

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

Colegio de Ciencia y Tecnología

“DISEÑO DE UNA ANTENA MICROSTRIP PARA UNA
FRECUENCIA DE 2.4 GHz Y SU POSIBLE
IMPLEMENTACIÓN CON UN MÓDULO FOTOVOLTAICO”

Tesis

Que para obtener el título de:

Ingeniero en Sistemas Electrónicos y de
Telecomunicaciones

P r e s e n t a :

Noe Granados Bermejo

D i r e c t o r :

Dr. Rogelio Mendoza Pérez

C o d i r e c t o r :

Mtro. en C. Eric Cervantes García

CDMX, diciembre de 2020

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

INTEGRACIÓN DEL JURADO

Presidente: Dr. Daniel Tapia Sánchez

Secretario: Dr. Rogelio Mendoza Pérez

Vocal: Mtro. en C. Eric Cervantes García

Suplente: Dr. Eduardo Ramos Díaz

Suplente: Ing. Ricardo Galindo Reyes

Lugar donde se realizará

A distancia

DIRECTOR DE TESIS

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Rogelio Mendoza Pérez

Mtro. en C. Eric Cervantes García

DEDICATORIA

A MIS QUERIDOS PADRES DOMINGA BERMEJO* Y GABINO GRANADOS,
QUIENES HAN SIDO EL PILAR DE MI FORMACIÓN.

A MIS HERMANOS RIGOBERTO, RICARDO, ANTONIO Y SERGIO, POR EL
APOYO BRINDADO.

* Finada

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM), la cual me dio la oportunidad de cursar la LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE TELECOMUNICACIONES dentro de sus instalaciones y haberme prestado los diferentes laboratorios para mi formación académica.

Agradezco a la convocatoria interna UACM proyectos de investigación del Colegio de Ciencia y Tecnología (CCyT)-2019.

Agradezco al área de Ciencia y Tecnología del Espacio del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE), por la información proporcionada para este trabajo.

A mi director de tesis Dr. Rogelio Mendoza Pérez por haberme guiado y prestado el laboratorio LACyTES, para el desarrollo y conclusión de este proyecto profesional.

A mi codirector de tesis Mtro. en C. Eric Cervantes García por sus consejos en la realización de este proyecto.

A mi tutor Dr. Marcos Antonio Noguez Córdoba por sus consejos en este proyecto personal.

A mis lectores, Dr. Eduardo Ramos Díaz, Dr. Daniel Tapia Sánchez y a Ing. Ricardo Galindo Reyes.

A todos mis profesores que me transmitieron su conocimiento a lo largo de esta etapa, que me fueron formando un mejor estudiante.

A el Instituto Fraunhofer ISE o Institute for Solar Energy Supply Technology (ISET), quien es una institución dedicada a la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, una de ella es la investigación y desarrollo de las antenas microstrip acopladas a un módulo fotovoltaico [1].

Gracias Maxim Integrated por el VCO MAX2750AUA para este proyecto.

LOS TRABAJOS DE LA VIDA

¡Trabajos peso dulce don preciso,
al que con humildad os sufre y lleva;
toque de la virtud; ilustre prueba
del corazón constante y generoso!

¡Saludable licor, néctar sabroso
que las fuerzas del ánimo renueva;
breve y seguro atajo; senda nueva
para llegar al reino del reposo!

¡Dichoso el que os abraza y se sustenta
del fruto del honor y la gloria
que entre vuestras espinas nace y crece!

Más ¡Hay de aquel que, en ocio y vida exenta,
dejando al mundo infamen su memoria,
sin beber de este cáliz envejecer!

ANTONIO DE MALUENDA (SIGLO XVI)

Resumen

En este trabajo se diseñó y se simuló una antena microstrip para hacer resonar a una frecuencia de 2.4 GHz y su posible acoplamiento con un módulo fotovoltaico, para ser usado en proyectos futuros en la red de Wi-Fi, conexiones Bluetooth, WiMAX, RF, entre algunas otras aplicaciones.

La antena microstrip es considerado un material dieléctrico Rogers Rt/duroid 5880 (tm) y un cable coaxial PECX006, con el propósito de lograr una mayor ganancia.

Mediante el software Matlab 15a se realizaron los cálculos de la antena microstrip, con el software HFSS 13.0 (High Frequency Structure Simulation) la simulación; además, analizamos las características eléctricas, magnéticas, la frecuencia de resonancia entre otras; y obtuvimos parámetros óptimos para el diseño de la antena: parche con dimensiones 49.41 X 42.09 mm”, sustrato de dimensiones 50.17 X 42.43 X 0.127 mm, y tierra con dimensiones de 50.17 X 42.43, punto alimentación en (0.0 mm, 14.22 mm); obteniendo una frecuencia de 2.4 GHz, una sensibilidad de -23.18 dB y un ancho de banda de 38 MHz.

Se realizó la Tarjeta de Circuito Impreso (PCB, donde se montaron los componentes electrónicos, eléctricos y la conexión entre ellos como: capacitores 220 pF, 0.1 y 0.22 μ F, potenciómetro de 10 k Ω , regulador de voltaje 7805), recomendamos que para poder implementar una antena microstrip acoplada a una un módulo fotovoltaico a una frecuencia de 2.4 GHz, es necesario tener un cuarto limpio para hacer la antena microstrip y tener los instrumentos de medición para hacer el análisis del funcionamiento de la antena.

Índice de Contenido

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
LOS TRABAJOS DE LA VIDA	III
Resumen	IV
Índice de contenido	V
Índice de capítulos	VI
Índice de tablas	VII
Índice de figuras	VIII
Ecuaciones	XI
Símbolos y Acrónimos	XIII
Objetivo general	XVI
Objetivo específico	XVI

Índice de capítulos una página

Capítulo 1: Introducción.	1
1.1 Antecedentes.	2
1.2 Justificación.	3
1.3 Principios básicos de las antenas.	4
1.4 Tipos de antenas.	5
1.5 Espectro electromagnético.	7
1.6 Ondas electromagnéticas transversales.	10
1.7 Parámetros de la antena.	10
Capítulo 2. Marco teórico.	22
2.1 Introducción.	22
2.2 Método de análisis.	22
2.3 Característica de una antena microstrip.	23
2.4 Diseño de una antena microstrip rectangular.	30
2.5 Manual HFSS.	33
Capítulo 3. Desarrollo experimental.	36
3.1 Diseño de la antena microstrip.	36
3.2 Primer intento.	38
3.3 Programa de la antena microstrip en Matlab.	40
3.4 Diseño de la antena microstrip 2.4 GHz en HFSS.	45
3.5 Simulación de la antena microstrip de 2.4 GHz.	49
3.6 Diseño del VCO MAX2750AUA 2.4 GHz.	56
3.7 Módulo fotovoltaico.	60
3.6 Trabajo alternativo.	61
Capítulo 4. Conclusiones y trabajos a futuro.	70
Bibliografía.	73

Índice de tablas

Tabla 1. Tabla de frecuencias.	7
Tabla 2. Características del dieléctrico.	26
Tabla 3. Características del cable coaxial.	38
Tabla 4. Dimensiones de la antena microstrip 2.4 GHz.	45
Tabla 5. Modificación de la antena microstrip 2.4 GHz.	51
Tabla 6. Frecuencia y atenuación de la antena microstrip 2.4 GHz.	52
Tabla 7. Puntos de impedancia.	55
Tabla 8. Características del MAX2750AUA.	57
Tabla 9. Análisis en CD, AC y Valor máximo.	58
Tabla 10. Parámetros del módulo fotovoltaico.	60
Tabla 11. Frecuencia del 30 de noviembre del 2018.	66
Tabla 12. Frecuencia del 3 de diciembre del 2018.	67
Tabla 13. Frecuencia del 17 de diciembre del 2018.	69

Índice de figuras

Figura 1. Tipos de onda.	4
Figura 2. Diagrama a bloques sistema de radiocomunicaciones.	4
Figura 3. Forma de la onda.	8
Figura 4. Espectro electromagnético.	9
Figura 5. a) Campo E y M, b) corte transversal E y M de un par de cables paralelos y una línea Coaxial.	10
Figura 6. Línea de transmisión de una antena.	11
Figura 7. Patrón de radiación en dos dimensiones.	12
Figura 8. Patrón de radiación en tridimensional.	12
Figura 9. Región de campo.	16
Figura 10. Polarización de una antena.	19
Figura 11. Red de dos puertos.	20
Figura 12. Antena microstrip.	24
Figura 13. Tipos de antena microstrip.	24
Figura 14. Tipos de alimentación de antena microstrip.	27
Figura 15. Circuitos equivalentes de alimentación.	28
Figura 16. Antena microstrip, a) vista superior, b) vista de lado.	28
Figura 17. Efecto del borde.	29
Figura 18. Modelo de línea de transmisión de una antena.	29
Figura 19. Icono del programa HFSS 13.0.	33
Figura 20. Interfaz HFSS 13.0.	33
Figura 21. Crear un nuevo diseño de trabajo en HFSS.	35
Figura 22. Nuevo diseño trabajo en HFSS.	35
Figura 23. Características de Rogers RT/duroid 5880 (tm).	37
Figura 24. Características del cable coaxial PECX006.	37
Figura 25. Partes del cable coaxial.	38
Figura 26. Rogers RT/duroid 5880 (tm), altura 0.127 mm, frecuencia 2.39 GHz, atenuación -7.33 dB.	39
Figura 27. TM, altura 3.81 mm, frecuencia 2.27 GHz, atenuación -1.049 dB.	39
Figura 28. Rogers RT/duroid 5880 (tm), altura de 0.254 mm, frecuencia 2.49 GHz, atenuación -5.91 dB.	39

Figura 29. Característica de la antena microstrip 2.4 GHz.	40
Figura 30. a) Dimensiones del sustrato. y b) Propiedades del sustrato.	46
Figura 31. a) Dimensiones del parche. y b) Propiedades del parche.	46
Figura 32. a) Dimensiones de la tierra. y b) Propiedades de la tierra.	47
Figura 33. Dimensiones de la alimentación.	47
Figura 34. a) Dimensiones del vivo. y b) Propiedades del vivo.	48
Figura 35. Dimensiones del vivo1. y b) Propiedades del vivo1.	48
Figura 36. Dimensiones de la terminal.	49
Figura 37. a) Dimensiones del radiador. y b) Propiedades del radiador.	49
Figura 38. Antena microstrip.	50
Figura 39. Frecuencia de resonancia 2.35 GHz.	50
Figura 40. Modificación de las dimensiones del parche.	51
Figura 41. Frecuencia de resonancia 2.4 GHz.	51
Figura 42. a) Campo eléctrico y b) Vector del campo eléctrico.	52
Figura 43. a) Campo magnético y b) Vector del campo magnético.	53
Figura 44. Patrón de radiación eléctrico y b) Patrón de radiación magnético.	53
Figura 45. Patrón de radiación en 3D.	54
Figura 46. Carta de Smith.	55
Figura 47. CI MAX2750AUA.	56
Figura 48. Circuito VCO.	56
Figura 49. Divisor de voltaje.	57
Figura 50. Circuito VCO I.	58
Figura 51. PCB MAX2750AUA.	59
Figura 52. PCB del circuito VCO.	59
Figura 53. Curva de corriente vs. voltaje.	60
Figura 54. Radiación electromagnética y Generador de corriente DC.	61
Figura 55. Prototipo SOLPLANT.	61
Figura 56. a) Antena GSM. y b) Patrón de radiación.	62
Figura 57. Medición de carga y descarga de la batería.	62
Figura 58. Patrón de radiación Antena GPS.	63
Figura 59. Antena GPS.	63
Figura 60. Receptor satelital.	64
Figura 61. Circuito equivalente de la antena solar.	64

Figura 62. Descripción del circuito equivalente de la Antena Solar.	65
Figura 63. Prototipo de la Antena Solar.	65
Figura 64. Frecuencia del 30 de noviembre del 2018.	66
Figura 65. Frecuencia del 3 de diciembre del 2018.	67
Figura 66. Amplificador Operacional.	68
Figura 67. Antena Solar acoplamiento con el Opam.	68
Figura 68. Frecuencia del 17 de diciembre del 2018.	69
Figura 69. Módulo fotovoltaico acoplado con una antena microstrip.	72
Figura 70. Módulo fotovoltaico acoplado con el VCO.	72

Índice de ecuaciones.

Ecuación 1. Longitud de onda.	7
Ecuación 2. Impedancia.	11
Ecuación 3. Impedancia compleja.	11
Ecuación 4. Ancho de banda.	13
Ecuación 5. Directividad.	14
Ecuación 6. Ganancia directiva.	14
Ecuación 7. Ganancia.	14
Ecuación 8. Eficiencia ideal.	15
Ecuación 9. Eficiencia con pérdidas.	15
Ecuación 10. Eficiencia.	15
Ecuación 11. Eficiencia total.	15
Ecuación 12. Vector Poyting.	17
Ecuación 13. Potencia total.	17
Ecuación 14. Densidad de potencia promedio.	17
Ecuación 15. Potencia radiada promedio.	18
Ecuación 16. EIRP (w).	18
Ecuación 17. Potencia capturada.	18
Ecuación 18. Potencia capturada 1.	18
Ecuación 19. Coeficiente de reflexión de puerto de entrada S_{11} .	21
Ecuación 20. Coeficiente de transmisión directa S_{12} .	21
Ecuación 21. Coeficiente transmisión directa S_{21} .	21
Ecuación 22. Coeficiente de reflexión del punto de salida S_{22} .	21
Ecuación 23. Constante dieléctrica.	26
Ecuación 24. Tangente de pérdida.	26
Ecuación 25. Coeficiente de reflexión de Voltaje.	27
Ecuación 26. Relación de onda estacionaria de voltaje.	27
Ecuación 27. Ancho del parche.	30
Ecuación 28. Permitividad efectiva.	31
Ecuación 29. Variación dl.	31
Ecuación 30. Longitud de la antena.	31
Ecuación 31. Longitud efectiva de la antena.	31

Ecuación 32. Cálculo del ancho del sustrato y tierra.	32
Ecuación 33. Cálculo del largo del sustrato y tierra.	32
Ecuación 34. Posición en el eje X.	32
Ecuación 35. Posición en el eje Y.	32
Ecuación 36. Frecuencia.	65
Ecuación 37. Frecuencia 30.78 kHz.	65
Ecuación 38. Opam ganancia.	68
Ecuación 39. Opam ganancia 101.	68

Símbolos y Acrónimos

λ Longitud de onda [m].

f Frecuencia [Hz].

C Velocidad de la luz 3×10^8 [m/s].

Z_{ent} , Z_{in} Impedancia de entrada [Ω].

E_i Voltaje de entrada de la antena [V].

I_i Corriente de entrada a la antena [Amp].

R_L Resistencia de carga [Ω].

jX_{ent} Resistencia imaginaria.

R_r Resistencia a la radiación [Ω].

B Ancho de banda [Hz].

f_{max} Frecuencia máxima [Hz].

f_{min} Frecuencia mínima [Hz].

f_{op} Frecuencia de operación [Hz].

D Directividad [adimensional].

U Intensidad de radiación [W/ unidad de ángulo sólido].

U_0 Intensidad de radiación de la fuente isotrópica [W/ unidad de ángulo sólido].

P_{rad} Potencia radiada total [W].

\mathcal{D} Ganancia directiva [a dimensional].

\mathcal{P} Densidad de potencia en un punto [W/m²].

\mathcal{P}_{ref} Densidad de potencia en el mismo punto [W/m²].

P_{in} Potencia de entrada total [W].

G Ganancia [adimensional].

η Eficiencia de la antena (caso ideal, sin pérdidas $\eta = 100\%$).

A_p (dB) Ganancia en decibeles [dB].

\mathcal{P}_{ent} Potencia de entrada [W].

\mathcal{P}_d Potencia disipada [W].

G_{rad} Conductancia de radiación.

G_{in} Conductancia de entrada.
 R_{rad} Resistencia de entrada.
 e_0 Eficiencia total [Adimensional].
 e_r Eficiencia de reflexión $(1 - |\Gamma|^2)$.
 e_c Eficiencia dieléctrico.
 e_d Coeficiente de reflexión.
 Z_0 Impedancia de transmisión.
 \mathbf{W} Vector Poynting instantánea [W/m²].
 \mathbf{E} Intensidad del campo eléctrico instantáneo [V/m²].
 \mathbf{H} Intensidad del campo magnético instantáneo [A/m].
 P Potencia total instantánea [W].
 $\hat{\mathbf{n}}$ Vector unitario normal a la superficie.
 da Área infinitesimal de la superficie cerrada [m²].
 $EIRP$ Potencia Isotrópica Efectiva Radiada [W].
 \mathcal{D}_t Ponencia directiva de la antena de transmisión [adimensional].
 A_c Área efectiva de captura [m²].
 A_r Ganancia de la potencia de la antena de recepción [adimensional].
 P_{cap} Potencia de captura [W].
 \mathcal{P} Densidad de captura en [w/m²].
 A_t Ganancia de la potencia de la antena de transmisión [adimensional].
 R Distancia entre las antenas de transmisión y recepción [m].
 ϵ_r Permitividad eléctrica o constante dieléctrica.
 ϵ Permitividad eléctrica del material [F/m].
 ϵ_o Permitividad $8,8541878176 \times 10^{-12}$ [F/m].
 Q Factor de calidad.
 $\tan(\delta)$ Tangente de pérdida.
 Γ Coeficiente de reflexión.
 VSWR Relación de onda estacionaria de voltaje.
 ROE Relación de onda estacionaria.

K_r Permitividad relativa del sustrato.
 W Ancho de la antena [mm].
 f Frecuencia de resonancia [1/s].
 h Espesor del sustrato [mm].
 K_{ref} Permitividad relativa efectiva.
 dl Variación de la antena microstrip.
 L_{ef} efectiva de la antena [mm].
 $W1, W2$ Ancho de la antena [mm].
 $L1, L2$ Largo de la antena [mm].
 X Posición en el plano [mm].
 Y Posición en el plano [mm].
ISE Instituto Fraunhofer.
ISET Institute for Solar Energy Supply Technology.
IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers.
HFSS High Frequency Structure Simulation.
VCO Oscilador Controlados por Voltaje.
RF Radiofrecuencia.
Opam Amplificador Operacional.
EMT Ondas electromagnéticas transversales.
E Campo eléctrico.
H Campo magnético.
PCB Tarjeta de Circuito Impreso.
VSWR Relación de onda estacionaria de voltaje.
SIW Substrate Integrated Waveguide.
ToI Tecnología de la Información.
SOLANPLAN Antena Solar Plana.
GSM Sistema Global para las Comunicaciones Móviles.
DC Corriente Directa.
GPS Sistema de Posición Global.

Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es el diseño y simulación de una antena rectangular microstrip y su posible acoplamiento con un módulo fotovoltaico para obtener una frecuencia de resonancia de 2.4 GHz.

Objetivos específicos

1. Hacer el diseño de una antena microstrip rectangular a una frecuencia de resonancia 2.4 GHz.
2. Calcular los parámetros a considerar en la antena microstrip mediante Matlab.
3. Simulación de una antena microstrip rectangular a una frecuencia de resonancia 2.4 GHz mediante el software HFSS, considerando las características del sustrato Rogers RT/duroid 5880 (tm) y cable coaxial PECX006.
4. Acoplamiento de un módulo fotovoltaico con la antena microstrip.

Capítulo 1. Introducción

En los últimos años, en las telecomunicaciones se ha tenido un incremento de servicios en el área de la comunicación inalámbrica, usando equipos que satisfagan este servicio y una solución es el uso de antenas más pequeñas, haciendo dispositivos más compactos, estos equipos son usados en cualquier sector que se requiera de una comunicación sin cables, las antenas son parte del sistema de transmisión y recepción y está diseñado para radiar o recibir ondas electromagnéticas [6], la antena microstrip tiene características de ser pequeña y confiable, empleada en los sistemas de comunicación como en los aviones, naves espaciales, en la medicina, en lo militar, entre otros usos.

La antena microstrip se empezó a desarrollar en los años 50, pero fue hasta los años 70 [7,10,12], donde se retomaron las diversas investigaciones y desarrollando la antena de microcinta, antena con tecnología de circuitos impresos, también conocida como antena parche, antena microstrip, entre otros nombres; con el paso de los años se hicieron populares por: ser ligeras, compactas y de bajo costo.

El módulo fotovoltaico es usado en la conversión de luz solar en energía eléctrica, en la recepción de la radiación solar en forma de ondas electromagnéticas, en la transmisión y recepción de ondas electromagnéticas [6], en nuestro proyecto se usó como parte de la antena microstrip a 2.4 GHz.

Los sistemas de comunicación inalámbrica requieren energía eléctrica para su funcionamiento y su uso. Las aplicaciones autónomas como sistemas de vigilancia ambiental, comunicación vehicular, drones, boyas de señalización marítima, etc.

Así como los sistemas de satélites necesitan una potencia independiente de la red que es preferentemente fiable por medio de la energía fotovoltaica, una tecnología avanzada que se distingue por su confiabilidad, vida útil y por ser amigable con el medio ambiente. Además de que las antenas son necesarias para recibir o transmitir ondas electromagnéticas. En la actualidad, el módulo fotovoltaico y la antena son dos dispositivos separados y compiten por el espacio disponible en el móvil y en varios de

los sistemas mencionados anteriormente, que por lo general son de tamaño limitado. Además, por separado estos sistemas pueden ser voluminosos y caros, y limitan las capacidades de diseños de productos. Para superar estas restricciones, la propuesta de combinar una antena MICROSTRIP PARA UNA FRECUENCIA DE 2.4 GHz Y SU POSIBLE IMPLEMENTACIÓN CON UN MÓDULO FOTOVOLTAICO en un solo dispositivo; daría como beneficio nuevos diseños de productos, reducción de costos en un solo dispositivo y aprovechamiento del espacio.

La energía eléctrica que generaría el módulo fotovoltaico a través de sus contactos conductores se usará simultáneamente con una antena para la radiación o la recepción de la radiación de ondas electromagnéticas. En este caso se utiliza el contacto posterior del módulo fotovoltaico como elemento radiante en términos de radiofrecuencia (RF). Basado en estas consideraciones, un concepto de desarrollo de productos se originó en el Instituto de Fraunhofer para los Sistemas de Energía Solar (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE - <https://www.ise.fraunhofer.de/en.html>) cuya idea básica ha sido registrada como patente en Alemania, Europa, Japón y EE.UU. [1].

1.1 Antecedentes

Hans Crinstian Oersted [7], demostró la desviación de la aguja de una brújula en la presencia de una corriente eléctrica, este fenómeno es la interacción entre la electricidad y el magnetismo, demostrando la circulación de una corriente para mover instantáneamente una aguja imantada de una brújula, descubriendo la relación entre la electricidad y el magnetismo en un experimento.

André Marie Ampère [7], desarrolló los trabajos de Oersted y Ampere, como resultado descubrió que la corriente eléctrica tiene efectos magnéticos idénticos a los de un imán, efectos entre imanes y el efecto entre alambres que conducen corriente eléctrica.

Michael Faraday [7], profundizó el estudio de un campo magnético induciendo una corriente por un hilo conductor, solo el efecto se observa cuando el campo magnético era variable, desarrollando el generador eléctrico.

Guillermo Marconi [7], realizó la conexión entre dos puntos sin cable submarino dando a lugar la radiocomunicación.

Heinrich Rudolf Hertz [7], demostró la propagación electromagnética, ondas de radio o hertzianas.

Jame Clark Maxwell [7], publicaba "Treatise on Electricity and Magnetism", desarrollo la unificación de las fuerzas eléctricas y magnéticas en una sola teoría del electromagnetismo, en 1864 presentó su trabajo en Royal Society la unificación de las fuerzas eléctricas y magnéticas en una sola teoría del electromagnetismo, también predijo que la luz se explica por el electromagnetismo y que las perturbaciones de las ondas de luz y electromagnéticas viajan a la misma velocidad.

1.2 Justificación

Las antenas en las telecomunicaciones son una parte importante del sistema de comunicación inalámbrica, siendo el elemento que nos permite recibir y transmitir ondas electromagnéticas del espacio libre como en la telefonía y televisión satelital, en localización de personas, objetos y de animales, entre otros usos.

Con los avances tecnológicos, la demanda de estar conectados y la miniaturización de los dispositivos; de bajo costo de producción además más pequeñas, versátiles y son usadas en radares, aviones, telefonía celular; entre otras aplicaciones.

La modelación de la antena nos permite hacer el estudio de su funcionamiento, efectuando comparaciones entre diferentes materiales, reduciendo costos y tiempo durante su proceso de elaboración.

La antena microstrip se acoplará con un módulo fotovoltaico para la recepción de ondas electromagnéticas en la frecuencia de 2.4 GHz, siendo esta una aplicación de la Antena Solar Plana (SOLPLANT) [4, 5].

1.3 Principios básicos de las antenas

Una antena es un conductor metálico capaz de radiar y capturar ondas electromagnéticas [8]. Además, una antena es un dispositivo que permite transmitir y recibir ondas electromagnéticas provenientes del espacio. Una antena transmisora transforma un voltaje en ondas electromagnéticas y la antena receptora realiza un proceso inverso.

En la línea de transmisión de una antena están presentes las ondas estacionarias (Fig. 1 a) el circuito abierto representa una discontinuidad para la onda incidente de voltaje y tiene la forma de una inversión de fase, esta inversión de fase hace que se irradie algo del voltaje incidente, sin reflejarse hacia la fuente. La energía radiada se propaga alejándose de la antena, en forma de ondas electromagnéticas transversales (Fig. 1 b). Cuando en una antena el conductor se aparta de una línea recta a la distancia de un cuarto de onda es llamada antena monopolo, antena de un cuarto de onda o antena Marconi (Fig. 1 c). El Dipolo de media onda se llama antena de Hertz (Fig. 1 d).

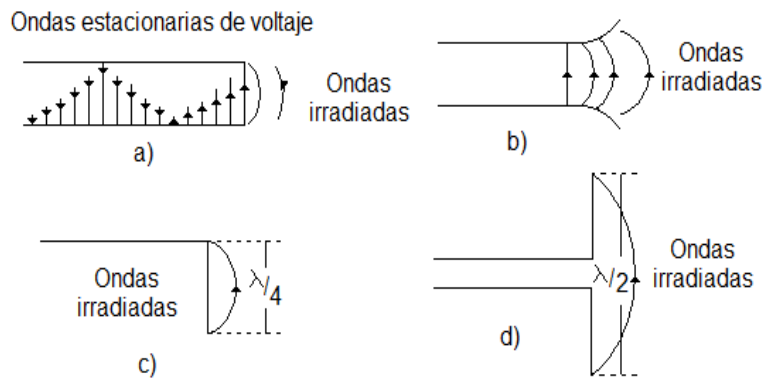


Figura 1. Tipos de onda; Radiación de una línea de transmisión: a) radiación de línea de transmisión, b) conductores divergentes, c) antena Marconi y d) antena Hertz.

En la Fig. 2 se observa un diagrama a bloques de sistema de radiocomunicaciones [9].

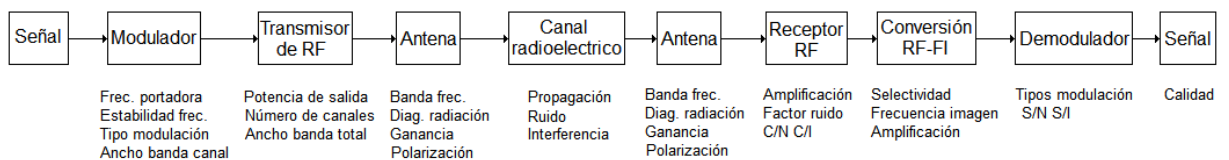


Figura 2. Diagrama a bloques sistema de radiocomunicaciones.

1.4 Tipos de antenas

Existen diferentes tipos de antenas con características específicas y usos. Algunos tipos de antena son:

- **Antena de hilo o cable**

Son aquellas cuyos elementos radiantes son hilos conductores, como monopolos, dipolos, espiral o elipse [10], pueden adoptar cualquier forma o figura para ser una antena.

- **Dipolo de media onda**

Este tipo de antena es la más usada para frecuencias mayores de 2 MHz, también conocida como antena de Hertz [8] o antena resonante en honor de Heinrich Hertz quien fue el primero en demostrar la existencia de las ondas electromagnéticas y como características que tiene un múltiplo de cuarto de longitud de onda de largo, su impedancia tiene varios valores, los más importantes es cuando tiene una corriente y un voltaje máximos y mínimos.

Los efectos de un dipolo de media onda sobre un terreno, están influenciadas por la orientación de la antena, la absorción de la antena, la absorción atmosférica y los efectos del suelo (como la reflexión).

- **Antena helicoidal**

Una antena helicoidal [8], es una antena para VHF o de UHF, para irradiar ondas electromagnéticas de polarización circular, más que de polarización horizontal o vertical, esta antena se puede usar como antena de un solo elemento depende de la polarización se modifica la radiación, la ganancia y el ancho de banda.

- **Antena de reflector parabólico**

Las antenas de reflector parabólico [8], proporcionan ganancias y directividades extremadamente altas, son usadas en las comunicaciones en radio y satélite. Una antena parabólica tiene dos partes: el reflector parabólico y el elemento activo, llamado mecanismo de alimentación, el mecanismo de alimentación encierra la antena primaria (es un dipolo o una red de dipolos), la antena irradia ondas

electromagnéticas hacia el reflector y el reflector es un dispositivo pasivo, que tan sólo refleja la energía que le llega del mecanismo de alimentación. La reflexión produce una emisión directiva y todas las ondas están sincronizadas, así como el frente de onda.

- **Antena de apertura**

Este tipo de antena tiene aplicaciones en las naves espaciales y en aviones por su adaptabilidad en las estructuras de los aviones o nave, su estructura consta de una guía de onda con determinación en forma piramidal, cilíndrica, corneta, etc.

- **Antenas de apertura planas**

Debido a las necesidades actuales y en la búsqueda de antenas más compactas, se ha generado diseños de apertura con dimensiones cada vez más pequeñas, prácticas y con un menor costo de fabricación. Por ejemplo, la antena Vivaldi, tienen la peculiaridad de utilizar dos formas de cobre cada una en un lado del sustrato dieléctrico, Onda de Guía integrada al Sustrato (SIW Substrate Integrated Waveguide) utiliza una guía de onda.

- **Antena microstrip**

Las antenas microstrip ha tenido una aceptación debido a sus diferentes características (tamaño reducido, la frecuencia de operación ha ido incrementando cada vez más, la antena microstrip: consta de dos placas metálicas (parche “antena” y la tierra, en medio de las dos placas esta el sustrato que es un material dieléctrico (en el capítulo 2, se explica).

- **Antena de reflexión**

Este tipo consta de una estructura de antena de cualquier tipo mencionada anteriormente incluyendo un reflector para mejorar sus propiedades. Algunas antenas son: parabólica, esférico, cilíndrico, etc.

1.5 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético [8], es todo el rango de frecuencias, este rango de frecuencia va desde las subsónicas o frecuencias muy bajas, hasta los rayos cósmicos (10^{22} Hz), la forma de onda se observa en la Fig. 3, la longitud de onda se calcula con la Ec. 1, el espectro electromagnético (Fig. 4) se dividen en bandas de frecuencia (Tabla 1).

Tabla 1. Tabla de frecuencias.

Abreviatura	Nombre	Banda ITU	Frecuencias
			< 3Hz
ELF	Frecuencias Extremadamente Bajas	1	3 – 30 Hz
SLF	Super Bajas Frecuencias	2	30 – 300 Hz
ULF	Ultra Bajas Frecuencias	3	300 – 3000 Hz
VLF	Muy Bajas Frecuencias	4	3 – 30 kHz
LF	Bajas Frecuencias	5	30 – 300 kHz
MF	Media Frecuencias	6	300 – 3000 kHz
HF	Alta Frecuencias	7	3 – 30 MHz
VHF	Muy Altas Frecuencias	8	30 – 300 MHz
UHF	Ultra Altas Frecuencias	9	300 – 3000 MHz
SHF	Súper Altas Frecuencias	10	3 – 30 GHz
EHF	Frecuencias Extremadamente Alta	11	30 – 300 GHz
			> 300 GHz

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Ec. 1})$$

λ Longitud de onda [m].

f Frecuencia [Hz].

c Velocidad de la luz 3×10^8 [m/s].

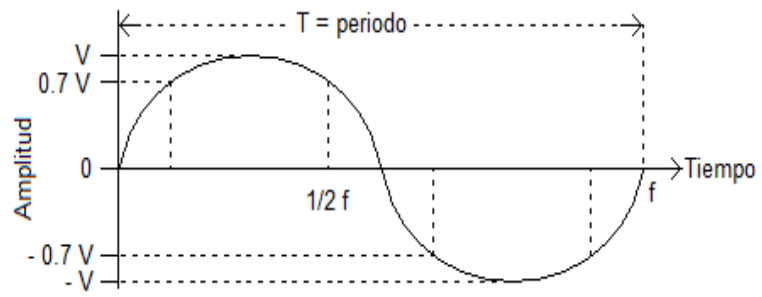


Figura 3. Forma de onda.

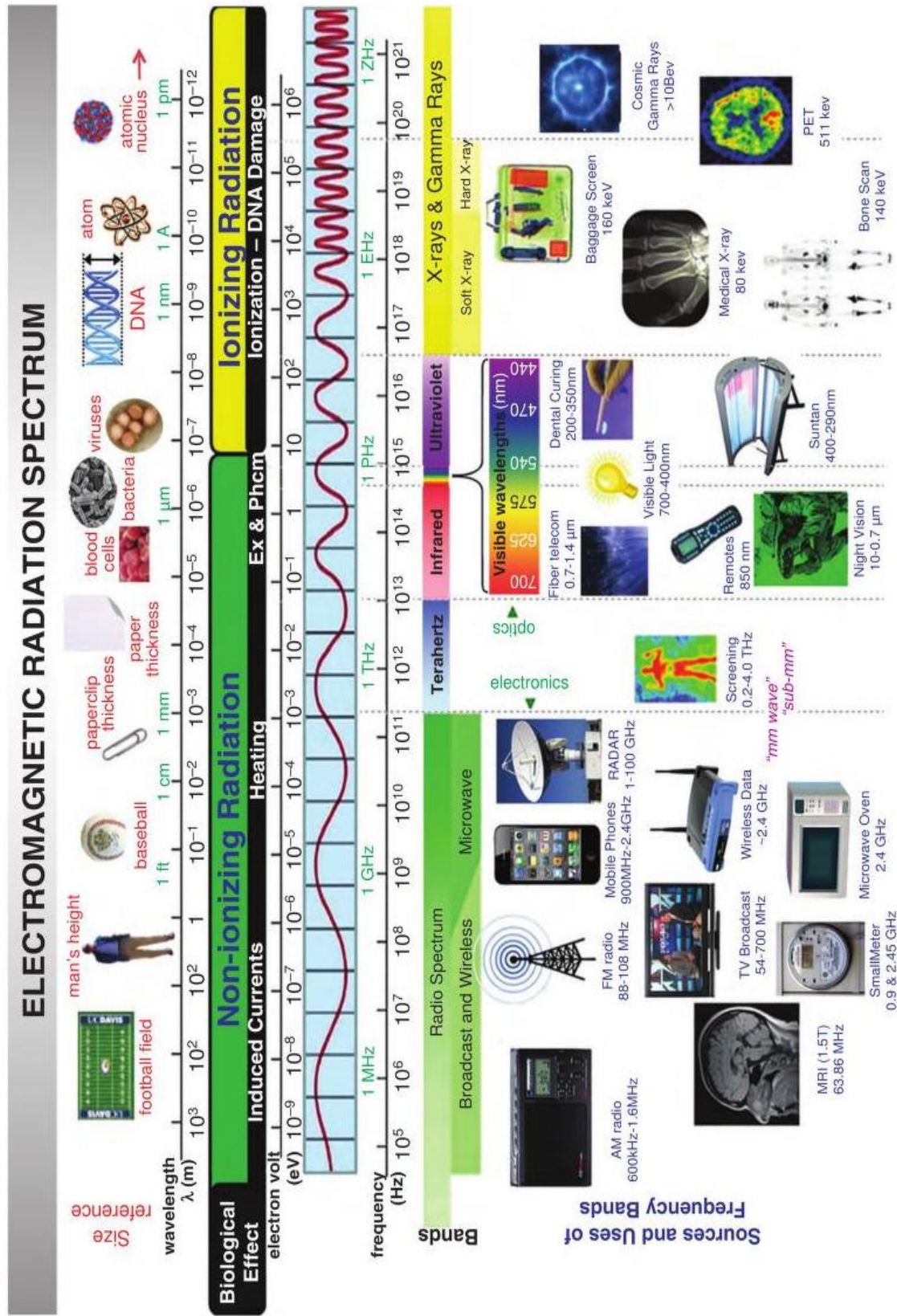


Figura 4. Espectro electromagnético [11].

1.6 Ondas electromagnéticas transversales EMT

Las ondas EMT [8], se propagan por el dieléctrico que está en medio de dos conductores.

Una onda electromagnética se produce por la aceleración de una carga eléctrica, en un conductor, la corriente y el voltaje siempre está acompañada por un campo eléctrico E y un campo magnético H (Fig. 5 a), haciendo unos cortes transversales de los campos E y H para el caso de un par de hilo paralelo y de una línea coaxial se observa que el H y E son perpendiculares (Fig. 5 b), entre todos los puntos, esto se llama cuadratura espacial, las ondas electromagnéticas que viajan por la línea de transmisión de la fuente a la carga, se llama onda incidente y la que regresa de la carga a la fuente se llama onda reflejada.

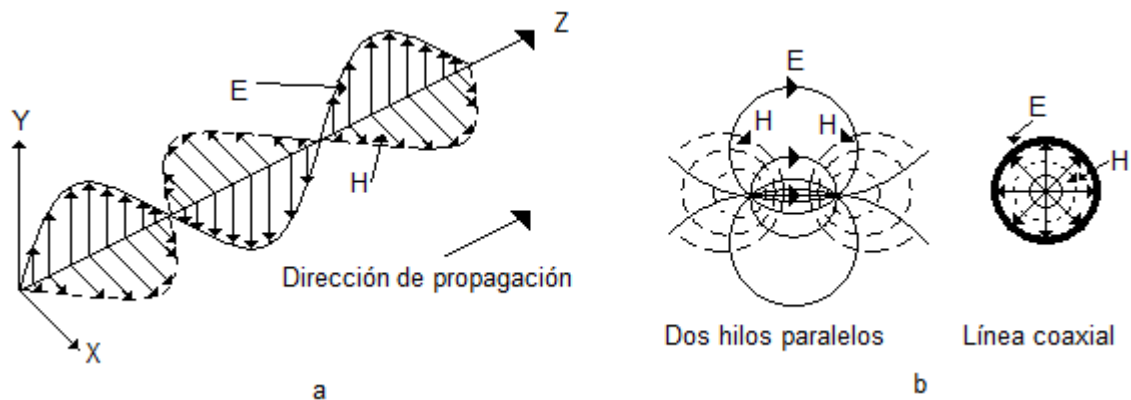


Figura 5. a) Campo E y M , b) corte transversal E y M de un par de cables paralelos y una línea Coaxial.

1.7 Parámetros de la antena

Cada antena tiene diferentes propiedades y características que está relacionado con la transmisión y recepción de señales.

- **Impedancia de entrada de la antena**

La impedancia [8] (Ec. 2), está presente en sus terminales de la antena, la radiación de una antena es el resultado del flujo de corriente de RF, esta corriente va de la antena hacia sus terminales de la antena (Fig. 16).

$$Z_{ent} = \frac{E_i}{I_i} \quad (\text{Ec. 2})$$

Z_{ent} Impedancia de entrada [Ω].

E_i Voltaje de entrada de la antena [V].

I_i Corriente de entrada a la antena [Amp].

Donde la impedancia en la forma compleja [8] (Ec. 3).

$$Z_{ent} = (R_L + R_r) + jX_{ent} \quad (\text{Ec. 3})$$

Z_{ent} Impedancia de entrada [Ω].

R_L Resistencia de carga [Ω].

jX_{ent} Resistencia imaginaria.

R_r Resistencia a la radiación [Ω].

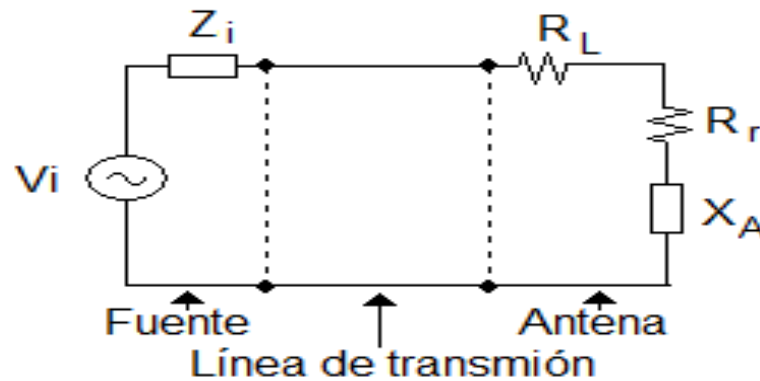


Figura 6. Línea de transmisión de una antena.

- **Patrón de radiación**

Es un diagrama o gráfica [8, 10], de dos o tres dimensiones que representa intensidades de campo o densidades de potencia en diversas posiciones angulares en relación con una antena. Si la gráfica de radiación se traza en

términos de intensidad del campo eléctrico (\mathcal{E}) o de densidad de potencia (\mathcal{P}) se llama patrón de radiación absoluta (Fig. 7 a) (es decir, distancia variable y potencia fija). Las gráficas de intensidad de campo o densidad de potencia con respecto al valor en algún punto de referencia, se llama patrón de radiación relativa (Fig. 7 b) (es decir, potencia variable, distancia fija).

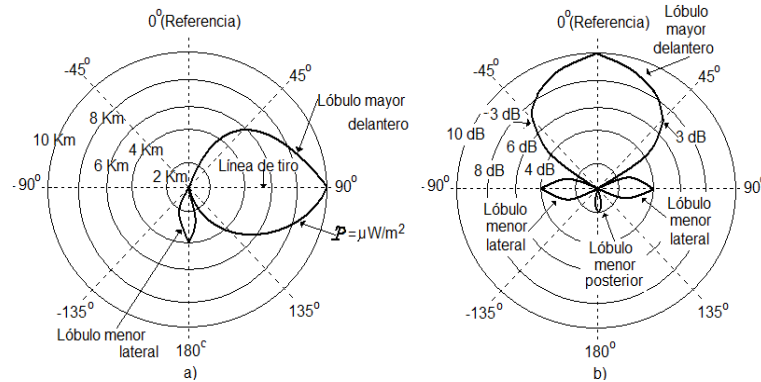


Figura 7. Patrón de radiación en dos dimensiones a) absoluta) y b) relativa.

En la Fig. 8 se observa el patrón de radiación en tres dimensiones, siendo la unión del patrón de radiación absoluta y relativa.

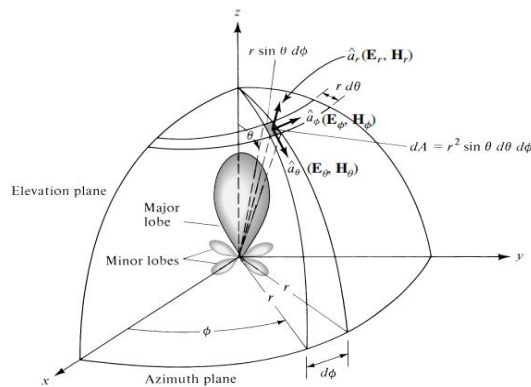


Figura 8. Patrón de radiación tridimensional [10].

Los patrones de radiación tienen varios lóbulos:

- ✧ Lóbulo principal (major lobe): Es el que contiene la dirección máxima de radiación.
- ✧ Lóbulo menor (minor lobe): Son todos aquellos distintos al principal.

- ✧ Lóbulos laterales (side lobe): Son los adyacentes al principal.
- ✧ Lóbulos posteriores (back lobe): Es la radiación en la dirección opuesta al principal.

Hay tres tipos de patrón de radiación.

I. Isotrópica.

Es un radiador sin pérdidas siendo capaz de radiar en todas direcciones con la misma intensidad.

II. Direccional.

Es un radiador que transmite y recibe ondas electromagnéticas en una sola dirección.

III. Omnidireccional.

Es un radiador que en un plano no radia y en otro plano radia en forma direccional.

● **Ancho de banda**

Es el intervalo de frecuencias dentro del cual, la antena es óptima para frecuencia de operación (Ec. 4).

$$B = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{op}} \quad (\text{Ec. 4})$$

B Ancho de banda [Hz].

f_{\max} Frecuencia máxima [Hz].

f_{\min} Frecuencia mínima [Hz].

f_{op} Frecuencia de operación [Hz].

● **Ganancia directiva y Directividad**

La directividad [10] (Ec. 5) y la ganancia directiva [8, 10] (Ec. 6) están muy ligadas y comparten mucho en similitud en definición y es la concentración de la potencia

irradiada en una dirección en particular, las unidades pueden ser dBi, dBw, entre otras unidades.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (\text{Ec. 5})$$

D Directividad [adimensional].

U Intensidad de radiación [W/ unidad de ángulo sólido].

U_0 Intensidad de radiación de la fuente isotrópica [W/ unidad de ángulo sólido].

P_{rad} Potencia radiada total [W].

$$\mathcal{D} = \frac{\mathcal{P}}{\mathcal{P}_{ref}} \quad (\text{Ec. 6})$$

\mathcal{D} Ganancia directiva [a dimensional].

\mathcal{P} Densidad de potencia en un punto [W/m²].

\mathcal{P}_{ref} Densidad de potencia en el mismo punto [W/m²].

✓ **Ganancia**

La ganancia de la antena [10] (Ec. 7), se puede definir como la intensidad de radiación en una dirección dada y la potencia de la antena cuando radia isotrópicamente.

$$G = 4\pi \frac{\text{Intensidad de radiación}}{\text{Potencia total de entrada(aceptada)}} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}} \quad (\text{Ec. 7})$$

G Ganancia [adimensional].

U Intensidad de radiación [W/ unidad de ángulo sólido].

P_{in} Potencia de entrada total [W].

- **Eficiencia**

La eficiencia de una antena [8], es la relación de la potencia irradiada por la antena entre la potencia total de entrada (Ec. 8), calcula la eficiencia (Ec. 9), [7] (Ec. 10), otra forma de calcular la eficiencia de la antena (Ec. 11) [7, 10], utilizando e_0 obtenemos la pérdida de entrada y salida en las terminales de la antena.

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{rad}}{\mathcal{P}_{ent}} \times 100 \quad (\text{Ec. 8})$$

\mathcal{P}_{ent} Potencia de entrada [W].

η Eficiencia.

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_{rad}}{\mathcal{P}_{ent} + \mathcal{P}_d} \times 100 \quad (\text{Ec. 9})$$

\mathcal{P}_d Potencia disipada por la antena [W].

$$\eta = \frac{G_{rad}}{G_{in}} = \frac{1}{G_{in} R_{rad}} \quad (\text{Ec. 10})$$

G_{rad} Conductancia de radiación.

G_{in} Conductancia de entrada.

R_{rad} Resistencia de entrada.

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (\text{Ec. 11})$$

e_0 Eficiencia total [Adimensional].

e_r Eficiencia de reflexión $(1 - |\Gamma|^2)$.

e_c Eficiencia del dieléctrico.

e_d Coeficiente de reflexión de voltaje en la entrada de la antena ($\Gamma = (Z_{in} - Z_0)/(Z_{in} + Z_0)$, Z_0 impedancia de transmisión, Z_{in} impedancia de entrada a la antena).

- **Región de campo**

El espacio que rodea a una antena generalmente se divide en tres regiones, cómo se observa en la Fig. 9.

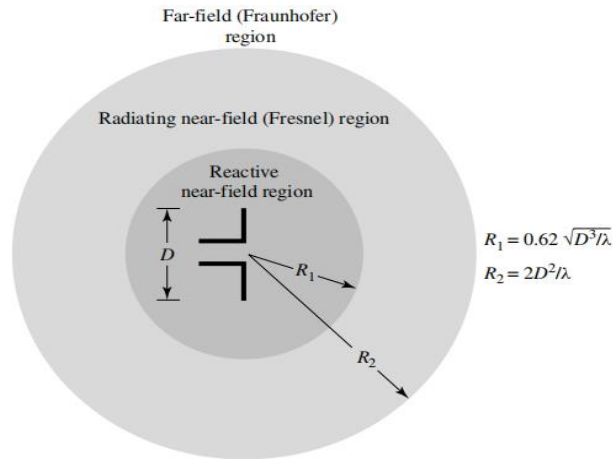


Figura 9. Región de campo [10].

I. Campo cercano: Es la región del campo cercano que rodea a la antena, en la que predomina el campo reactivo, para muchas antenas esta región es la frontera exterior dada por $R_1 < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$, R es el radio alrededor de la antena, donde λ longitud de la onda, D es la dimensión mayor de la antena.

II. Campo cercano radiante (Fresnel): Esta región se encuentra entre la región del campo reactivo y el campo lejano, donde la distribución del campo angular es dependiente de la distancia, si la antena tiene una dimensión máxima y la longitud de onda es muy pequeña, esta región puede ser que no exista, entonces para conocer frontera se toma la distancia $R \geq 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$, donde λ longitud de onda, D es la dimensión más grande de la antena y la frontera exterior su longitud se calcula como $R \geq 2D^2/\lambda$.

III. Campo lejano o Fraunhofer: Es la región de una antena donde la distancia es la más alejada de la antena, después de Fresnel. Si la antena tiene una máxima

dimensión D , la región del campo lejano se toma como una distancia $R > 2D^2/\lambda$ de la antena.

- **Densidad de potencia de radiación**

Densidad de potencia de radiación utiliza un medio por donde transportar la información por un medio inalámbrico de un punto a otro, el vector Poynting (Ec. 12), tiene asociado como productos el campo eléctrico y el campo magnético.

Las ondas electromagnéticas usan el medio de transporte sin hilos de un punto a otro, la potencia y la energía están asociados con el campo electromagnético, el vector de Poynting instantáneo.

$$\mathbf{W} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (\text{Ec. 12})$$

W Vector Poynting instantánea [W/m^2].

E Intensidad del campo eléctrico instantáneo [V/m^2].

H Intensidad del campo magnético instantáneo [A/m].

- ✓ **La potencia total instantánea (Ec. 13) que contiene al vector de Poynting.**

$$P = \oiint_s \mathbf{W} \cdot d\mathbf{s} = \oiint_s \mathbf{W} \cdot \hat{\mathbf{n}} da \quad (\text{Ec. 13})$$

P Potencia total instantánea [W].

$\hat{\mathbf{n}}$ Vector unitario normal a la superficie.

da Área infinitesimal de la superficie cerrada [m^2].

- ✓ **Densidad de potencia promedio (Ec. 14).**

$$\mathbf{W}_{av}(x, y, z) = \mathbf{W}(x, y, z, t)_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \quad (\text{Ec. 14})$$

✓ **Potencia radiada promedio de una antena (Ec. 15).**

$$P_{rad} = P_{av} = \iint_S \mathbf{W}_{rad} \cdot d\mathbf{s} = \iint_S \mathbf{W}_{av} \cdot \hat{\mathbf{n}} da = \frac{1}{2} \iint_S \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot d\mathbf{s} \quad (\text{Ec. 15})$$

✓ **Potencia Isotrópica Efectiva Radiada (EIRP o ERP) (Ec. 16)**

$$EIRP = \mathcal{P}_{rad} \mathcal{D}_t \quad (\text{Ec. 16})$$

EIRP Potencia Isotrópica Efectiva Radiada [W].

\mathcal{P}_{rad} Potencia total irradiada [W].

\mathcal{D}_t Potencia directiva de la antena de transmisión [adimensional].

✓ **Potencia capturada**

La potencia capturada (Ec. 17), es directamente proporcional a la densidad de potencia recibida. La potencia capturada corresponde a la capacidad de captura de energía electromagnética, es directamente proporcional a la densidad de potencia recibida y al área de captura de la antena receptora.

$$P_{cap} = \mathcal{P} A_c \quad (\text{Ec. 17})$$

P_{cap} Potencia de captura [W].

\mathcal{P} Densidad de captura en [W/m²].

A_c Área efectiva de captura [m²].

Sustituyendo la ecuación de densidad de potencia y el área efectiva, tenemos la potencia capturada 1 (Ec. 18).

$$P_{cap} = \frac{(P_{ent} A_t) (A_r \lambda^2)}{16\pi^2 R^2} \quad (\text{Ec. 18})$$

A_t Ganancia de la potencia de la antena de transmisión [adimensional].

R Distancia entre las antenas de transmisión y recepción [m].

A_r Ganancia de la potencia de la antena de recepción [adimensional].

● Polarización

La polarización de la antena es solamente la orientación del campo eléctrico que se irradia, se tienen cuatro tipos de polarizaciones (Fig. 10):

I. Polarización vertical.

Se obtiene cuando oscila en forma vertical.

II. La polarización horizontal.

Se obtiene cuando oscila en forma horizontal.

III. La polarización elíptica.

Es cuando dos componentes polarizados linealmente no están en fase, su vector gira sobre la dirección de propagación y la amplitud puede ser periódica.

IV. La polarización circular.

Es cuando las componentes elípticas tienen la misma amplitud y están en cuadratura (desfasados 90° grados).

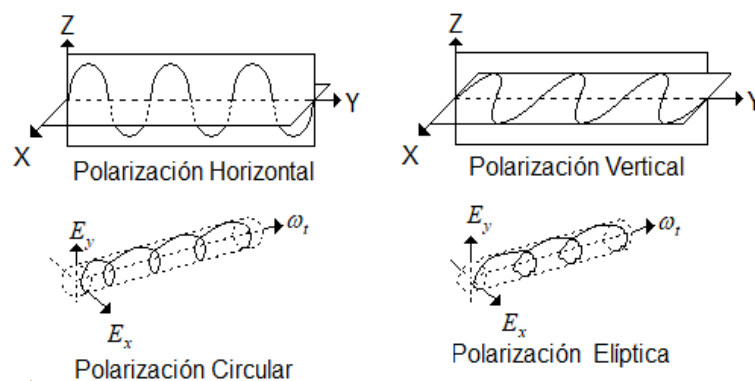


Figura 10. Polarización de una antena.

En el caso de la polarización circular y elíptica, presentan dos tipos de rotaciones: el primero en sentido de las manecillas del reloj y el segundo sentido opuesto.

- **Parámetro S**

Las antenas como muchos circuitos electrónicos pueden caracterizarse como una red de dos puertos, de esta forma la respuesta general del sistema. En la Fig. 11, se muestra una representación de una red de dos puertos, los parámetros de impedancia o parámetros Z, parámetros de admitancia o parámetros Y, parámetros híbridos o parámetros H, parámetros de transmisión o parámetros T, parámetros de transmisión inversa o parámetros ABCD y parámetros de dispersión o parámetros S.

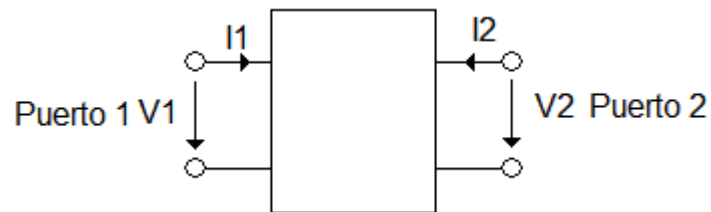


Figura 11. Red de dos puertos

Los parámetros de S pueden ser utilizados para cualquier frecuencia debido a que no hacen consideraciones de ningún circuito abierto ni corto circuito, simplemente se basan en los niveles de potencia que se perciben en las terminales de la red de dos puertos.

Los parámetros de S [10, 12] son cuatro:

- ✓ S_{11} . Este parámetro mide la cantidad de potencia que refleja en comparación con la cantidad de potencia que se está aplicando en el puerto 1. El parámetro S_{11} también es conocido como el coeficiente de reflexión de puerto de entrada Γ (Ec. 19).

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} = \frac{V_1 - Z_{01} \cdot i_1}{V_1 + Z_{01} \cdot i_1} = \frac{Z_1 - Z_{01}}{Z_1 + Z_{01}} = \Gamma_1 \quad (\text{Ec. 19})$$

- ✓ S_{12} . Este parámetro mide la potencia recibida en el puerto 2 en comparación con la enviada por el puerto 1. A este punto se le conoce como coeficiente de transmisión directa (Ec. 20).

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} = \sqrt{\frac{Z_{02}}{Z_{01}}} \frac{V_1 - Z_{01} \cdot i_1}{V_2 + Z_{02} \cdot i_2} = \sqrt{\frac{Z_{02}}{Z_{01}}} \frac{2V_1}{V_2 + Z_{02} \cdot i_2} = T_{12} \quad (\text{Ec. 20})$$

- ✓ S_{21} . Este parámetro mide la potencia recibida en el puerto 2 en comparación con la enviada por el punto 1, este parámetro se define como el coeficiente de transmisión directa (Ec. 21).

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} = \sqrt{\frac{Z_{01}}{Z_{02}}} \frac{V_2 - Z_{01} \cdot i_1}{V_1 + Z_{01} \cdot i_1} = \sqrt{\frac{Z_{01}}{Z_{02}}} \frac{2V_2}{V_1 + Z_{01} \cdot i_1} = T_{21} \quad (\text{Ec. 21})$$

- ✓ S_{22} . Este parámetro mide la potencia reflejada en el puerto 2 en comparación con la cantidad de potencia que se envía del puerto 2. A este se le conoce como coeficiente de reflexión del puerto de salida (Ec. 22).

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} = \frac{V_2 - Z_{02} \cdot i_2}{V_2 + Z_{02} \cdot i_2} = \frac{Z_2 - Z_{02}}{Z_2 + Z_{02}} = \Gamma_2 \quad (\text{Ec. 22})$$

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Introducción

La antena microstrip es una evolución de stripline (La stripline es una Tarjeta de Circuito Impreso conocida como PCB, que tiene un dieléctrico y dos capas metalizadas en su parte interior y en la parte superior del dieléctrico), este tipo de antena es propuesta por Deschamps [10, 13] en 1953, pero hasta 1970 fue cuando se empezaron a utilizar, hacer investigación y desarrollo de la antena de circuito impreso. Algunas ventajas de la antena parche, es que dentro de sus características físicas se identifica por ser compacta, delgada, liviana y de bajo costo. Algunas desventajas tienen baja potencia de radiación y ancho de banda angosta. Estas antenas están dentro de los equipos móviles y en general en las comunicaciones inalámbricas, es ideal para las ondas milimétricas y microondas, estas últimas son de alta frecuencia.

Anteriormente existían dos tipos de antenas, las de onda viajera y resonante [10].

- Ondas viajeras

Este tipo de antenas microstrip, son de líneas impresas (líneas de peine, línea de muralla, líneas discontinuas, entre otros), son diseñadas para radiar eficientemente, como característica tienen ancho de banda de impedancia amplia, es afectado negativamente por la dependencia de la frecuencia de radiación.

- Resonador

Este tipo de antena microstrip (circular, cuadrada, rectangular, elíptica, entre otras), está diseñada para radiar, como característica tiene ancho de banda mejorado como la ganancia y su radiación.

2.2 Método de análisis

Existen tres métodos de análisis de la antena microstrip.

- **Modelo empírico**

Este modelo es uno de los menos precisos, son los más sencillos de hacer, este modelo se recomienda para frecuencias menores de 30 GHz, para frecuencias mayores, este modelo deja de ser preciso, algunos ejemplos de modelos empíricos son:

- ✧ Modelo de línea de transmisión.
- ✧ Modelo de cavidad.

- **Modelo semi-empíricos**

Este modelo está entre el modelo empírico y de onda completa, tiene una mayor precisión del modelo empírico, aumenta la complejidad del modelo y algunos ejemplos son descritos a continuación:

- ✧ Enfoque variacional.
- ✧ Enfoque variacional generalizado.
- ✧ Enfoque de ecuación integral dual.
- ✧ Modelo de corrientes superficial eléctrico.
- ✧ Método de reciprocidad.

- **Modelo de onda completa**

Este modelo es el más preciso y más complicado por lo que se requiere una computadora para llevar a cabo el modelo de la antena.

- ✧ Método de momentos en el dominio del espacio.
- ✧ Método de momentos espectral.
- ✧ Método de estados finitos.
- ✧ Método de momento.

2.3 Característica de una antena microstrip

Una antena microstrip (Fig. 12) tiene una placa radiante o parche de dimensiones (W , L) impresa sobre un material dieléctrico (w , l) de grosor (h), permitividad relativa (ϵ_r) y un plano de tierra.

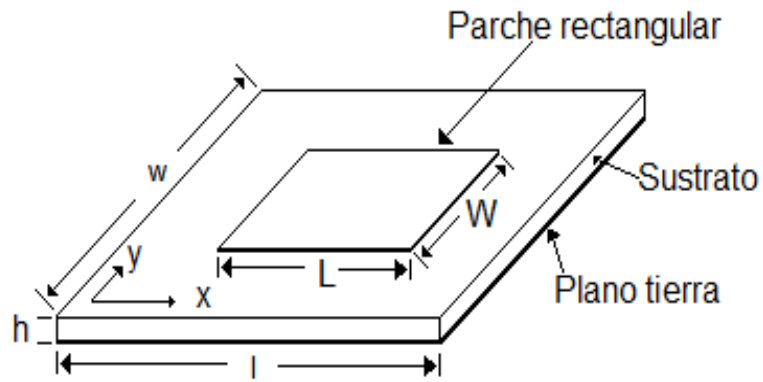


Figura 12. Antena microstrip.

I. Tipos de antena microstrip.

Las antenas microstrip tienen diferentes diseños y configuraciones de parche (Fig. 13), los más comunes son: cuadrado, rectángulo, triángulo, elipse, dipolo, circular, entre otros tipos diseño de antena parche.

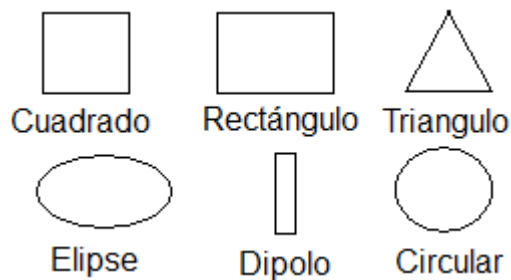


Figura 13. Tipos de antena microstrip.

II. Tipos de ondas

Existen cuatro tipos de ondas:

- ◇ Ondas espaciales: Son aquellas ondas enviadas al espacio libre en un rango de 0° a 180° , como característica se atenúa con forme viaja, conforme va propagándose su magnitud se va desvaneciendo.

- ✧ Ondas superficiales: Son aquellas ondas que se presentan en dirección descendente y limitadas por el valor: $\frac{\pi}{2} < \theta < \pi - \arcsin\left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}\right)$, estas ondas están en el dieléctrico y no son uniformes. Al ir descendiendo, las ondas encuentran el plano de tierra que las refleja y después al llegar a la entrecara del dieléctrico el espacio libre provoca que las ondas sean reflejadas mediante el esquema conocido como: reflexión interna total, las ondas superficiales toman parte de la señal enviada y por lo tanto aumentan las pérdidas. La amplitud de la señal es reducida, por lo que la señal se va desvaneciendo al ir viajando y atenuando.

- ✧ Ondas de fuga: Este tipo de ondas son parecidas a las ondas de superficie, con la diferencia en que el plano de elevación el ángulo tiene el siguiente rango: $\pi - \arcsin\left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}\right) < \theta < \pi$, las ondas inicialmente son reflejadas en el plano de tierra (como las ondas reflejadas superficiales) viajan en el dieléctrico en dirección de la tira conductora, posteriormente, cuando las ondas alcanzan la entrecara del suelo y el espacio libre, parte de las ondas son reflejadas, mientras que otras se fugan hacia el espacio libre.

- ✧ Las ondas guiadas: Este tipo de ondas están presentes en los circuitos impresos que son utilizados para guiar la onda o líneas de transmisión, son aquellas que se encuentran cuando la parte superior del sustrato está metalizado casi en su totalidad, además las ondas guiadas solamente pueden existir para valores específicos del ángulo de incidencia. Las ondas guiadas se encuentran viajando dentro del sustrato rebotando tanto en la parte metálica superior como cuando se referencia a tierra.

III. Sustrato

Es el material dieléctrico de la antena microstrip tiene diferentes propiedades como la tangente, la permeabilidad relativa, el espesor, etcétera., las constantes dieléctricas se observan en la tabla 2.

Tabla 2. Características del dieléctrico [12].

Sustrato	Constante dieléctrica (ϵ_r)	Pérdidas $\tan(\delta)$ 10^{-4}
Aluminio 96 %	9.6	0.0006
Zafiro	10.1	0.0001-0.0002
Vidrio	9.6	0.0005
Cuarzo	3.8	0.0001
RT Duroid 5880	2.1-2.2	0.0005-0.00015
FR4	4.3-4.5	0.01

IV. Constante dieléctrica

Todos los materiales tienen asociada una constante dieléctrica, la constante dieléctrica del material se calcula por medio de la Ec. 23.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{Ec. 23})$$

ϵ_r Permitividad eléctrica o constante dieléctrica.

ϵ Permitividad eléctrica del material [F/m].

ϵ_0 Permitividad $8.8541878176 \times 10^{-12}$ [F/m].

V. Tangente de pérdida

La tangente de pérdida ($\tan(\delta)$) (Ec. 24), está definida como el inverso del factor de calidad.

$$\tan(\delta) = \frac{1}{Q} \quad (\text{Ec. 24})$$

Q Factor de calidad.

VI. Coeficiente de reflexión

Es la señal reflejada en un punto de alimentación y se calcula en la Ec. 25.

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (\text{Ec. 25})$$

Γ Coeficiente de reflexión.

VII. VSWR (Relación de onda estacionaria de voltaje) o ROE (Relación de onda estacionaria)

La relación de onda estacionaria [7, 10, 13], es la relación máximo y mínimo de voltaje o de la corriente máxima entre la corriente mínima de la una onda estacionar en la línea de transmisión, se le conoce como relación de voltajes de onda estacionaria (Ec. 26), el coeficiente de reflexión de reflexión tiene un valor entre 0 a 1.

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (\text{Ec. 26})$$

$VSWR$ Relación de voltajes de onda estacionaria.

VIII. Alimentación

Hay cuatro formas de alimentar a las antenas microstrips, la primera es por una línea de alimentación por microcinta (Fig. 14 a), la segunda por un cable coaxial (Fig. 14 b), la tercera en forma de proximidad (Fig. 14 c) y por apertura (Fig. 14 d) [8,10].

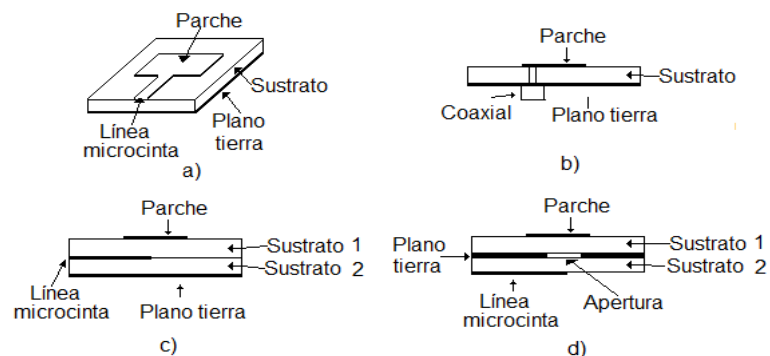


Figura 14. Tipos de alimentación de antena microstrip.

Los circuitos equivalentes de las antenas microstrip: línea de alimentación por un cable coaxial (Fig. 15 a), por microcinta (Fig. 15 b), por proximidad (Fig. 15 c) y por apertura (Fig. 15 d).

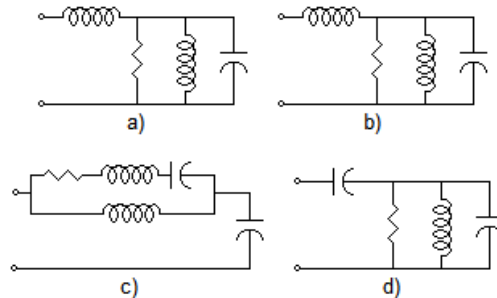


Figura 15. Circuitos equivalentes de alimentación.

IX. Polarización

La polarización de una antena microstrip rectangular (Fig. 16), estará en función de la geometría de la misma antena, dimensiones de sustrato, de parche, espesor y la constante dieléctrica ϵ_r , para minimizar los efectos del borde, este efecto se produce en el borde del parche (fringing effects que forman líneas de radiación, estos efectos son diferentes para cada diseño, frecuencia y tipo de sustrato).

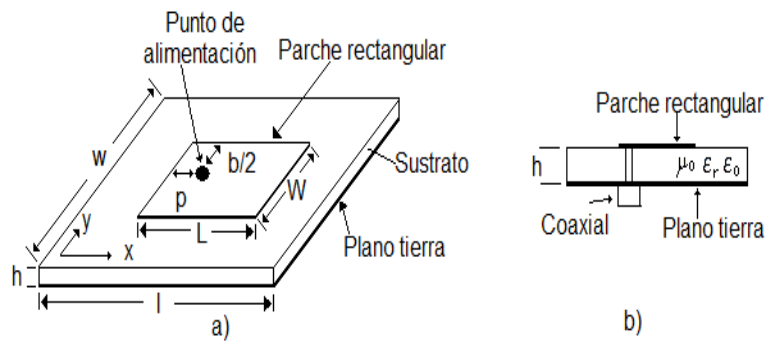


Figura 16. Antena microstrip, a) vista superior, b) vista de lado.

Los efectos fringing effects, están presente en la antena microstrip porque tiene dos medios: el aire y el sustrato de la antena microstrip) (Fig. 17), que dependerá

de las propiedades de la antena: Dimensiones del parche (ancho W , largo L , espesor del sustrato h) y la constante dieléctrica ϵ_r , cuando $L/h \gg 1$.

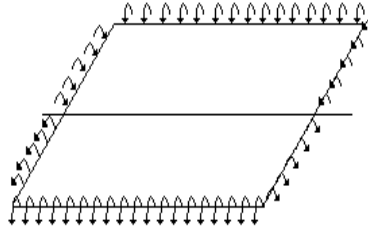


Figura 17. Efecto del borde.

X. Modelo de línea de transmisión

Este modelo considera los bordes de la antena como dos aperturas (slots) que radia, cada apertura tiene un ancho de la W , altura h y la distancia L . Las aperturas a su vez son consideradas como admitancias complejas compuestas de la conductancia G y una susceptancia B . en la figura 18, se muestra el circuito equivalente de una antena rectangular con el modelo de línea de transmisión [10].

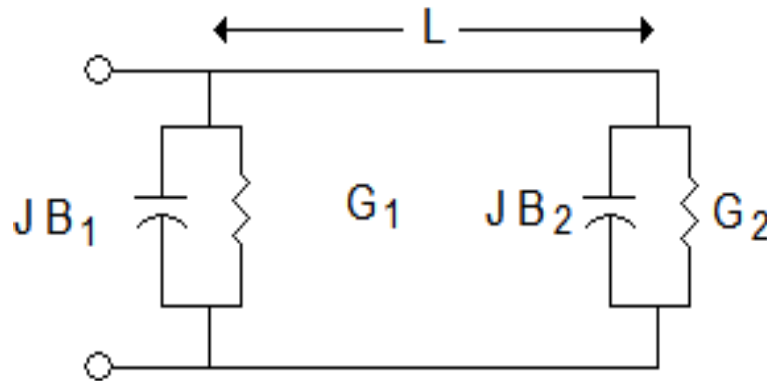


Figura 18. Modelo de línea de transmisión de una antena

2.4 Diseño de una antena microstrip rectangular [8, 10,12, 13, 14]

En el diseño del método de línea de transmisión, debemos considerar la frecuencia de operación o de resonancia, el tipo de sustrato (sus características: la frecuencia en que se desea trabajar, ϵ_r permitividad eléctrica, h altura o grosor del sustrato) para el diseño y simulación de la antena microstrip, en el caso de la antena microstrip rectangular se usará el software Matlab 15a para hacer los cálculos matemáticos y HFSS 13.0 para la simulación.

i. Cálculo del ancho del sustrato y tierra de la antena

La radiación emitida por el parche microstrip se produce en los bordes de la estructura, por lo que la dimensión W influye directamente en la radiación de la antena microstrip, en la Ec. 27 se muestra el cálculo del ancho de W .

$$W = \frac{C}{2f} \sqrt{\frac{2}{K_r + 1}} \quad (\text{Ec. 27})$$

C Velocidad de la luz [cm/s].

K_r Permitividad relativa del sustrato.

W Ancho de la antena [cm].

f Frecuencia de resonancia [1/s].

ii. Cálculo de la permitividad relativa efectiva

La permitividad relativa del sustrato dieléctrico de la antena microstrip es un parámetro de gran importancia debido a su directa incidencia, tanto en las pérdidas por radiación como en el factor de calidad.

Se debe tener en cuenta que las líneas de campo se encuentran sobre un medio no homogéneo, de modo que parte del campo eléctrico viaja a través de un medio de permitividad relativa (K_r) mientras que parte del campo lo hará a través del aire. Por este motivo, para el diseño de una antena microstrip, se debe tener en

cuenta una permitividad relativa efectiva (K_{ref}), en la Ec. 28 se observa el cálculo de K_{ref} .

$$K_{ref} = \left[\frac{K_r + 1}{2} + \left[\left(\frac{K_r + 1}{2} \right) \left(1 + \left(\frac{12 \times h}{W} \right) \right)^{\frac{-1}{2}} \right] \right] \quad (\text{Ec. 28})$$

h Espesor del sustrato [cm].

K_r Permeabilidad relativa del sustrato.

K_{ref} Permitividad relativa efectiva.

W Ancho de la antena (cm).

iii. Cálculo de la variación dl de la antena

Esta variación de la antena es producida por el efecto del borde de la antena (fringe effect), el borde provoca un estiramiento virtual de la dimensión dl (Ec. 29).

$$dl = 0.412 \times h \left[\frac{\left(K_{ref} + 0.3 \right) \left(0.264 + \frac{W}{h} \right)}{\left(K_{ref} - 0.258 \right) \left(0.8 + \frac{W}{h} \right)} \right] \quad (\text{Ec. 29})$$

dl Variación de la antena microstrip.

✓ Cálculo de la longitud del sustrato y de la tierra de la antena

El cálculo de la longitud efectiva de la antena microstrip, se muestra en la Ec. 30.

$$L = L_{ef} - 2 \times dl \quad (\text{Ec. 30})$$

Donde L_{ef} es la longitud efectiva de la antena (Ec. 31).

$$L_{ef} = \frac{C}{2f \sqrt{K_{ref}}} \quad (\text{Ec. 31})$$

L_{ef} Longitud efectiva de la antena y se mide en centímetro (cm).

iv. Cálculo de las dimensiones del parche de la antena microstrip

El modelo de transmisión de línea en los planos de tierra infinitos y planos de tierra infinitos y planos de tierra como se muestra en la siguiente Ec. 32, en el inciso a y b se calcula el ancho de la antena, mientras que en la Ec. 33 se calcula a lo largo de la antena (inciso a y b).

$$W1 = 6h + W \quad (\text{Ec. 32 a})$$

$$W2 = 3W \quad (\text{Ec. 32 b})$$

$W1$, $W2$ Ancho de la antena en (cm).

$$L1 = 6h + L \quad (\text{Ec. 33 a})$$

$$L2 = 3L \quad (\text{Ec. 33 b})$$

$L1$, $L2$ Largo de la antena en (cm).

v. Cálculo de la alimentación del sustrato y tierra de la antena microstrip

En la Ec. 34 se observa la posición del cable y la alimentación en el eje X, por otro lado, en la Ec. 35. se muestra la posición en el eje Y.

$$X = \frac{W}{2} \quad (\text{Ec. 34})$$

X Posición en el plano en (cm).

$$Y = \frac{L}{2\sqrt{K_{ref}}} \quad (\text{Ec. 35})$$

Y Posición en el plano en (cm).

2.5 Manual HFSS

HFSS es un software para el diseño y simulación de estructuras en 3D de altas frecuencias y permite hacer el estudio de modelos por el método de elementos finitos y de mallas adaptativas, facilitando el estudio del comportamiento de la estructura, los prototipos de sistemas de comunicaciones, los componentes eléctricos, los filtros, los conectores y entre otras aplicaciones.

I. Ejecutar el programa HFSS

Para poder ejecutar el programa debemos dar doble click en el icono de HFSS 13.0 (Fig. 19).



Figura 19. Icono del programa HFSS 13.0.

II. Interfaz de usuario

La interfaz tiene 7 ventanas como se observa en la Fig. 20.

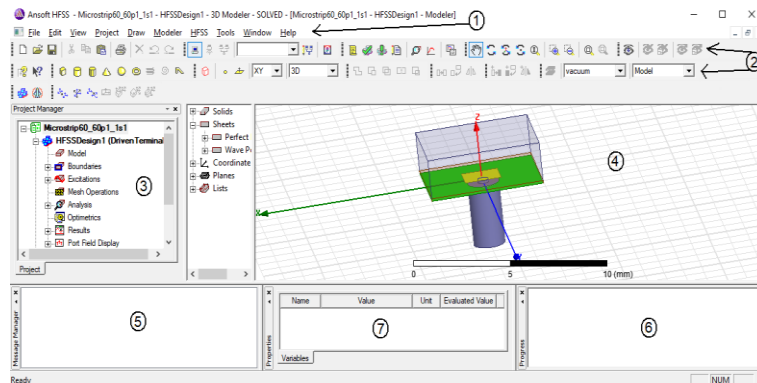


Figura 20. Interfaz HFSS 13.0.

1. Menú: Contiene los diferentes menús de herramienta, dibujo, propiedades, modelación y análisis de resultados.

2. Herramientas: Es un acceso rápido para el diseño, construcción y simulación de los diferentes proyectos.
3. Administrador de proyectos: Organiza todas las acciones del usuario de manera automática y ordenada.
4. Modelo en 3D: En esta ventana es donde se construyen los diferentes objetos que tiene el proyecto y está constituida en dos partes, en la ventana izquierda es donde se despliega una lista detallada y automática de las diferentes de las diferentes acciones del usuario, en la ventana derecha es donde el usuario realiza objetos del proyecto.
5. Administrador de Mensaje: Muestra al usuario diferentes mensajes o advertencias.
6. Ventana de progreso: Muestra el progreso de la simulación.
7. Propiedades: Indica las características generales del elemento seleccionado.

III. Nueva ventana de diseño en HFSS.

Seleccionamos un nuevo diseño de en HFSS, lo podemos hacer de dos formas diferentes, las primeras seleccionamos el menú de **Project** → **Insert HFSS Design** (Fig. 28 a), posteriormente seleccionamos el símbolo de **Insert HFSS Design** (Fig. 28 b).

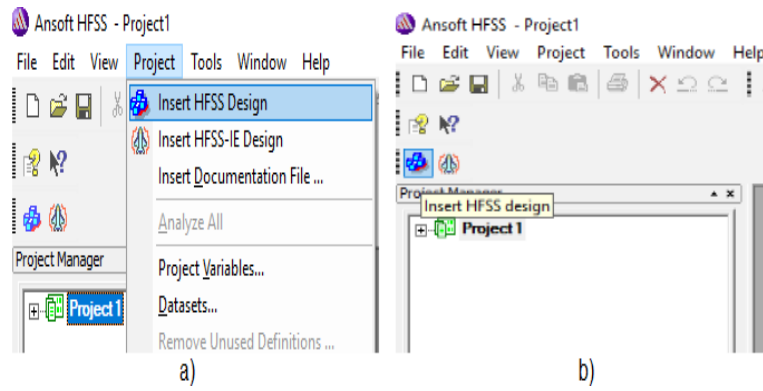


Figura 21. Crear un nuevo diseño de trabajo en HFSS.

Una vez que se ha creado un nuevo diseño (Fig. 29), estará listo para empezar a trabajar en la simulación del proyecto.

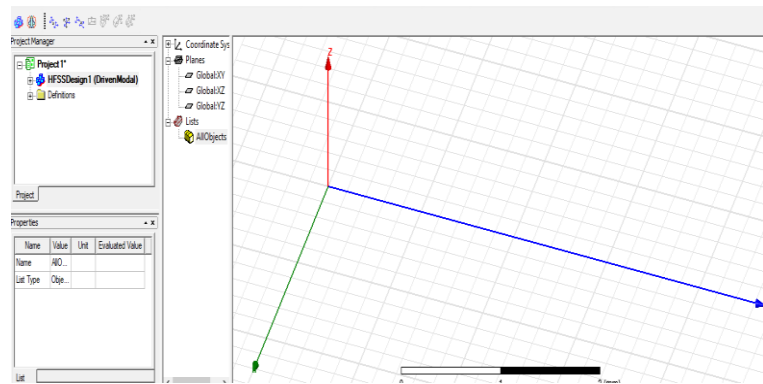


Figura 22. Nuevo diseño de trabajo en HFSS.

Capítulo 3. Desarrollo experimental y resultados

En el desarrollo experimental se realizó el diseño y la simulación para validar los parámetros de la antena microstrip; además, se diseñó el VCO MAX2750AUA, el cual sirve para ejemplificar la validez del sistema de comunicación que podrá implementarse en un futuro, tomando como fuente de alimentación de un módulo fotovoltaico y la antena microstrip, también se fabricó un PBC para la manipulación del VCO y así se pudieron validar las características para la implementación del módulo fotovoltaico.

3.1 Diseño de la antena microstrip

Para el diseño de la antena microstrip a 2.4 GHz, se utilizaron los siguientes programas.

a) Matlab 15. Este programa se utilizó para los cálculos del diseño de la antena microstrip (el punto de alimentación y las dimensiones del parche, sustrato y tierra, como se observa en el capítulo 2), así mismo se pudo lograr una verificación directa de la teoría con el simulador, el diseño de un algoritmo que únicamente le pide al usuario ingresar parámetros que solicita el software: frecuencia de resonancia de la antena, la velocidad de la luz, permitividad eléctrica o constante dieléctrica y el grosor del sustrato para calcular las dimensiones de la antena.

b) HFSS 13.0 es un programa es parte fundamental de la tesis, ya que nos permite realizar una simulación válida, como proceso anterior a la fabricación o inclusive como sustituto de la misma, debido a su cálculo aproximado a la experimentación basado en la teoría, podemos analizar el comportamiento de la misma en todos sus parámetros, cabe mencionar que actualmente es un programa aceptado por la comunidad científica en la elaboración de simulaciones para publicaciones internacionales arbitradas.

c) Características del sustrato Rogers RT/duroid 5880 (tm) [2]. Para esta tesis se eligió de manera arbitraria un sustrato "Rogers RT/duroid 5880 (tm)" y como forma de

alimentación, se optó por una línea de alimentación por medio del cable coaxial “PECX006” para ser conectado con el parche de la antena microstrip, algunas características obtenidas del datasheet, como se observa en la Fig. 23.

Product	Dielectric Constant, ϵ_r @ 10 GHz (Typical)		Dissipation Factor TAN δ @ 10 GHz (Typical)	Thermal ⁽²⁾ Coefficient of ϵ_r -50°C to 150°C ppm/°C (Typical)	Volume Resistivity Mohm · cm (Typical)	Surface Resistivity Mohm (Typical)	Water ⁽⁴⁾ Absorption D48/50 % (Typical)
	Process ⁽¹⁾	Design ⁽¹⁾					
RT/duroid 5880 PTFE RandomGlass Fiber	2.20 ± 0.02	2.20	0.0009	-125	2 X 10 ⁷	3 X 10 ⁷	0.02

Product	Standard Dielectric Thickness (Without The Cladding)	Available Claddings	Standard Panel Sizes
RT/duroid* 5870 RT/duroid 5880	0.005" (0.127mm) ± 0.0005" 0.010" (0.254mm) ± 0.0007" 0.015" (0.381mm) ± 0.0010" 0.020" (0.508mm) ± 0.0010" 0.031" (0.787mm) ± 0.0010" 0.062" (1.575mm) ± 0.0020" 0.125" (3.175mm) ± 0.0040" Non-Standard thicknesses available	¼", ½", 1, 2* oz (9, 18, 35, 70µm) ED ½", 1, 2* oz (18, 35, 70µm) Rolled Copper ½", 1, 2* oz (18, 35, 70µm) Reverse treated ½", 1 oz (18, 35µm) Ohmega resistive foil Thick metal Aluminum, Copper, Brass * Note: Please check with Rogers' Representative to confirm availability.	18" X 12" (457mm X 305mm) 18" X 24" (457mm X 610mm) Non-Standard size available up to 18" X 48" (457mm X 1219mm)

Figura 23. Características de Rogers RT/duroid 5880 (tm).

d) Características del cable coaxial PECX006 [3]. Para la simulación se eligió el Cable coaxial “PECX006”, que tiene como característica una frecuencia máxima de 62 GHz (Fig. 24), con la finalidad de poder usarlo en proyectos futuros a frecuencias mayores de 2.4 GHz.

Electrical Specifications				
Description	Minimum	Typical	Maximum	Units
Frequency Range	DC		62	GHz
Impedance		50 ± 2		Ohms
Velocity of Propagation		76.5		%

Mechanical Specifications	
Min. Bend Radius (Installation)	0.25 in [6.35 mm]

Construction Specifications		
Description	Material and Plating	Diameter
Inner Conductor	Copper, Silver, 1 Strands ASTM B-298	0.023 in [0.58 mm]
Conductor Type	Solid	
Dielectric	Microporous PTFE	0.066 in [1.68 mm]
Outer Conductor	Copper, Tin MIL-T-10727	0.087 in [2.21 mm]

Environmental Specifications	
Temperature Operating Range	-65 to +225 deg C

Figura 24. Características del cable coaxial PECX006.

En la Fig. 25 se observan las partes del cable coaxial (forro, malla, dieléctrico, vivo).

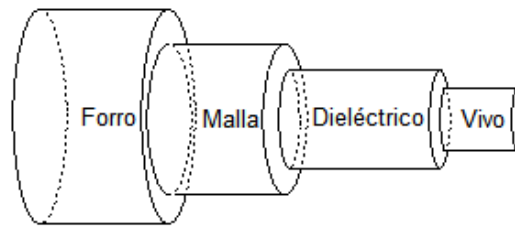


Figura 25. Partes del cable coaxial.

En la tabla 3, se muestra una tabla con características del cable coaxial PECX006 [3], obtenidas del datasheet.

Tabla 3. Características del cable coaxial.

Frecuencia Máxima	Diámetro del dieléctrico	Diámetro del vivo	Diámetro de la malla
62 GHz	1.68 mm	0.58 mm	2.21 mm

3.2 Primer intento

Inicialmente se procede a realizar la simulación de la antena microstrip, los cálculos se realizaron a mano, usando las ecuaciones números 27 hasta la 35, principalmente las ecuaciones 32 b) $L2=3L$ y 33 b) $W2=3W$, son las dimensiones del parche y realizando la simulación con HFSS, obtuvimos una frecuencia de resonancia que era próxima a la frecuencia de resonancia y una baja sensibilidad, se realizaron otros cálculos y simulaciones con diferentes sustratos obteniendo baja sensibilidad y unas frecuencia de resonancia cercanas a la frecuencia de resonancia. En la Fig. 26, 27 y 28 se observan algunas simulaciones como primer intento.

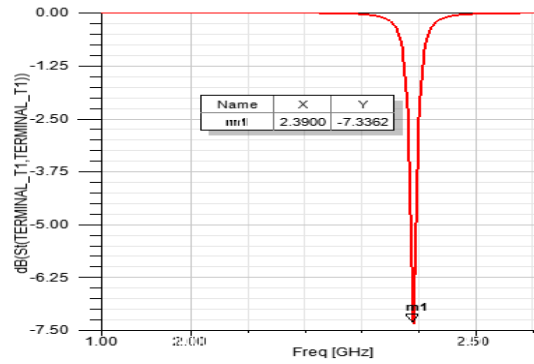


Figura 26. Rogers RT/duroid 5880 (tm), altura 0.127 mm, frecuencia 2.39 GHz, sensibilidad -7.33 dB.

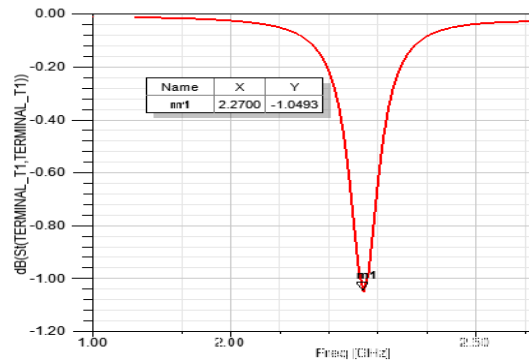


Figura 27. TM, altura 3.81 mm, frecuencia 2.27 GHz, sensibilidad -1.049 dB.

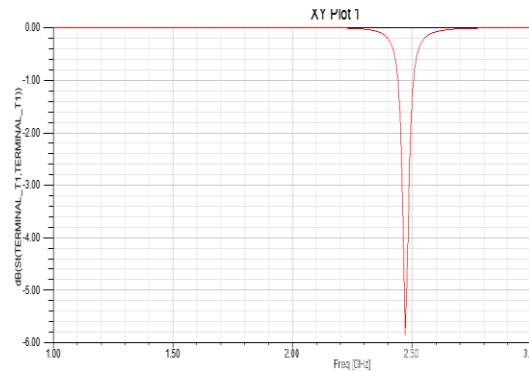


Figura 28. Rogers RT/duroid 5880 (tm), altura de 0.254 mm, frecuencia 2.49 GHz, atenuación -5.91 dB.

Debido a la baja sensibilidad obtenida por la antena, se hace uso del software Matlab para programar la antena microstrip y obtener mayor ganancia, ahorro de tiempo y precisión; con el propósito de que un usuario sea capaz de elegir entre cualquier sustrato y frecuencia deseable, entre otros parámetros para la simulación de la antena.

3.3 Programa de la antena microstrip en Matlab

Para hacer el programa debemos escribir las ecuaciones 27 a 35, principalmente las ecuaciones 32 a) $L1=6h+L$ y 33 a) $W1=6h+W$, como datos de entrada debemos ingresar: la frecuencia, la velocidad de la luz, la permitividad eléctrica, grosor del sustrato, el programa se encargará de dar las dimensiones del parche, sustrato y tierra, el punto de alimentación y la variación de dl, esta longitud es para poder ajustar la frecuencia de resonancia.

Como datos de entrada del programa: frecuencia de la antena, la velocidad de la luz, la permitividad eléctrica o constante dieléctrica del sustrato y el grosor, estos datos deben de estar en milímetros. El programa hará los cálculos con las ecuaciones 27 a 35 y mostrará las características de la antena en milímetros.

Para el presente proyecto, los datos de entrada del programa son:

- I. Frecuencia de la antena de 2.4 GHz.
- II. Velocidad de la luz 3×10^{11} [mm/s].
- III. Permitividad eléctrica o constante dieléctrica $\epsilon_r = 2.2$.
- IV. Grosor $h=0.127$ [mm].

Al ejecutar el programa hará los cálculos con las ecuaciones antes mencionadas y mostrará las características de la antena microstrip como: las dimensiones del parche, sustrato, tierra, alimentación o posición del cable coaxial, la variación del largo de la antena, centro del parche, sustrato y la tierra, la altura, landa y la permeabilidad relativa como se muestra en la Fig. 29.

```
Características de la antena microstrip Frecuencia de resonancia 2.4e+09 Hz
Longitud de onda 125.0 mm
Permeabilidad relativa efectiva de la antena, kref=2.19
Altura del sustrato, h= 0.127 mm
Ancho, Largo de la antena, (W,L)=(49.41, 42.09) en mm
Centro de la antena (x,y)=(24.71, 21.04) en mm
Variación de en el largo de la antena dl= 0.07 mm
Ancho y largo del sustrato y el plano de tierra (x,y)=(50.17, 42.85) en mm
Centro del sustrato y la tierra (x,y)=(25.09, 21.43) en mm
Posición del cable coaxial (x0,y0)=(0.00, 14.22) en mm
>>
```

Figura 29. Característica de la antena microstrip 2.4 GHz.

En Matlab permite editar el programa en una página web, se inserta la página web como se observa a continuación.

Información

```
%Universidad Autónoma de la Ciudad de México UACM

%LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE TELECOMUNICACIONES

%Tesis: DISEÑO DE UNA ANTENA MICROSTRIP PARA UNA FRECUENCIA DE 2.4 GHz Y

%SU POSIBLE IMPLEMENTACIÓN CON UN MÓDULO FOTOVOLTAICO

% TRABAJO RECEPCIONAL

%PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE TELECOMUNICACIONES

%Presenta

%Noe Granados Bermejo
```

Limpia memoria y pantalla

```
clear all %Elimina todo en memoria

clc %limpia la pantalla
```

Declaración de variables

```
%describir más los parámetros de la entrada

f=2.4e9; % Frecuencia en hertz [1/s]

kr=2.2; % Permitividad relativa del RT/Duroid 5880

h=0.127; % Espesor en cm del RT/Duroid 5880 [mm]

C=3e11; %Velocidad de la luz 3e10 [mm/s]
```

Cálculo de las dimensiones de la antena microstrip

```
landa=C/f; %Landa es la longitud de onda

W=(C/(2*f))*sqrt(2/(kr+1)); % Ancho de la antena en cm

kref=((kr+1)/2)+(((kr-1)/2)*(1+(12*(h/W))-1/2)); % Permitividad relativa efectiva

dl=h*0.412*(((kref+0.3)*(0.264+(W/h)))/((kref-0.258)*(0.8+(W/h)))); % Variación del largo de la
antena

Lef=C/(2*f*sqrt(kref)); % Longitud efectiva de la antena

L=Lef-2*dl; % Longitud real de la antena
```

Cálculo de las dimensiones del sustrato y la tierra

```
W1=6*h+W; % Ancho del sustrato

L1=6*h+L; % Largo del sustrato
```

Cálculo de de la posición del cable coaxial

```
x=W/2-W/2; % Posición en x de el coaxial

y=(L/(2*sqrt(kref))); % Posición en y de el coaxial
```

Despliega en pantalla las características de la antena microstrip

```
fprintf('Características de la antena microstrip')

fprintf('\tFrecuencia de resonancia %.1e Hz\n', f)

fprintf('\tLongitud de onda %.1f mm\n', landa)

fprintf('\tPermeabilidad relativa efectiva de la antena, kref=%.2f\n', kref)
```

```

fprintf('\tAltura del sustrato, h= %.3f mm\n', h)

fprintf('\tAncho, Largo de la antena, (W,L)=(%.2f, %.2f) en mm\n', round(W, 2), round(L, 2))

fprintf('\tCentro de la antena (x,y)=(%.2f, %.2f) en mm\n', round(W/2, 2), round(L/2, 2))

fprintf('\tVariación de en el largo de la antena dl= %.2f mm\n', round(dl, 2))

fprintf('\tAncho y largo del sustrato y el plano de tierra (x,y)=(%.2f, %.2f) en
mm\n', round(W1, 2), round(L1, 2))

fprintf('\tCentro del sustrato y la tierra (x,y)=(%.2f, %.2f) en mm\n', round(W1/2, 2), round(L1/2, 2))

fprintf('\tPosición del cable coaxial (x0,y0)=(%.2f, %.2f) en mm\n', round(x/2, 2), round(y, 2))

```

Características de la antena microstrip Frecuencia de resonancia 2.4e+09 Hz

Longitud de onda 125.0 mm

Permeabilidad relativa efectiva de la antena, kref=2.19

Altura del sustrato, h= 0.127 mm

Ancho, Largo de la antena, (W,L)=(49.41, 42.09) en mm

Centro de la antena (x,y)=(24.71, 21.04) en mm

Variación de en el largo de la antena dl= 0.07 mm

Ancho y largo del sustrato y el plano de tierra (x,y)=(50.17, 42.85) en mm

Centro del sustrato y la tierra (x,y)=(25.09, 21.43) en mm

Posición del cable coaxial (x0,y0)=(0.00, 14.22) en mm

Published with MATLAB® R2015a

A continuación se muestra el código para el cálculo de la antena microstrip.

```
%%
% *_Información*_
%Universidad Autónoma de la Ciudad de México UACM
%LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE TELECOMUNICACIONES
%Tesis: DISEÑO DE UNA ANTENA MICROSTRIP PARA UNA FRECUENCIA DE 2.4 GHz Y
%SU POSIBLE IMPLEMENTACIÓN CON UN MÓDULO FOTOVOLTAICO
%
% TRABAJO RECEPCIONAL
%PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS
Y DE TELECOMUNICACIONES
%Presenta
%Noe Granados Bermejo
%%

%%
% *_Limpia memoria y pantalla*_
clear all %Elimina todo en memoria
clc %limpia la pantalla
%%

%%
% *_Declaración de variables*_
%describir más los parámetros de la entrada
f=2.4e9; % Frecuencia en hertz [1/s]
kr=2.2; % Permitividad relativa del RT/Duroid 5880
h=0.127; % Espesor en cm del RT/Duroid 5880 [mm]
C=3e11; %Velocidad de la luz 3e10 [mm/s]
%%

%%
% *_Cálculo de las dimensiones de la antena microstrip*_
landa=C/f; %Landa es la longitud de onda
W=(C/(2*f))*sqrt(2/(kr+1)); % Ancho de la antena en cm
kref=((kr+1)/2)+(((kr-1)/2)*(1+(12*(h/W))-1/2)); % Permitividad relativa
efectiva
dl=h*0.412*(((kref+0.3)*(0.264+(W/h)))/((kref-0.258)*(0.8+(W/h)))); %
Variación del largo de la antena
Lef=C/(2*f*sqrt(kref)); % Longitud efectiva de la antena
L=Lef-2*dl; % Longitud real de la antena
%%

%%
% *_Cálculo de las dimensiones del sustrato y la tierra*_
Wl=6*h+W; % Ancho del sustrato
Ll=6*h+L; % Largo del sustrato
%%

%%
% *_Cálculo de la posición del cable coaxial*_
x=W/2-W/2; % Posición en x (alimentación coaxial)
y=(L/(2*sqrt(kref))); % Posición en y (alimentación coaxial)
%%

%%
% *_Despliega en pantalla las características de la antena microstrip*_
fprintf('Características de la antena microstrip')
```

```

fprintf('\tFrecuencia de resonancia %.1e Hz\n', f)
fprintf('\tLongitud de onda %.1f mm\n', lambda)
fprintf('\tPermeabilidad relativa efectiva de la antena, kref=%.2f\n',kref)
fprintf('\tAltura del sustrato, h= %.3f mm\n',h)
fprintf('\tAncho, Largo de la antena, (W,L)=(%.2f, %.2f) en mm\n',
round(W,2),round(L,2))
fprintf('\tCentro de la antena (x,y)=(%.2f, %.2f) en
mm\n',round(W/2,2),round(L/2,2))
fprintf('\tVariación de en el largo de la antena dl= %.2f mm\n',round(dl,2))
fprintf('\tAncho y largo del sustrato y el plano de tierra (x,y)=(%.2f,
%.2f) en mm\n',round(W1,2),round(L1,2))
fprintf('\tCentro del sustrato y la tierra (x,y)=(%.2f, %.2f) en
mm\n',round(W1/2,2),round(L1/2,2))
fprintf('\tPosición del cable coaxial (x0,y0)=(%.2f, %.2f) en
mm\n',round(x/2,2),round(y,2))
%%

```

En la tabla 4, se observan dimensiones de la antena microstrip calculado anteriormente con el programa de Matlab.

Tabla 4. Dimensiones de la antena microstrip 2.4 GHz.

Altura del sustrato	0.127 mm
Ancho y largo de la antena	(49.41 mm, 42.09 mm)
Centro de la antena	(24.71 mm, 21.04 mm)
Variación de la antena	0.07 mm
Ancho y largo del sustrato y la tierra	(50.17 mm, 42.85 mm)
Centro de ancho y largo del sustrato y la tierra	(25.09 mm, 22.43 mm)
Alimentación	(0.00 mm, 14.22 mm)

3.4 Diseño de la antena microstrip 2.4 GHz en HFSS

Para la simulación de la antena microstrip se utilizó HFSS 13.00 y los resultados del programa de la antena microstrip o las dimensiones que están en la tabla 4. Las partes de la antena son: sustrato, parche, tierra, alimentación por cable coaxial (en el caso de la alimentación tenemos que hacer el cable como: la terminal, vivo y el dieléctrico) y al final se hará el radiador.

I. Sustrato

En la Fig. 30 a) se escribieron las dimensiones del sustrato tomadas de la tabla de dimensiones de la antena microstrip y en la Fig. 30 b) se cambió las propiedades del sustrato, modificando el nombre a sustrato y el tipo de material a Rogers RT/duroid 5880 (tm).

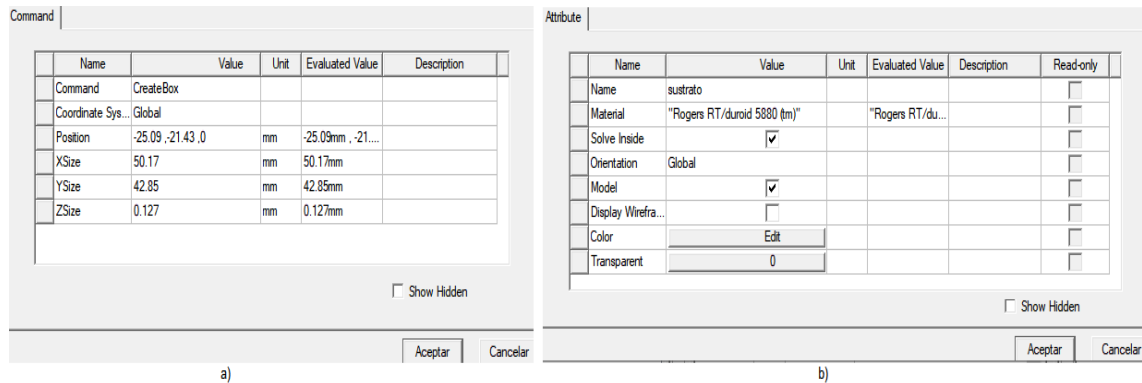


Figura 30. a) Dimensiones del sustrato. y b) Propiedades del sustrato

II. Parche

En la Fig. 31 a) se escribieron las dimensiones del parche y en la Fig. 31 b) se modificó las propiedades del parche, cambiando el nombre a parche y el color

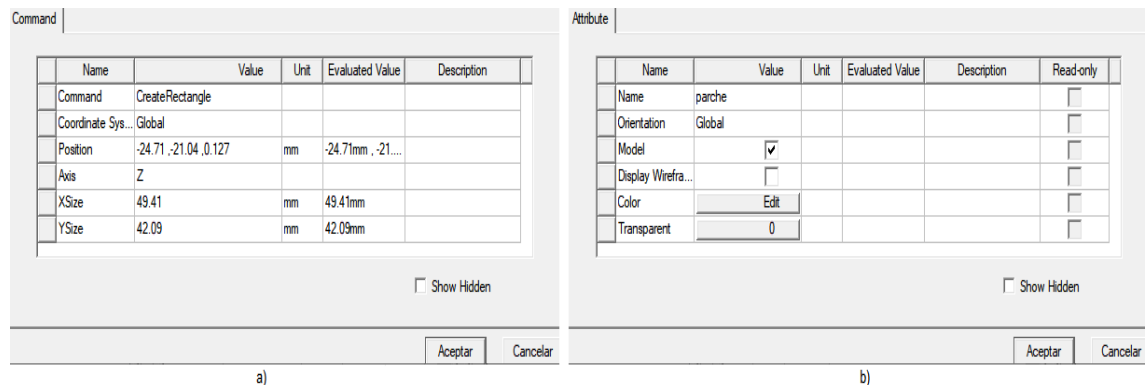


Figura 31. a) Dimensiones del parche. y b) Propiedades del parche.

III. Tierra

En la Fig. 32 a) se escribieron las dimensiones de la tierra y en la Fig. 32 b) se modificó las propiedades de la tierra, cambiando el nombre a tierra y variando el color.

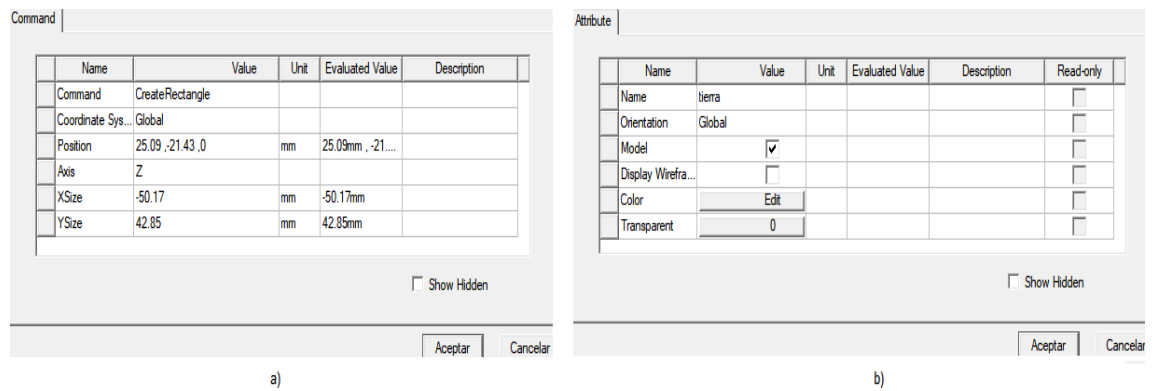


Figura 32. a) Dimensiones de la tierra. b) Propiedades de la tierra.

IV. Alimentación

En el caso de la alimentación sólo localizamos la conexión entre el cable coaxial con la antena microstrip, como se observa en la Fig. 33.

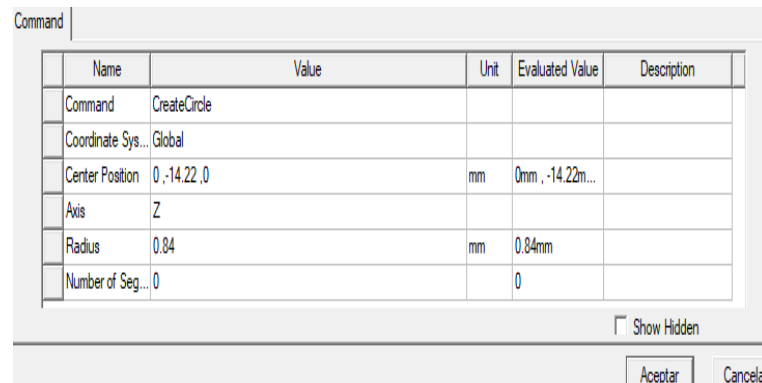


Figura 33. Dimensiones de la alimentación.

V. Coaxial

En el caso del cable coaxial se tiene que hacer varios elementos: vivo (es un solo elemento que se encuentra en dos lugares diferentes, uno es el que está dentro de la antena y se conecta al parche “vivo”, el siguiente es el que está fuera de ella “vivo1”), dieléctrico (es el material aislante) y la terminal (es el punto de conexión hacia otros dispositivos).

En la Fig. 34 a) se escribieron la localización del vivo y en la Fig. 34 b) se modificaron las propiedades del vivo, cambiando el nombre a vivo, tipo de material a pec (Perfect Electric Conductor o que sea un conductor eléctrico).

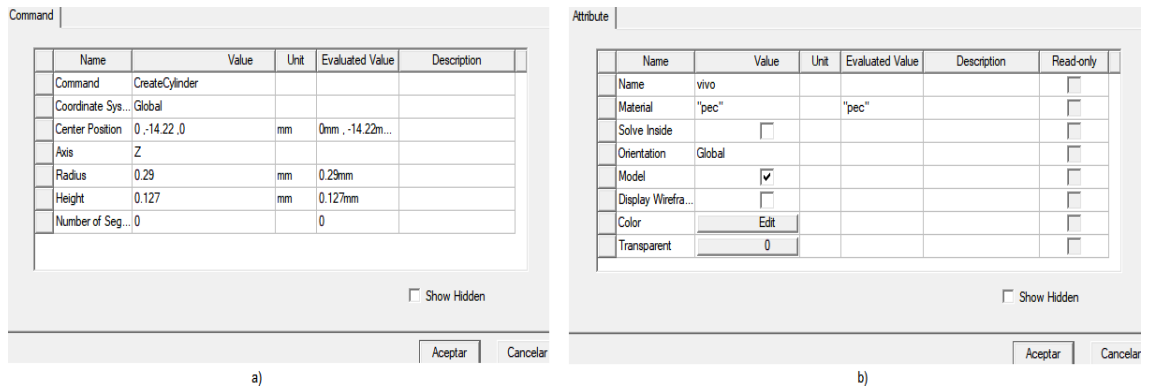


Figura 34. a) Dimensiones del vivo. y b) Propiedades de vivo.

En la Fig. 35 a) se escribieron la localización del vivo1 y en la Fig. 35 b) se modificaron las propiedades del vivo1, se varió el nombre a vivo1, tipo de material a pec.

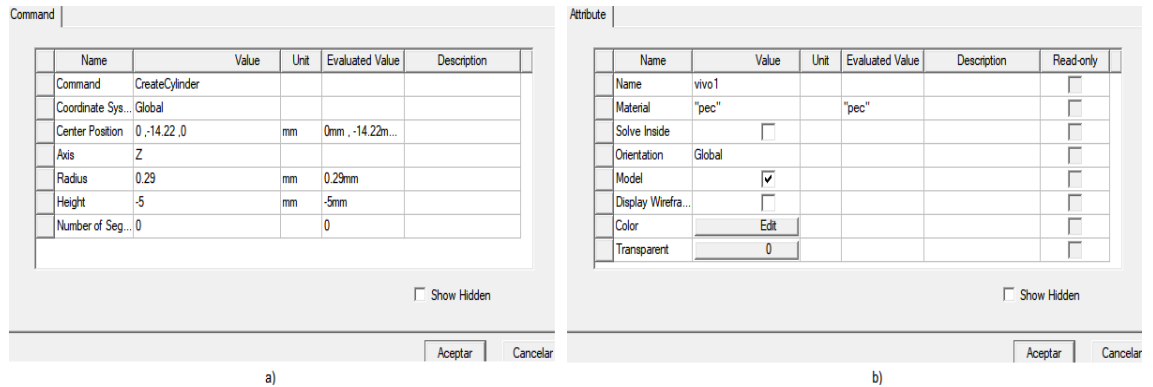


Figura 35. Dimensiones de vivo1. y b) Propiedades de vivo1.

En la Fig. 36 se muestran las características de la terminal para la conexión, ejecutar las pruebas y la conexión hacia otros dispositivos

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateCircle			
Coordinate Sys...	Global			
Center Position	0 -14.22 -5	mm	0mm , -14.22m...	
Axis	Z			
Radius	0.84	mm	0.84mm	
Number of Seg...	0		0	

Show Hidden

Aceptar Cancelar

Figura 36. Dimensiones de la terminal.

VI. Radiador

Es diseñado para observar el comportamiento de la antena microstrip, en la Fig. 37 a) se escribió las dimensiones del radiador y en la Fig. 37 b) se rectificó las propiedades del radiador, cambiado el nombre a radiador, el tipo de material que es el aire y la transparencia del material a cero.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateBox			
Coordinate Sys...	Global			
Position	25.09 -21.43 0.127	mm	25.09mm , -21...	
XSize	-50.17	mm	-50.17mm	
YSize	42.85	mm	42.85mm	
ZSize	40	mm	40mm	

Show Hidden

Aceptar Cancelar

a)

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Name	radia				<input type="checkbox"/>
Material	"air"		"air"		<input type="checkbox"/>
Solve Inside	<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>
Orientation	Global				<input type="checkbox"/>
Model	<input checked="" type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>
Display Wirefra...	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>
Color	Edit				<input type="checkbox"/>
Transparent	0				<input type="checkbox"/>

Show Hidden

Aceptar Cancelar

b)

Figura 37. a) Dimensiones del radiador. y b) Propiedades del radiador.

3.5 Simulación de la antena microstrip de 2.4 GHz

Una vez realizado el diseño de la antena microstrip 2.4 GHz, se muestran tres imágenes de la misma antena, en la Fig. 38 a) se muestra la antena ¿Vista de lado?, observando el radiador (rectángulo transparente) y el parche, en la Fig. 38 b) se ve solo el parche (rectángulo de color amarillo), un punto para la conexión con el parche

y el cable coaxial (vivo), en la Fig. 38 c) se expone la parte inferior la tierra (rectángulo color verde) y el cable coaxial (terminal).

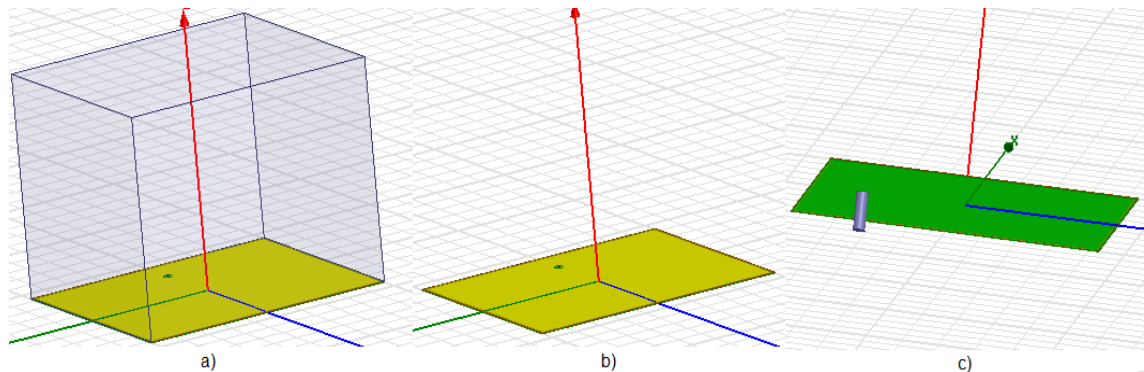


Figura 38. Antena microstrip.

I. Resultados de la simulación de la antena microstrip

Los resultados son producidos por el coeficiente de reflexión “S₁₁”.

Como primer paso, en la simulación en HFSS: se obtiene una frecuencia de resonancia 2.35 GHz y una sensibilidad de -21.75 dB (Fig. 39).

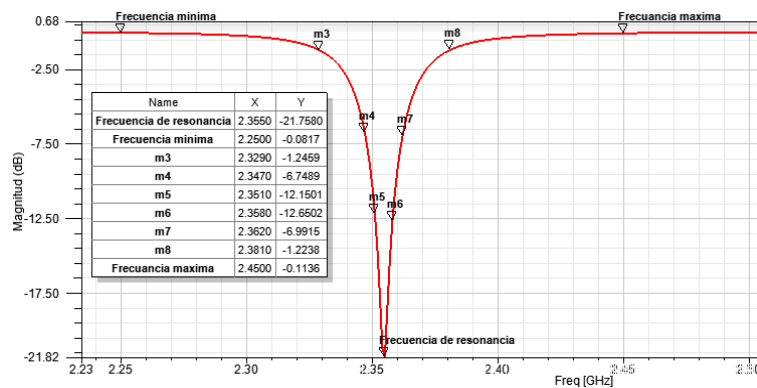


Figura 39. Frecuencia de resonancia 2.355 GHz.

Como la sensibilidad de la antena microstrip es muy pequeña, se prosiguió a la modificación el largo del parche de ± 0.07 mm y el ancho para ajustar una frecuencia de operación de 2.4 GHz, esta variación se presenta en la tabla 5 y también se muestra en la Fig. 40.

Tabla 5. Modificación de la antena microstrip 2.4 GHz.

Altura del sustrato	0.127 mm
Ancho y largo de la antena	(49.4 mm, 41.6 mm)
Centro de la antena	(24.71 mm, 21.04 mm)
Variación de la antena	0.07 mm
Ancho y largo del sustrato y la tierra	(50.17 mm, 42.85 mm)
Centro de ancho y largo del sustrato y la tierra	(25.09 mm, 22.43 mm)
Alimentación	(0.0 mm, 14.22 mm)

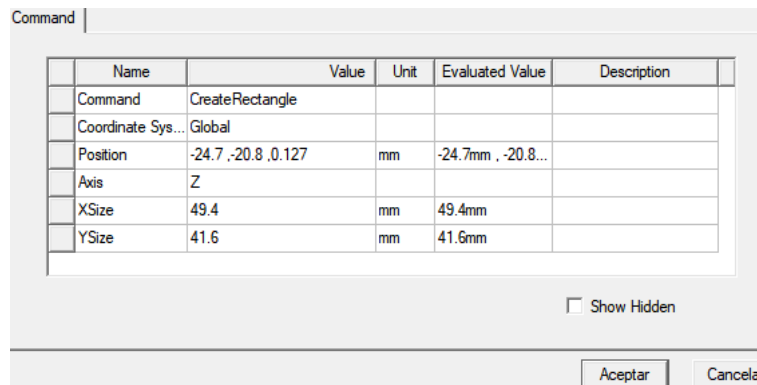


Figura 40. Modificación de las dimensiones del parche.

Realizando las modificaciones con los valores de la tabla 5 y la simulación en HFSS: obtenemos una frecuencia de resonancia de 2.4 GHz con una sensibilidad de -23.18 dB y un ancho de banda de 38 MHz (frecuencia mínima de 2.381 GHz y una frecuencia máxima de 2.419 GHz), como se observa en la Fig. 41.

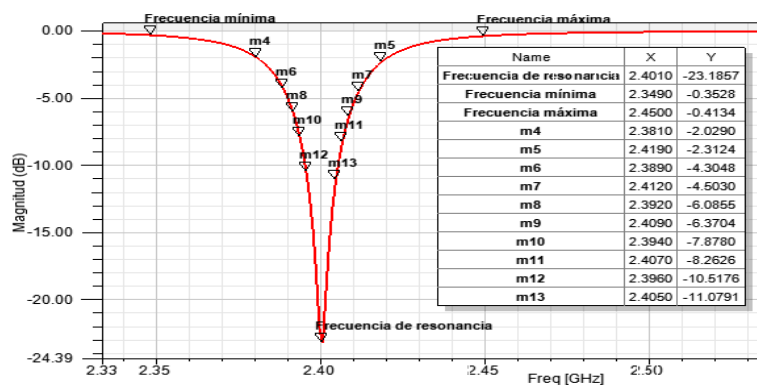


Figura 41. Frecuencia de resonancia 2.4 GHz.

En la tabla 6, se observan valores cercanos a la frecuencia de resonancia, estas se usan para determinar el ancho de banda que tiene la antena, el ancho de banda es de 38 MHz, este ancho de banda puede ser más pequeño si se toman frecuencias más cercanas a la frecuencia de resonancia.

Tabla 6. Frecuencia y atenuación de la antena microstrip.

	Frecuencia	Atenuación
Frecuencia de resonancia	2.401	-23.1857
Frecuencia mínima m4	2.381	-2.029
Frecuencia máxima m5	2.419	-2.3124
m6	2.389	-4.3048
m7	2.412	-4.503
m8	2.392	-6.0855
m9	2.409	-6.3704
m10	2.394	-7.878
m11	2.407	-8.2626
m12	2.396	-10.5176
m13	2.405	-11.0791

II. Campo eléctrico y el Vector del campo eléctrico

En la Fig. 42 a) se observa la distribución del campo eléctrico (el cual, tiene menor concentración en el centro y como se va alejando, éste va incrementando su intensidad del campo eléctrico). En la Fig. 42 b), es posible asimilar el comportamiento del vector eléctrico (es menor en el centro, como se va alejando, va incrementando la intensidad del campo eléctrico).

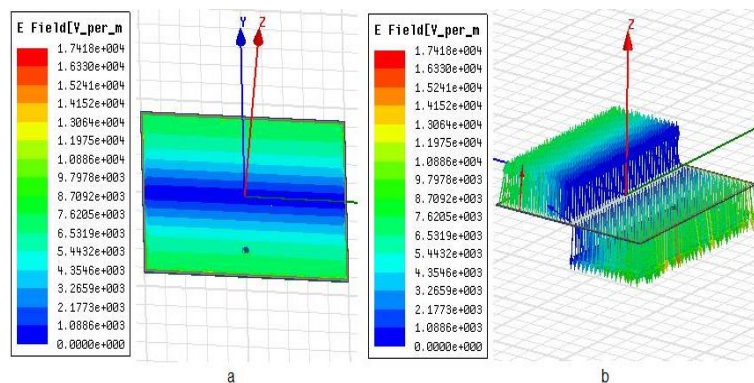


Figura 42. a) Campo eléctrico y b) Vector del Campo eléctrico.

III. Campo magnético y el vector del campo magnético

En la Fig. 43 a) se observa la distribución del campo magnético (éste tiene mayor concentración en el centro, como se va alejando, va disminuyendo la intensidad del campo magnético). En la Fig. 43 b) se muestra el comportamiento del vector campo magnético (es mayor en el centro, como se va alejando del centro, va decreciendo la intensidad del campo magnético).

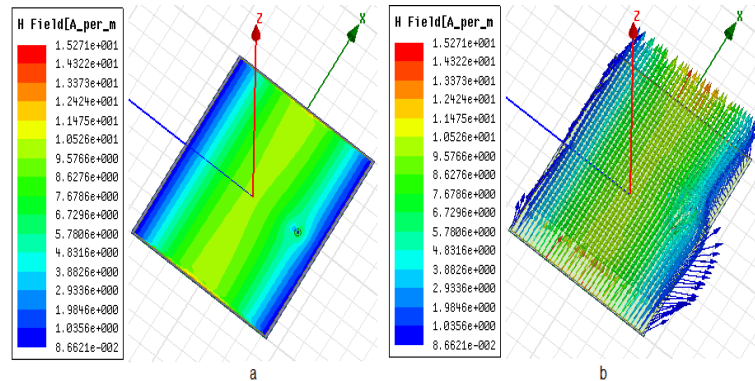


Figura 43. a) Campo magnético y b) Vector de campo magnético.

IV. Patrón de radiación eléctrico y magnético

El patrón o diagrama de radiación de una antena, está en función de la radiación en las diferentes direcciones y cuenta con dos diferentes diagramas.

1. Diagrama de radiación en 2D como: en la Fig. 44 a) se observa el comportamiento del patrón de radiación eléctrico y en la Fig. 44 b) el comportamiento del patrón de radiación magnético, teniendo una ganancia de 15 dB y la máxima directividad está en el rango de -60° a 60° , para ambos tipos de radiación.

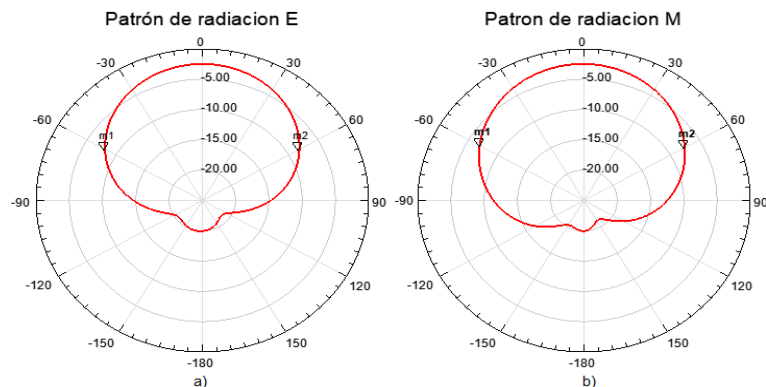


Figura 44. Patrón de radiación eléctrico y b) Patrón de radiación magnético.

2. Diagrama de radiación en 3D, es la combinación del patrón de radiación electro y magnético, en donde la máxima radiación se observa en la parte superior en color rojo y va disminuyendo al acercarse al origen, se ve en la Fig. 45.

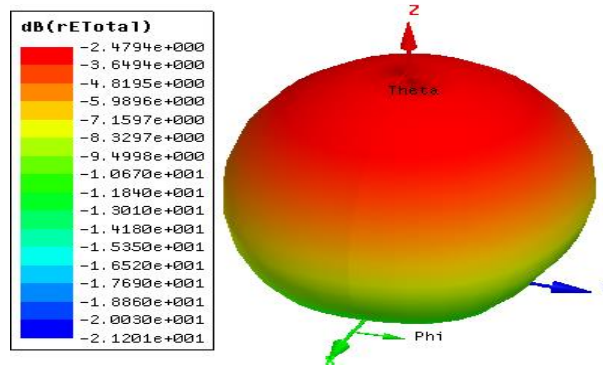


Figura 45. Patrón de radiación en 3D.

V. Carta de Smith

La Carta de Smith fue por Phillip Smith en el año de 1930 en los laboratorios BELL [8], quien realizó un método más fácil para resolver además de incorporar otras escalas para el diseño de circuitos en R.F., tales como, la relación de onda estacionaria, el coeficiente de reflexión y las pérdidas de transmisión a lo largo de la línea de transmisión. Además, es una herramienta gráfica usada para relacionar un coeficiente de reflexión complejo con una impedancia compleja.

La carta de Smith es una gráfica que nos permite hacer cálculos sencillos para obtener la impedancia, el coeficiente de reflexión en la línea de alimentación, anteriormente se realizaban operaciones con números complejos, en la actualidad las operaciones se efectúan con las computadoras, este proceso se caracteriza por ser más eficiente y fácil, además de que disminuye el tiempo de elaboración.

En la Fig. 46, se muestra la carta de Smith y obtenemos: la frecuencia de 2.4 GHz, impedancia de $8.7627 + j23.9431 \Omega$, coeficiente de reflexión de $\Gamma = 0.9734$ y las pérdidas de retorno 4.2196, estos datos nos permiten hacer el acoplamiento con una línea de transmisión.

Smith antenna microstrip 2.4 GHz

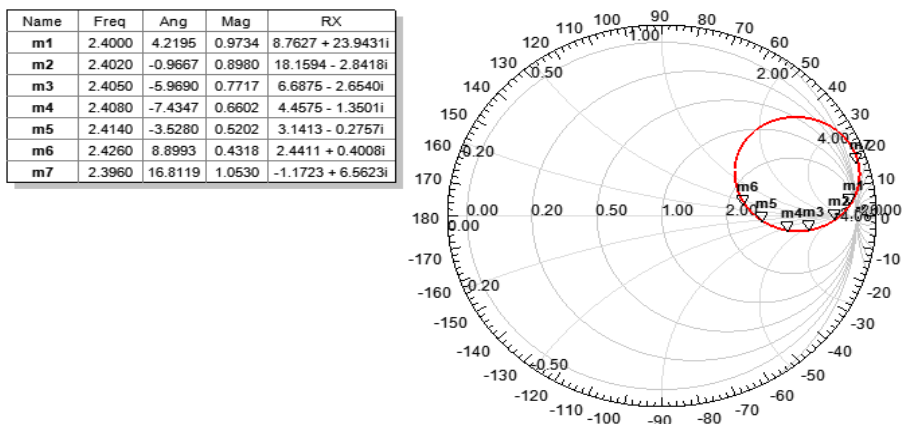


Figura 46. Carta de Smith.

En la tabla 7, se muestran otros parámetros: como: impedancias, frecuencias, coeficiente de reflexión y pérdidas de retorno, estos datos nos sirven para hacer el acoplamiento con una línea de alimentación

Tabla 7. Puntos de impedancia.

name	Frecuencia	Angulo	Magnitud	Rx
m1	2.4	4.2195	0.9734	8.7627 + j23.9431
m2	2.402	-0.9667	0.898	18.1594 - j2.8418
m3	2.405	-5.969	0.7717	6.6875 - j2.654
m4	2.408	-7.4347	0.6602	4.4575 - j1.3501
m5	2.414	-3.528	0.5202	3.1413 - j0.2757
m6	2.426	8.8993	0.4318	2.4411 + j0.4008
m7	2.396	16.8119	1.053	-1.1723 + j6.5623

3.5 Diseño del VCO MAX2750AUA

Para el diseño del Circuito Oscilador Controlado por Voltaje MAX2750AUA (Fig. 47), se utilizó porque es posible realizar la conversión de una señal de DC, este voltaje es el que proviene de la celda fotovoltaica el cual cambia a una señal variable y es la que se utiliza en el sistema de comunicación el cual nos permite ajustar la frecuencia de resonancia a 2.4 GHz, siendo la misma frecuencia que opera nuestra antena microstrip.

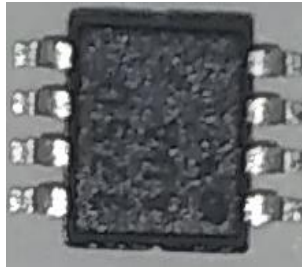


Figura 47. CI MAX2750AUA.

La configuración del VCO MAX2750AUA [15], se obtuvo a partir del datasheet, tiene un rango de frecuencia de 3.37 a 2.47 GHz, en la Fig. 48 se enseña el circuito oscilador controlado por voltaje.

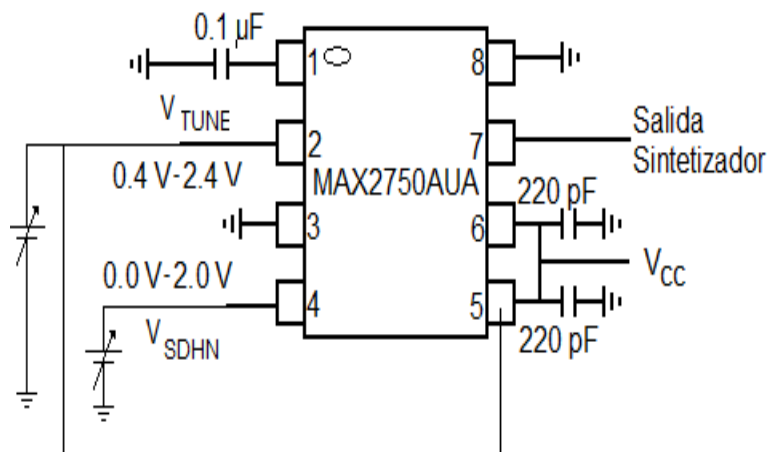


Figura 48. Circuito VCO.

En la Fig. 49, se observa el diseño de dos divisores de voltaje (en sustitución de las fuentes de voltajes para poder ajustar la frecuencia a 2.4 GHz), usando el voltaje de 12 V es el que nos proporciona la celda solar.

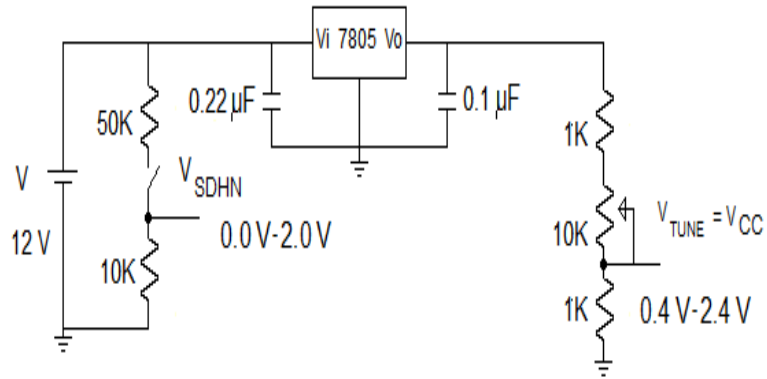


Figura 49. Divisor de voltaje.

En la tabla 8, se observa las características del VCO (de cada uno de los pines), estos datos son obtenidos del datasheet.

Tabla 8. Características del MAX2750AUA.

PIN	Nombre	Función
1	BYP	Se conecta un capacitor de 0.1 μ F .
2	TUNE	Entrada de voltaje de sintonización
3	GND	Conexión a tierra para el oscilador y polarización.
4	SHDN	Entrada lógica, habilita y deshabilita el dispositivo.
5	Vcc1	Se conecta un capacitor de 220 pF, para obtener un rendimiento de bajo ruido.
6	Vcc2	Se conecta un capacitor de 220 pF, para obtener el mejor rendimiento de alta frecuencia.
7	OUT	Salida del oscilador.
8	GND	Conexión a tierra para el buffer de salida.

En la tabla 9 se observan el análisis en CD y AC y el valor máximo del VCO.

Tabla 9. Análisis en CD, AC y Valor máximo.

	DC	AC	Valor máximo
V _{cc}	2.7V - 5.5V (común 3V)	2.7V - 5.5V (común 3V)	-0.3V a 6V
TUNE	0.4V a 2.4V	0.4V a 2.4V	V _{cc} + 0.3V
SHDN	Bajo 0.4V, Alto 2V		V _{cc} + 0.3V
BYP			V _{cc} + 0.3V
OUT	50 Ω	50 Ω	V _{cc} + 0.3V

En la Figura 50, se observa el circuito del VCO acoplado con los divisores de voltaje, V_{SDHN} es al voltaje que habilita o deshabilita al VCO y V_{TUNE} puede operar en un voltaje de 0.4 a 2.24 V para ajustar una frecuencia de resonancia a 2.4 GHz., este mismo valor tiene V_{cc}.

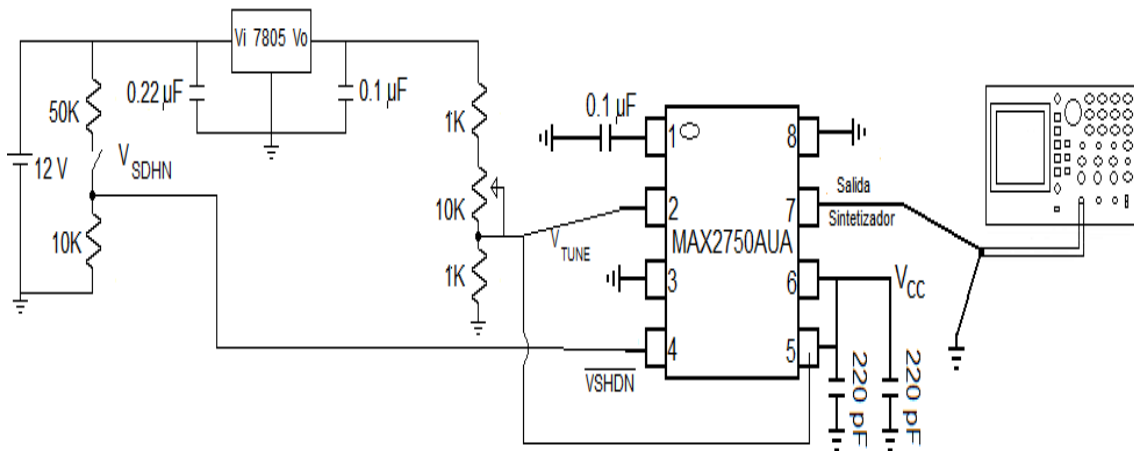


Figura 50. Circuito VCO I.

- **PCB MAX2750AUA**

Como una opción de usar el Oscilador Controlado por Voltaje MAX2750AUA, porque tiene como característica hacer el ajuste a una frecuencia de 2.4 GHz, en este circuito integrado no es posible hacer su simulación con Proteus, Multisim,

PSpice (ORCAD) y la implementación, derivado de las condiciones de la pandemia por COVID-19 y por no contar con instrumentos para hacer el soldado de montaje superficial e instrumentos de medición, sin embargo se realizó el PCB MAX2750AUA como se observa en la Fig. 51, el diseño del PCB se utilizó el software Proteus.

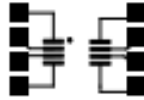


Figura 51. PCB MAX2750AUA.

En la Fig. 52 a) se observa el circuito VCO MAX2750AUA, teniendo las fuentes de voltaje y en la Fig. 52 b) se observa el circuito VCO con los divisores de voltaje para ajustar la frecuencia a 2.4 GHz.

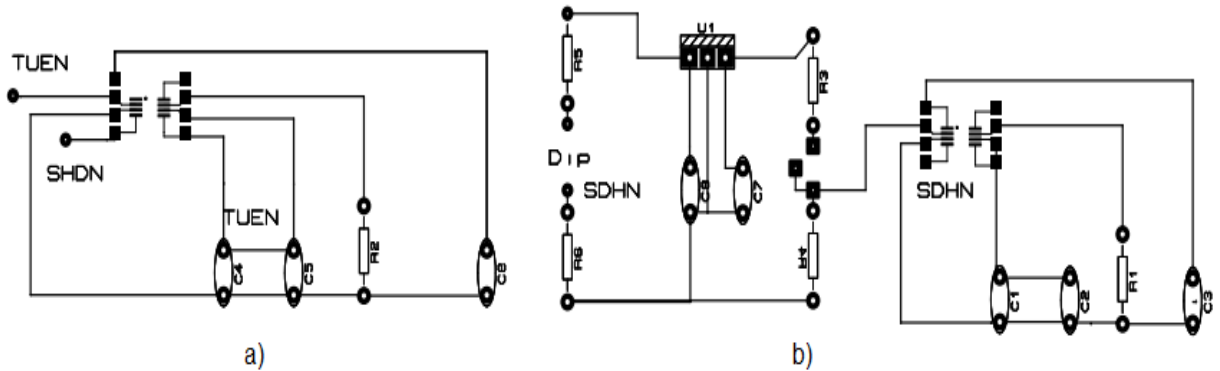


Figura 52. PCB del circuito VCO.

3.6 Módulo fotovoltaico

Un módulo fotovoltaico está formado por un conjunto de celdas fotovoltaicas interconectadas, las celdas transforman la energía proveniente del sol en forma de una corriente continua.

Características

El módulo fotovoltaico es de silicio policristalino Si-p, con dimensiones de 9.5 x 9.5 cm ($A=88 \text{ cm}^2$). Sus parámetros fotovoltaicos se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Parámetros del módulo fotovoltaico.

$V_{ca}(V)$	I_{cc} (mA)	J_{cc} (mA/cm ²)	I_{max} (mA)	V_{max} (V)	P_{max} (mW)	Factor de llenado	Eficiencia fotovoltaica (%)
8.6	122	1.4	94	5.9	554	53	6.3

En la Fig. 53, se observa la curva de corriente vs. voltaje (I vs. V), fue obtenida en un simulador solar certificado Oriel Newport clase AAA, en el Laboratorio de Ciencias y Tecnología Sustentable bajo Condiciones Estándares de Medición (STC – Standard Test Conditions, AM1.5, $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ y una Irradiancia de 100 mW/cm^2).

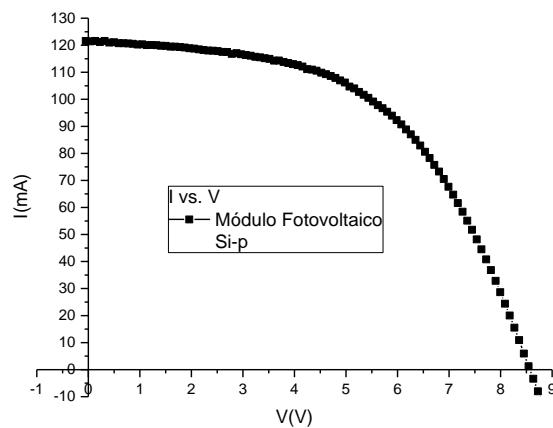


Figura 53. Curva de corriente vs. voltaje.

3.6 Trabajo alternativo

A partir del trabajo SOLAR CELL ANTENNAS IN WIRELESS COMMUNICATION AND RADIO BROADCAST SYSTEMS [16], describe la aplicación de celdas solares o módulos fotovoltaicos en antena plana, donde el parche es sustituido por el módulo fotovoltaico, además incorpora antenas microstrip de apertura, este acoplamiento hace que la celda solar puede transmitir y recibir ondas electromagnéticas siendo una nueva aplicación en las comunicaciones inalámbricas, otros documentos que usan el SOLANPLAN [1, 2].

La Antena Solar Plana “SOLPLANT” (es una patente de Alemania, Europa, Japón y USA), tiene un módulo fotovoltaico, una placa fenólica como tierra, Terminal DC y antena microstrip (U_{RF}) como se observa en la Fig. 54.

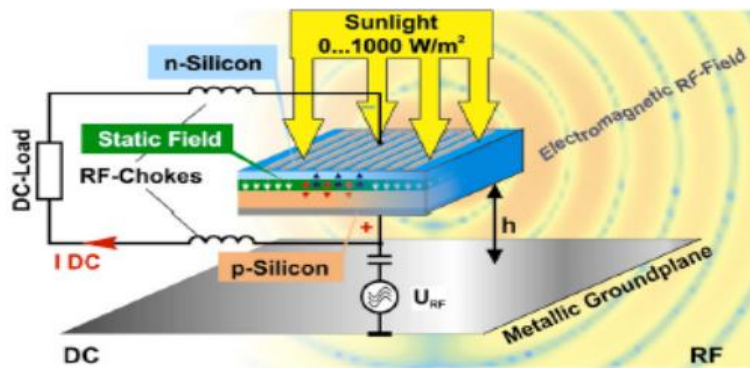


Figura 54. Radiación electromagnética y Generador de corriente DC.

En la Fig. 55, se observa el prototipo del SOLPLANT, en ella se observa el módulo fotovoltaico, una antena microstrip de apertura con una terminal, un reflector (tierra).

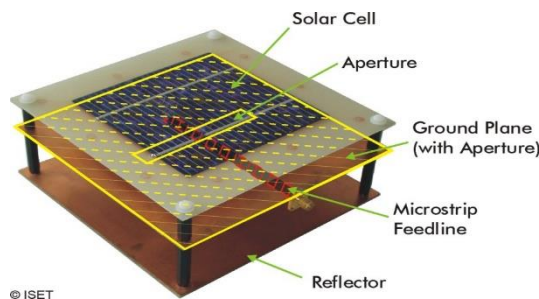


Figura 55. Prototipo SOLPLANT.

En la Fig. 56 a) se observa un prototipo del SOLPLANT (antena GSM “Sistema Global para las Comunicaciones Móviles”) y en la Fig. 61 b) el patrón de radiación de de la antena GSM.

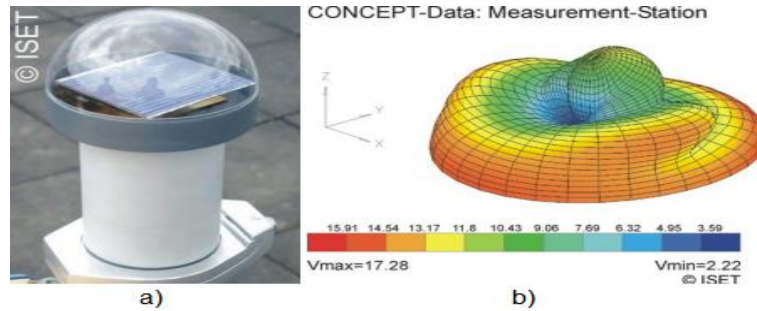


Figura 56. a) Antena GSM. y b) Patrón de radiación.

En la Fig. 57, se observa una gráfica del monitoreo de la carga entre 7.5V y 8.25V y descarga de la batería (en la parte superior es la carga de la batería y en la parte inferior la descarga de la batería).

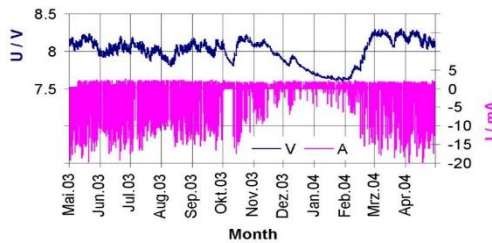


Figura 57. Medición de carga y descarga de la batería

En la Fig. 58, se observa el patrón de radiación de la Antena Solar Plana (Antena GPS “Sistema de Posición Global), este usa por lo menos cuatro satélites para conocer su posición.

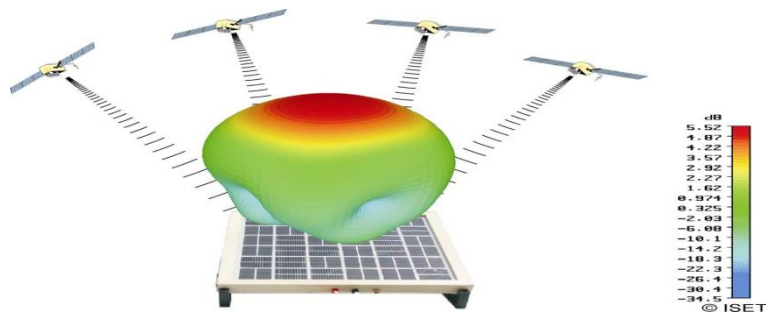


Figura 58. Patrón de radiación Antena GPS.

En la Fig. 59, observamos la una aplicación de Antena GPS: el ventilador simula un carro y observamos un dispositivo visual de GPS. Las bandas de GSM 900 y GSM 1800.



Figura 59. Antena GPS.

En la Fig. 60, se observa una Antena receptora Saté debate Digital Worldspace (es un equipo de receptor saté debate de material educativo de Woldspace), los saté debates distribuyen el material educativo: África, Asia, la mayor parte de América y partes de Europa incluyendo Alemania. El rango de frecuencia de recepción es de 1453,384 a 1490,644 MHz con una polarización circular y si desean transmitir al transpondedor se hace entre las frecuencia de 12 a 14 GHz.



Figura 60. Receptor satelital.

Para obtener el circuito equivalente usamos el trabajo de Patch Antenna based on a Photovoltaic Cell with a Dual resonance Frequency [17], porque tiene el circuito equivalente del módulo fotovoltaico con la antena microstrip (Fig. 61).

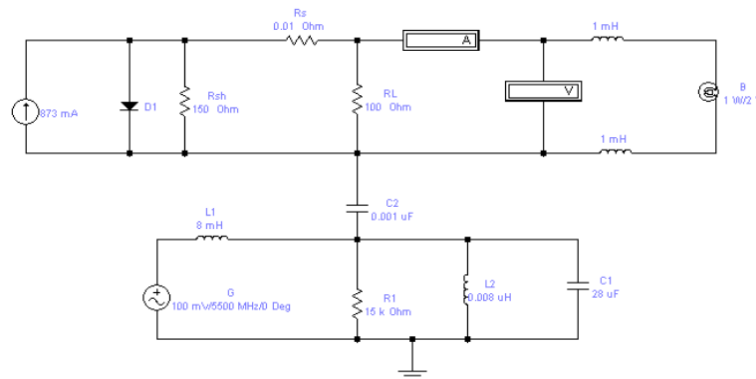


Figura 61. Circuito equivalente de la antena solar [17].

En la Fig. 62, se describe el circuito equivalente de la Antena Solar, donde observamos el circuito equivalente del módulo fotovoltaico, terminal CD o voltaje del módulo fotovoltaico, y el circuito equivalente de la antena microstrip (circuito tanque).

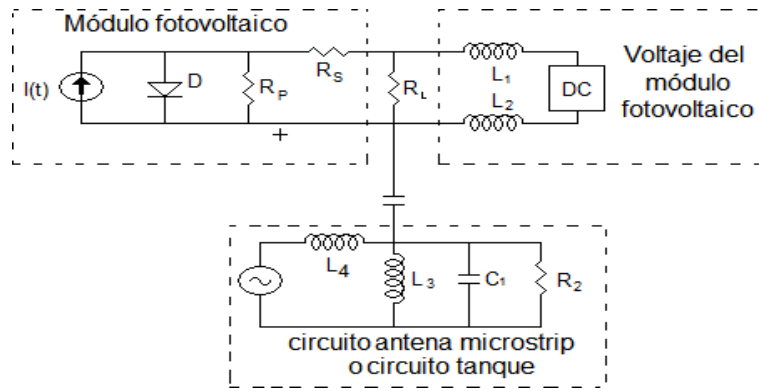


Figura 62. Descripción del circuito equivalente de la Antena Solar.

Para poder hacer un primer acercamiento con la Antena Solar debemos de hacer un circuito tanque, la terminal del voltaje del módulo fotovoltaico y el módulo fotovoltaico. Realizamos el circuito tanque el circuito tanque (Ec. 36), usando un capacitor de 3.3 μF y un inductor de 8.1 μH la frecuencia que oscila es de 30.78 KHz (Ec. 37).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}} \quad (\text{Ec. 36})$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{8.1 \times 10^{-6} * 1 \times 10^{-6}}} = 30.78 \text{ [kHz]} \quad (\text{Ec. 37})$$

El valor del inductor L1 y L2 tiene un valor de 1 mH, y L4 tiene un valor de 3.3 μF . La placa fenólica se usó como tierra de la Antena Solar como se observa en la Fig. 54. En la Fig. 63, se observa el prototipo de la Antena Solar formada por el circuito oscilador y el módulo fotovoltaico.



Figura 63. Prototipo de la Antena Solar.

Se realizaron varias mediciones en diferentes días:

1.- Día 30 de noviembre del 2018 se usó una placa fenólica de 30X30 cm, en la Fig. 64 se observan las frecuencias recibidas.

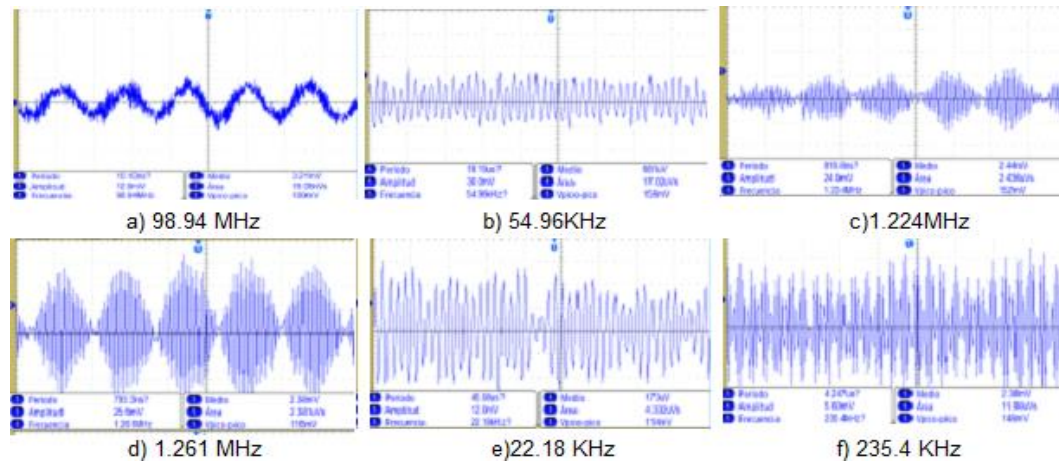


Figura 64. Frecuencia del 30 de noviembre del 2018.

En la tabla 11, se observa algunas mediciones de frecuencias y el voltaje de la señal recibida, se observa un rango de frecuencia entre 22.18 kHz a 98.94 MHz. La frecuencia es de 30.78 kHz. No se obtuvo en la medición, pero está dentro del rango de la frecuencia.

Tabla 11. Frecuencia del 30 de noviembre del 2018.

Frecuencia	Amplitud (V _{pico-pico})	Frecuencia	Amplitud (V _{pico-pico})
98.94 Mhz	12.0 mV	214.20 kHz	54.4 mV
222.40 kHz	10.4 mV	305.80 kHz	162.0 mV
54.96 kHz	10.4 mV	1.22 MHz	152.0 mV
1.26 MHz	36.0 mV	22.18 kHz	12.0 mV
23.47 MHz	164.0 mV	1.22 MHz	24.0 mV

2.- Día 3 de diciembre del 2018 se usó una placa fenólica de 20X20 cm, en la Fig. 65 se observan las frecuencias recibidas.

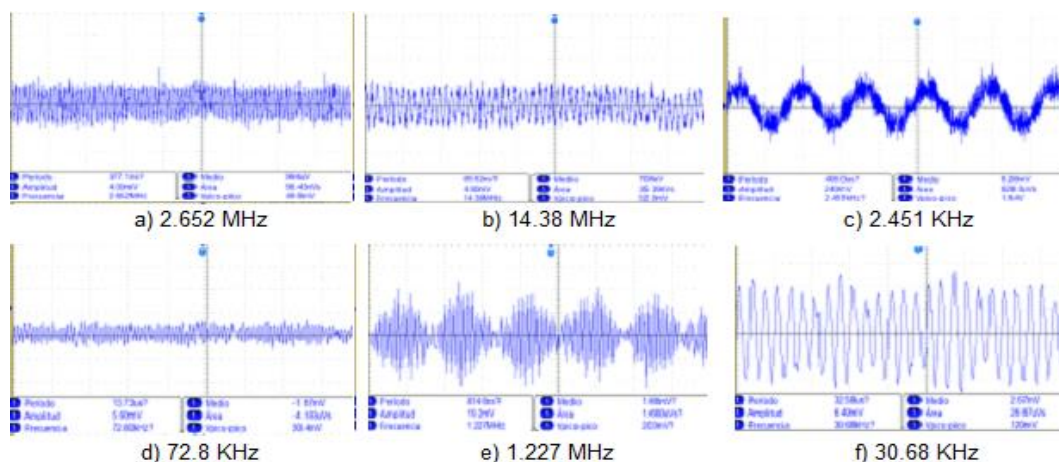


Figura 65. Frecuencia del 3 de diciembre del 2018.

En la Tabla 12, se observa algunas mediciones de frecuencias y el voltaje de la señal recibida, se observa un rango de frecuencia entre 10.01 kHz a 2.65 MHz, como en el caso anterior no se obtuvo la frecuencia de 30.78 kHz, pero está dentro del rango de frecuencia.

Tabla 12. Frecuencia del 3 de diciembre del 2018.

Frecuencia	Amplitud (V _{pico-pico})	Frecuencia	Amplitud (V _{pico-pico})
11.62 kHz	6.0 mV	2.65 MHz	4.0 mV
14.38 MHz	4.8 mV	2.45 kHz	240.0 mV
1.35 MHz	40.0 mV	1.79 MHz	2.4 mV
10.01 kHz	5.6 mV	72.80 kHz	5.6 mV
1.227 MHz	19.2 mV	30.68 kHz	6.4 mV

Haciendo comparaciones con las diferentes mediciones se decidió realizar un circuito amplificador no inversor (Fig. 66), porque la señal obtenida era muy pequeña, usamos el TL082 [18] el cual tiene como características que a la entrada tiene una alta impedancia lo cual nos dice que deja pasar todas las frecuencias y tiene una frecuencia máxima de 4 MHz. Para la realización usamos la Ec. 38, sustituimos los valores de $R_1 = 100\Omega$ y $R_f = 100\text{ k}\Omega$ y obtenemos una ganancia de 1001 (Ec. 39).

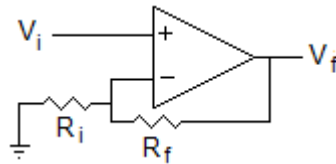


Figura 66. Amplificador Operacional.

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (\text{Ec. 38})$$

$$A = 1 + \frac{100[\text{K}\Omega]}{100[\Omega]} = 1001 \quad (\text{Ec. 39})$$

3. - Día 17 de diciembre del 2018 se usó una Antena Solar acoplado con el Opam y usando una placa fenólica de 30x30 cm como se observa en la Fig. 67.

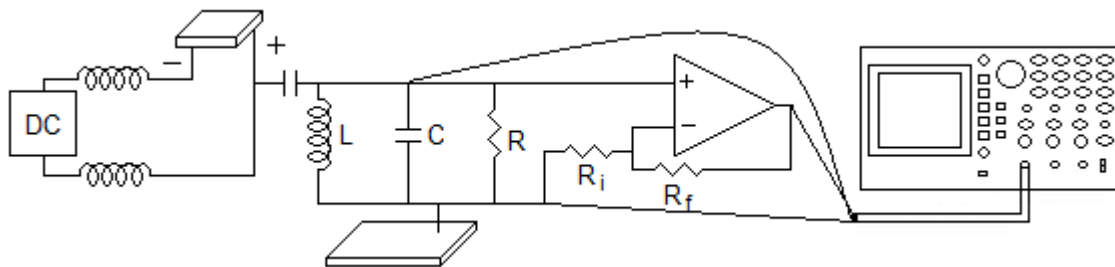


Figura 67. Antena Solar acoplamiento con el Opam.

En la Fig. 68, se observan algunas mediciones de la Antena Solar con el Opam.

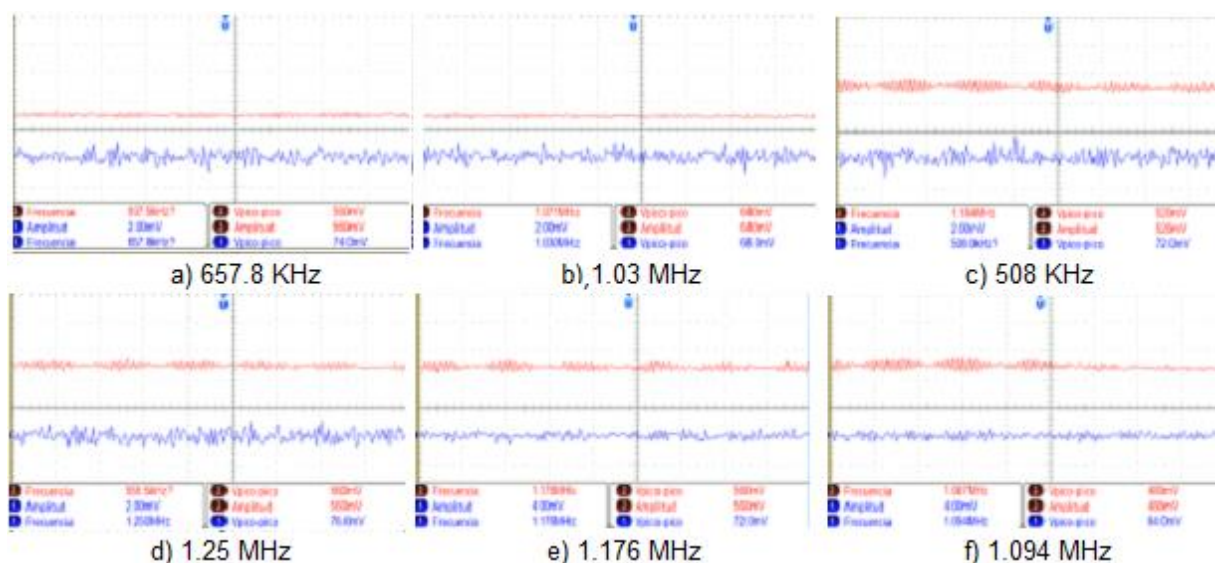


Figura 68. Frecuencia del 17 de diciembre del 2018.

En la Tabla 13, se observa algunas mediciones de frecuencias y el voltaje de la señal recibida, se observa un rango de frecuencia entre 508 kHz a 1.184 MHz, este rango de frecuencia no tiene la frecuencia del circuito oscilador 30.78 kHz.

Tabla 13. Frecuencia del 17 de diciembre del 2018.

Frecuencia sin amplificar		Frecuencia amplificada	
Frecuencia	Amplitud ($V_{\text{pico-pico}}$)	Frecuencia	Amplitud ($V_{\text{pico-pico}}$)
657.8 kHz	2 mV	973.5 kHz	560 mV
1.03 MHz	2 mV	1.071 MHz	640 mV
508 kHz	2 mV	1.184 MHz	520 mV
1.25 MHz	2 mV	555.5 kHz	560 mV
1.176 MHz	4 mV	1.176 MHz	560 mV
1.094 MHz	4 mV	1.087 MHz	480 mV

Capítulo 4. Conclusiones y trabajos a futuro.

En el presente trabajo se diseñó y simuló una antena microstrip para una frecuencia de 2.4 GHz, con el propósito de una posible implementación con un módulo fotovoltaico.

Mediante el software Matlab se obtuvieron los parámetros para la antena microstrip 2.4 GHz, cuyas características fueron: el punto de alimentación del cable coaxial (0.0 mm, 14.22 mm), la variación del largo del parche es de 0.07 mm, las dimensiones del parche (49.40 mm, 41.60 mm), sustrato (50.17 mm, 42.85 mm, 0.127 mm) y tierra (50.17 mm, 42.85 mm).

Se realizó la simulación de la antena microstrip rectangular a partir de los datos calculados por el programa diseñado en Matlab, esto se llevó a cabo de acuerdo a la teoría para el diseño de una antena microstrip, buscando obtener una frecuencia de resonancia de 2.40 GHz mediante el software HFSS. En el primer diseño, se obtuvo una frecuencia de resonancia de 2.39 GHz, con una sensibilidad de -6.45 dB usando las ecuaciones 32 b) $L2=3L$ y 33 b) $W2=3W$. Utilizando las ecuaciones 32 a) $L1=6h+L$ y 33 a) $W1=6h+W$, conseguimos una frecuencia de 2.36 GHz con una sensibilidad de -21.750 dB; por último, para alcanzar la frecuencia de 2.40 GHz se variaron las dimensiones del parche logrando una sensibilidad de -23.185 dB y ancho de banda de 38 MHz.

Pensando en una implementación futura de la antena a la fotocelda, se adquirió el CI VCO MAX2750AUA, con la finalidad de mostrar que a partir de una señal de voltaje en DC de una fotocelda podemos obtener una señal variable y ajustarla a la frecuencia de resonancia de 2.4 GHz, la cual tiene la antena microstrip. Con esto se demuestra que es posible implementar un sistema de comunicaciones a partir de la energía de la fotocelda.

Al intentar crear osciladores a una frecuencia de 2.4 GHz, encontramos varias dificultades, una de ellas fue en los valores de los capacitores e inductores, ya que son muy pequeños y no son comerciales, por lo que se decidió usar el circuito integrado

MAX2750AUA para poder ejemplificar como se llevaría a cabo la implementación para el envío y recepción de una señal.

No fue posible mostrar la señal variable generada a partir del VCO (Oscilador controlado por voltaje) MAX2750AUA por 2 motivos:

1.- La frecuencia de la señal es muy alta y no se contaba con un osciloscopio con ancho de banda suficiente para medirla; además el analizador de espectros no estaba disponible, ya que a partir de marzo por la situación de la contingencia sanitaria no hubo servicio de laboratorio.

2.- Debido a la pandemia no existieron condiciones adecuadas para poder ir a un laboratorio donde mostrar la señal producida a esa frecuencia, pero es posible saber cómo se comporta a partir del datasheet del CI mostrado.

Como trabajo alternativo se realizó el acoplamiento del sustrato RF4 con un módulo fotovoltaico y un circuito oscilador, esto basado en la idea de la patente internacional "SOLPLANT" [4, 5, 16, 17] y en el trabajo realizado por Baccouch et al. [17], para saber si es que podíamos recibir una frecuencia específica, con lo cual obtuvimos un rango de frecuencia de los 10.01 kHz hasta los 98.94 MHz.

Realizar la simulación de una antena microstrip en HFSS reduce costos del material a utilizar y permite hacer un estudio más profundo del funcionamiento de la antena o en muchos casos de la misma teoría física, ya que en la práctica existen parámetros que no son posibles de medir de una forma adecuada, los cuales son cruciales al momento de la fabricación, de igual forma, existen casos en donde no hay un consenso sobre el fenómeno físico que existe detrás, esto se observa en la simulación realizada por Zhu et al. [19] para antenas THz. Por lo tanto, este tipo de simulaciones son elementales para el mejoramiento constante de la teoría y la caracterización para la eficiencia de la fabricación de las antenas de este tipo.

La implementación de la antena microstrip, se propone como un trabajo a futuro debido a que no existieron las condiciones de un cuarto limpio o sala blanca para fabricarla en la UACM; así mismo, la automatización con el algoritmo creado en Matlab para este trabajo, nos permitirá agilizar y optimizar el cálculo de los parámetros para distintas antenas microstrip, variando dimensiones, sustratos, frecuencias de resonancia, etc.

Como trabajos futuros

- 1.- Hacer la antena microstrip y hacer mediciones.
- 2.- Hacer el acoplamiento del módulo fotovoltaico con la antena microstrip 2.4 GHz (Fig. 69).

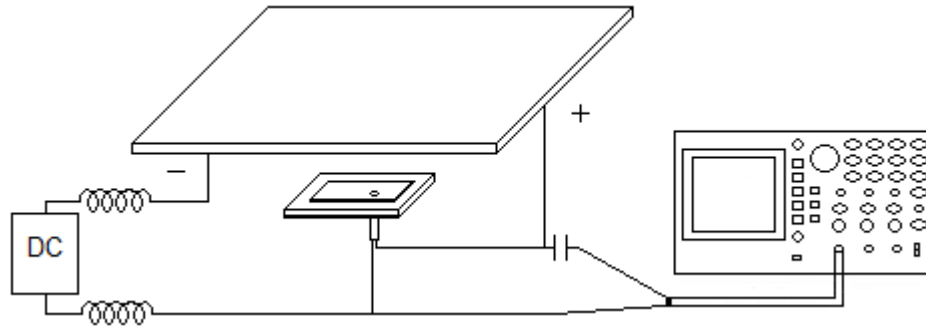


Figura 69. Módulo fotovoltaico acoplado con una antena microstrip.

- 3.- Realizar la simulación del VCO MAX2750AUA y el acoplamiento con el módulo fotovoltaico (Fig. 70).

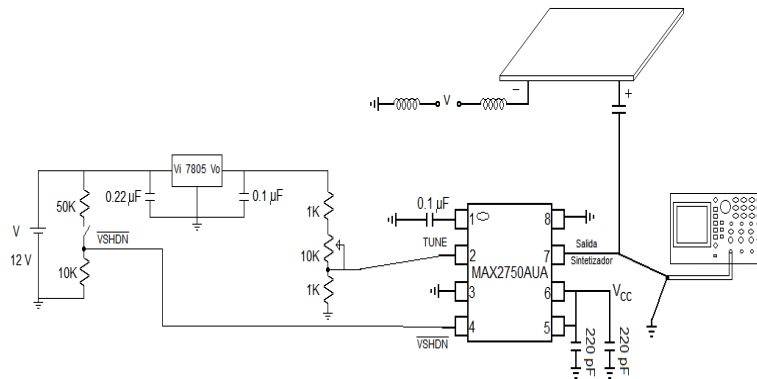


Figura 70. Módulo fotovoltaico acoplado con el VCO.

Bibliografía

- [1] ISE. Instituto Fraunhofer ISE o Institute for Solar Energy Supply Technology (ISET). 28-06-2018. Sitio web: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/about-us.html>
- [2] Rogers Corporation. (2019). Product Selector Guide. 28-06-2019, de Rogers Corporation Sitio web: <https://www.rogerscorp.com/documents/2532/acs/ACS-Product-Selector-Guide-and-Standard-Thicknesses-and-Tolerances.pdf>
- [3] Pasternack. (2018). Datasheet PECX006. 28-06-2019, de Pasternack Sitio web: <https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/PECX006.pdf>
- [4] Dr. C. Bendel, J. Kirchhof, N. Henze, (2004) Solar Cell Antennas in Wireless Communication and Radio Broadcast Systems. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Paris, Octubre 2018 France. Sitio web: https://www.researchgate.net/profile/Joerg_Kirchhof/publication/44186443_Solar_cell_antennas_in_wireless_communication_and_radio_broadcast/links/5615281e08aed47facefb57e/Solar-cell-antennas-in-wireless-communication-and-radio-broadcast.pdf
- [5] Roo Ons Maria Jose. (2010) Integration of Antennas and Solar Cells for Autonomous Communication Systems. Octubre 2018, Sitio web: Doctoral Thesis. Dublin, Dublin Institute of Technology. Sitio web: <https://www.semanticscholar.org/paper/Integration-of-Antennas-and-Solar-Cells-for-Systems-Ons-Jose/cd1b1df81892dca0ab04b491f58f86487ad67192>
- [6] IEEE. (1993). IEEE Standard Definitions of Terms of Antennas. United States of America. IEEE.
- [7] Murillo Fuentes Juan José. (2012). Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación 2nd. Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

[8] TOMASI, WAYNE. (2003). Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, México. Pearson Educación

[9] Francisco Ramos Pascual. (2007). Radiocomunicaciones. España, Marcombo Ediciones Técnicas. (Físico)

[10] Constantine A. Balanis (2005). Antenna Theory and Analysis and Design 3rd, United States of America. John Wiley & Sons.

[11] Operador Nuclear (2018) Espectro electromagnético con sus aplicaciones prácticas. Octubre 2020, Sitio web: <https://twitter.com/OperadorNuclear/status/1006773860635725825>

[12] T. C. Edwards, M. B. Steer. (2000). Fundation of Interconnect and Microstrip Design 3rd. Englan. John Wiley & Sonns

[13] Girish Kumar, K. P. Ray. (2003). Broadband Microstrip Antennas. United States of America. Artech House

[14] Eric Cervantes García. Diseño y simulación de una antena microcinta rectangular a la frecuencia de 72 GHz. 15 Julio 2019. Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica Santa María Tonantzintla, Puebla.

[15] Maximintegrated. (2020). Datasheet MAX2775AUA. 15-06-2020, de Maximintegrated. Sitio web: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX2750AUA.pdf>

[16] Dr. C. Bendel, J. Kirchhof, N. Henze. (2004), SOLAR CELL ANTENNAS IN WIRELESS COMMUNICATION AND RADIO BROADCAST SYSTEMS. Octubre 2018, Sitio web: https://www.researchgate.net/profile/Joerg_Kirchhof/publication/44186443_Solar_cell

_antennas_in_wireless_communication_and_radio_broadcast/links/5615281e08aed47facefb57e/Solar-cell-antennas-in-wireless-communication-and-radio-broadcast.pdf

[17] Chokri Baccouch, Dhaou Bouchouicha, Hedi Sakli and Taoufik Aguil. (2016). Patch Antenna based on a Photovoltaic Cell with a Dual resonance Frequency. Octubre 2018, Sitio web: https://www.researchgate.net/publication/309963418_Patch_Antenna_based_on_a_Photovoltaic_Cell_with_a_Dual_resonance_Frequency

[18] Texas Instruments. (2018). Datasheet TL082. 28-06-2019, de Texas Instruments. Sitio web: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl082.pdf>

[19] Ning Zhu, Student Member, IEEE, and Richard W. Ziolkowski, Fellow, IEEE. (2013). Photoconductive THz Antenna Designs With High Radiation Efficiency, High Directivity, and High Aperture Efficiency. Enero 2020, Sitio web: https://www.researchgate.net/publication/264587913_Photoconductive_THz_Antenna_Designs_With_High_Radiation_Efficiency_High_Directivity_and_High_Aperture_Efficiency