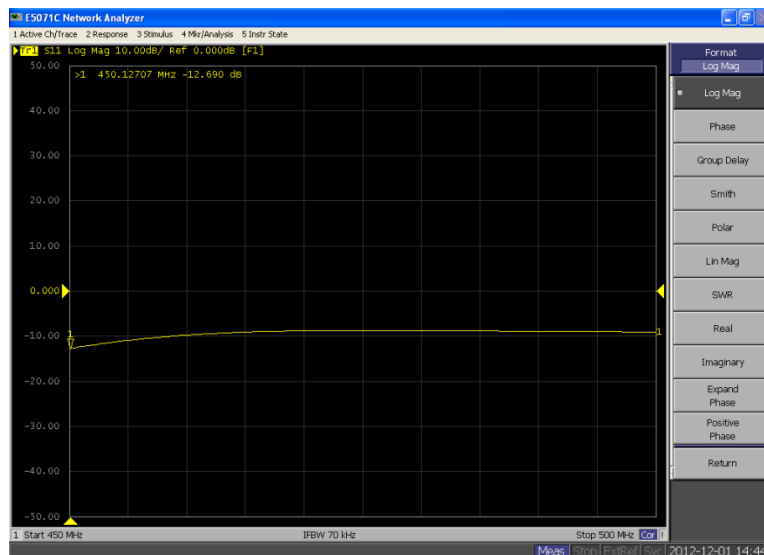


Figura 51. Parámetro S11. Arreglo en configuración horizontal. Alimentación uniforme.
Fuente: Elaboración Propia.

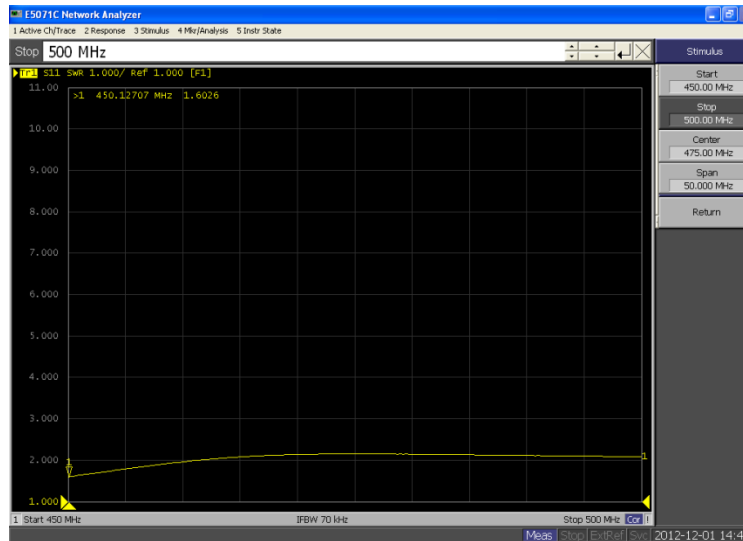


Figura 52. ROE. Arreglo en configuración horizontal. Alimentación uniforme.
Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 51 y 52 se muestran las gráficas del parámetro S11 y el ROE, respectivamente, obtenidas para el arreglo en configuración horizontal y con una alimentación uniforme. En ellas se puede apreciar que del arreglo se obtiene un adecuado funcionamiento para una frecuencia de 450 MHz, de donde el parámetro S11 se obtiene un valor inferior a -10 y el ROE un valor inferior a 2. De igual manera que con los resultados simulados, se puede aproximar el valor del ancho de banda útil del arreglo, en donde de los resultados prácticos se obtiene que el arreglo tiene un ancho de banda útil de al menos 7 MHz. Por lo tanto, a esta frecuencia, el arreglo pudiese operar según los requerimientos de la mayoría de los sistemas de comunicaciones, en cuanto a estos parámetros se refiere.

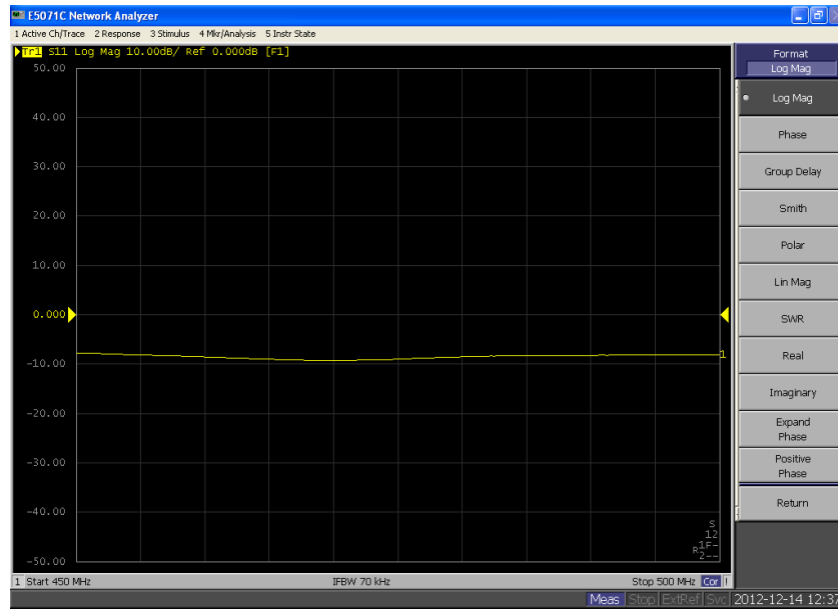


Figura 53. Parámetro S11. Arreglo en configuración horizontal. Alimentación no uniforme.
Fuente: Elaboración Propia.

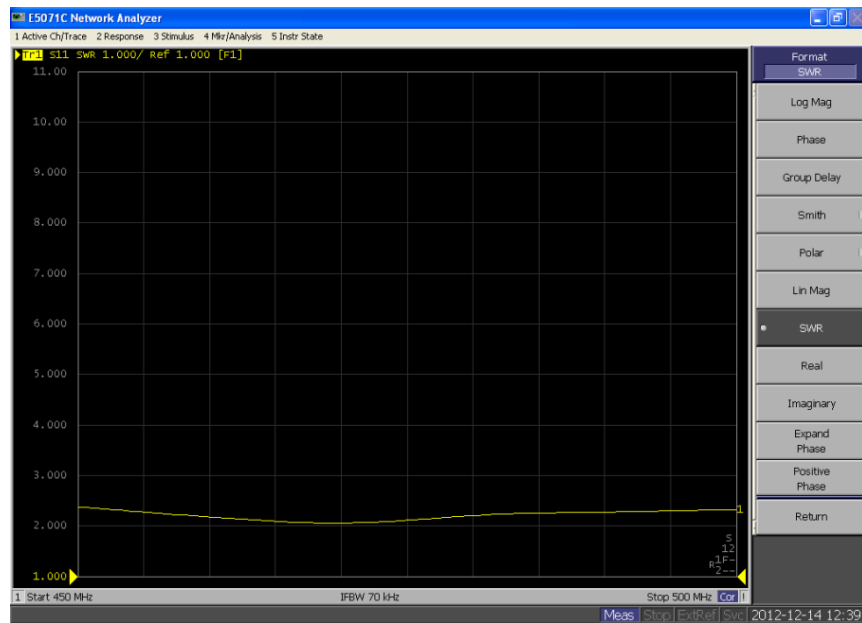


Figura 54. SWR. Arreglo en configuración horizontal. Alimentación no uniforme.
Fuente: Elaboración Propia.

Por otra parte, en las figuras 53 y 54 se muestran los resultados obtenidos para el arreglo igualmente en configuración horizontal pero con la alimentación no uniforme. Es decir, la alimentación de cada uno de los elementos radiantes no es igual para todos y cada uno de

ellos. Para ello, se procede a hacer uso de un splitter adicional de 1 a 2. Por lo tanto, si se enumeran las antenas comenzando por la parte delantera del arreglo, las antenas 1, 3 y 5 tienen el doble de potencia de alimentación que las antenas 2 y 4.

Los resultados obtenidos para este caso no fueron los más deseados, dado que los valores, tanto para el parámetro S11 como para el ROE, no cumplen con los requisitos de la mayoría de los sistemas.

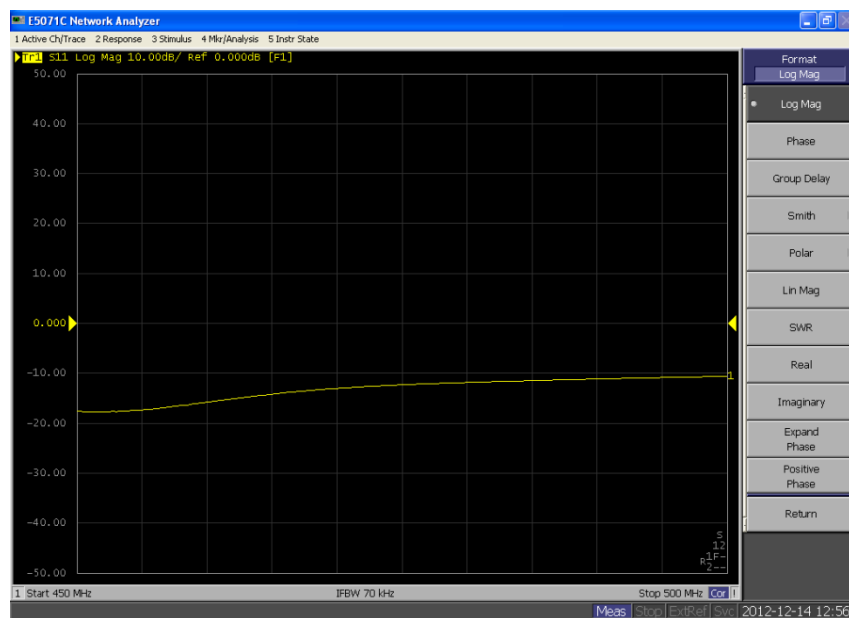


Figura 55. Parámetro S11. Arreglo en configuración vertical. Alimentación uniforme.
Fuente: Elaboración Propia.

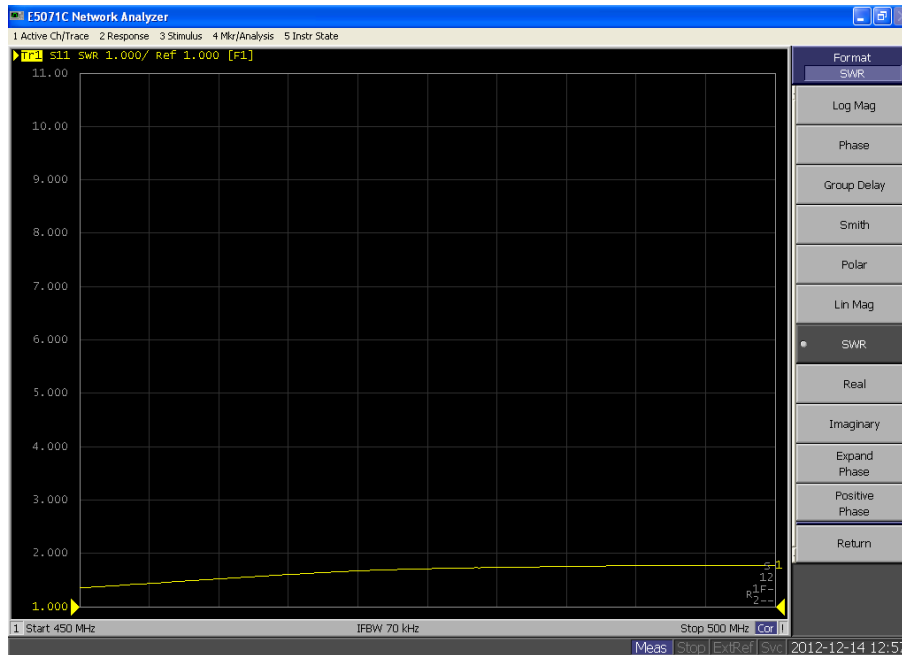


Figura 56. SWR. Arreglo en configuración vertical. Alimentación uniforme.
Fuente: Elaboración Propia.

En las figuras 55 y 56 se pueden apreciar los resultados obtenidos para el arreglo en configuración vertical y con una alimentación uniforme. En el caso del parámetro S11, el valor obtenido está considerablemente por debajo de -10 en casi la totalidad del ancho de banda muestreado. De igual manera, los valores del ROE se encuentran por debajo de 2. Dado que los valores obtenidos son óptimos en todo el ancho de banda muestreado, se puede decir que con esta configuración se mejora de manera considerable el ancho de banda útil haciendo comparación con una sola antena.

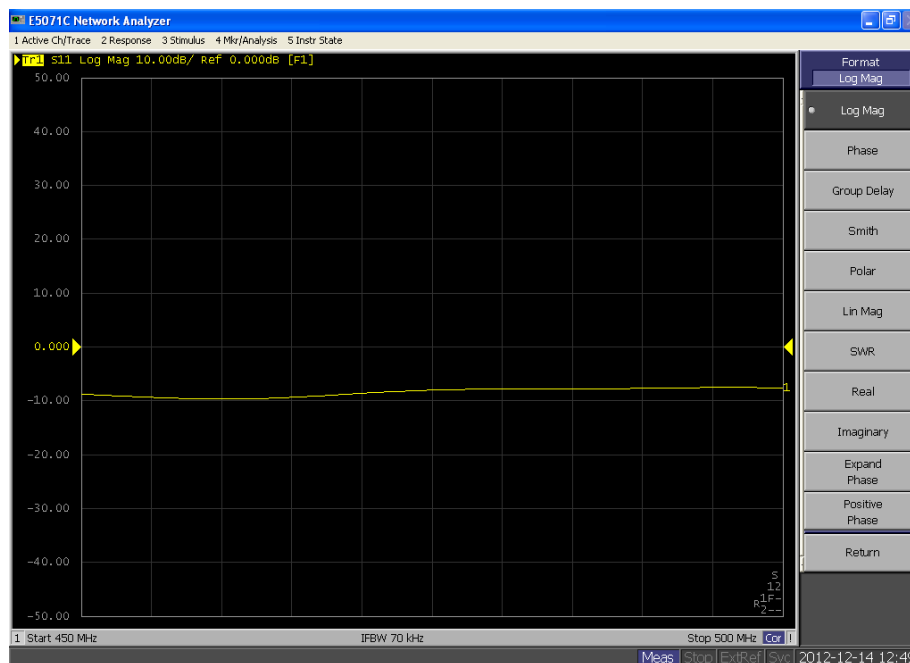


Figura 57. Parámetro S11. Arreglo en configuración vertical. Alimentación no uniforme.
Fuente: Elaboración Propia.

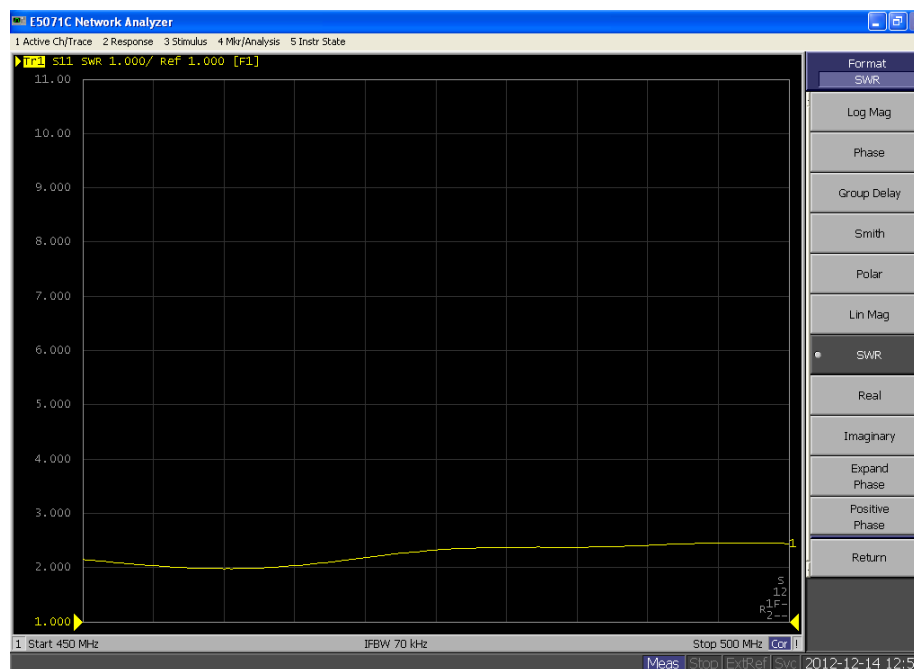


Figura 58. SWR. Arreglo en configuración vertical. Alimentación no uniforme.
Fuente: Elaboración Propia.

Por último, se obtuvieron los valores prácticos del parámetro S_{11} y el ROE para el arreglo en configuración vertical pero con la alimentación no uniforme. Dicha alimentación se realizó de igual manera que con el arreglo en configuración horizontal. En este caso, como se puede apreciar en las figuras 57 y 58, el arreglo no alcanza a cumplir con los valores óptimos deseados.

Finalmente, se puede asegurar que, haciendo uso de los valores prácticos obtenidos, la alimentación no uniforme no permitiría obtener un funcionamiento óptimo del arreglo. Y por otro lado, aplicando la alimentación uniforme, el arreglo en configuración vertical sería el más recomendado a usar.

Hay que destacar que las mediciones fueron realizadas en un ambiente no ideal por no disponer de la cámara anecóica. No obstante, los resultados obtenidos otorgan una valiosa información para conocer el funcionamiento del arreglo.

V.3 Aplicación

Este arreglo de antenas impresas es perfectamente compatible con la salida de RF del modulador DVB-T modelo MO-160/MO-161 y el transmodulador MO-162/MO-163, ambos del fabricante español Promax, dadas las especificaciones de estos productos, en donde se destaca el ancho de banda de transmisión y las potencias radiadas. Estos dispositivos son utilizados en sistemas de distribución de Televisión Digital Terrestre en hospitales, hoteles y cualquier red de cable.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se expresaran las conclusiones a los resultados obtenidos y algunas recomendaciones para futuras investigaciones.

VI.1 Conclusiones

En el presente proyecto se estudió el funcionamiento de las antenas de tipo parche, así como también se diseñó, construyó y se puso a prueba un arreglo de antenas configurables de las cuales se logró obtener una serie de resultados, para dar a conocer las características de este arreglo de antenas.

Con la implementación del arreglo de antena de tipo patch se logró mejorar el funcionamiento básico que presenta el uso de una sola antena de este tipo.

Se logró una mejora en características como el ROE y ancho de banda, que le permitirá a dicho sistema tener un campo más amplio en su funcionamiento.

Este arreglo de antenas puede ser implementado para aplicaciones donde se requiera una baja transmisión de potencia. Por otro lado a pesar de su baja capacidad en cuanto a ancho de banda, puede ser utilizada en sistemas de televisión digital dado que es capaz de transmitir el ancho de banda requerido por los mismos, como se ha mencionado en capítulos anteriores. Como se planteó al inicio del presente proyecto y según los resultados obtenidos a partir del prototipo, éste puede ser implementado para la difusión de señales de televisión digital en pequeñas áreas como clínicas, casas de reposo, etc.

Cabe destacar que dicho arreglo de antenas se logró diseñar, construir e implementar con cierta facilidad y valiéndonos de un presupuesto relativamente bajo, lo cual es un aspecto interesante a la hora de competir con otros sistemas más costosos.

Con este proyecto se puede comprobar el principio de las antenas configurables dado que se obtienen diversas características para una misma antena las cuales varían según la

configuración empleada. Hay que destacar el cumplimiento de todos los objetivos planteados inicialmente en este trabajo de grado.

VI.2 Recomendaciones

Para la realización de este tipo de trabajos, de diseño e implementación, se recomienda informarse bien de los materiales existentes en el mercado y en base a eso realizar el diseño, esto para reducir costos y evitar pérdida de tiempo. También se recomienda como alternativa la compra de los materiales en el exterior y así reducir costos.

Informarse y planificar con tiempo sobre la necesidad de usar espacios e instrumentos especializados para medir parámetros en antenas (como por ejemplo la cámara anecoica), para así poder realizar las mediciones bajo condiciones ideales y obtener resultados más precisos.

Si las mediciones se deciden realizar en un lugar menos adecuado, como el usado para este trabajo, se recomienda realizar repetidas veces las mediciones y en lugares de distintas características para disminuir el error generado.

Se recomienda además, para futuras investigaciones, el desarrollo de arreglos de antenas impresas usando otro tipo de configuraciones con el fin de lograr distintos resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, T. R. (22 de Marzo de 2005). *Google Patents*. Recuperado el 4 de Abril de 2012, de <http://www.google.com/patents?hl=es&lr=&vid=USPAT6870517&id=TncVAAAAEBAJ&oi=fn&dq=antenas+configurables&printsec=abstract#v=onepage&q&f=false>
- Aznar, Á. C. (2002). *Antenas*. Barcelona: UPC.
- Boix, R. R. (s.f.). *Antenas*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2012, de <http://personal.us.es/boix/uploads/pdf/master%20microelectronica/5-antenas.pdf>
- Br. Cafiero, S. E. (2012). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ANTENAS ELÉCTRICAMENTE PEQUEÑAS EN LA BANDA VHF*. Caracas: Febrero.
- Chambi Pacco, P. J. (8 de Agosto de 2011). *www.slideshare.net*. Recuperado el 24 de Abril de 2012, de <http://www.slideshare.net/lonely113/diseo-de-antena-microstrip>
- Freescale Semiconductor. (2006). *Freescale*. Retrieved 06 27, 2011, from http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/app_note/AN2731.pdf
- Gete, O., & Roldán, A. (Diciembre de 2008). Recuperado el 22 de Junio de 2012, de http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.166711/pfc_OscarGete.pdf
- González Ugarte, R. J., & Navarro Osuna, K. (Septiembre de 2011). Diseño y construcción de arreglos de antenas configurables. Caracas.
- Jiménez Martín, J. L., Rodríguez Martín, J. M., & González Posadas, V. (26 de Noviembre de 2011). *www.polired.upm.es*. Recuperado el 05 de Mayo de 2012, de <http://polired.upm.es/index.php/iac/article/viewFile/1762/1774>
- M. A. Madi, M. A.-H.-H. (2012). *www.ebscohost.com*. Recuperado el 24 de Abril de 2012, de <http://web.ebscohost.com/ehost/detail?sid=55a5431b-6031-481d-8ac5-76d72c17d945%40sessionmgr110&vid=1&hid=110&bdata=Jmxhbm9ZMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#db=asf&AN=70450768>
- Ruiz, J. A., & Masa, J. L. (2008). *www.eps.uam.es/~acaf*. Recuperado el 16 de Junio de 2012, de *Antenas y Circuitos de Alta Frecuencia. Segunda Parte, Tema III:* http://antxta.ii.uam.es/~acaf/Documentacion/TemaIII_antenas_impresas.pdf
- Vielma, M. (Abril de 2005). Recuperado el 5 de Septiembre de 2012, de <http://es.scribd.com/doc/96180464/introduccion-antenas>

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de valores de VSWR o ROE y pérdidas por retorno.

THE EFFECT OF VSWR ON TRANSMITTED POWER													
VSWR	VSWR (dB)	RETURN LOSS (dB)	TRANS. LOSS (dB)	VOLT. REFL. COEFF.	POWER TRANS. (%)	POWER REFL. (%)	VSWR	VSWR (dB)	RETURN LOSS (dB)	TRANS. LOSS (dB)	VOLT. REFL. COEFF.	POWER TRANS. (%)	POWER REFL. (%)
1.00	.0	∞	.000	.00	100.0	.0	1.64	4.3	12.3	.263	.24	94.1	5.9
1.01	.1	46.1	.000	.00	100.0	.0	1.66	4.4	12.1	.276	.25	93.8	6.2
1.02	.2	40.1	.000	.01	100.0	.0	1.68	4.5	11.9	.289	.25	93.6	6.4
1.03	.3	36.6	.001	.01	100.0	.0							
1.04	.3	34.2	.002	.02	100.0	.0	1.70	4.6	11.7	.302	.26	93.3	6.7
							1.72	4.7	11.5	.315	.26	93.0	7.0
1.05	.4	32.3	.003	.02	99.9	.1	1.74	4.8	11.4	.329	.27	92.7	7.3
1.06	.5	30.7	.004	.03	99.9	.1	1.76	4.9	11.2	.342	.28	92.4	7.0
1.07	.6	29.4	.005	.03	99.9	.1	1.78	5.0	11.0	.356	.28	92.1	7.9
1.08	.7	28.3	.006	.04	99.9	.1							
1.09	.7	27.3	.008	.04	99.8	.2	1.80	5.1	10.9	.370	.29	91.8	8.2
							1.82	5.2	10.7	.384	.29	91.5	8.5
1.10	.8	26.4	.010	.05	99.8	.2	1.84	5.3	10.6	.398	.30	91.3	8.7
1.11	.9	25.7	.012	.05	99.7	.3	1.86	5.4	10.4	.412	.30	91.0	9.0
1.12	1.0	24.9	.014	.06	99.7	.3	1.88	5.5	10.3	.426	.31	90.7	9.3
1.13	1.1	24.3	.016	.06	99.6	.4							
1.14	1.1	23.7	.019	.07	99.6	.4	1.90	5.6	10.2	.440	.31	90.4	9.6
							1.92	5.7	10.0	.454	.32	90.1	9.9
1.15	1.2	23.1	.021	.07	99.5	.5	1.94	5.8	9.9	.468	.32	89.8	10.2
1.16	1.3	22.6	.024	.07	99.5	.5	1.96	5.8	9.8	.483	.32	89.5	10.5
1.17	1.4	22.1	.027	.08	99.4	.6	1.98	5.9	9.7	.497	.33	89.2	10.8
1.18	1.4	21.7	.030	.08	99.3	.7							
1.19	1.5	21.2	.033	.09	99.2	.8	2.00	6.0	9.5	.512	.33	88.9	11.1
							2.50	8.0	7.4	.881	.43	81.6	18.4
1.20	1.6	20.8	.036	.09	99.2	.8	3.00	9.5	6.0	1.249	.50	75.0	25.0
1.21	1.7	20.4	.039	.10	99.1	.9	3.50	10.9	5.1	1.603	.56	69.1	30.9
1.22	1.7	20.1	.043	.10	99.0	1.0	4.00	12.0	4.4	1.938	.60	64.0	36.0
1.23	1.8	19.7	.046	.10	98.9	1.1							
1.24	1.9	19.4	.050	.11	98.9	1.1	4.50	13.1	3.9	2.255	.64	59.5	40.5
							5.00	14.0	3.5	2.553	.67	55.6	44.4
1.25	1.9	19.1	.054	.11	98.8	1.2	5.50	14.8	3.2	2.834	.69	52.1	47.9
1.26	2.0	18.8	.058	.12	98.7	1.3	6.00	15.6	2.9	3.100	.71	49.0	51.0
1.27	2.1	18.5	.062	.12	98.6	1.4	6.50	16.3	2.7	3.351	.73	46.2	53.8
1.28	2.1	18.2	.066	.12	98.5	1.5							
1.29	2.2	17.9	.070	.13	98.4	1.6	7.00	16.9	2.5	3.590	.75	43.7	56.2
							7.50	17.5	2.3	3.817	.76	41.5	58.5
1.30	2.3	17.7	.075	.13	98.3	1.7	8.00	18.1	2.2	4.033	.78	39.5	60.5
1.32	2.4	17.2	.083	.14	98.1	1.9	8.50	18.6	2.1	4.240	.79	37.7	62.3
1.34	2.5	16.8	.093	.15	97.9	2.1	9.00	19.1	1.9	4.437	.80	36.0	64.0
1.36	2.7	16.3	.102	.15	97.7	2.3							
1.38	2.8	15.9	.112	.16	97.5	2.5	9.50	19.6	1.8	4.626	.81	34.5	65.5
							10.00	20.0	1.7	4.807	.82	33.1	66.9
1.40	2.9	15.6	.122	.17	97.2	2.8	11.00	20.8	1.6	5.149	.83	30.6	69.4
1.42	3.0	15.2	.133	.17	97.0	3.0	12.00	21.6	1.5	5.466	.85	28.4	71.6
1.44	3.2	14.9	.144	.18	96.7	3.3	13.00	22.3	1.3	5.762	.86	26.5	73.5
1.46	3.3	14.6	.155	.19	96.5	3.5							
1.48	3.4	14.3	.166	.19	96.3	3.7	14.00	22.9	1.2	6.040	.87	24.9	75.1
							15.00	23.5	1.2	6.301	.88	23.4	76.6
1.50	3.5	14.0	.177	.20	96.0	4.0	16.00	24.1	1.1	6.547	.88	22.1	77.9
1.52	3.6	13.7	.189	.21	95.7	4.3	17.00	24.6	1.0	6.780	.89	21.0	79.0
1.54	3.8	13.4	.201	.21	95.5	4.5	18.00	25.1	1.0	7.002	.89	19.9	80.1
1.56	3.9	13.2	.213	.22	95.2	4.8							
1.58	4.0	13.0	.225	.22	94.9	5.1	19.00	25.6	.9	7.212	.90	19.0	81.0
							20.00	26.0	.9	7.413	.90	18.1	81.9
1.60	4.1	12.7	.238	.23	94.7	5.3	25.00	28.0	.7	8.299	.92	14.8	85.2
1.62	4.2	12.5	.250	.24	94.4	5.6	30.00	29.5	.6	9.035	.94	12.5	87.5

Fuente: <http://www.minicircuits.com/app/AN40-013.pdf>

Anexo 2. Hoja de especificaciones de modulador MO-160/MO-161



MODULADOR DVB-T

MO-160 / MO-161



- Entradas TS en formato ASI y SPI
- Alta resolución en frecuencia (pasos de 1 Hz)
- Salidas COFDM (2k y 8k)
- MER superior a 35 dB
- Cobertura: 475 - 875 MHz **MO-160**
45 - 875 MHz **MO-161**
- Anchos de banda para canales de 6, 7 y 8 MHz

Descripción general del modulador DVB-T MO-160 / 161

El **MO-160 / MO-161** es un modulador DVB-T de propósito general sobre chasis para montaje en rack 19" 1U. Dispone de una entrada ASI serie y una entrada SPI.

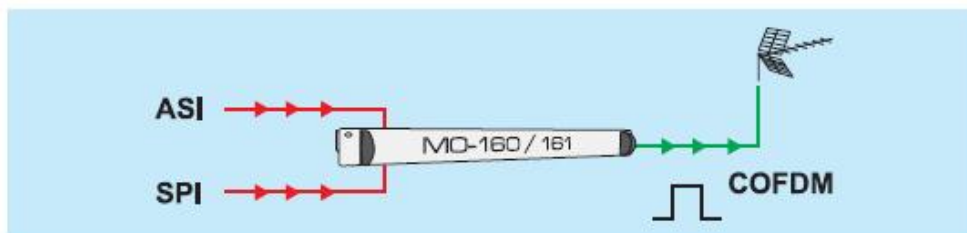
Cualquiera de las dos entradas puede utilizarse para modular la señal COFDM tanto en modo de portadoras 2k como 8k. La cobertura es de 475 MHz a 875 MHz para el **MO-160** y 45 MHz a 875 MHz para el **MO-161** seleccionable en pasos de 1 Hz. La señal de salida puede ajustarse en pasos de 1 dB con un MER superior a 35 dB en todos los canales.

El **MO-160 / MO-161** es ideal para su utilización en cualquier aplicación de distribución de Televisión Digital Terrestre para ser integrado como módulo dentro del sistema de transmisión. Puede utilizarse en sistemas de remultiplexado para distribución de señales en hoteles, hospitales y en general cualquier red de cable. También puede utilizarse como módulo de generación de la señal en aplicaciones sin hilos donde se utilice la tecnología COFDM.

El **MO-160 / MO-161** es capaz de trabajar con cualquier 'bit rate' entrante siempre que sea estrictamente inferior al valor especificado por el estándar DVB-T para los parámetros de la modulación en uso. El 'bit rate' de la entrada TS es adaptado de forma automática a la tasa útil requerida por la señal DVB-T. Esto se consigue mediante el relleno del TS con paquetes NULL.

El modulador puede ser configurado para generar cualquiera de los modos de transmisión descritos por el estándar DVB-T. El ancho de banda del canal puede ser seleccionado por el usuario en 6, 7 u 8 MHz según requiera la aplicación.

El control del funcionamiento del **MO-160 / MO-161** se realiza a través de la pantalla LCD del panel frontal. El modulador puede ser configurado fácilmente mediante un conjunto intuitivo de menús.





MODULADOR DVB-T

MO-160 / MO-161

Interfaz de control

- Pulsador rotativo de control situado en el panel frontal con teclas de navegación y pantalla LCD
- Dos LEDs que indican la potencia y el estado de sincronización del equipo
- Conector DB9 macho RS232

ESPECIFICACIONES	MO-160 / 161
ENTRADAS MPEG-2 Transport Stream Modos de operación Maestro Esclavo	2xDVB-ASI, 75 Ω BNC hembra // 1xDVB-SPI, LVDS DB-85 Paquetes TS de longitud 188 ó 204 bytes (detección automática) Soporta modo burst y paquetes continuos mode Tasa binaria del TS de entrada inferior al valor indicado en especificaciones DVB-T Relleno de paquetes para adaptación automática de la tasa binaria Tasa binaria constante en la entrada TS según el estándar DVB-T (sin relleno). Tolerancia $\pm 0,1\%$
SALIDA IF Tipo Margen de frecuencias Polaridad espectral Nivel de potencia (media) Rizado de amplitud en banda Retardo del rizado de amplitud en banda Estabilidad de frecuencia Características espectrales fuera de la banda ¹ @ $\pm 3,805$ MHz @ $\pm 4,25$ MHz @ $\pm 5,25$ MHz Desequilibrio amplitud IQ Error de cuadratura IQ Supresión de la portadora central Armónicos y espúreos MER ²	50 Ω conector tipo BNC hembra Variable (32 a 36) MHz en pasos de 1 Hz. Fijo en 36 MHz con salida RF desconectada Seleccionable mediante los controles del panel frontal 0 dBm (107 dB μ V) fja < 0,2 dB < 10 ns 20 ppm 0 dBc -46 dBc (2k), -56 dBc (8k) -56 dBc < 0,02% < 0,02° < -55 dBc < -60 dBc > 43 dB
SALIDA RF Tipo Margen de frecuencias Polaridad del espectro Nivel de potencia (medio) Nivel de armónicos y espúreos Estabilidad de frecuencia MER Fase ruido SSB	50 Ω conector hembra tipo N Ajustable de 475 a 875 MHz en pasos de 1 Hz (45-875 MHz para MO-161) Seleccionable mediante los controles del panel frontal -27 a -87 dBm en pasos de 1 dB (opcional hasta +6 dBm) < -50 dBc 20 ppm > 36 dB ≤ -87 dBc/Hz @ 2 kHz
PARÁMETROS DVB-T Tamaño IFFT Intervalo de Guarda Code rates Interleaving de Símbolo Constelaciones Modos de jerarquía Operación MFN Señal TPS Ancho de banda de canal	2k, 8k 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8 Nativo QPSK, 16QAM, 64QAM Constelaciones 16QAM y 64QAM con $\alpha = 1, 2$ or 4 Disponible Cell ID 6, 7 and 8 MHz (seleccionable por el usuario)
SELECCIÓN DE PRORAMA	Selección de servicio sin reconstrucción de tablas (Filtrado PID)
CONTROL REMOTO	Interfaz RS-232C (conector DB-9 macho)
OPCIONES OP-1xx-P	Salida +6 dBm
ALIMENTACIÓN Tensión Consumo	90 - 250 V AC (50 - 60 Hz) 20 W

- ¹ Frecuencias relativas a la frecuencia central para un canal de 8 MHz. Niveles de pico medidos utilizando un ancho de banda de 10 kHz y referidos a las portadoras situadas cualquier parte del espectro. Los valores mostrados suponen el peor caso y corresponden a intervalos guarda de 1/32.
- ² Valor medido en modo maestro. En modo esclavo, el MER es mayor de 38 dB para canales de 8 MHz, y alrededor de 35 dB para canales de 7 y 6 MHz.



PROMAX ELECTRONICA, S.A.

Francisco Moragas, 71 * 08907 L'HOSPITALET * SPAIN

Tel: (+34) 93 260 20 02 * Fax: (+34) 93 338 11 26 * promax@promax.es * www.promax.es

Fuente: <http://www.promax.es/downloads/products/esp/MO-160.pdf>

Anexo 3. Hoja de especificaciones de transmodulador MO-162/MO-163



TRANSMODULADOR QPSK

MO-162 / MO-163



El **MO-162** y **MO-163** es un transmodulador directo de señal **QPSK** a **COFDM**.

El **MO-162 / MO-163** es un transmodulador de **QPSK** a **COFDM**, que realiza la conversión de un transpondedor de satélite en un canal de Televisión Digital Terrestre.

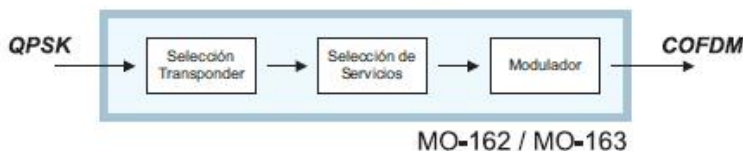
Para ello, el equipo permite **seleccionar** el transpondedor de satélite a la entrada y el canal de salida para el multiplex resultante. Lógicamente, debe tenerse en cuenta que la capacidad de transporte de un multiplex TDT es inferior a la de un transpondedor de satélite, por lo cual puede que todos los servicios de un transpondedor no puedan trasladarse a un solo multiplex. Por ello el equipo permite la selección del número de servicios a realojar.

El equipo viene construido sobre chasis para montaje en rack 19" 1U. Dispone de una entrada de FI de satélite de 950 a 2150 MHz del tipo F.

La cobertura es de 475 MHz a 875 MHz para el **MO-162** y 45 MHz a 875 MHz para el **MO-163** seleccionable en pasos de 1 Hz. La señal de salida puede ajustarse en pasos de 1 dB con un MER superior a 35 dB en todos los canales. La modulación **COFDM** tanto en modo de portadoras 2k como 8k.

El **MO-162 / MO-163** es ideal para su utilización en sistemas de distribución de Televisión Digital Terrestre en hoteles, hospitales y en general en cualquier red de cable.

El control del funcionamiento del **MO-162 / MO-163** se realiza a través de la pantalla LCD del panel frontal. El modulador puede ser configurado fácilmente mediante un conjunto intuitivo de menús.

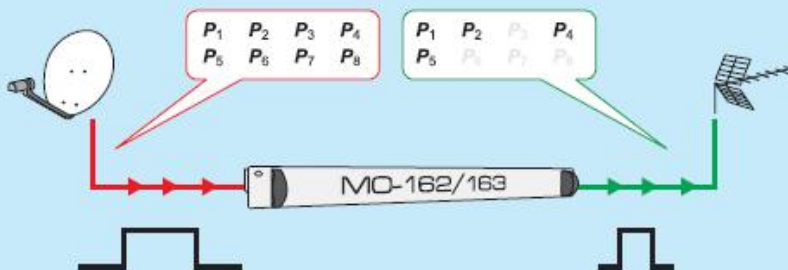


En el caso del ejemplo que sigue, se puede utilizar un **MO-162 / MO-163** para seleccionar hasta cuatro servicios de un **transponder QPSK** y empaquetarlos en un **multiplex COFDM**.

El **MO-162 / MO-163** permite la **selección de cualquiera de los transponders** presentes a la entrada.

El siguiente paso es **seleccionar los servicios** que deseamos insertar en el multiplex resultante.

Finalmente, **seleccionamos el canal** de salida de este multiplex resultante.





TRANSMODULADOR QPSK

MO-162 / MO-163

Interfaz de control

- Pulsador rotativo de control situado en el panel frontal con teclas de navegación y pantalla LCD
- Dos LEDs que indican la potencia y el estado de sincronización del equipo
- Conector ethernet

ESPECIFICACIONES	MO-162 / 163
ENTRADAS QPSK MPEG-2 Transport Stream Modos de operación Maestro Esclavo	Conector F hembra, 950-2150 MHz (de -65 a -25 dBm) Dos entradas DVB-ASI, 75 Ω BNC hembra Paquetes TS de longitud 188 ó 204 bytes (detección automática) Soporte para modo de paquetes de disparo y continuo. Tasa binaria del TS de entrada inferior al valor indicado en especificaciones DVB-T. Relleno de paquetes por adaptación de tasa binaria y reestampado del PCR automáticos. Tasa binaria constante en la entrada TS según el valor dado en el documento DVB-T (sin relleno). Tolerancia $\pm 0.1\%$
SALIDA IF Tipo Margen de frecuencias Polaridad espectral Nivel de potencia (media) Rizado de amplitud en la banda Retardo del rizado de amplitud en la banda Estabilidad frecuencial Características espectrales fuera de la banda ¹ @ ± 3.805 MHz @ ± 4.25 MHz @ ± 5.25 MHz Desequilibrio amplitud IQ Error de cuadratura IQ Supresión de la portadora central Armónicos y espurios MER ²	Conector hembra BNC 50 Ω Ajustable de 32 a 36 MHz en pasos de 1 Hz Fijada a 36 MHz cuando la salida RF está desconectada Seleccionable mediante los controles del panel frontal 0 dBm (107 dBmV) fija < 0.2 dB < 10 ns 20 ppm 0 dBc -46 dBc (2k), -56 dBc (8k) < 0.02% < 0.02° < -55 dBc < -60 dBc > 43 dB
SALIDA RF Tipo Escala de frecuencias Polaridad del espectro Nivel de potencia (medio) Nivel de armónicos y espurios Estabilidad de frecuencia MER Fase Ruido SSB:	Conector hembra tipo N 50 Ω Ajustable entre 475 y 875 MHz en pasos de 1 Hz (45-875 MHz para MO-163) Seleccionable mediante los controles del panel frontal -87 a -27 dBm en pasos de 1 dB (opción hasta +6 dBm) < -50 dBc 20 ppm > 36 dB ≤ -87 dBc/Hz @ 2 kHz
PARÁMETROS DVB-T Tamaño IFFT Intervalos de Guarda Code rate Interleaving de símbolo Constelaciones Modos de jerarquía Operación MPFN Señal TPS Ancho de banda del canal	2k, 8k 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8 Nativo QPSK, 16QAM, 64QAM Constelaciones 16QAM y 64QAM con $\alpha = 1, 2$ ó 4 Disponible Cell ID 6, 7 y 8 MHz (seleccionable por el usuario)
SELECCIÓN DE PRORAMAS	Selección de servicios sin reconstrucción de tablas (Filtrado PID)
CONTROL REMOTO	Fast Ethernet (conector RJ-45)
INTERFAZ ETHERNET RJ-45	
OPCIONES OP-1xx-S OP-1xx-P	Protocolo SNMP Salida +6 dBm
ALIMENTACIÓN Tensión Consumo	90 - 250 V AC (50 - 60 Hz) 20 W

¹ Frecuencias relativas a la frecuencia central para un canal de 8 MHz. Niveles medios medidos utilizando un ancho de banda de 10 kHz y referidos a las portadoras situadas cualquier parte del espectro.

² Valor medido para canales de 8 MHz. Para canales de 7 y 6 MHz el MER presenta un valor aproximado de 36,5 y 36 dB.

PROMAX ELECTRONICA, S.A.

Francisc Moragas, 71 * 08907 L'HOSPITALET * SPAIN

Tel: (+34) 93 260 20 00 * Fax: (+34) 93 338 11 26 * promax@promax.es * www.promax.es

Fuente: <http://www.promax.es/esp/products/fichaprod.php?product=MO-163&IDfamilia=13>

Anexo 4. Transformador de impedancias utilizado.



Fuente: http://www.ebay.com/itm/100-Viewsonics-Model-VSIT-50-75-5-1000MHz-Impedance-Transformer-/290790622056?pt=US_Audio_Cables_Adapters&hash=item43b478c368

Anexo 5. Tabla de costos de producción del prototipo.

Elemento	Costo (BsF)
Lámina para circuitos impresos 1.2 m x 1 m doble cara FR2	395
Percloruro Férrico 250 ml	80
Trípode para cornetas amplificadoras	350
Tubos de PVC	110
Cableado	80
Conectores	160
Transformadores de impedancia	360
Splitter	80
Bisagras, tornillos, arandelas, tuercas, remaches	90
TOTAL	1705

Fuente: Elaboración Propia

Anexo 6. Fotos de construcción y pruebas del arreglo.



Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia