



## **Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez**

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Ingeniería Electrónica

### **Residencia profesional**

Reporte de Residencia profesional

**Diseño de un sistema de antena para la recolección de energía electromagnética**

#### **Presenta el alumno:**

- Encino Morales Kleiverg Eulalio

#### **Ingeniería en Electrónica**

#### **Asesor Externo**

Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza

#### **Asesor Interno**

Ing. Arnulfo Cabrera Gómez

#### **Periodo:**

Enero-Junio del 2017

# INDICE

Pág.

## CAPITULO 1

Introducción-----1

Planteamiento del problema-----2

Delimitaciones -----3

Objetivos generales -----4

Objetivos específicos -----4

Justificación -----5

## CAPITULO 2

Diagrama a bloques -----6

Soporte teórico -----8

## CAPITULO 3

Desarrollo -----36

## CAPITULO 4

Resultados -----67

## CAPITULO 5

Recomendaciones y conclusiones -----72

# INDICE DE IMÁGENES

Pág.

## CAPÍTULO 2

Figura 2.1.	-----	7
Figura 2.2	-----	9
Figura 2.3	-----	11
Figura 2.4	-----	13
Figura 2.5	-----	16
Figura 2.6	-----	17
Figura 2.7	-----	18
Figura 2.9	-----	19
Figura 2.10	-----	20
Figura 2.11	-----	20
Figura 2.12	-----	21
Figura 2.13	-----	23
Figura 2.14	-----	24
Figura 2.15	-----	25
Figura 2.16	-----	27
Figura 2.17	-----	28
Figura 2.18	-----	31
Figura 2.19	-----	32
Figura 2.20	-----	32
Figura 2.21	-----	33
Figura 2.22	-----	34
Figura 2.23	-----	34
Figura 2.24	-----	35
Figura 2.25	-----	36
Figura 2.26	-----	36

## CAPÍTULO 3

Figura 3.1	-----	38
Figura 3.2	-----	38
Figura 3.3	-----	39
Figura 3.4	-----	40
Figura 3.5	-----	42
Figura 3.6	-----	42
Figura 3.7	-----	43
Figura 3.8	-----	43
Figura 3.9	-----	44
Figura 3.10	-----	44
Figura 3.11	-----	45
Figura 3.12	-----	45
Figura 3.13	-----	46
Figura 3.14	-----	46
Figura 3.15	-----	47
Figura 3.16	-----	47
Figura 3.17	-----	48
Figura 3.18	-----	48
Figura 3.19	-----	48
Figura 3.20	-----	49
Figura 3.21	-----	49
Figura 3.22	-----	50

Figura 3.23	-----	50
Figura 3.24	-----	51
Figura 3.25	-----	51
Figura 3.26	-----	52
Figura 3.27	-----	52
Figura 3.28	-----	53
Figura 3.29	-----	53
Figura 3.30	-----	54
Figura 3.31	-----	54
Figura 3.32	-----	55
Figura 3.33	-----	56
Figura 3.34	-----	56
Figura 3.35	-----	57
Figura 3.36	-----	57
Figura 3.37	-----	58
Figura 3.38	-----	58
Figura 3.39	-----	59
Figura 3.40	-----	59
Figura 3.41	-----	60
Figura 3.42	-----	60
Figura 3.43	-----	61
Figura 3.44	-----	61
Figura 3.45	-----	62
Figura 3.46	-----	62
Figura 3.47	-----	63
Figura 3.48	-----	63
Figura 3.49	-----	64
Figura 3.50	-----	66
Figura 3.51	-----	66
Figura 3.52	-----	67

#### CAPÍTULO 4

Figura 4.1	-----	68
Figura 4.2	-----	69
Figura 4.3	-----	69
Figura 4.4	-----	70
Figura 4.5	-----	70
Figura 4.6	-----	71
Figura 4.7	-----	71
Figura 4.8	-----	72

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

Las actividades realizadas en Residencia Profesional sirven como muestra del conocimiento y habilidades adquiridas a lo largo de la preparación en una carrera de Ingeniería. Existen diferentes formas de llevar a cabo este requisito, sin embargo, es importante tomar el tiempo necesario para elegir las mejores opciones ya que significa asegurar en un futuro un empleo o la obtención de alguna beca para continuar con estudios de posgrado.

Se eligió el CICESE (Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada) para realizar la residencia profesional; el objeto fue un proyecto de investigación centrado en antenas, el cual se presentará en este trabajo. Las actividades se realizaron en el laboratorio de Electrónica y Telecomunicaciones, edificio de Física Aplicada, con la orientación y guía de un asesor de este centro.

El siguiente reporte trata del diseño de un sistema de antena (microstrip), que sea capaz de recolectar energía proveniente de diferentes fuentes radiantes de energía electromagnética (específicamente en el rango de RF) que se encuentran en el medio ambiente.

En estos días, con el desarrollo de comunicación inalámbrica, el medio ambiente de nuestra vida diaria está lleno de ondas electromagnéticas, incluyendo las redes 2G, 3G, 4G, WLAN, GPS, etc. Estas ondas son eliminadas dentro del aire y solo una parte de ellas son recibidas, causando residuos de energía. Si se utiliza correctamente, la energía de radio frecuencia sería una complementación importante para la recolección de energía existente y reutilización de fuentes como energía solar y eólica.

En el caso de las fuentes de energía de RF ambiental, la cantidad de energía recolectada es pequeña. Por esta razón una simple antena no es suficiente y un arreglo de antenas es esencial. Sin embargo, en este proyecto no se utiliza un arreglo debido al casi nulo avance que se tiene en ésta línea y por consecuencia se debe tomar este proyecto como el comienzo de una línea de investigación que puede ser fructífera en un futuro. En el estudio del estado del arte, pudimos darnos cuenta que existen centros de investigación en otros países que ya tienen un avance significativo en este tema, por lo que no debemos rezagarnos en un tema que es de mucho interés por sus aplicaciones. Ya que como se dijo anteriormente la cantidad de energía que se puede recolectar es pequeña, se utilizará un rectificador multiplicador de voltaje para incrementar la salida recolectada.

Las aplicaciones de este sistema son varias, y se ven limitadas por una sola cuestión: la cantidad de energía que éste sistema puede proveer. La cantidad de energía que se puede recolectar en el mejor de los casos suele estar en el orden de los microWatts. Sin embargo, aunque esta cantidad es pequeña para muchos dispositivos, no lo es para sensores pequeños que trabajan aproximadamente con esta pequeña potencia.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La sostenibilidad energética sin una batería integrada es una de las principales características deseadas en el diseño de dispositivos portátiles y / o implantables de próxima generación, especialmente para aquellos que se usan en monitoreo y seguimiento remoto. Actualmente casi todos esos dispositivos están alimentados por baterías. Requieren mantenimiento periódico, como el cambio de las baterías, que es engorroso y costoso; E incluso a veces impracticable en algunos escenarios (es decir, en el caso de dispositivos corporales implantados, realizar cirugía de cuerpo para reemplazar la batería del implante es difícil

Hoy en día se han descubierto diversas formas de obtener energía (energy harvesting) del medio ambiente; existe la energía eólica, eléctrica, solar, etc. Estas formas de obtener energía son excelentes para aplicaciones en sistemas que sean capaces de alimentar redes de dispositivos por ejemplo, o un aparato cualesquiera. Sin embargo, la sostenibilidad energética sin una batería integrada es una de las principales características deseadas en el diseño de dispositivos portátiles y / o implantables de próxima generación, especialmente para aquellos que se usan en monitoreo y seguimiento remoto. Actualmente casi todos esos dispositivos están alimentados por baterías. Requieren mantenimiento periódico, como el cambio de las baterías, que es engorroso y costoso; e incluso a veces impracticable en algunos escenarios (es decir, en el caso de dispositivos corporales implantados, realizar cirugía de cuerpo para reemplazar la batería del implante es difícil y no se puede estar haciendo una cirugía cada vez que el implante se quede sin alimentación).

## DELIMITACIONES

En un proyecto como éste, del cual se tiene poco avance y conocimiento, tenemos una tarea que es sentar las bases para seguir con investigaciones futuras en ésta línea. Los elementos que probablemente se utilicen en un sistema como este son diferentes a los utilizados normalmente. Un ejemplo de ellos son los diodos; no todos los diodos trabajan de manera correcta en frecuencias tan altas como son las microondas. Los valores de capacitores son de valores realmente pequeños, que están en el orden de los pico Faradios. Inductores (bobinas) de valores igualmente pequeños, en el orden de los nano Henrios. Antenas tipo parche o también llamadas microstrip que tienen una estructura novedosa son diseñadas para operar en un ancho de banda y con una frecuencia central en este caso en las RF.

Todos estos elementos nos crean limitaciones en el momento del diseño, ya que no se tienen siempre disponibles en este país, y en varios casos es necesario adquirirlos en otros países (principalmente en países de Europa, o en EU); esto hace que el desarrollo del proyecto se vea afectado, ya que por cuestiones de búsqueda y envíos que llegan a tardar algunos meses el proyecto se demora, por lo que se tiene que encontrar alguna solución para obtener resultados en los tiempos requeridos.

Otra de las limitaciones que tenemos es como ya se había mencionado el poco avance que se tiene en esta línea de investigación, ya que una investigación de este tipo requiere empezar con una obtención del estado del arte que se tiene hasta el momento y comenzar desde ahí. En otros países hemos encontrado avances significativos en ésta línea, y los diferentes Software que utilizan en el diseño y en las pruebas no siempre están disponibles para nosotros, o son Software totalmente desconocidos de los cuales se tiene que obtener información para poder comprenderlos y utilizarlos. En el caso del diseño de una antena tipo parche, los Software que utilizan diferentes investigadores en el tema son de nivel avanzado, utilizándolos mayormente investigadores que realizan estudios de Doctorado en diferentes centros de investigación.

Todas estas limitaciones provocan que el desarrollo del proyecto no sea siempre del modo que se había planeado, y que los objetivos que se habían proyectado no sean del todo alcanzados debido a las diferentes razones que hemos presentado, sin embargo, todo este proyecto de investigación tendrá resultados sumamente interesantes y alcanzará la mayor parte de objetivos planteados. Claramente servirá para tener las fuentes necesarias en investigaciones futuras en esta línea, las cuales podrán ofrecer aportaciones y mejoras a los sistemas de recolección de energía en RF en el país.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar un sistema de antena para la recolección de energía electromagnética

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Realizar un estudio sobre tecnologías existentes
- Elegir los componentes con mejor funcionamiento en la banda requerida
- Diseñar una antena para la banda GSM en 850 MHz
- Diseñar un circuito rectificador para el sistema recolector.
- Diseñar una red inductivo-capacitivo para el acoplamiento de impedancias entre la antena y el circuito rectificador
- Realizar pruebas para obtener resultados del sistema

## JUSTIFICACIÓN

Hoy en día, las tecnologías inalámbricas han tenido un desarrollo especial debido a las grandes aplicaciones que se tienen en este campo.

Se han logrado transmisiones de información, datos, voz, a grandes distancias de manera impresionante, logrando una comunicación mundial que no se ve afectada por las distancias entre los puntos de comunicación. Sin embargo, en México, poco se ha avanzado en lo que concierne a recolectar y utilizar la energía irradiada por diversas fuentes de energía electromagnética, como radio bases de telefonía celular, televisión, radio. WiFi, etc. Es energía a la cual no se la da un uso concreto debido a que como ya conocemos las antenas que se encargan de irradiar las ondas, lo hacen de manera constante, sin importar que los dispositivos receptores, o emisores estén activos o no.

El presente trabajo de investigación sirve para crear en un inicio el conocimiento necesario para tener avances significativos en la recolección de energía electromagnética proveniente de las fuentes ya antes mencionadas. En otros países se está desarrollando este tipo de tecnología y ya se encuentran en etapas de mejoras a la eficiencia de los diferentes bloques que componen al sistema recolector. Nosotros aún estamos empezando, y el trabajo actual podrá proveer de elementos a estudiantes e investigadores que tengan deseos de aportar en esta línea de investigación.

La utilidad de estos sistemas se encuentra en sensores, implantes, que necesitan ser alimentados de forma constante y que debido a su ubicación sea en el ambiente o en el cuerpo humano no deberían estar siendo removidos del lugar en que funcionan. Un sistema de antena que sea capaz de captar la energía en radiofrecuencia y que la convierta a DC sería conveniente para alimentar a estos tipos de dispositivos. Aunque la potencia captada es pequeña, una buena cantidad de dispositivos pueden funcionar con estos niveles de potencia.

El dar inicio a un tema de importancia como éste, servirá para seguir desarrollando sistemas que sean más eficientes, que puedan funcionar con antenas tipo parche de tamaño más pequeño que el actual: un arreglo de antenas podría ser la respuesta. Un sistema rectificador de alta eficiencia y de pocas pérdidas por reflexión puede ser diseñado si se sigue con la línea de investigación que este trabajo ofrece.

Temas como microondas, radiofrecuencia, banda GSM, WiFi, RFID; tecnologías 2G, 3G, 4G, y actualmente 5G, son temas que se tocan en este trabajo y que son de gran aportación para estudiantes e investigadores que deseen avanzar más en el tema.

En el CICESE, un centro dedicado a la investigación, en este caso telecomunicaciones, el obtener avances y estar a la vanguardia en este tema es de suma importancia por el simple hecho de ser el centro CONACYT más grande y de mayor antigüedad en México. Hacer aportes al área de Electrónica y Telecomunicaciones del CICESE, es una gran oportunidad como estudiante en residencia, y el inicio de una trayectoria en la investigación.

## CAPITULO II

### DIAGRAMA A BLOQUES

Se da a conocer un diagrama de bloques del sistema que se tiene planeado diseñar; en él se presentan de manera general las partes que componen al sistema así como la definición de cada una de éstas y los componentes electrónicos que conforman a cada bloque.

En la siguiente figura se muestran los bloques que componen al sistema:

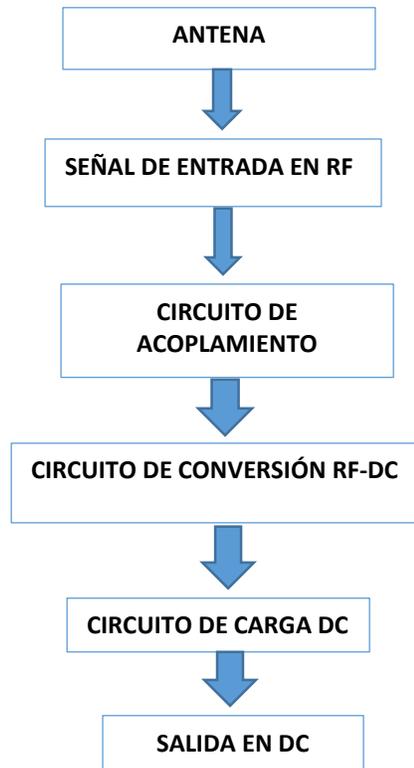


Figura 2.1. Diagrama de bloques del sistema de antena para recolectar energía en RF

1.- En éste bloque se cuenta con una antena, en este caso tipo parche, que es capaz de captar las señales emitidas en RF específicamente en la banda GSM a 850 MHz. Es una antena rectangular, el objetivo de utilizar una antena de este tipo es el tamaño reducido. Otros tipos de antenas son utilizadas para captar de mejor manera la energía en RF pero son grandes y no son útiles en el proyecto que se ésta presentando.

Aunque la antena tipo parche o microstrip tiene poca ganancia y eficiencia, en futuros proyectos se puede optar por utilizar un arreglo de antenas para cubrir más bandas y obtener mayor cantidad de potencia. Un arreglo de antenas sería esencial, pero en este proyecto nos limitamos a utilizar una sola antena.

Esta antena ésta compuesta de material conductor como el cobre, de un sustrato, y de cables que sean conectados de la antena al circuito rectificador.

2.- En este bloque se encuentran los cables coaxiales y elementos conectores que sirven para transmitir la energía captada por la antena al circuito de acoplamiento de impedancias. Se tiene planeado utilizar un conector RG-58 macho para la transmisión de potencia.

3.- En este bloque tenemos el circuito para acoplamiento de impedancias. En un sistema como éste, en el que tenemos por un lado la antena receptora y por el otro lado el circuito rectificador, es importante que acoplemos las impedancias entre estas dos partes para asegurar la máxima transferencia de energía. Si no ponemos este circuito, la cantidad de energía captada por la antena no lograra transmitirse hasta la carga en la que queremos se suministre la potencia.

Se utiliza la carta Smith, para encontrar los valores requeridos de capacitores e inductores. Los valores de estos elementos son significativamente pequeños debido a que son utilizados para RF.

4.- Posteriormente del circuito para acoplamiento de impedancias se encuentra el circuito rectificador. Es el diseño de un doblador de voltaje, del cual se dará a conocer más en la parte teórica de éste trabajo. Se eligió éste circuito debido a que la potencia en las señales RF es muy baja, por lo que tenemos que obtener la mayor cantidad que podamos. Se encuentran los diodos Schottky HSMS, utilizados especialmente en RF, y capacitores de valores bajos para poder cargarse, descargarse y trabajar adecuadamente en potencias tan pequeñas. Este bloque puede estar compuesto de una, dos o tres etapas del doblador, para obtener mejores resultados; se elegirá la más conveniente para éste proyecto.

5.- Éste bloque está constituido de un resistor de diferente valor que depende de las etapas del doblador de voltaje que se elija. Es básicamente para simular una carga que emule a un dispositivo.

6.- En este bloque tenemos al sistema de conexionado que provee la potencia del sistema recolector a la carga, pueden ser conectores, cables, adaptadores, etc.

## SOPORTE TÉCNICO

### RECOLECCIÓN DE ENERGÍA (ENERGY HARVESTING)

La energía está por todas partes en el ambiente que nos rodea, disponible en la forma de la energía termal, de la luz (solar), de la energía eólica, energía electromagnética y de la energía mecánica. Sin embargo, la energía de estas fuentes se encuentra a menudo en cantidades tan pequeñas que no puede suministrar la energía adecuada para cualquier propósito viable. De hecho, hasta hace poco, no ha sido posible capturar dicha energía lo suficiente para realizar ningún trabajo útil en el caso de la energía electromagnética.

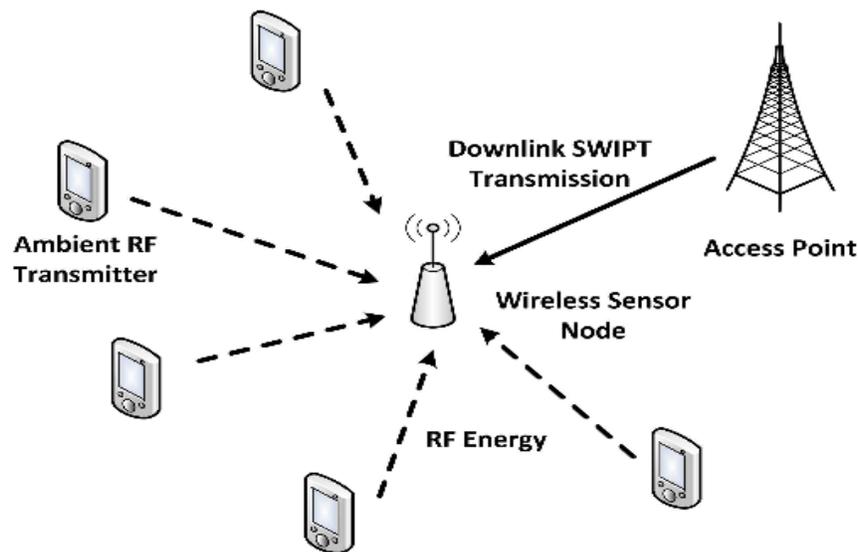


Fig 2.2) Transmisión de señales en RF

Este escenario está a punto de cambiar.

La recolección de energía es el proceso de capturar pequeñas cantidades de energía de una o más de estas fuentes naturales de energía, acumulándolas y almacenándolas para su uso posterior. Los dispositivos de recolección de energía capturan, acumulan, almacenan, acondicionan y gestionan eficazmente esta energía y la suministran de una forma que puede utilizarse para realizar una tarea útil. Del mismo modo, un módulo de recolección de energía es un dispositivo electrónico que puede realizar todas estas funciones para alimentar una variedad de circuitos de sensor y control para aplicaciones de servicio intermitente.

¿Por qué la recolección de energía?

Los desarrollos técnicos avanzados han aumentado la eficiencia de los dispositivos para capturar trazas de energía del medio ambiente y transformarlas en energía eléctrica. Además, los avances en la tecnología de microprocesadores han aumentado la eficiencia energética, reduciendo efectivamente los requisitos de consumo de energía. En combinación, estos desarrollos han despertado el interés

en la comunidad de ingeniería para desarrollar más y más aplicaciones que utilizan la recolección de energía para el poder.

La recolección de energía desde una fuente natural donde se despliega una aplicación remota, y donde tal fuente de energía natural es esencialmente inagotable, es una alternativa cada vez más atractiva a los tapones de pared inconvenientes y costosas baterías. Esta fuente de energía esencialmente libre, cuando está diseñada e instalada correctamente, está disponible sin necesidad de mantenimiento y ahora está disponible a lo largo de toda la vida útil de la aplicación. Tales sistemas pueden ser más confiables que los enchufes de pared o las baterías.

Además, la recolección de energía se puede utilizar como una fuente de energía alternativa para complementar una fuente de energía primaria y para mejorar la fiabilidad del sistema en general y evitar interrupciones de energía.

### Aplicaciones para la recolección de energía

Muchas aplicaciones de la vida real que utilizan la energía del sistema de recolección de energía son ahora prácticas. Los sistemas de redes de sensores inalámbricos, como los sistemas ZigBee, a menudo se benefician de fuentes de energía de recolección de energía. Por ejemplo, cuando un nodo inalámbrico se despliega en un sitio remoto donde un enchufe de pared o una batería no es confiable o no está disponible, la recolección de energía puede aumentar o suministrar energía. En otro ejemplo, un nodo de control remoto que se ejecuta en la recolección de energía se puede implementar como un sistema electrónico autoalimentado. Y en otras situaciones, múltiples fuentes de energía se pueden utilizar para mejorar la eficiencia general y la fiabilidad de cualquier sistema.

### Fuentes Comunes de Recolección de Energía

- Energía mecánica - de fuentes tales como vibración, esfuerzo mecánico y tensión
- Energía térmica - energía residual de los hornos, calentadores y fuentes de fricción
- Energía de la luz - capturada de la luz del sol o de la sala a través de sensores fotográficos, fotodiodos o paneles solares
- Energía Electromagnética - de inductores, bobinas y transformadores
- Energía Natural - desde el ambiente como el viento, el flujo de agua, las corrientes oceánicas y la energía solar.
- Cuerpo Humano - una combinación de energía mecánica y térmica generada naturalmente a partir de bio-organismos o a través de acciones como caminar y sentarse
- Otras Energías - de fuentes químicas y biológicas. Es importante señalar que todas estas fuentes de energía son virtualmente ilimitadas y esencialmente libres, si pueden ser capturadas en o cerca de la ubicación del sistema.

## RECOLECCIÓN DE ENERGÍA EN RF

La energía de RF se transmite actualmente a miles de millones de transmisores de radio de todo el mundo, incluidos teléfonos móviles, radios portátiles, estaciones base móviles y emisoras de televisión / radio. La capacidad de recolección de energía RF, de fuentes ambientales o dedicadas, permite la carga inalámbrica de dispositivos de baja potencia y tiene como resultado beneficios al diseño del producto, usabilidad y confiabilidad. Los sistemas basados en baterías pueden cargarse para eliminar el reemplazo de la batería o extender la vida útil de los sistemas que utilizan baterías desechables. Los dispositivos libres de batería se pueden diseñar para operar bajo demanda o cuando se acumula suficiente carga. En ambos casos, estos dispositivos pueden estar libres de conectores, cables y paneles de acceso a baterías, y tienen libertad de colocación y movilidad durante la carga y el uso.

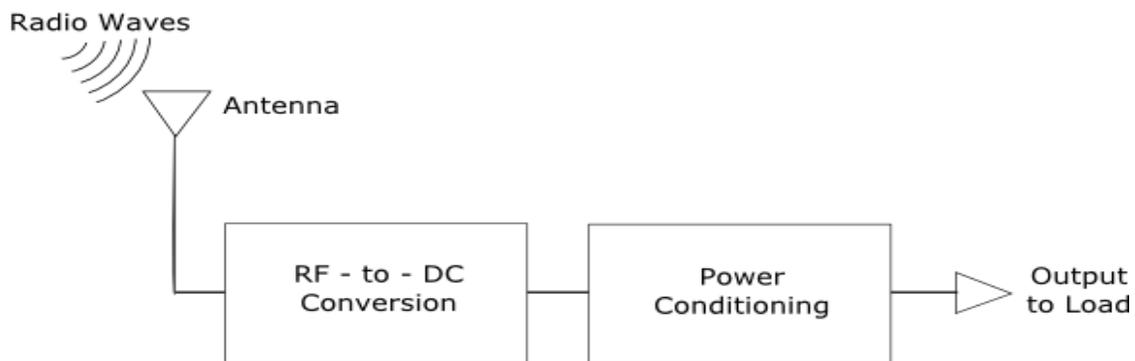


Figura 2.3) Bosquejo de sistema para recolectar energía en RF

### Fuentes de energía

El atractivo obvio de la recolección de energía de RF ambiente es que es esencialmente energía "libre". El número de transmisores de radio, especialmente para estaciones base y teléfonos móviles, continúa aumentando. ABI Research y iSupply calculan que el número de suscripciones a teléfonos móviles superó recientemente los 5.000 millones, y la UIT estima que hay más de 1.000 millones de suscripciones para la banda ancha móvil. Los teléfonos móviles representan una gran fuente de transmisores para recolectar energía RF, y potencialmente permitirán a los usuarios suministrar energía bajo demanda para una variedad de aplicaciones de detección de proximidad. Además, hay que tener en cuenta el número de routers WiFi y dispositivos inalámbricos finales, como ordenadores portátiles. En algunos entornos urbanos, es posible detectar literalmente cientos de puntos de acceso WiFi desde una sola ubicación. A corto alcance, como dentro de la misma sala, es posible recolectar una pequeña cantidad de energía de un router WiFi típico que transmite a un nivel de potencia de 50 a 100 mW. Para un funcionamiento a más largo plazo, se necesitan antenas más grandes con mayor ganancia para la recolección práctica de energía de RF desde estaciones base móviles y torres de radio de radiodifusión.

En 2005, Powercast demostró la recolección de energía de RF ambiente a 2,4 km (1,5 millas) de una pequeña estación de radio AM de 5 kW.

La energía de RF se puede emitir en bandas sin licencia como 868MHz, 915MHz, 2.4GHz y 5.8GHz cuando se necesita más energía o energía más predecible que la que se obtiene de fuentes ambientales. A 915MHz, las regulaciones gubernamentales limitan la potencia de salida de los radios que utilizan bandas de frecuencia sin licencia a 4W de potencia isotrópica radiada efectiva (EIRP), como en el caso de los interrogadores de identificación por radiofrecuencia (RFID). Como comparación, las generaciones anteriores de teléfonos móviles basados en tecnología analógica tenían una potencia de transmisión máxima de 3,6 W, y el transmisor TX91501 de Powercast que envía energía y datos es 3W

### Receptores de recolección de RF

Dispositivos de recolección de energía de RF, convierten la energía de RF en corriente continua. Estos componentes se añaden fácilmente a los diseños de circuitos y funcionan con antenas estándar o personalizadas de 50 ohmios.

Un aspecto importante del rendimiento de una cosechadora de energía de RF es la capacidad de mantener la eficiencia de conversión de RF a CC en una amplia gama de condiciones de funcionamiento, incluidas las variaciones de potencia de entrada y resistencia de carga de salida.

Los circuitos de recolección de energía de RF que pueden acomodar rangos de frecuencias de banda ancha o banda ancha, y la sintonización automática de frecuencia, aumentará aún más la potencia de salida, ampliará potencialmente las opciones de movilidad y simplificará la instalación.

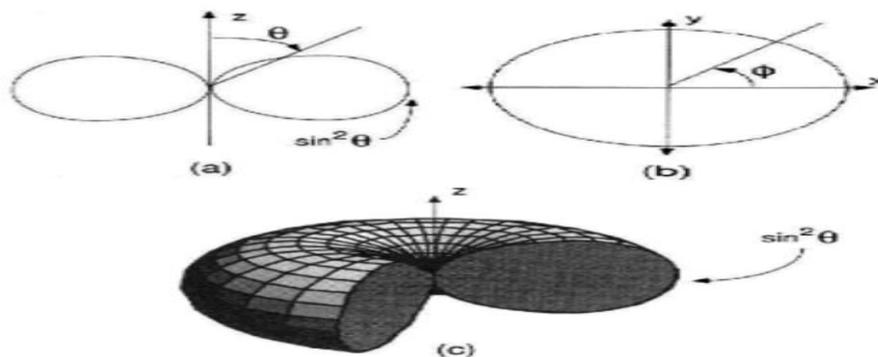
### ANTENAS

Una antena es un dispositivo hecho para transmitir (radiar) y recibir ondas de radio (electromagnéticas). Existen varias características importantes de una antena que deben de ser consideradas al momento de elegir una específica para su aplicación:

- Patrón de radiación
- Ganancia
- Directividad
- Polarización

## Patrones de Radiación:

El patrón de radiación de una antena se puede representar como una gráfica tridimensional de la energía radiada vista desde fuera de esta. Los patrones de radiación usualmente se representan de dos formas, el patrón de elevación y el patrón de azimuth. El patrón de elevación es una gráfica de la energía radiada por la antena vista de perfil. El patrón de azimuth es una gráfica de la energía radiada vista directamente desde arriba. Al combinar ambas gráficas se tiene una representación tridimensional de cómo es realmente radiada la energía desde la antena.



a) Patrón de elevación de un dipolo genérico b) Patrón de azimuth de un dipolo genérico c) Patrón de radiación 3D

Figura 2.4) Patrones de radiación

## Ganancia:

La ganancia de una antena es la relación entre la potencia que entra en una antena y la potencia que sale de esta. Esta ganancia es comúnmente referida en dBi's, y se refiere a la comparación de cuanta energía sale de la antena en cuestión, comparada con la que saldría de una antena isotrópica. Una antena isotrópica es aquella que cuenta con un patrón de radiación esférico perfecto y una ganancia lineal unitaria.

## Directividad:

La directividad de la antena es una medida de la concentración de la potencia radiada en una dirección particular. Se puede entender también como la habilidad de la antena para direccionar la energía radiada en una dirección específica. Es usualmente una relación de intensidad de radiación en una dirección particular en comparación a la intensidad promedio isotrópica.

## Polarización:

Es la orientación de las ondas electromagnéticas al salir de la antena. Hay dos tipos básicos de polarización que aplican a las antenas, como son: Lineal (incluye vertical, horizontal y oblicua) y circular (que incluye circular derecha, circular izquierda, elíptica derecha, y elíptica izquierda). No olvide que tomar en cuenta la polaridad de

la antena es muy importante si se quiere obtener el máximo rendimiento de esta. La antena transmisora debe de tener la misma polaridad de la antena receptora para máximo rendimiento.

## TIPOS DE ANTENAS

### Antenas Dipolo:

Todas las antenas de dipolo tienen un patrón de radiación generalizado. Primero el patrón de elevación muestra que una antena de dipolo es mejor utilizada para transmitir y recibir desde el lado amplio de la antena. Es sensible a cualquier movimiento fuera de la posición perfectamente vertical. Se puede mover alrededor de 45 grados de la verticalidad antes que el desempeño de la antena se degrade más de la mitad. Otras antenas de dipolo pueden tener diferentes cantidades de variación vertical antes que sea notable la degradación. Un ejemplo de patrón de elevación puede verse en la figura 1a. A partir del patrón de azimuth se ve que las antenas operan igualmente bien en 360 grados alrededor de la antena. Físicamente las antenas dipolo son cilíndricas por naturaleza, y pueden ser ahusadas o con formas específicas en el exterior para cumplir con especificaciones de medidas. Estas antenas son usualmente alimentadas a través de una entrada en la parte inferior, pero también pueden tener el conector en el centro de la misma.

### Antenas Dipolo Multi-Elemento:

Las antenas multi-elemento tipo dipolo cuentan con algunas de las características generales del dipolo simple. Cuentan con un patrón de elevación y azimuth similar al de la antena dipolo simple. La diferencia más clara entre ambas es la direccionalidad de la antena en el plano de elevación, y el incremento en ganancia debido a la utilización de múltiples elementos. Con el uso de múltiples elementos en la construcción de la antena, esta puede ser configurada para diferentes ganancias, lo cual permite diseños con características físicas similares. Tal como se puede ver en el patrón de elevación de la fig. 2, múltiples antenas de dipolo son muy direccionales en el plano vertical. Debido a que la antena de dipolo radía igualmente bien en todas las direcciones del plano horizontal, es capaz de operar igualmente bien en configuración horizontal.

### Antenas Yagi:

Estas se componen de un arreglo de elementos independientes de antena, donde solo uno de ellos transmite las ondas de radio. El número de elementos (específicamente, el número de elementos directores) determina la ganancia y directividad. Las antenas Yagi no son tan direccionales como las antenas parabólicas, pero son más directivas que las antenas panel.

### Antenas Panel Plano (Flat Panel):

Las antenas de panel plano como su nombre lo dice son un panel con forma cuadrada o rectangular y están configuradas en un formato tipo patch. Las antenas tipo Flat Panel son muy direccionales ya que la mayoría de su potencia radiada es una sola dirección ya sea en el plano horizontal o vertical.

Las antenas Flat Panel pueden ser fabricadas en diferentes valores de ganancia de acuerdo a su construcción. Esto puede proveer excelente directividad y considerable ganancia.

### Antenas Parabólicas:

Las antenas parabólicas usan características físicas así como antenas de elementos múltiples para alcanzar muy alta ganancia y direccionalidad. Estas antenas usan un plato reflector con la forma de una parábola para enfocar las ondas de radio recibidas por la antena a un punto focal. La parábola también funciona para capturar la energía radiada por la antena y enfocarla en un haz estrecho al transmitir. La antena parabólica es muy direccional. Al concentrar toda la potencia que llega a la antena y enfocarla en una sola dirección, este tipo de antena es capaz de proveer muy alta ganancia.

### Antena de Ranura:

Las antenas de ranura cuentan con características de radiación muy similares a las de los dipolos, tales como los patrones de elevación y azimuth, pero su construcción consiste solo de una ranura estrecha en un plano. Así como las antenas microstrip mencionadas abajo, las antenas de ranura proveen poca ganancia, y no cuentan con alta direccionabilidad, como evidencian sus patrones de radiación y su similitud al de los dipolos. Su más atractiva característica es la facilidad de construcción e integración en diseños existentes, así como su bajo costo. Estos factores compensan por su desempeño poco eficiente.

### Antenas Microstrip:

Estas antenas pueden ser hechas para emular cualquiera de los diferentes tipos de antenas antes mencionados. Las antenas microstrip ofrecen varios detalles que deben de ser considerados. Debido a que son manufacturadas con pistas en circuito impreso, pueden ser muy pequeñas y livianas. Esto tiene como costo no poder manejar mucha potencia como es el caso de otras antenas, además están hechas para rangos de frecuencia muy específicos. En muchos casos, esta limitación de frecuencia de operación puede ser benéfico para el desempeño del radio. Debido a sus características las antenas microstrip no son muy adecuadas para equipos de comunicación de banda amplia.

	<b>Patrón de Radiación</b>	<b>Ganancia</b>	<b>Directividad</b>	<b>Polarización</b>
Dipolo	Amplio	Baja	Baja	Lineal
Dipolo Multi-Elemento	Amplio	Baja/Media	Baja	Lineal
Panel Plano (Flat Panel)	Amplio	Media	Media/Alta	Lineal/Circular
Plato Parabólico	Amplio	Alta	Alta	Lineal/Circular
Yagi	Endfire	Media/Alta	Media/Alta	Lineal
Ranura	Amplio	Baja/Media	Baja/Media	Lineal
MicroStrip	Enfire	Media	Media	Lineal

Figura 2.5) Características de los diferentes tipos de antenas

## LA ANTENA TIPO MICROSTRIP O PARCHE

Una antena tipo Patch Microstrip consiste en un parche muy fino que se coloca a pequeña fracción la longitud de onda sobre un plano de tierra. El parche y el plano de tierra son separados por un dieléctrico. Normalmente el parche es de cobre y puede asumir cualquier forma. Los parches están generalmente fotograbados en el sustrato dieléctrico y el sustrato es generalmente no magnético. La permitividad relativa del sustrato es un parámetro importante a considerar. Este tipo de antena es caracterizado por su longitud  $L$ , la anchura  $W$ , y el espesor  $h$ .

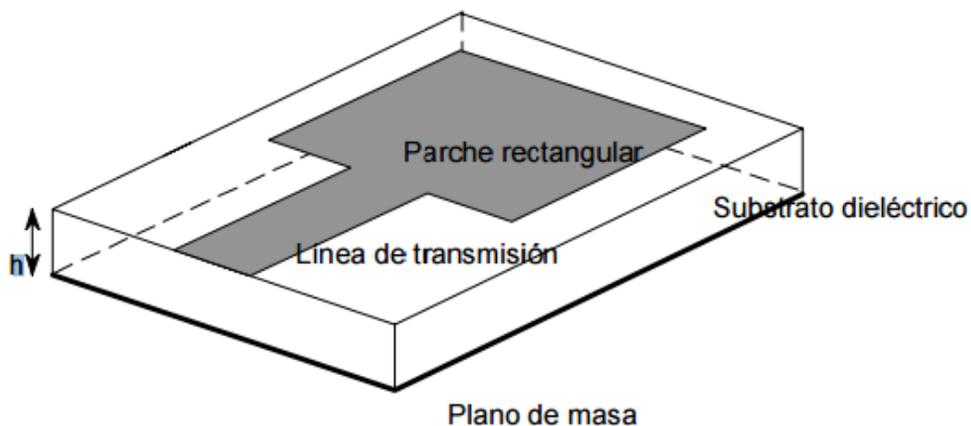


Fig 2.6 ) Diseño de una antena microstrip

Las antenas patch irradian sobre todo debido a los campos que viajan entre el borde del patch y el plano de tierra. Para el buen funcionamiento de la antena, se sugiere un sustrato dieléctrico grueso, que tenga una constante dieléctrica baja. Esto proporciona una mejor eficacia, un ancho de banda más grande y una mejor radiación. Sin embargo, tal configuración lleva a un tamaño más grande de la antena.

## MÉTODOS TÍPICOS DE ALIMENTACIÓN DE ANTENAS TIPO PARCHE

Un aspecto muy importante cuando se diseña una antena consiste en el esquema de alimentación que tendrá ésta, puesto que sin una estructura eficiente de alimentación las antenas de microstrip no funcionarán correctamente sin importar la precisión llevada a cabo para diseñar el elemento radiante. Existen diferentes métodos para alimentar una antena de microstrip de forma que radie lo más eficientemente posible en las frecuencias deseadas mediante un correcto acoplamiento de impedancias. A pesar de existir muchos métodos para alimentar una antena, éstos se pueden condensar en tres categorías principales: alimentación directa, alimentación por proximidad y alimentación por apertura.

### Alimentación directa

Como su nombre lo indica, estos métodos de alimentación requieren de un contacto directo entre la estructura de alimentación y la antena radiante. Los dos principales métodos de alimentación en esta categoría son dos: alimentación por microstrip y alimentación por conector coaxial. La desventaja de estos métodos es que no se puede optimizar por separado el esquema de alimentación y la antena puesto que se trabaja en un mismo sustrato así que debe hacerse un compromiso entre las características esperadas de radiación y las características esperadas de la alimentación.

## CONECTORES

En la siguiente imagen podemos observar la forma de conexionado entre un sistema para “Energy Harvesting” y la antena.

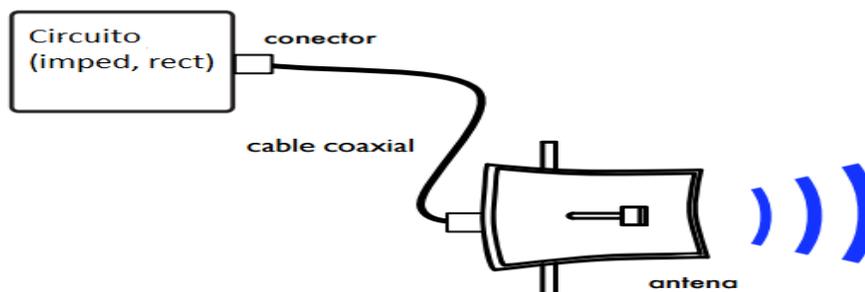


Figura 2.7) Partes de un sistema “Energy Harvesting”

El circuito se conecta a la antena por medio de un cable coaxial con conectores. Hay una variedad de conectores en uso, con diferentes tamaños y diferentes propiedades eléctricas y mecánicas. Los conectores deben ser los apropiados para el cable y el radio. A veces se requieren adaptadores o “transiciones” para realizar la interfaz entre diferentes tipos de conectores.

Un cable coaxial transporta la señal desde el radio a la antena y viceversa. La antena acopla la señal del cable coaxial al espacio libre para transmisión y al revés para recepción. Para minimizar la atenuación se debe utilizar la línea de transmisión más corta posible, construida con el cable de mejor calidad que se pueda obtener. Use exclusivamente cable diseñado para operar a frecuencias de microondas, (como LMR o Heliax). Evite usar cables como el RG-58 y RG-213 pues introducen demasiada atenuación a las frecuencias de microondas. Se pueden evitar completamente las pérdidas en el cable.

### Líneas de transmisión coaxiales

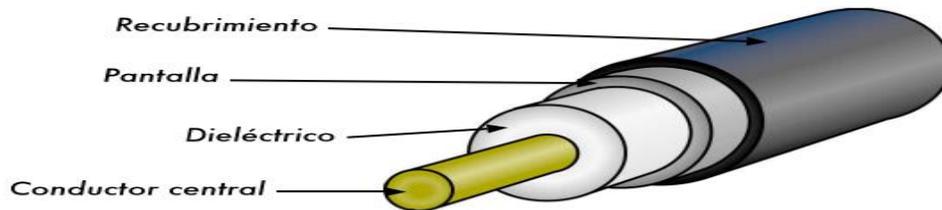


Fig 2.8) Partes de un cable coaxial

Las líneas de transmisión coaxiales o cables coaxiales tienen un conductor central rodeado por un material aislante llamado dieléctrico. El dieléctrico se recubre con una pantalla o blindaje hecho de malla o un tubo conductor. La pantalla se protege con un recubrimiento resistente, usualmente fabricado con PVC (Cloruro de polivinilo).

Los cables no son conductores perfectos. Parte de la señal será siempre perdida durante la transmisión (convertida en calor o irradiada directamente por el cable). Esta disminución de la señal se llama atenuación y se mide en decibelios por metro (dBm/m). La tasa de atenuación es función de la frecuencia de la señal, de la geometría del cable y de los materiales con los que se construyó. A mayor frecuencia mayor atenuación en el cable.

Mientras más grueso sea el cable, menor será la atenuación (un tubo grueso tiene menos pérdidas). La atenuación es afectada por el tipo de dieléctrico así como por el tipo de pantalla. La pantalla o blindaje a menudo está hecha con una malla, para mayor flexibilidad y facilidad de instalación, pero esto introduce algunas pérdidas.

Los cables para RF de baja pérdida son rígidos. Un cable flexible como el el RG-8 tendrá muchas pérdidas a frecuencias superiores a 2GHz.

## Líneas de transmisión coaxiales

La pérdida (o atenuación) de un cable coaxial depende de la construcción del cable y de la frecuencia de operación. La pérdida total es proporcional a la longitud del cable.

Tipo de cable	Diámetro	Atenuación @ 2.4 GHz	Atenuación @ 5.3 GHz
RG-58	4.95 mm	0.846 dB/m	1.472 dB/m
RG-213	10.29 mm	0.475 dB/m	0.829 dB/m
LMR-400	10.29 mm	0.217 dB/m	0.341 dB/m
LDF4-50A	16 mm	0.118 dB/m	0.187 dB/m

Figura 2.9) Atenuaciones en tipos de cables

## Conectores

Los conectores vienen en una gran variedad de formas y tamaños. Además de los modelos estándares, los conectores pueden tener polaridad inversa (géneros intercambiados) o roscas invertidas.



Figura 2.10) Tipos de conectores

## Adaptadores y Pigtaills

Los adaptadores (transiciones) y pigtaills se usan para interconectar diferentes clases de cables y dispositivos.

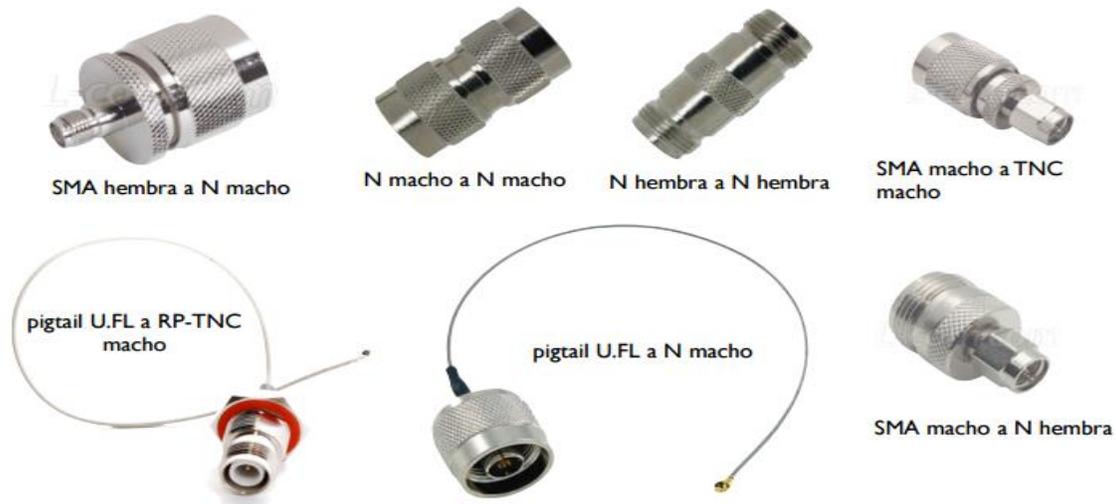


Figura 2.11) Adaptadores y pigtaills

Un pigtail es un cable flexible que se usa para reducir el esfuerzo mecánico que un cable rígido impondría en un conector pequeño como los que se usan en la mayoría de los casos.

Hay muchas clases de adaptadores y pigtaills. Se usan para efectuar la transición entre diferentes tipos de conectores con diferentes tamaños, tipo de rosca, género, etc.

Pero en lugar de utilizar adaptadores, es mejor comprar cables de los comercializados ya con las terminaciones apropiadas para nuestro propósito. Esto ayuda a evitar un posible punto de falla y la atenuación introducida por el adaptador.

## ACOPLAMIENTO DE IMPEDANCIAS

Los acopladores de impedancia son elementos indispensables para conseguir la máxima transferencia de potencia entre circuitos, ya sean amplificadores, osciladores, mezcladores, etc. Un caso de aplicación importante es en el acoplamiento de líneas de transmisión y antenas.

La idea básica del acoplador se ilustra en la figura 1, en que un generador, de impedancia  $Z_G = R_G + jX_G$  suministra potencia a una carga de impedancia  $Z_L = R_L + jX_L$ . para que la transferencia de potencia entre generador y carga sea máxima, es necesario que sus impedancias sean complejas conjugadas, es decir  $Z_G = Z_L^*$ , en que  $Z_L^*$  es el complejo conjugado de  $Z_L$ , es decir  $R_L - jX_L$ .

La función del acoplador es, por consecuencia, hacer que el generador “vea” en sus terminales una impedancia compleja igual al conjugado de su impedancia interna,

es decir,  $Z_G^* = R_G - jX_G$  y del lado de la carga, la impedancia de salida del acoplador debe ser igual al complejo conjugado de la impedancia de carga,  $Z_L^*$ .

En general, es deseable que en el acoplador no se disipe potencia, por lo que es frecuente implementarlos con elementos puramente reactivos (bobinas y condensadores), lo que da lugar a varias geometrías posibles: L invertida, T y  $\pi$ . En la práctica, la mayoría de las antenas requieren de acopladores de impedancia entre la línea de transmisión y los elementos radiadores. La implementación de estos acopladores puede hacerse diversas formas, dependiendo de la frecuencia y potencia de funcionamiento. En el análisis de los acopladores de impedancia se suele emplear la convención de que, si el circuito retarda o retrasa una señal por  $\theta^\circ$ , se dice que el defasamiento es negativo (capacitivo) y, si la adelanta, el defasamiento es positivo (inductivo). Las configuraciones más utilizadas son por lo general tres: L, T y  $\pi$ .

Las desadaptaciones de impedancia causan reflexiones y aumentan la ROE (Razón de Onda Estacionaria).

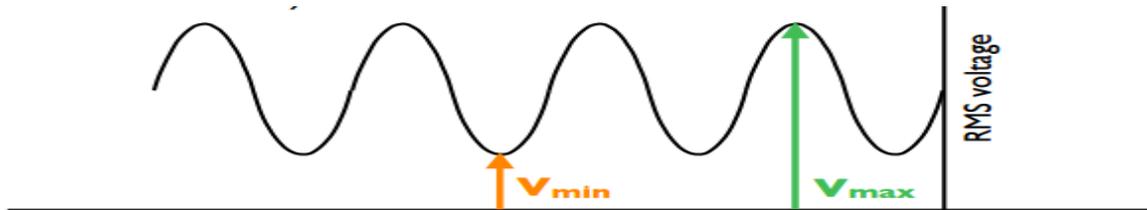
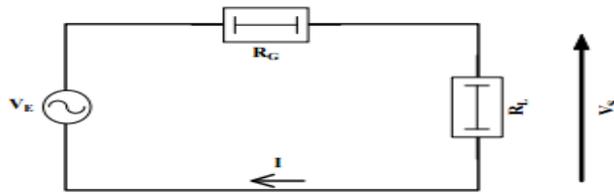


Fig 2.12) Razón de onda estacionaria (ROE)=  $V_{max}/V_{min}$

Tradicionalmente, la adaptación de impedancia ha sido considerada como una operación difícil y delicada, temida siempre por la mayoría de los profesionales de la electrónica, sobre todo cuando se trata de abarcar una banda ancha. Sin embargo, éste es un aspecto es muy importante, ya que de esta adaptación depende la optimización de los emisores y receptores, influyendo, por tanto, en la calidad del enlace.

En radiocomunicaciones, lo que se pretende es transferir la máxima potencia de una fuente de tensión  $V_E$ , con una resistencia interna  $R_G$ , a una carga de valor  $R_L$ .



**Figura 9.1.** *Transferencia de potencia.*

La tensión  $V_s$  en los bornes de la carga  $R_L$  vale:

$$V_s = V_E \frac{R_L}{R_L + R_G}$$

La potencia  $P_s$  suministrada a la carga  $R_L$  vale:

$$P_s = \frac{V_s^2}{R_L} = V_E^2 \frac{R_L}{(R_L + R_G)^2}$$

Se pretende entonces hallar la relación entre  $R_L$  y  $R_G$ , tal que la potencia sea máxima:

$$\frac{dP_s}{dR_L} = V_E^2 \frac{R_G - R_L}{(R_L + R_G)^3}$$

Cuando  $\frac{dP_s}{dR_L} = 0$ , la potencia  $P_s$  es máxima. Esta condición equivale a la relación bien conocida  $R_G = R_L$ .

Cuando la resistencia de carga  $R_L$  es igual a la resistencia interna del generador  $R_G$ , el circuito está adaptado en potencia. La potencia  $P_s$  suministrada a la carga es máxima y vale:

$$P_{S\text{máx}} = \frac{V_E^2}{4R_L}$$

Conviene destacar que este resultado no es idéntico al que se obtendría si se buscara la *máxima transferencia de tensión*. El máximo de la función de transferencia  $\frac{V_s}{V_E}$  se obtiene cuando  $R_G = 0$ .

En el caso simple de la figura 9.1, las impedancias  $R_G$  y  $R_L$  son resistencias puras. Ciertamente, puede darse este hecho concreto, pero no suele ser un caso real muy frecuente. Generalmente, las impedancias  $Z_G$  y  $Z_L$  son impedancias complejas.

Una impedancia compleja  $Z$  puede expresarse de la siguiente forma:

$$Z(p) = \frac{N(p)}{D(p)}$$

La impedancia se pone en forma de relación de dos polinomios función de  $p = j\omega$ . La impedancia  $Z(p)$  está constituida por un número cualquiera de elementos pasivos elementales, resistencias, bobinas y condensadores. Los grados de los polinomios  $N(p)$  y  $D(p)$  difieren en 1, como máximo.

## MÉTODOS PARA ACOPLAR IMPEDANCIAS

### Acoplador en L

El acoplador en L es el más simple y se configura con dos reactancias, una en serie y otra en paralelo como se muestra en la figura siguiente:

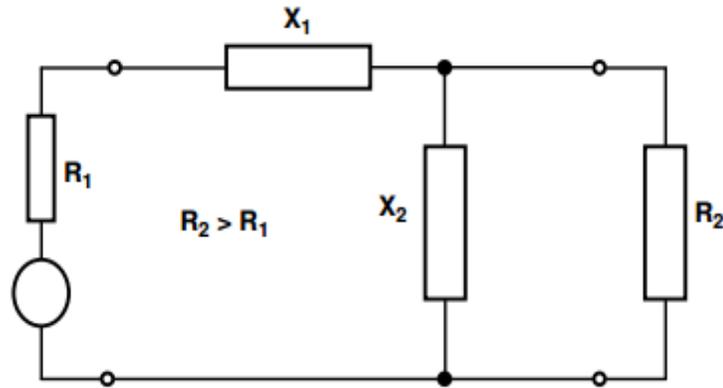


Figura 2.13) Acoplador en L

Ecuaciones de diseño:

$$Q = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} - 1 = \left| \frac{X_1}{R_1} \right| = \left| \frac{R_2}{X_2} \right|$$

$$X_2 = \frac{\pm R_2}{Q}$$

$$X_1 = -\frac{R_1 R_2}{X_2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{R_2}{X_2} \right)$$

En que:

Q es la Q con carga del circuito.

R1 es la resistencia de entrada en ohms

R2 es la resistencia de salida en ohms.

X1 es la reactancia de la rama en serie.

X2 es la reactancia de la rama en paralelo.

Hay que notar que la resistencia en paralelo con X2 siempre debe ser la mayor. El acoplador puede verse también como el reflejo del de la figura

## Acoplador en T

Este tipo de acoplador, en la configuración mostrada en la figura 3 se usa también cuando las impedancias de carga y del generador son puramente resistivas. Tiene la propiedad de que el desfase es independiente de la relación entre las resistencias de entrada y salida y puede considerarse como formado por dos acopladores en L conectados espalda con espalda. En este circuito se tienen dos Qs con carga, una Q de entrada y otra de salida. Para calcular el ancho de banda del acoplador T, debe ignorarse la Q menor y, por otra parte, la Q del circuito aumenta cuando aumenta el desfase.

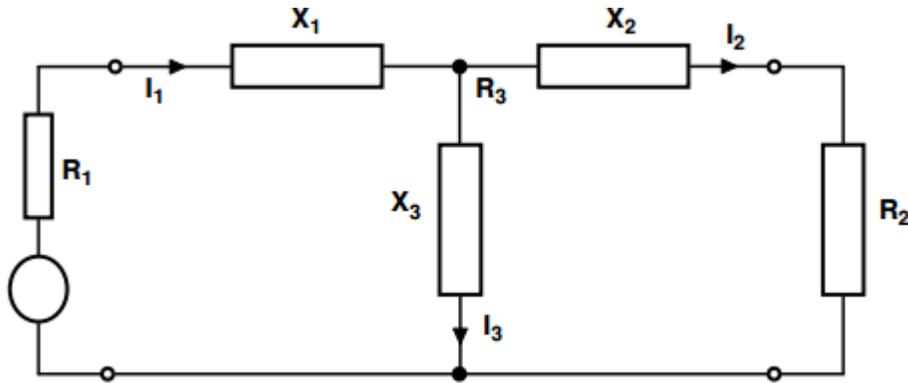


Figura 2.14) Acoplador en T

Ecuaciones de diseño

$$X_3 = \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{\text{sen}(\theta)} \quad (5)$$

$$X_1 = \frac{R_1}{\tan(\theta)} - X_3 \quad (6)$$

$$X_2 = \frac{R_2}{\tan(\theta)} - X_3 \quad (7)$$

$$Q_1 = \left| \frac{X_1}{R_1} \right| \quad (8)$$

$$Q_2 = \left| \frac{X_2}{R_2} \right| \quad (9)$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{W}{R_1}} \quad (10)$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{W}{R_2}} \quad (11)$$

$$I_3 = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 - 2 I_1 I_2 \cos(\theta)} \quad (12)$$

$$R_3 = (Q_2^2 + 1) R_2 \quad (13)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{X_1}{R_1} \right) \pm \tan^{-1} \left( \frac{X_2}{R_2} \right) \quad (14)$$

Donde:

$R_1$  = Resistencia de entrada que “ve” la red T ( $\Omega$ )

$R_2$  = Resistencia de salida que “ve” la red T ( $\Omega$ )

$I_1$  = Corriente de entrada a la red T (A)

$I_2$  = Corriente de salida de la red T (A)

$I_3$  = Corriente a través del elemento en derivación (A)

$X_1$  = Reactancia del elemento de entrada de la red T ( $\Omega$ )

$X_2$  = Reactancia del elemento de salida de la red T ( $\Omega$ )

$X_3$  = Reactancia de elemento en derivación ( $\Omega$ )

$W$  = Potencia de entrada (w)

$Q_1$  = Q con carga a la entrada

$Q_2$  = Q con carga a la salida

$R_3$  = Resistencia en el punto medio de la red T ( $\Omega$ )

Para emplear las fórmulas anteriores es necesario conocer, o bien  $Q_1$  y  $Q_2$ , o bien el ángulo de desfase  $\theta$ , ya que de otra forma el sistema es indeterminado. La elección de un ángulo arbitrario, si la fase no es importante, simplifica los cálculos.

### Acoplador en $\pi$

Este acoplador, mostrado en la figura 4, también puede considerarse como formado por dos acopladores en L y son válidas las consideraciones sobre la Q con carga realizadas para el acoplador T. En este caso se utilizan susceptancias en lugar de reactancias, a fin de simplificar los cálculos. La resistencia en el punto medio de una red  $\pi$  siempre es menor que  $R_1$  o  $R_2$ . Se considera, además, que una red  $\pi$  es de retardo o fase negativa cuando  $Y_3$  es positiva y viceversa.

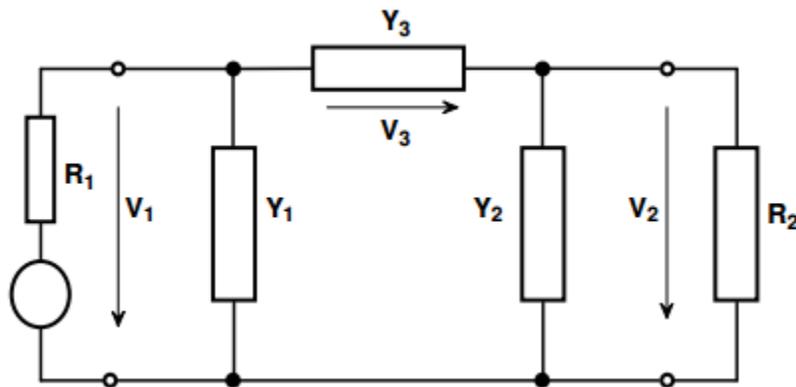


Figura 2.15) Acoplador en  $\pi$

Ecuaciones de diseño

$$Y_3 = \frac{1}{-\operatorname{sen}(\theta)\sqrt{R_1 R_2}}$$

$$Y_1 = \frac{\tan(\theta)}{R_1 - Y_3}$$

$$Y_2 = \frac{\tan(\theta)}{R_2 - Y_3}$$

$$Q_1 = |R_1 Y_1|$$

$$Q_2 = |R_2 Y_2|$$

$$V_1 = \sqrt{R_1 W}$$

$$V_2 = \sqrt{R_2 W}$$

$$V_3 = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(\theta)}$$

$$R_3 = \frac{Q_2^2 + 1}{R_2}$$

Lo mencionado para el acoplador en T es igualmente válido para el acoplador en  $\pi$ .

## LA CARTA SMITH

La carta de Smith constituye una herramienta básica en el análisis y diseño de cualquier circuito de microondas. Es un tipo de nomograma, usado en ingeniería eléctrica e ingeniería de telecomunicaciones, que muestra cómo varía la impedancia compleja de una línea de transmisión a lo largo de su longitud. Se usa frecuentemente para simplificar la adaptación de la impedancia de una línea de transmisión con su carga.

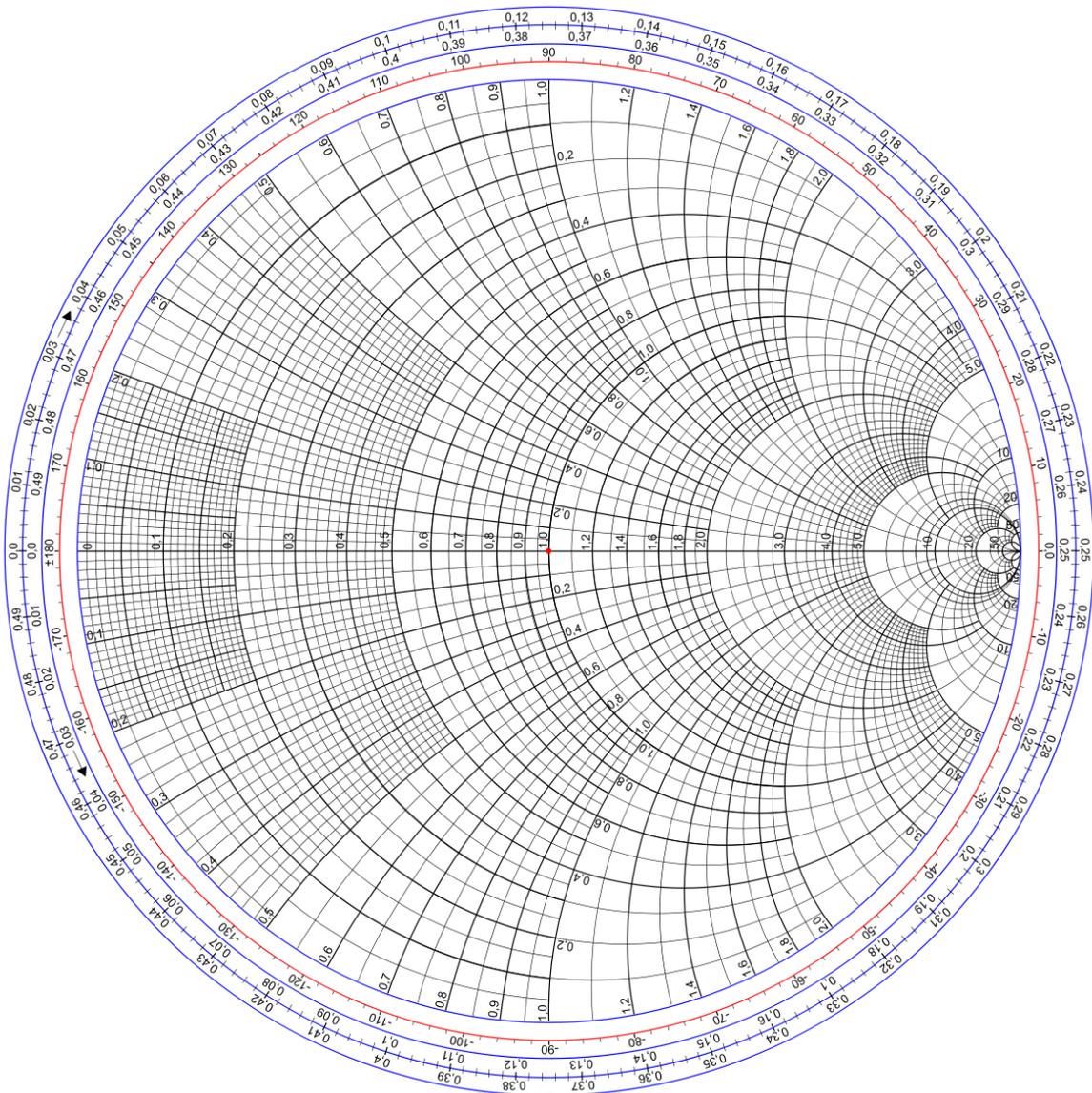


Figura 2.16) La carta Smith

El fundamento de la carta de Smith es la transformación de impedancias y coeficientes de reflexión haciendo uso de una representación polar en el plano de los coeficientes de representación polar en el plano de los coeficientes de reflexión.

De esta forma se obtiene una representación acotada del conjunto de todas las impedancias pasivas existentes

Contiene círculos de resistencia constante, círculos de reactancia constante, círculos de relación de onda estacionaria constante y curvas radiales que representan los lugares geométricos de desfase en una línea de valor constante; se utiliza en la resolución de problemas de guías de ondas y líneas de transmisión.

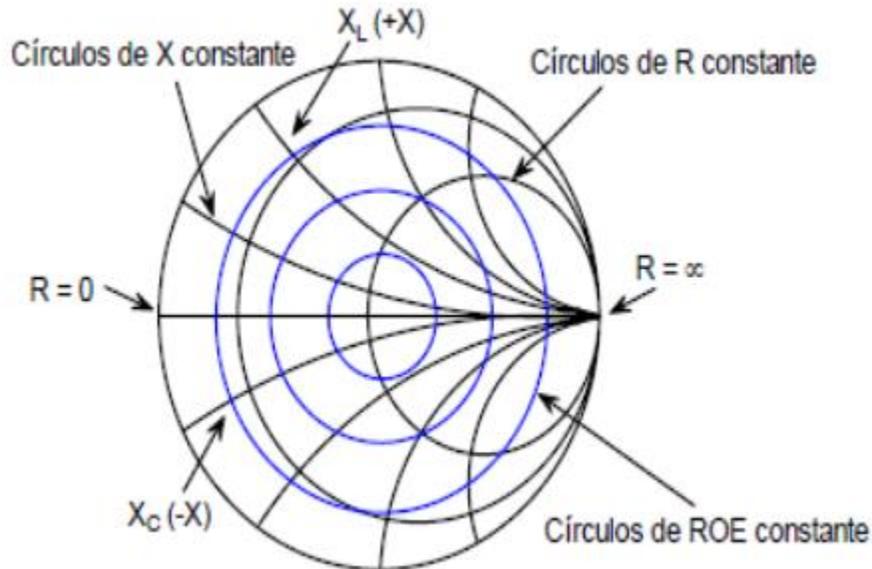


Fig 2.17) Círculos en la carta Smith

### Usos de la carta Smith

Se puede utilizar para una variedad de propósitos, incluyendo la determinación de la impedancia, la adaptación de la impedancia, la optimización del ruido, la estabilidad y otros. La carta de Smith es una ingeniosa técnica gráfica que virtualmente evita todas las operaciones con números complejos. Por ejemplo, se puede determinar la impedancia de entrada a una línea de transmisión dando su longitud eléctrica y su impedancia de carga.

El resultado importante es el hecho de que el coeficiente de reflexión de tensión y la impedancia de entrada a la línea normalizada en el mismo punto de la línea, están relacionados por la carta de Smith. En la parte exterior de la carta hay varias escalas. En la parte exterior de la carta está una escala llamada "ángulo del coeficiente de reflexión en grados", a partir de ésta se puede obtener directamente el valor del argumento del coeficiente de reflexión.

La escala angular en el borde tiene divisiones de 1/500 de una longitud de onda (0,72 grados) y la escala del coeficiente de reflexión se puede leer a una precisión de 0,02, con lo que se demuestra que es absolutamente suficiente para la mayoría de los propósitos. Por ejemplo, si la longitud de onda en cable coaxial en 1 GHz es 20 centímetros, la carta de Smith localiza la posición a lo largo del cable a 20/500

centímetros o 0,4 milímetros y resulta claro a cualquier persona que ha manejado el cable en el 1GHz que no puede ser cortado a esta precisión.

Si se requiere mayor precisión, una sección agrandada de la carta se puede hacer fácilmente con una fotocopia.

Muchas de las características más avanzadas de los circuitos de microondas se pueden representar sobre la carta de Smith como círculos, por ejemplo, las regiones de la figura de ruido y de estabilidad de los amplificadores. El "punto en el infinito" representa el límite del aumento muy grande de la reflexión y, por lo tanto, nunca necesita ser considerado para los circuitos prácticos. Una proyección simple del lugar geométrico de la impedancia (o admitancia) en el diagrama sobre el eje real da una lectura directa del coeficiente de onda estacionaria (ROE o *VSWR*) a través de la escala inferior correspondiente.

## EL SIMULADOR ADS SOFTWARE

Advanced Design System es el software líder mundial en automatización de diseño electrónico para RF, microondas y aplicaciones digitales de alta velocidad. En una interfaz potente y fácil de usar, ADS es pionera en las tecnologías más innovadoras y comercialmente exitosas, como los simuladores X-parameters \* y 3D EM, utilizados por empresas líderes en la comunicación inalámbrica y redes y en las industrias aeroespacial y de defensa. Para WiMAX™, LTE, enlaces de datos, radar y aplicaciones satelitales de varios gigabits por segundo, ADS proporciona un diseño y verificación completos basados en estándares con las bibliotecas inalámbricas y la co-simulación de circuito-sistema-EM en una plataforma integrada.

ADS es un simulador como Spycy, en avance. Pero se centra en el RF y el diseño de microondas, por lo que la mayoría de sus dispositivos en la biblioteca son dispositivos de microondas.

### Simulación de circuitos:

Éstos son algunos de los análisis de ADS:

**Análisis DC:** se utiliza para determinar el punto de polarización del circuito

**Análisis transitorio:** ejecuta el análisis del dominio del tiempo en los circuitos y considera la no linealidad de los elementos.

**Análisis de CA:** ejecuta el análisis de señal pequeña y utiliza el modelo lineal de elementos en su punto de polarización. Así, los elementos no lineales como el transistor se sustituyen por un modelo lineal (pequeño circuito de señal) que incluye resistencias, condensadores, inductores y fuentes de tensión y corriente.

Análisis de parámetros S: calcula los parámetros de dispersión de los componentes y muestra la variación de los parámetros S en diferentes frecuencias. También se utiliza para calcular la figura de ruido y el retardo de grupo.

### Balance armónico:

El balance armónico es una técnica de análisis de dominio de frecuencia para simular circuitos y sistemas no lineales. Es muy adecuado para simular circuitos analógicos de RF y microondas, ya que estos son más naturalmente manejados en el dominio de la frecuencia. Los circuitos que mejor se analizan usando HB bajo condiciones de señal grandes son:

- \*Amplificadores de potencia
- \* Multiplicadores de frecuencia
- \*Mezcladores
- \*Osciladores
- \*Moduladores

La simulación de balance armónico calcula la magnitud y la fase de voltajes o corrientes en un circuito potencialmente no lineal. Utilice esta técnica para:

- \*Calcular cantidades tales como P1dB, puntos de interceptación de tercer orden (TOI), distorsión armónica total (THD) y componentes de distorsión de intermodulación
- \*Realizar análisis del contorno de carga-tracción del amplificador de potencia
- \*Realizar análisis de ruido no lineal
- \*Simular los armónicos del oscilador, el ruido de fase y los límites de amplitud

### La carta Smith en ADS

ADS cuenta con la ventaja de utilizar la carta Smith en una utilidad presente en el mismo Software. Con ella, podemos obtener los valores de los elementos que se utilizaran en el acoplamiento de impedancias de la antena al sistema. El uso como se ha mencionado es complejo, pero se tiene la ventaja que ADS software utiliza los valores del circuito que se está estudiando en la ventana y arroja los resultados para éste.

A continuación se presentan los pasos principales para obtener los valores de capacitancia e inductancia para el acoplamiento de impedancias.

## RECTIFICADOR

### El doblador de voltaje

Un circuito multiplicador de voltaje es un arreglo de capacitores y diodos rectificadores que se utiliza con frecuencia para generar altos voltajes de Corriente Directa. Este tipo de circuito se utiliza el principio de la carga en paralelo de capacitores, a partir de la entrada de Corriente Alterna y añadiendo voltaje a través de ellos en serie se obtiene voltajes de CD más alto que el voltaje de la fuente. Circuitos individuales de multiplicadores de Voltaje (a menudo llamados etapas) se pueden conectar en serie para obtener aún más altos voltajes de salida.

Estos son empleados en la transmisión de energía inalámbrica, recolección de energía, sistemas RFID y otras; donde la potencia disponible es muy poca. Resulta de importancia obtener la mayor potencia posible a la salida, exigiendo eficiencia por parte del multiplicador de tensión. En este trabajo se analiza la eficiencia de conversión y potencia de salida de los multiplicadores de tensión en cuanto al número de etapas.

A continuación se muestra un doblador de voltaje de una etapa:

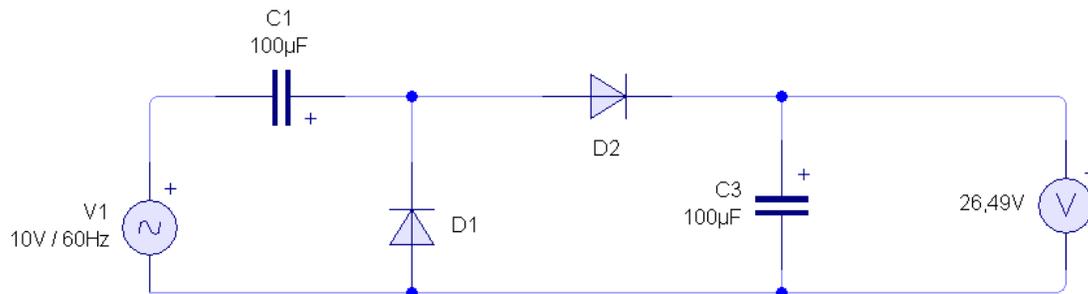


Fig 2.18) Doblador de voltaje de una etapa

Funcionamiento:

- En el primer semiciclo negativo de la onda de entrada, el diodo D1 conduce permitiendo el paso de la corriente por el capacitor C1, cargándose a una tensión igual al máximo valor de tensión de la tensión de entrada. Si la tensión de entrada, el valor pico de esta entrada es  $V_{max}$ , entonces este capacitor se carga a esta tensión. En este ciclo el diodo no conduce.
- En el siguiente semiciclo de la tensión de entrada (semiciclo positivo), el diodo D1 está polarizado en inverso y no conduce. El diodo D2 está polarizado en directo y la corriente fluye pasando por el capacitor C1, el diodo D2 y el capacitor C3.
- En el inicio del semiciclo negativo, el capacitor C3 está descargado, pero C1 está cargado a  $V_{max}$  (valor pico de la tensión de entrada). El capacitor C3 se

cargará entonces al doble de la tensión pico de la entrada, pues se suman ésta (la tensión pico de entrada y la tensión acumulada que está en el capacitor C1.

El siguiente circuito es utilizado para dos etapas:

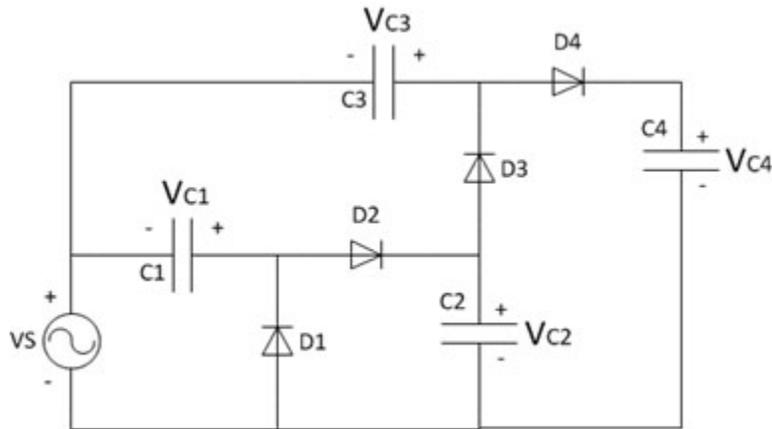


Fig 2.19) Doblador de voltaje de dos etapas

El siguiente circuito es para tres etapas:

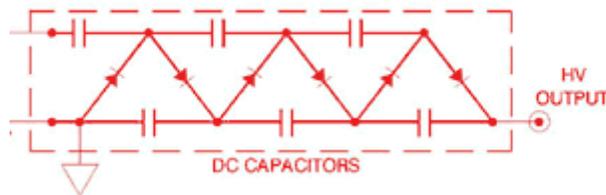


Fig 2.20) Doblador de voltaje de tres etapas

Hemos conocido el diseño de un multiplicador de voltaje y los elementos que se utilizan son capacitores y diodos. En un multiplicador de voltaje de alta tensión, se utilizan obviamente dispositivos (diodos y capacitores) que resistan las altas potencias. Sin embargo, el diseño de sistema que estamos trabajando es de muy bajas potencias de entrada, es por esto que los dispositivos que utilizaremos tendrán que ser de menor capacidad (en el caso de capacitores), y diodos especiales para RF.

Los diodos que mejor trabajan en RF y que han sido especialmente diseñados para estas frecuencias son los diodos Schottky. A continuación se da a conocer información sobre el diodo Schottky (también llamado de barrera), y las características del diodo que utilizaremos, que en éste caso es el diodo Schottky HSMS-2850, que por sus ventajosas características en RF es el modelo que mejor se adapta a las necesidades.

## El diodo schottky

(Pasar en limpio de libro de Boylestad)

### El diodo Schottky HSMS-2850

En nuestro proyecto de investigación, obtuvimos información que este diodo es utilizado en la mayoría de aplicaciones de RF, y en algunos trabajos de investigadores en otros países, han utilizado este diodo por las ventajosas características que posee.



Figura 2.21) Diodo Schottky HSMS-2850

El diodo Schottky HSMS-2850-TR1G es un diodo detector Schottky sin polarización, en un montaje de tres pines. Se ha diseñado y optimizado para su uso en aplicaciones de pequeña señal ( $P_{in} < -20\text{dBm}$ ) a frecuencias inferiores de 1.5 GHz. Son ideales para aplicaciones RF/ID y tarjetas de RF donde la alimentación (polarización) no está disponible. El chip de diodo de barrera Schottky consiste en una barrera de metal-semiconductor formada por deposición de una capa de metal sobre un semiconductor.

Estas son sus características:

Alta sensibilidad de detección

<b>Configuración de Diodo:</b> Único	<b>Tensión Inversa Vr:</b> 2V
<b>Corriente Directa If Máx.:</b> 1mA	<b>Tensión Directa VF Máx.:</b> 250mV
<b>Capacitancia Ct:</b> 0.3pF	<b>Encapsulado del Diodo:</b> SOT-23
<b>Núm. de Pines:</b> 3 Pines	<b>Empaquetado:</b> Cinta Cortada

## RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La radiación electromagnética resulta de la oscilación de campos eléctricos y magnéticos. La onda de energía generada por estas vibraciones se desplaza por el espacio a la velocidad de la luz. La luz visible es una forma de radiación electromagnética (EM).

Rayos X , ondas de radio , rayos gamma , "luz" infrarroja y ultravioleta, son los tipos más importantes de radiación electromagnética. Todas son vibraciones de ondas electromagnéticas que viajan, cada una con su propia longitud de onda característica. Organizadas por longitud de onda, conforman el espectro electromagnético.

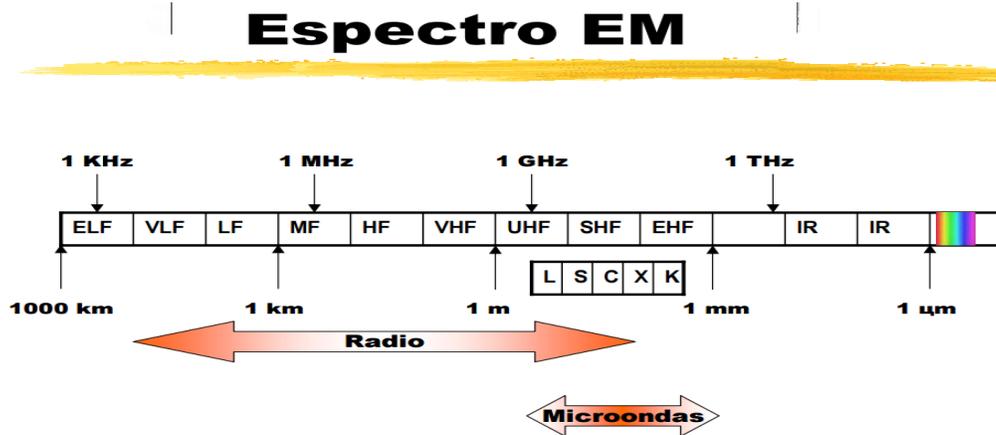


Figura 2.22) El espectro electromagnético

### Ondas de radio

Las ondas de radio son un tipo de radiación electromagnética. Una onda de radio tiene una longitud de onda mayor que la luz visible. Las ondas de radio se usan extensamente en telecomunicaciones.

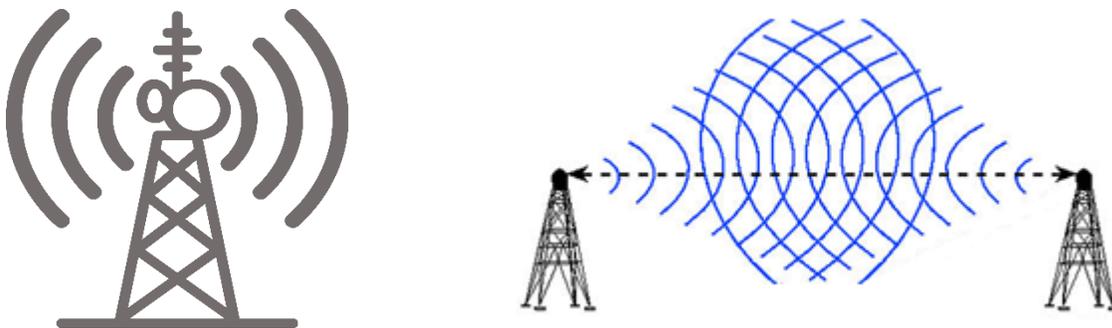


Figura 2.23) Propagación de las ondas de radio

Las ondas de radio son un tipo de radiación electromagnética con longitudes de onda en el espectro electromagnético más largo que la luz infrarroja.

Las ondas de radio tienen longitudes que van de tan sólo unos cuantos milímetros (décimas de pulgadas), y pueden llegar a ser tan extensas que alcanzan cientos de kilómetros (cientos de millas). En comparación, la luz visible tiene longitudes de onda en el rango de 400 a 700 nanómetros, aproximadamente 5 000 menos que la longitud de onda de las ondas de radio. Las ondas de radio oscilan en frecuencias entre unos cuantos Kiloherz (KHz o miles de Hertz) y unos cuantos Terahertz. La radiación "infrarroja lejana", sigue las ondas de radio en el espectro electromagnético, los IR lejanos tienen un poco más de energía y menor longitud de onda que las de radio.

Las microondas, que usamos para cocinar y en las comunicaciones, son longitudes de onda de radio cortas, desde unos cuantos milímetros a cientos de milímetros (décimas a decenas de pulgadas).

Varias frecuencias de ondas de radio se usan para la televisión y emisiones de radio FM y AM, comunicaciones militares, teléfonos celulares, radioaficionados, redes inalámbricas de computadoras, y otras numerosas aplicaciones de comunicaciones.

La mayoría de las ondas de radio pasan libremente a través de la atmósfera de la Tierra. Sin embargo, algunas frecuencias pueden ser reflejadas o absorbidas por las partículas cargadas de la ionosfera.

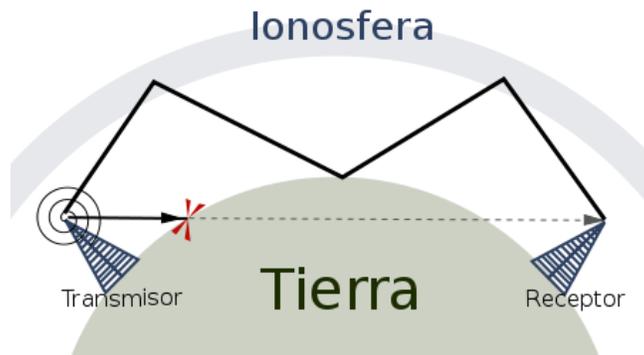


Fig 2.24) Ionósfera en la transmisión de RF

### La banda GSM

GSM (Sistema Global para la Comunicación Móvil) es un sistema de telefonía móvil digital que es ampliamente utilizado en Europa y otras partes del mundo. GSM utiliza una variación de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) y es el más utilizado de las tres tecnologías digitales de telefonía inalámbrica (TDMA, GSM y CDMA). GSM digitaliza y comprime los datos, luego los envía por un canal con otros dos flujos de datos de usuario, cada uno en su propio intervalo de tiempo. Funciona en la banda de frecuencias aproximadamente de 800 MHz o 1900 MHz.

## Banda GSM en México y el mundo

A continuación se muestra un mapa que presenta las bandas GSM que se encuentran alrededor del mundo.

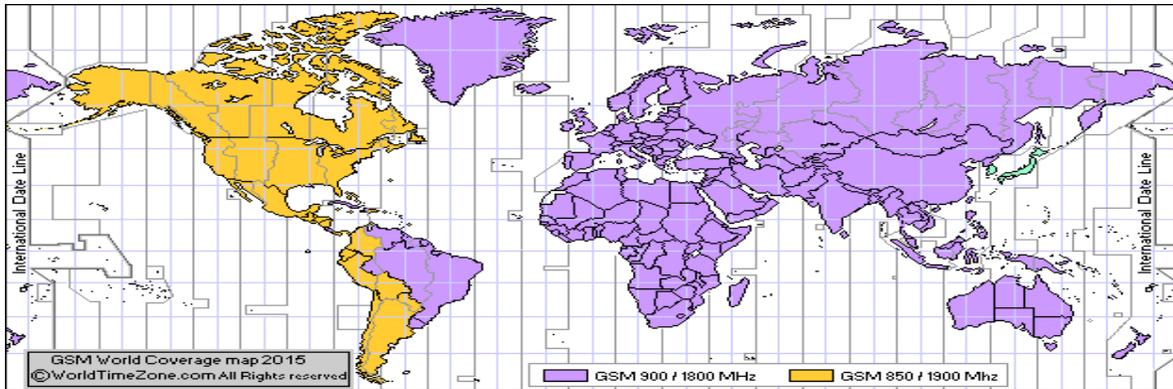


Figura 2.25) La banda GSM en México y el mundo

- **México:** 850/1900 MHz - 3G/4G Redes disponibles

Estas son las bandas y frecuencias de AT&T (Iusacell y Nextel), Movistar y Telcel en México, que son los principales proveedores.

OPERADOR	BANDA / FRECUENCIA PARA 3G	BANDA / FRECUENCIA PARA 4G LTE
AT&T (Iusacell y Nextel)	B2 / 1900 MHz. B5 / 850 MHz. B4 / 1700/2100 MHz.	B4 / 1700/2100 MHz.
Movistar	B2 / 1900 MHz. B5 / 850 MHz.	B2 / 1900 MHz.
Telcel	B2 / 1900 MHz. B5 / 850 MHz.	B4 / 1700/2100 MHz.

Figura 2.26) Bandas y frecuencias de principales proveedores en México

## CAPITULO III

### DESARROLLO

De acuerdo a las elecciones en los elementos del sistema que elegimos, tuvimos el siguiente desarrollo para obtener el diseño requerido y poder hacer las pruebas necesarias.

En el anteproyecto se manejaron seis actividades principales, y por supuesto hay más actividades derivadas de éstas. A continuación se da a conocer las actividades realizadas en este proyecto, detallando cada una de éstas y mencionando las formas en que obtuvimos los diferentes elementos del sistema.

#### 1.-Estudio del estado del arte de sistemas de recolección de energía electromagnética

En esta actividad realizamos un estudio minucioso de los sistemas de recolección de energía electromagnética. Una gran ventaja que se presentó en el desarrollo de ésta actividad fue que el CICESE cuenta con una gran cantidad de accesos a temas de éste tipo. El departamento de Electrónica y Telecomunicaciones tiene acceso a la IEEE. Gracias a esta ventaja pudimos obtener una amplia información de sistemas y avances que existen principalmente en otros países, como universidades de EU, Japón, Reino Unido, etc.

En 2016, se llevó a cabo un Simposio Internacional de Antenas y Propagación, en el cual mi asesor estuvo presente. En este evento hubo una sección especial para el tema “Energy Harvesting”, que trataba sobre temas relacionados con eficiencias de antenas y diseños de rectificadores eficaces. Entre los más afines con nuestro proyecto hay varios, pero a continuación se presentan los siguientes tres en resumen:

- ANTENA MULTIBANDA FRACTAL PARA RECOLECCION DE ENERGIA EN RF

Éste documento presenta una antena fractal multi banda diseñada para la recolección de energía de RF. La antena está basada en una antena dipolo cruzado. Mediante la adición iterativa de una ranura en cada polo, se logra un rendimiento en la multi-banda. El tamaño y el tiempo de iteración de la antena están optimizadas a través de la simulación en HFSS (High Frequency Structural Simluator) , y como resultado la antena cubrió más de las fuentes comunes de RF como 3G, 4G, y WLAN in 2.4 GHZ y 5.8GHz. Una versión derivada de la antena está desarrollada envolviendo la antena original con una estructura de anillo para un mejor desempeño en los 900MHz. Además de las características multi banda, la antena es también de apariencia compacta y artística.

Diseño y dimensiones de la antena:

TABLE. I. DIMENSIONS OF THE FRACTAL ANTENNA

	R	r	L
I	16.1mm	7.7mm	15.8mm
II	3.95mm	1.8mm	3.9mm

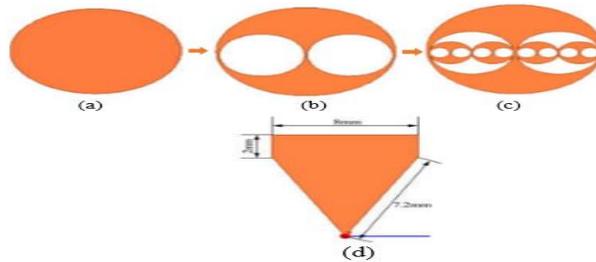


Fig. 1. Iteration of the fractal. (a) The zeroth iteration. (b) The first iteration. (c) The second iteration. (d) The connection part.

Figura 3.1) Antena multibanda

- ANTENA DE FRECUENCIA AJUSTABLE USANDO MATERIAL FLEXIBLE PARA APLICACIONES DE RECOLECCION DE ENERGIA RF

Se presenta una nueva configuración de una antena con frecuencia ajustable. Se utiliza el principio de la antena acoplada microstrip. La parte de la antena está impresa en un material flexible y puede fácilmente ser adherido o removido del exterior del empaquetado del circuito para alterar su frecuencia de resonancia mientras que la red de alimentación y el circuito conectado no son afectados por dentro.

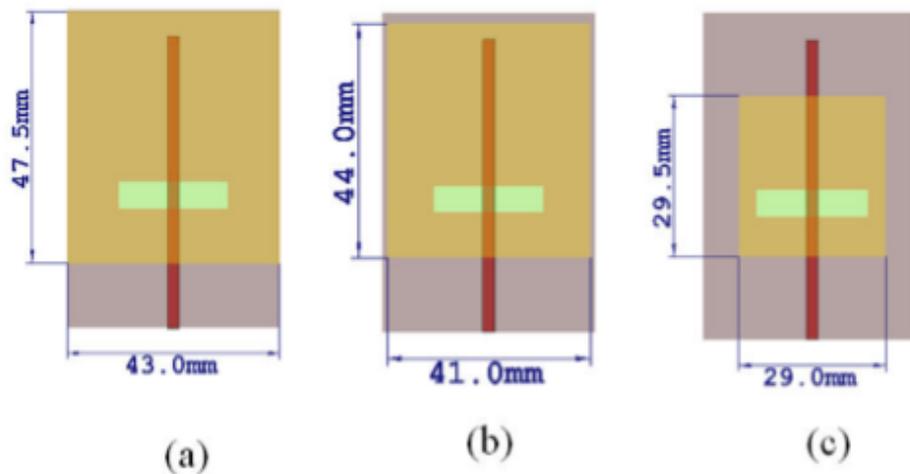


Fig. 2. Parameters of proposed antenna for (a) GSM 1800 MHz; (b) GSM 1900 MHz; (c) WLAN 2.4 GHz

Figura 3.2) Antena de frecuencia ajustable

- Diseño e implementación de una antena para recolección de energía UHF altamente eficiente

Este artículo presenta el diseño e implementación de una novedosa y altamente eficiente antena dirigida flexionado dipolo con un circuito conectado a tierra y un circuito asociado para recolección de energía en los 915 MHz.

La antena esta implementada en una placa FR4 con medidas de 41.3 mm y 17.5 mm. La eficiencia de conversión es medida 0.005% en una distancia de 1.5 m de la fuente de radiación. En la prueba, un lector RFID UHF comercial fue utilizado como la fuente de radiación.

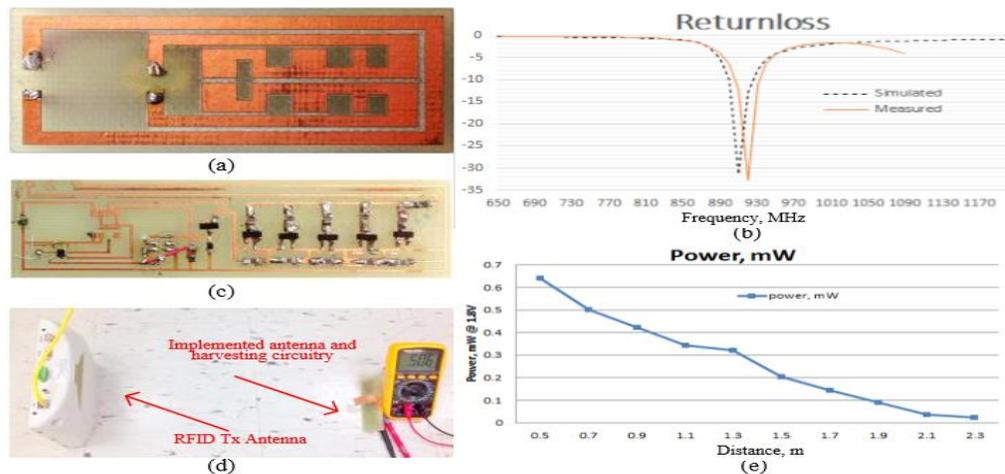


Fig. 5. (a) Implemented antenna; (b) Simulated and measured return loss; (c) Implemented Cockcroft-Walton charge pump; (d) Snapshot of the test bench to measure harvested power; (e) Harvested power vs distance curve.

Figura 3.3) Antena para recolección de energía UHF

En las actividades realizadas en este punto, nos dimos cuenta que si bien existen tecnologías similares en otros lugares, algunas se enfocan principalmente en la antena; esto es importante, ya que una antena eficiente significa mejor recolección de energía. En otros artículos manejan el diseño del rectificador, introducen el concepto de acoplamiento de impedancias. Otros se centran en estudiar las bandas principales de las que se puede recolectar energía.

En un artículo publicado por miembros de la IEEE, se realizó un estudio de las bandas a las que podría estar dedicada la recolección de energía. El estudio se llevó a cabo en Londres; se observó que las frecuencias de mayor presencia en el entorno son las de DTV (televisión digital en los 500 MHz aproximadamente), las de 900 MHz, las de 1800 MHz, las de 2100 MHz, y las de 2.4 GHz. A continuación se muestra la gráfica de la investigación que se realizó y que da sustento a la justificación de nuestro proyecto.

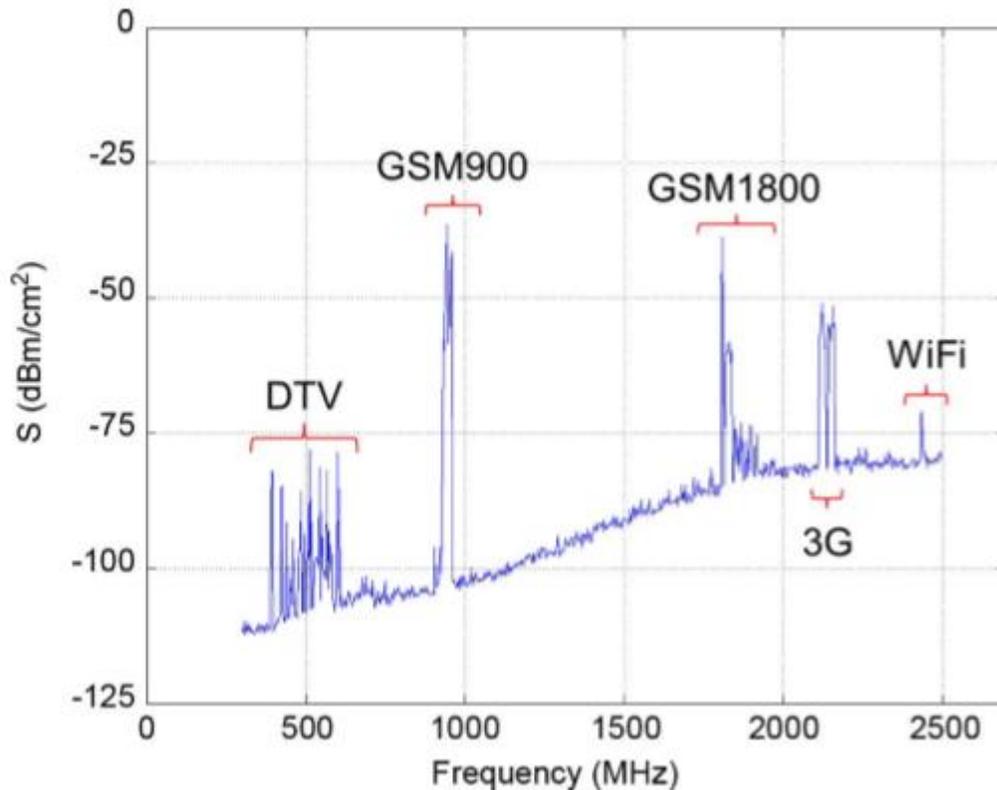


Figura 3.4) Principales frecuencias disponibles en una ciudad (Londres)

Posteriormente a obtener todos estos resultados de éstas investigaciones, nos damos cuenta que muy poco hay de recolección de energía electromagnética con sistemas de antenas a nivel nacional. Hay varios estudios realizados en otros países, recordemos que las emisiones de energía en RF son emisiones constantes. Las torres o sistemas que transmiten las señales de RF están irradiando energía constantemente.

Como parte de ésta actividad, también se hizo una investigación amplia de lo que viene inmerso en el diseño completo de un recolector de energía, el software que podríamos utilizar para hacer simulaciones por ejemplo, los diseños del rectificador, una cantidad aproximada de energía que podría ser captada, el tipo de antena que sería conveniente.

Con esta actividad tenemos lo suficiente para seguir avanzando en el proyecto. Nos quedamos con investigaciones semanales para seguir aunando más en el tema. Es una actividad que si bien tiene una duración específica por cuestiones de calendario, debe seguir aplicándose.

## 2.- ESTUDIO Y DETERMINACIÓN DEL ELEMENTO DE ANTENA ADECUADO PARA EL SISTEMA

Esta actividad se desarrolla en el estudio de las antenas. Las características que cada una pueda tener, así como los tipos de antenas existentes hoy en día, con sus diferentes aplicaciones.

Nos dimos a la tarea de encontrar el elemento adecuado para la antena, basándonos en la ventaja que tendría al utilizar una en específico. Al tener en cuenta, por nuestras investigaciones realizadas en el punto uno, que el sistema que queríamos diseñar, no era apto para media o alta potencia, decidimos centrarnos en un tipo de antena de la cual se conoce poco pero que se ha ido utilizando mayormente en los últimos años: la antena microstrip.

La antena microstrip (también llamada tipo parche), es un tipo de antena de la cual se han dado características y diseños en el marco teórico de éste reporte. El sistema que tenemos como objetivo diseñar, tiene que ser fácil de manipular y de un tamaño apropiado; no debemos utilizar antenas voluminosas, y la principal ventaja de este tipo de antena es el tamaño. En los estudios realizados en el punto uno, pudimos observar diseños de antenas tipo parche de tamaños considerablemente reducidos, sus principales aplicaciones era la alimentación de sensores que trabajan a potencias en el orden de los microwatts.

El diseño de la antena tipo parche es una antena tipo rectangular, que ha sido diseñada en el software HFSS; un software para simulaciones y diseños en 3D, en éste caso lo utilizamos para el diseño de la antena y para observar sus características. Las características de la antena se muestran a continuación, tenemos el patrón de radiación de la antena, las medidas de la antena y el parámetro S11 de la antena que nos indica la cantidad de potencia reflejada.

A continuación se muestran las actividades desarrolladas en el Software HFSS para diseñar la antena y observar sus características.

La antena microstrip como se ha mencionado en el marco teórico está compuesta de un sustrato, una capa de tierra y el parche que es la antena.

Estas características son las que se introducen en HFSS. En el caso del sustrato el diseño se hizo como se muestra a continuación:

- Se elige un tipo de Sustrato Rogers RO4350, y se modifican las características del sustrato:

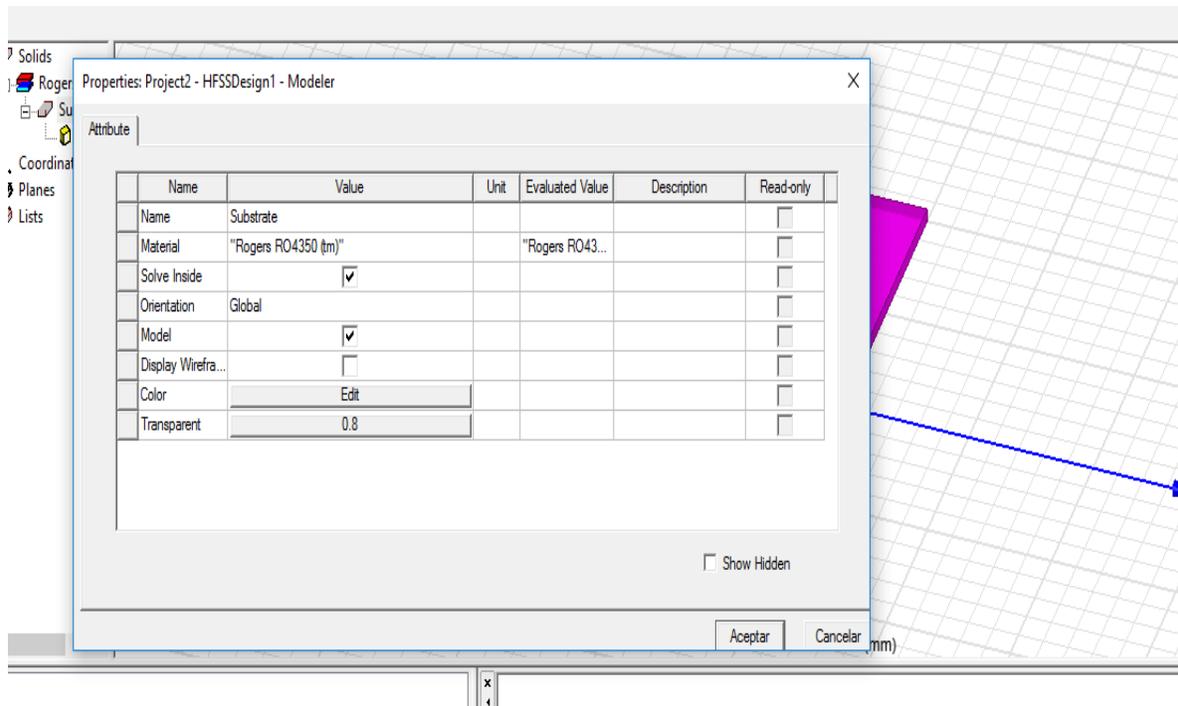


Figura 3.5) Características del sustrato

Después de haber realizado los cambios necesarios, el plano del sustrato queda la siguiente manera:

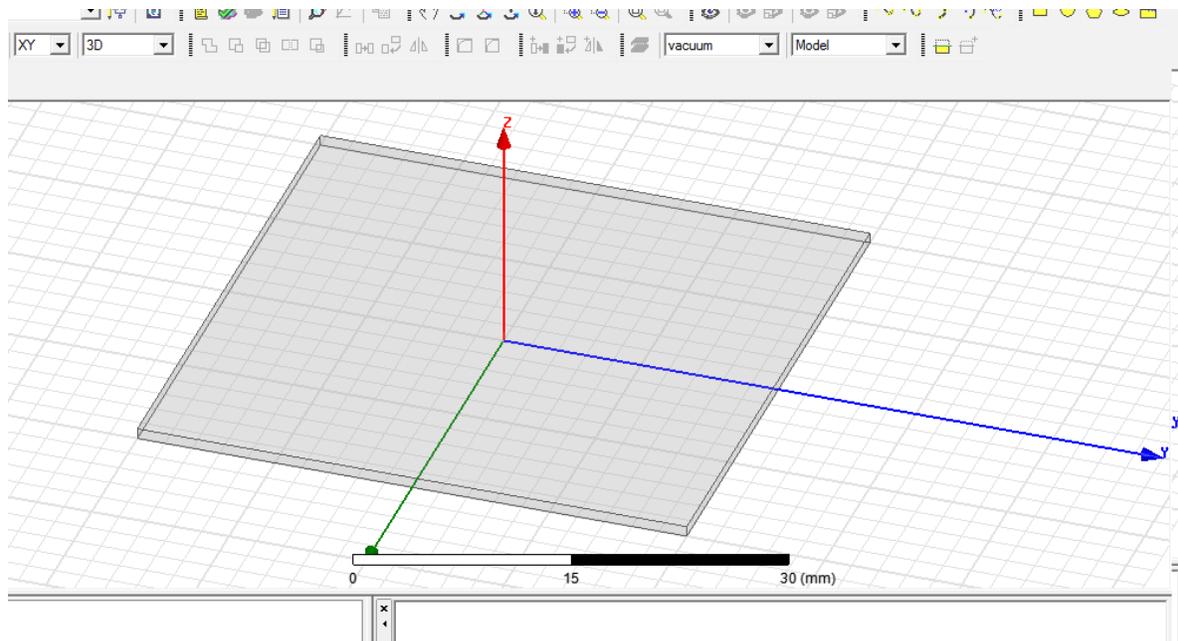


Figura 3.6) Sustrato en HFSS

- Después de haber obtenido el sustrato, se procede con introducir la parte de tierra ("Ground").

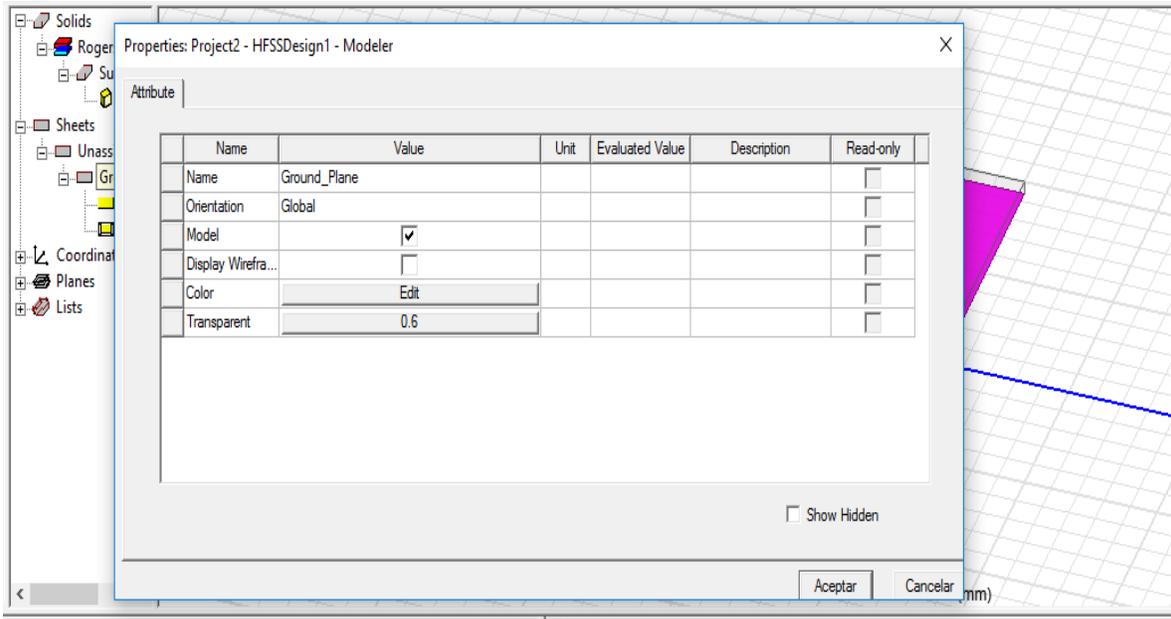


Figura 3.7) Características de la tierra (Ground)

- Después de haber introducido la parte “Ground”, el diseño queda de la siguiente manera, se pueden distinguir las dos partes, una del sustrato y otra de Ground.

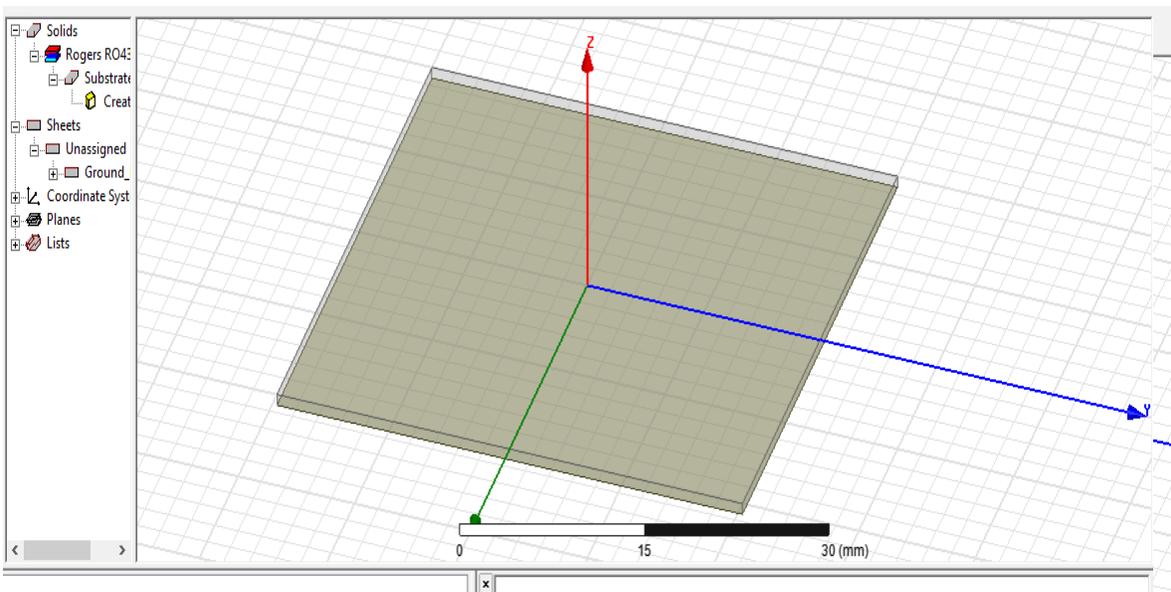


Figura 3.8) Unión del sustrato y la tierra en HFSS

En la siguiente imagen, podemos observar el diseño de la antena y las medidas de la antena diseñada para operar en los 850MHz.

Hasta esta parte se tiene un buen avance. Después de esto se procede a poner la parte de la antena (el parche) sobre el sustrato como se muestra en las siguientes imágenes.

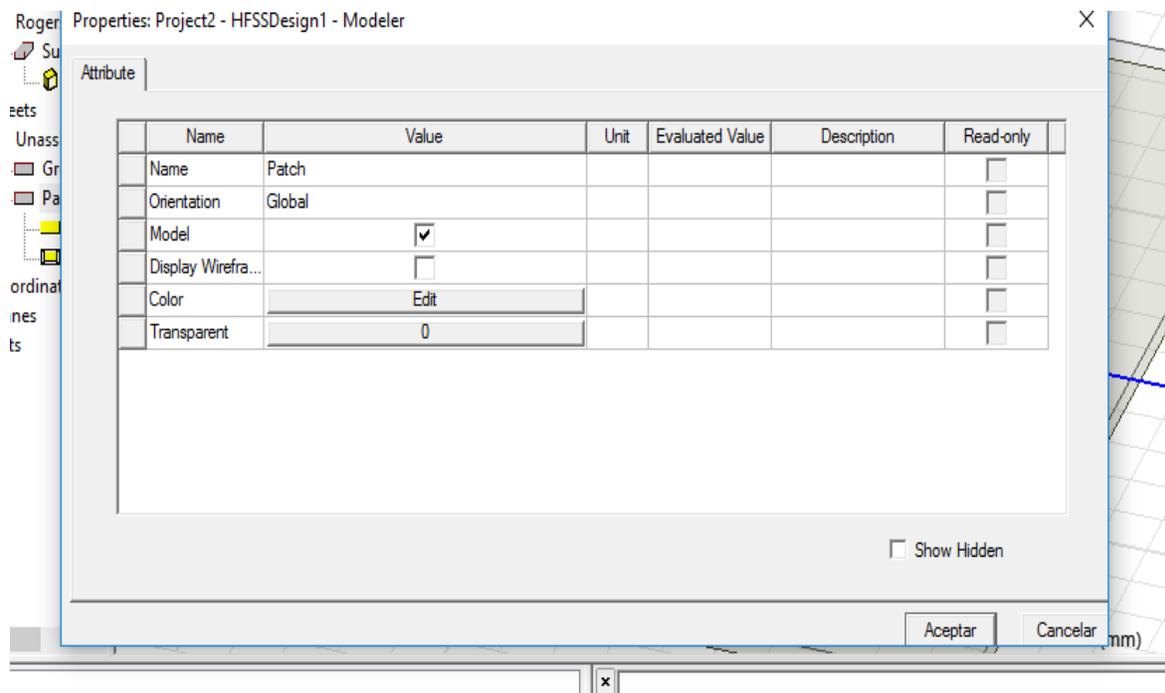


Figura 3.9) Características del parche

- La parte rectangular de la antena queda de la siguiente manera, aún falta ponerle el feed line de alimentación.

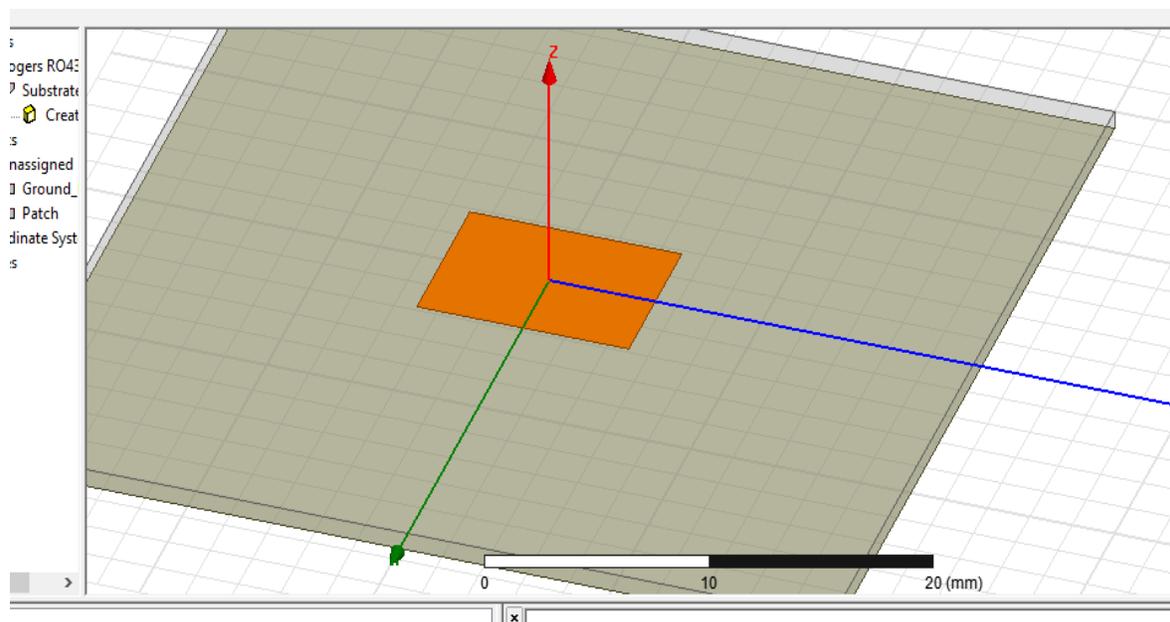


Figura 3.10) Antena sin FeedLine

- Se diseña otro rectángulo en el software, que será la parte que será sustraída de la placa principal para que la placa tome forma

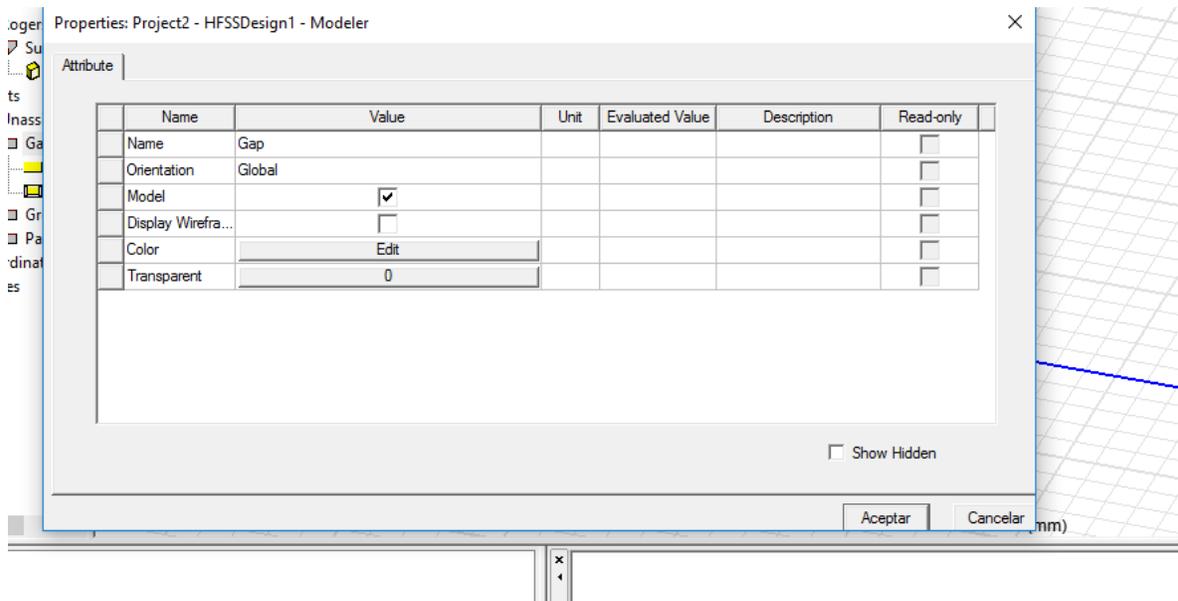


Figura 3.11) Porción a eliminar de la antena

- Esta es la forma de dicha parte

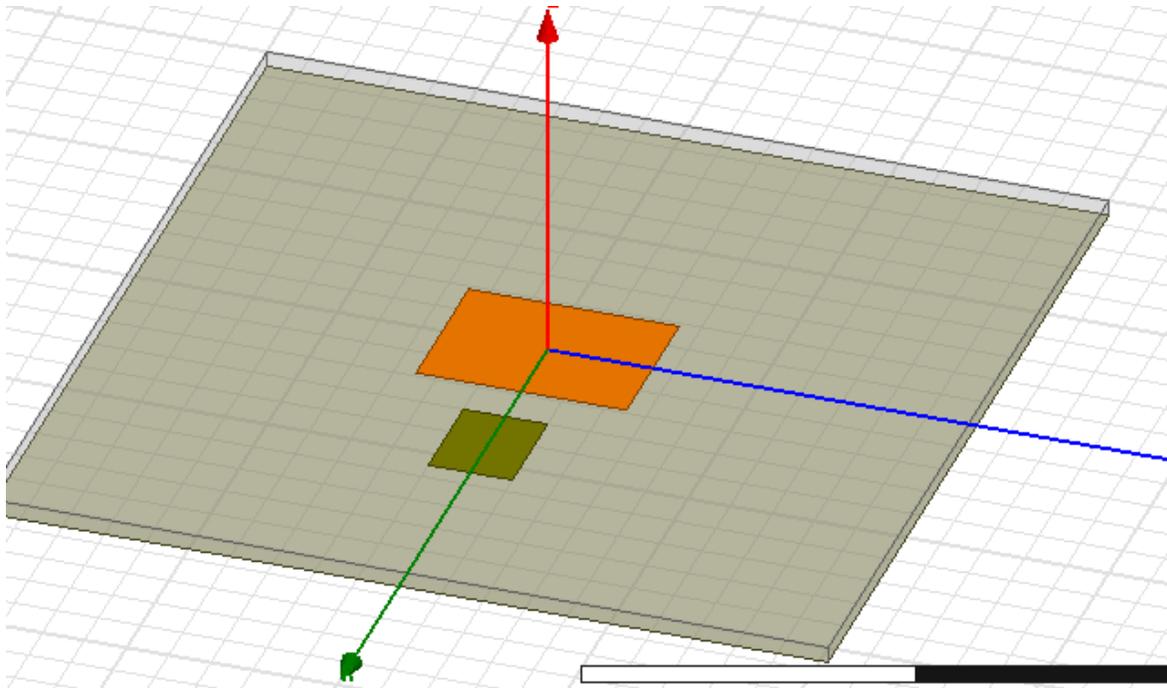


Figura 3.12) Diseño de la antena sin FeedLine

- Se procede a sobreponer la parte verde en el parche principal.

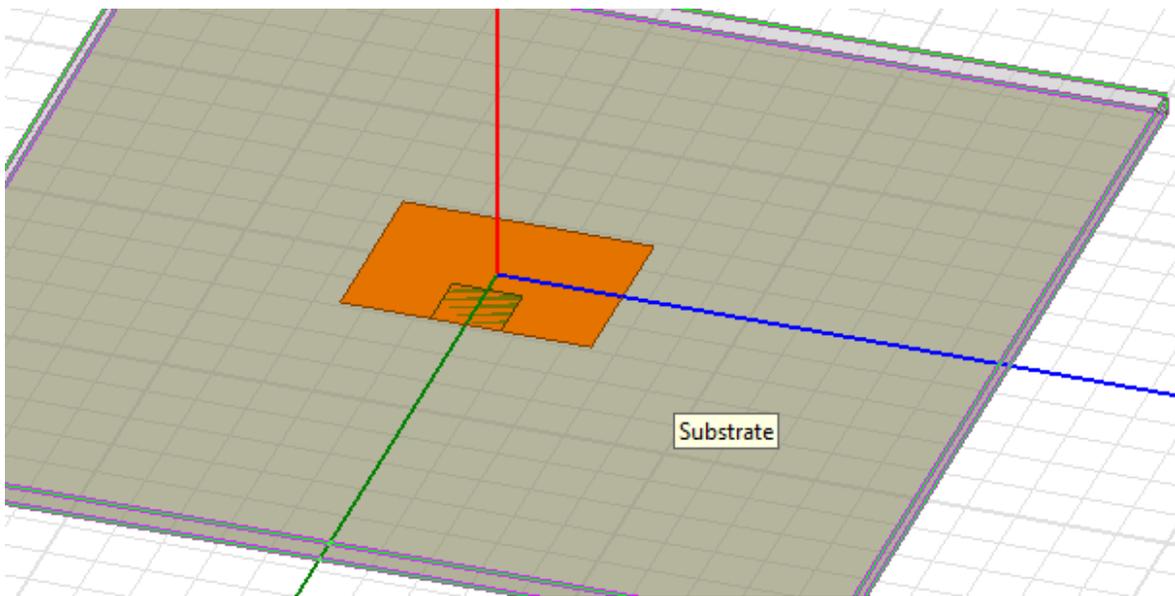


Figura 3.13) Porción sobrepuesta en el parche

- A continuación se extrae la parte verde del parche

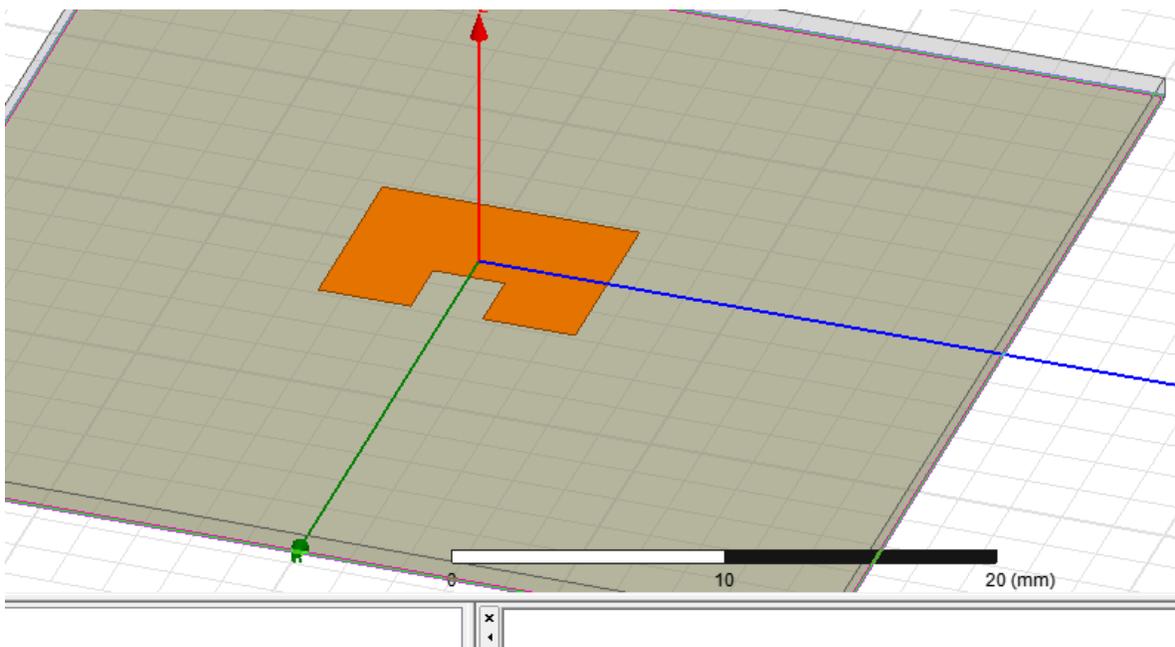


Figura 3.14) Diseño del parche sin FeedLine en HFSS

- Se procede con poner la línea de alimentación:

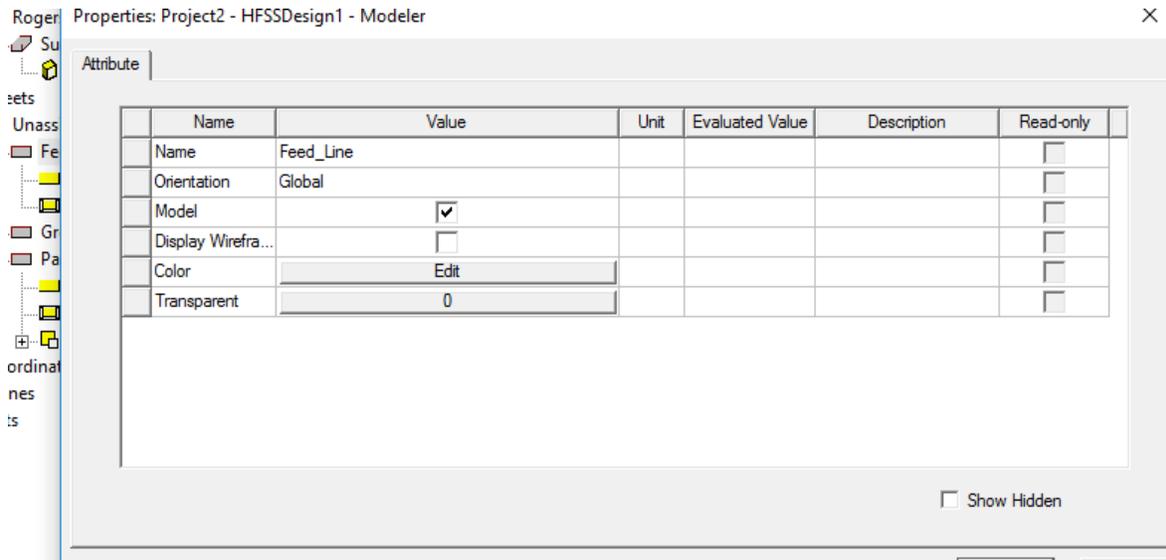


Figura 3.15) Diseño de la línea de alimentación

- Después unimos el parche principal con la línea de alimentación:

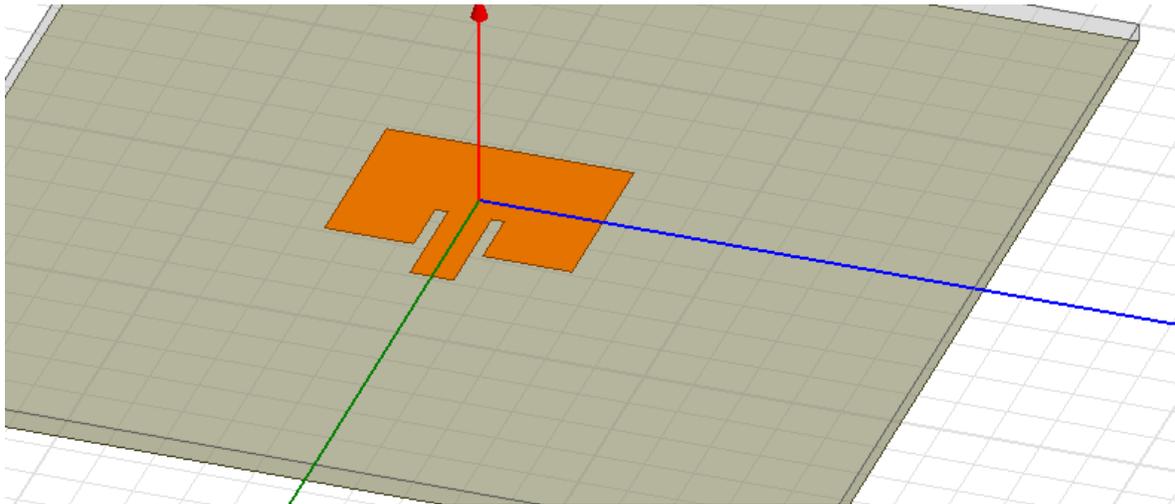


Figura 3.16) Antena completa en HFSS

- A continuación se procede con colocar la parte de la fuente, para poder hacer las pruebas necesarias en el software, se puede apreciar como la parte color verde.

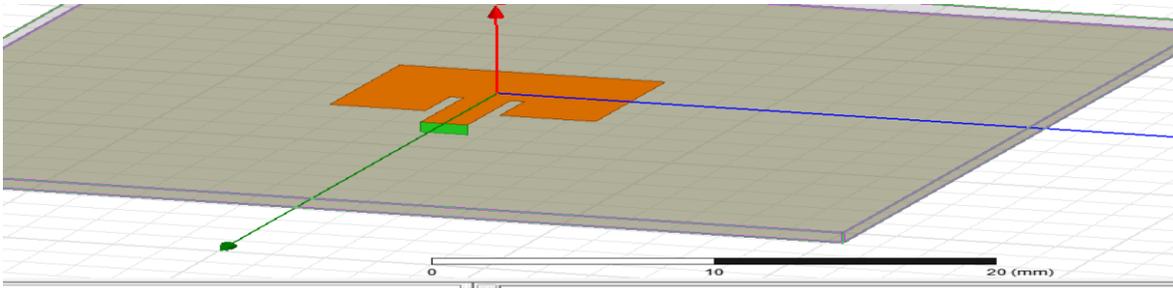


Figura 3.17) Fuente para la antena en HFSS

La ventaja que da éste software es el manejo 3D, se presenta otra perspectiva de la antena en otra perspectiva:

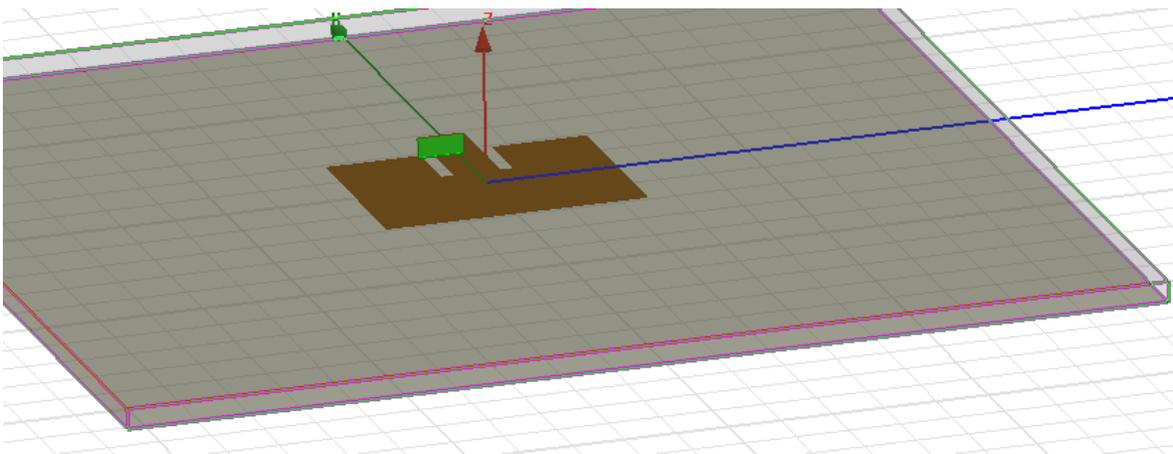


Figura 3.18) Fuente desde otra perspectiva

- Después de tener el parche completo, se procede a construir una caja de aire para poder obtener los resultados de la antena.

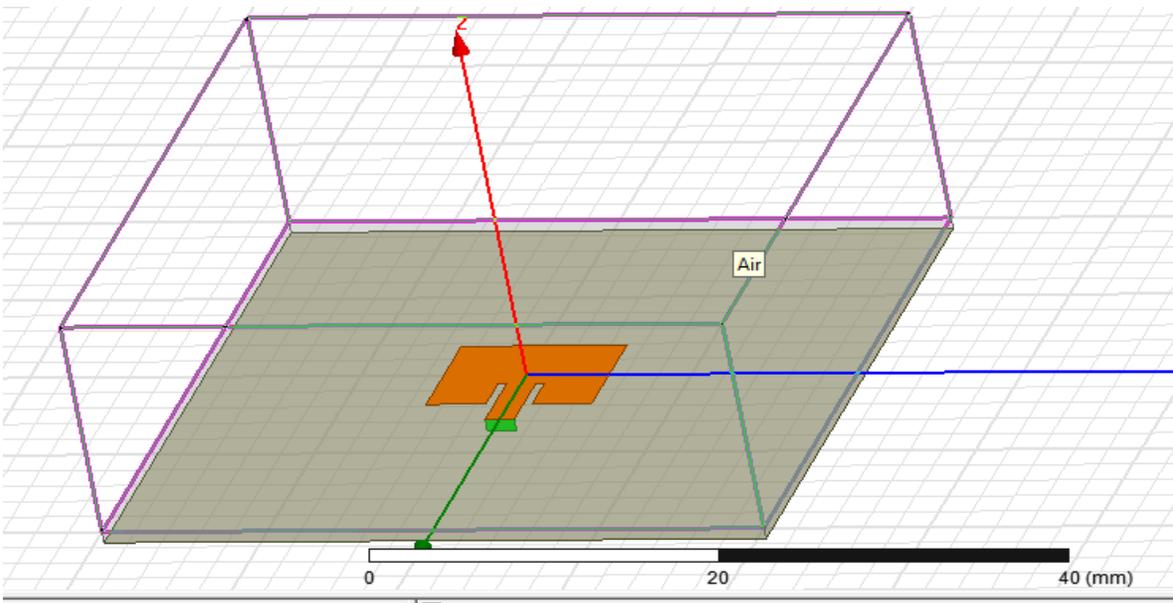


Figura 3.19) Caja de aire en HFSS

- La siguiente imagen es la parte de la caja que se diseñó para obtener los resultados de radiación de energía

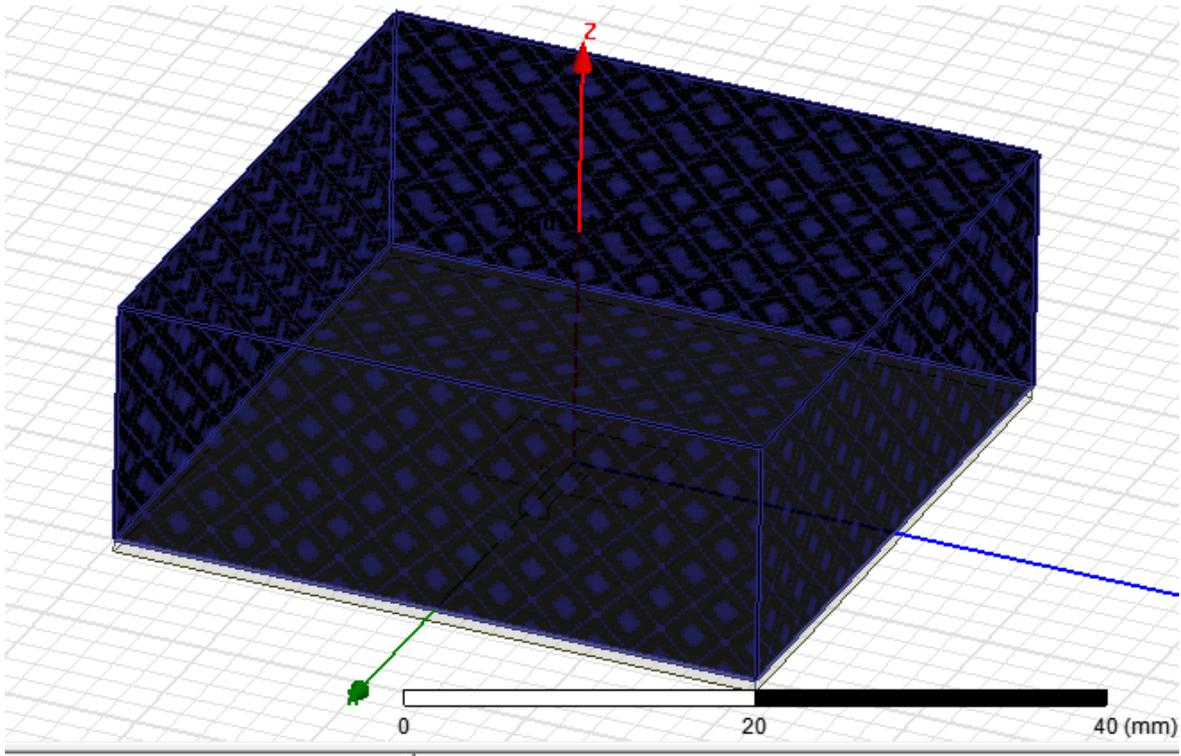


Figura 3.20) Otra forma de ver la caja de aire en HFSS

- En esta parte se elige la frecuencia a la que se hará el estudio a la antena:

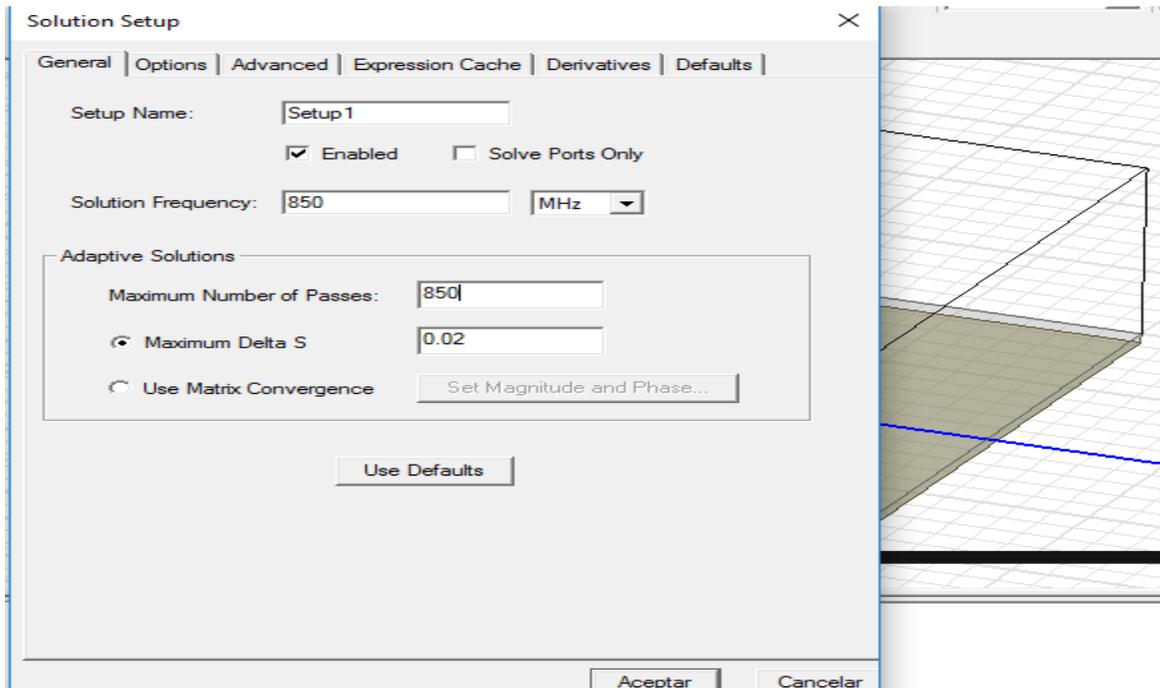


Figura 3.21) Selección de la frecuencia

- Se elige la banda de estudio, la cual ira de 700 MHz hasta 1 GHz.

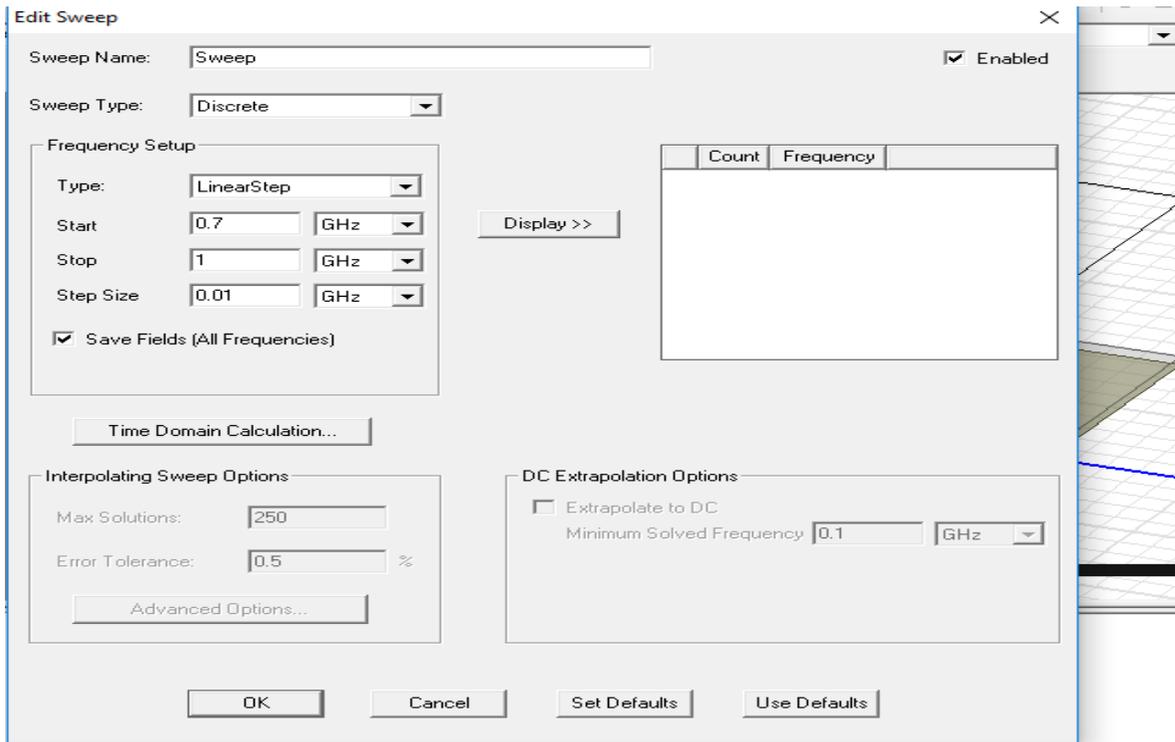


Figura 3.22) Selección de la banda de frecuencia

- Al haber finalizado toda la parte del diseño y de los parámetros para observar el funcionamiento de la antena, se procede a analizar el diseño realizado, y observar los resultados en el software.

El parámetro S11 se presenta a continuación, se observa la parte en 850 MHz.

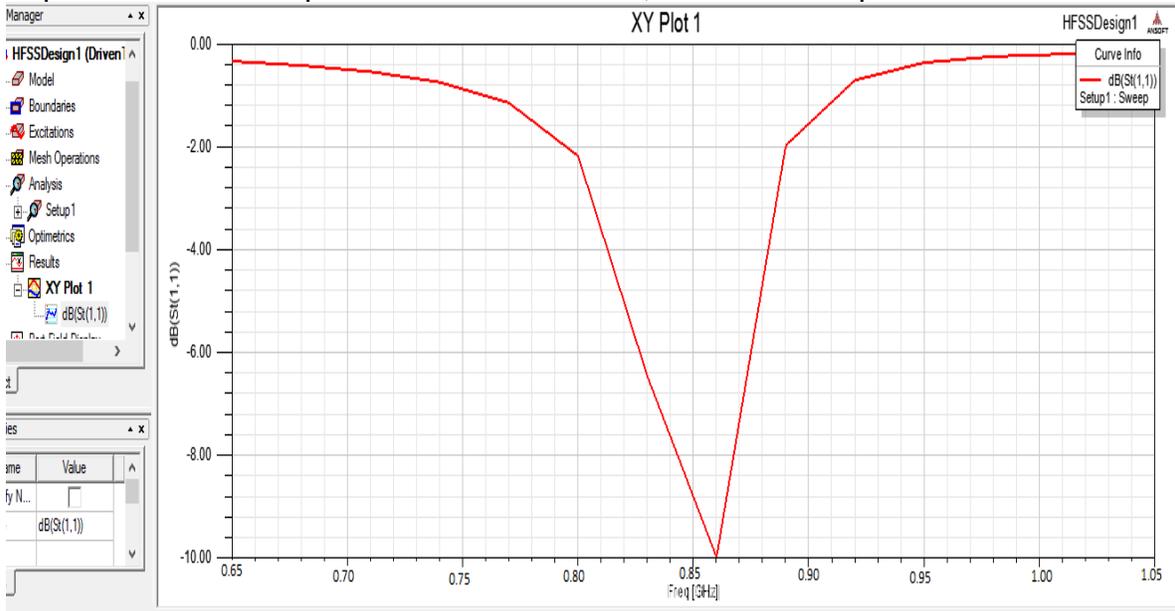


Figura 3.23) Parámetro S11

- Este es el patrón de radiación

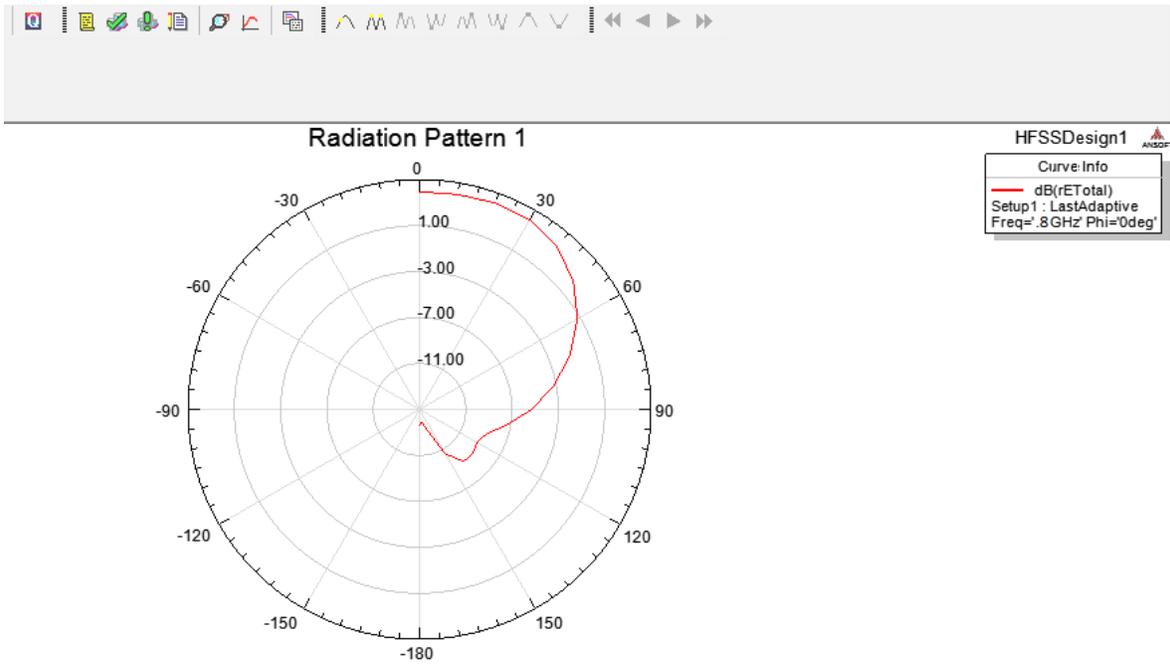


Figura 3.24) Patrón de radiación

- A continuación se muestra la gráfica en 3D, del patrón de radiación en términos de ganancia en dB.

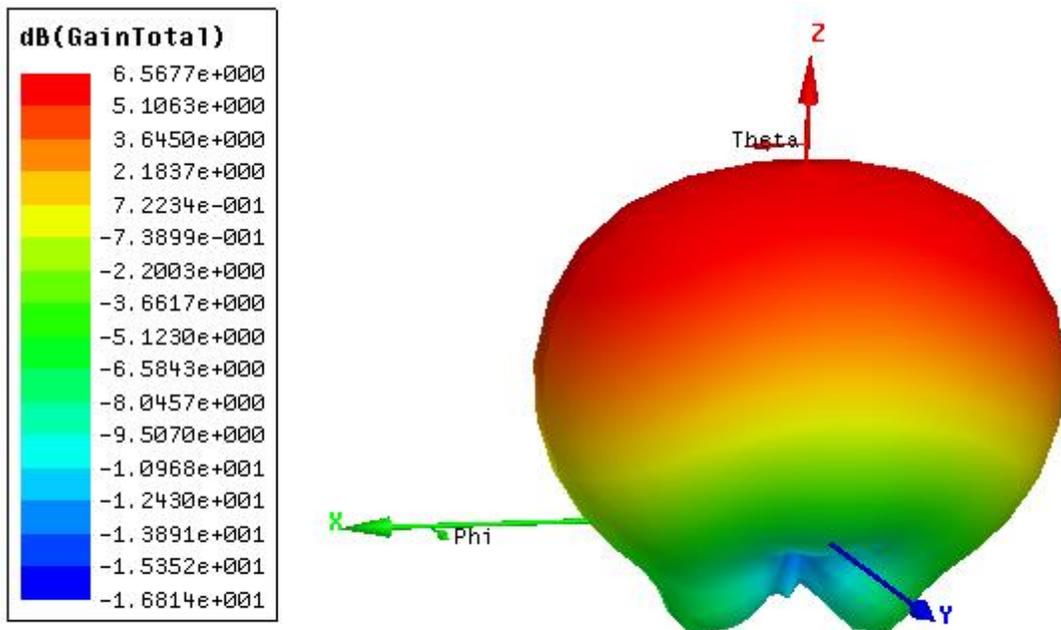


Figura 3.25) Patrón de radiación en 3D

- Desde otra perspectiva

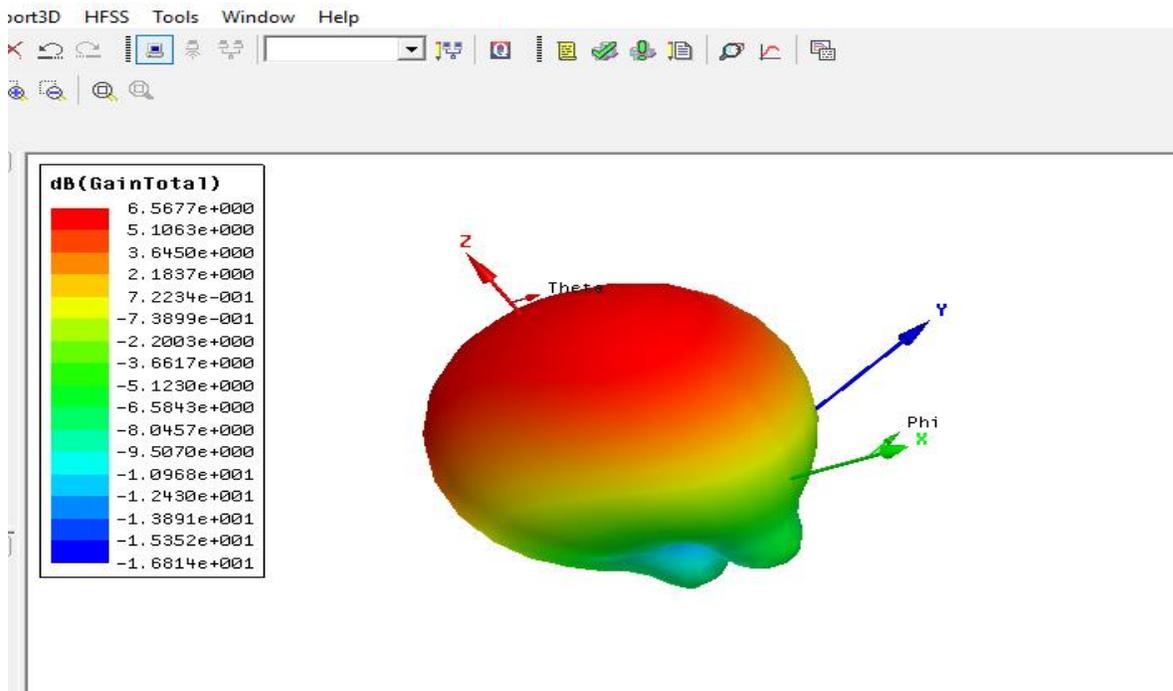


Figura 3.26) Diferente perspectiva del patrón en 3D

- Otra perspectiva

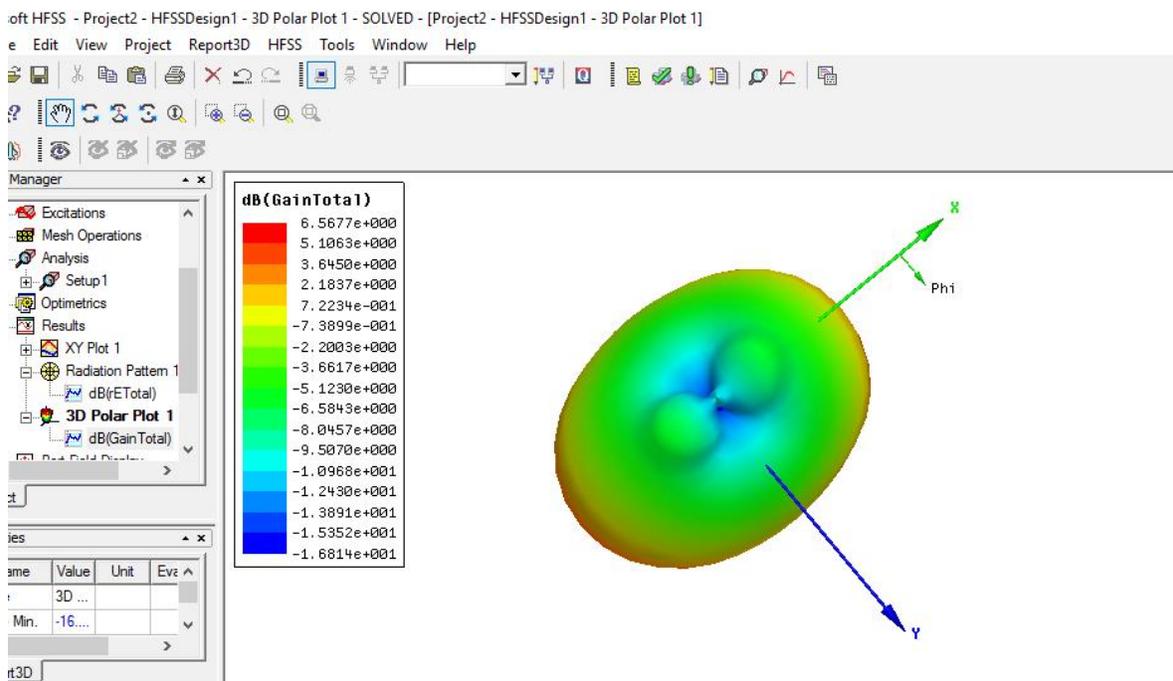


Figura 3.27) Diferente perspectiva del patrón de radiación en 3D

El diseño de la antena se muestra a continuación, con las medidas correspondientes en la tabla mostrada

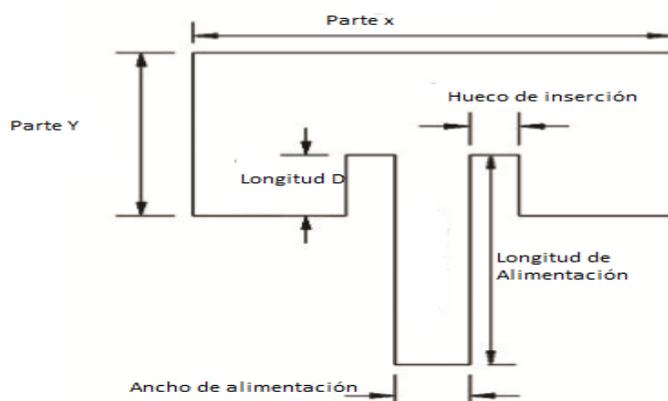


Fig 3.28) Diseño de la antena y parámetros

En ésta tabla se muestran las medidas correspondientes a cada parte de la antena

Parámetros	Dimensiones de la antena (mm)
	Frecuencia de 850 MHz
Parte X	108
Parte Y	70
Longitud D	16
Hueco de inserción	8
Longitud de alimentación	28
Ancho de alimentación	7

Figura 3.29) Tabla de parámetros de la antena

Después de haber realizado este diseño y conocer las medidas correspondientes de la antena, nos damos a la tarea de realizar dicha antena con material conductor. Utilizamos una placa de cobre y procedemos a hacer dicha antena tipo microstrip.

Las actividades para realizar esta antena se muestran a continuación:

1.- Se escoge una placa tipo FR4, como se muestra en la siguiente imagen:



Figura 3.30) Selección de la placa para la antena

2.- Se marca el diseño en la placa con las medidas ya mencionadas y se realiza el procedimiento adecuado para dejar marcado solamente de cobre a estas medidas. Se utilizan materiales para realizar un circuito.

- Un recipiente para depositar el cloruro férrico y agua caliente, para después sumergir la placa de cobre, con la finalidad que solamente quede marcado el diseño de la antena.
- Cloruro férrico para eliminar el cobre de la parte sobrante de la antena

3.- Habiendo realizado el procedimiento adecuado se presenta el diseño de la antena microstrip (parche) con las medidas ya mencionadas.



Figura 3.31) Antena microstrip resultante

Antena vista desde otro ángulo



Figura 3.32) Antena vista desde otro ángulo

Habiendo concluido con la construcción de la antena, nos damos la tarea de seguir con las siguientes actividades marcadas.

La conexión de la antena con el circuito rectificador se dará a conocer más adelante

### 3.- ANÁLISIS DEL SISTEMA DE RECTIFICACION BASADO EN DIODOS SCHOTTKY

En esta actividad, teniendo como base las investigaciones que habíamos realizado, elegimos al diodo Schottky HSMS-2850, debido a las características ventajosas que tiene en nuestra aplicación; es de uso especial para radio frecuencias, y trabaja en un rango de frecuencias menores a las de 1.5GHz, por lo que nuestra elección es correcta.

Al haber tomado la decisión de utilizar este modelo de diodos Schottky, elegimos también a los elementos que tienen que estar en el circuito de rectificación, en éste caso son capacitores y resistencias.

En el caso de los capacitores, los valores elegidos de capacitancia son diferentes para el número de etapas que incluyamos en nuestro circuito. Es decir, si nuestro doblador de voltaje es de una etapa, el valor de capacitor que utilizaremos será diferente al que utilizaríamos en uno de dos o tres etapas. Nuestro objetivo fue diseñar un doblador de voltaje de dos etapas.

Para la etapa de acoplamiento de impedancias, más adelante se dará a conocer la forma en que se obtuvieron los valores del capacitor y bobina. El software ADS cuenta con una parte especial para obtener el diseño y valores de los elementos mediante la carta Smith. Utilizar la carta Smith en ADS nos da la ventaja de ahorrar tiempo y también de acercarnos de mejor manera a los valores correctos. Recordemos que la etapa de acoplamiento es importante, y utilizarla nos brindara mejor cantidad de potencia a la salida de nuestro sistema. A continuación de muestran los valores de capacitores y resistencias a utilizar en un doblador de voltaje de una etapa y de dos etapas.

#### Doblador de voltaje de una etapa

Elementos electrónicos a utilizar:

Elemento	Valor	Cantidad
Diodo Schottky HSMS-2850	----	2
Capacitores cerámicos	70 pF	2
Resistencias	1	100 kΩ
Capacitores cerámicos	1pF	1
Inductores (bobinas)	20 nH	1

Figura 3.33) Elementos a utilizar para el circuito rectificador

#### Doblador de voltaje de dos etapas

Elementos electrónicos a utilizar:

Elemento	Valor	Cantidad
Diodo Schottky HSMS-2850	---	4
Capacitores cerámicos	80 pF	4
Resistencias	1	500 kΩ
Capacitores cerámicos	1pF	1
Inductores (bobinas)	20 nH	1

Figura 3.34) Valor y cantidad de los elementos a utilizar

Es importante mencionar que el valor de los capacitores y bobinas es realmente bajo, uno está acostumbrado a manejar tal vez capacitancias e inductancias de mayor valor, sin embargo, los capacitores e inductores de este proyecto son de valores pequeños debido a que la energía que se puede captar del medio ambiente es realmente baja, como se ha mencionado en las investigaciones anteriores. Debido a esto cargar un capacitor de mayor valor con señales tan pequeñas sería imposible, o si no fuera así, tomaría demasiado tiempo lograrlo.

A continuación se muestran imágenes de los elementos utilizados, resaltando de igual manera el tamaño de los diodos Schottky HSMS-2850, de los cuales hasta ahora no teníamos conocimiento. La verdad es que son muy pequeños, los pines

apenas y se logran distinguir, por lo que prevemos que la unión de estos elementos con los capacitores e inductores no será sencilla.

Decidimos utilizar resistencias de los valores marcados, con la diferencia que serán de menor potencia, en este caso será de  $\frac{1}{4}$  de Watt.

#### ELEMENTOS A UTILIZAR:

- Diodo Schottky HSMS-2850



Figura 3.35) Diodo Schottky HSMS-2850



Figura 3.36) Diodo Schottky HSMS-2850



Figura 3.37) Diodo HSMS-2850

- Capacitor de 68 pF (no se encontró el valor de 70 pF)



Figura 3.38) Capacitor de 69 pF

- Capacitor de 1 pF

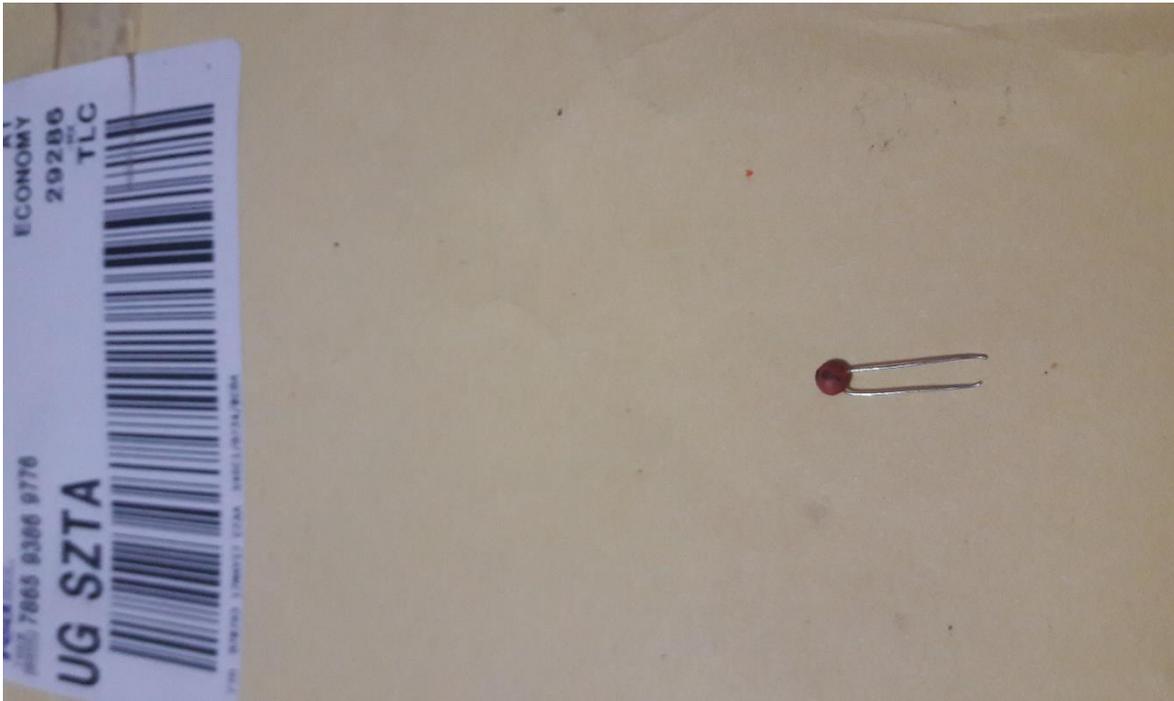


Figura 3.39) Capacitor de 1 pF

- Inductor (bobina) variable de 17.34 nH (no se encontró de 20 nH)



Figura 3.40) Inductor (bobina) variable de 17.34 nH

- Capacitor de 82 pF (no se encontró de 80 pF)

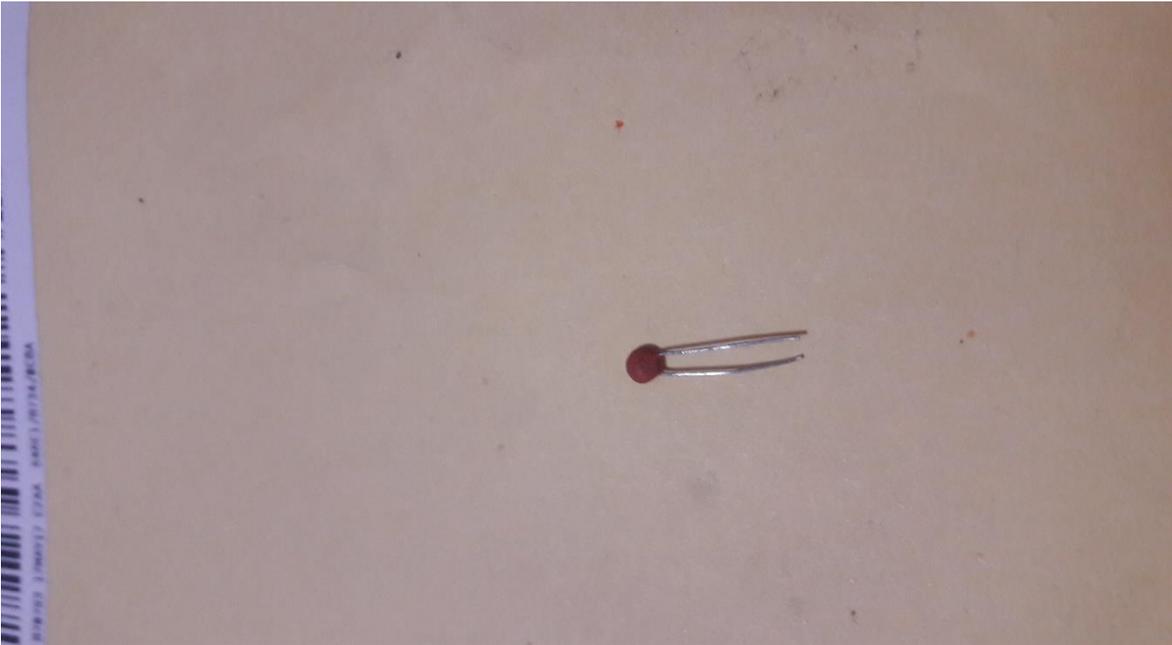


Figura 3.41) Capacitor de 82 pF

Para enriquecer de mejor manera ésta actividad, se utilizó el ADS (Advanced Simulated Design), el cual es un software que se utiliza especialmente en las radio frecuencias.

A continuación se da a conocer la simulación, y la forma en que se encontraron los valores de la etapa de acoplamiento de impedancias a través de la carta Smith en ADS.

Se hizo el diseño de un doblador de voltaje de una etapa en ADS; aquí se muestran las actividades.

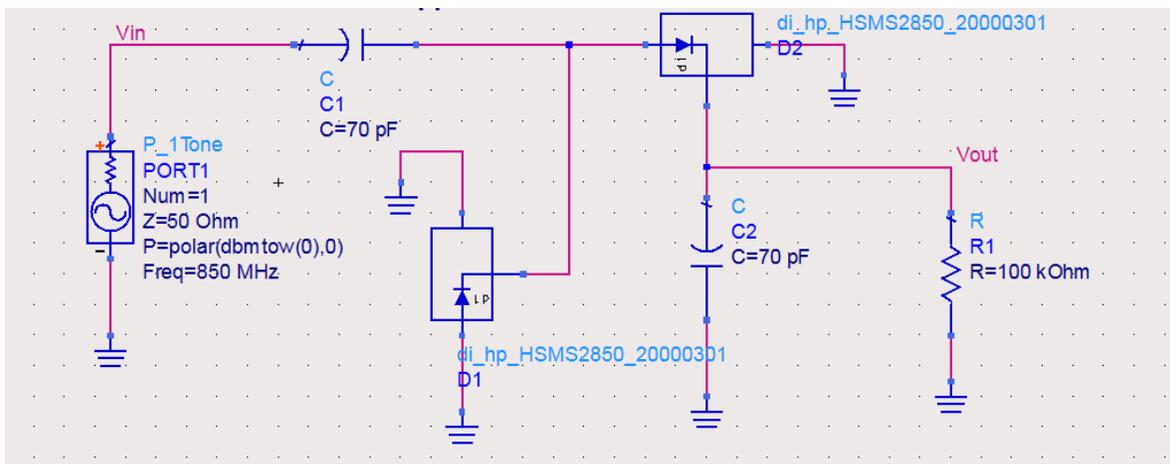


Figura 3.42) Doblador de voltaje de una etapa en ADS

La imagen anterior muestra un doblador de voltaje de una etapa simulada en ADS. Se utilizó una fuente con impedancia  $Z=50 \Omega$ , y frecuencia de 850 MHz para simular la antena del sistema.

Al ser un doblador de voltaje, la salida del sistema debe ser el doble de la señal de entrada, por lo que proseguimos a correr la simulación y observar en una gráfica la salida contra la entrada en el dominio del tiempo

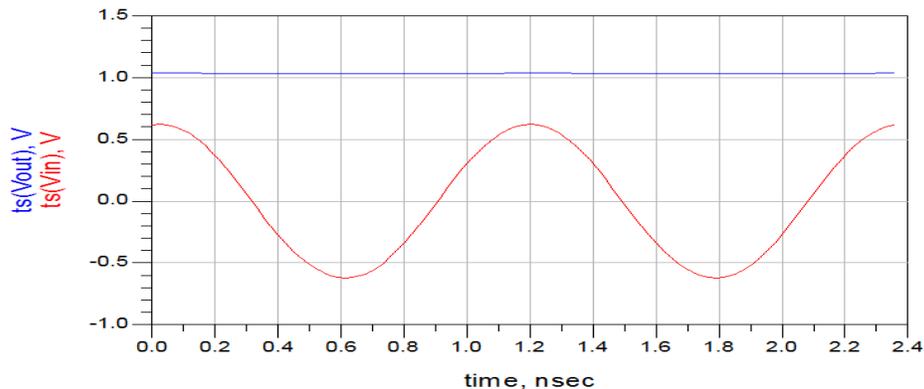


Figura 3.43) Grafica del comportamiento del sistema

En la gráfica anterior se puede observar lo que habíamos mencionado, la entrada a un valor de 0.6 V, tiene una salida de aproximadamente 1.1 V. Nuestra configuración de doblador de voltaje de una etapa funciona correctamente.

Ahora proseguimos a incluir la etapa de acoplamiento de impedancias, que está formada por una bobina y un capacitor en forma L. Los valores de estos elementos fueron encontrados gracias a la carta Smith que viene incluida en las utilidades de ADS.

Los valores a utilizar están marcados en la tabla anterior de elementos electrónicos a utilizar para cada etapa, a continuación se muestra el circuito con el respectivo acoplamiento de impedancias.

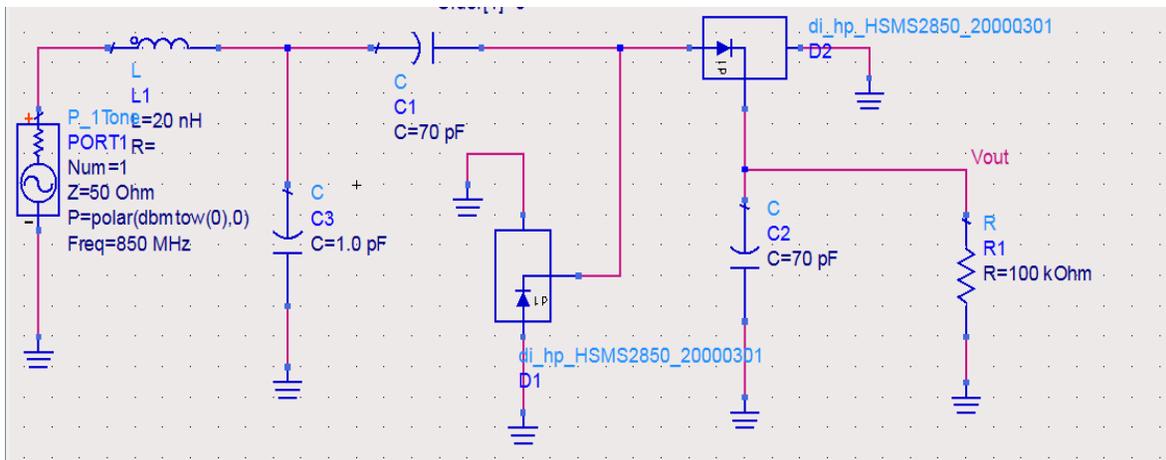


Figura 3.44) Dobrador de voltaje con acoplamiento de impedancias

Con la bobina y el capacitor se mejora la transferencia de energía de la fuente, a continuación se muestra la gráfica de la salida del sistema contra la entrada en el dominio del tiempo.

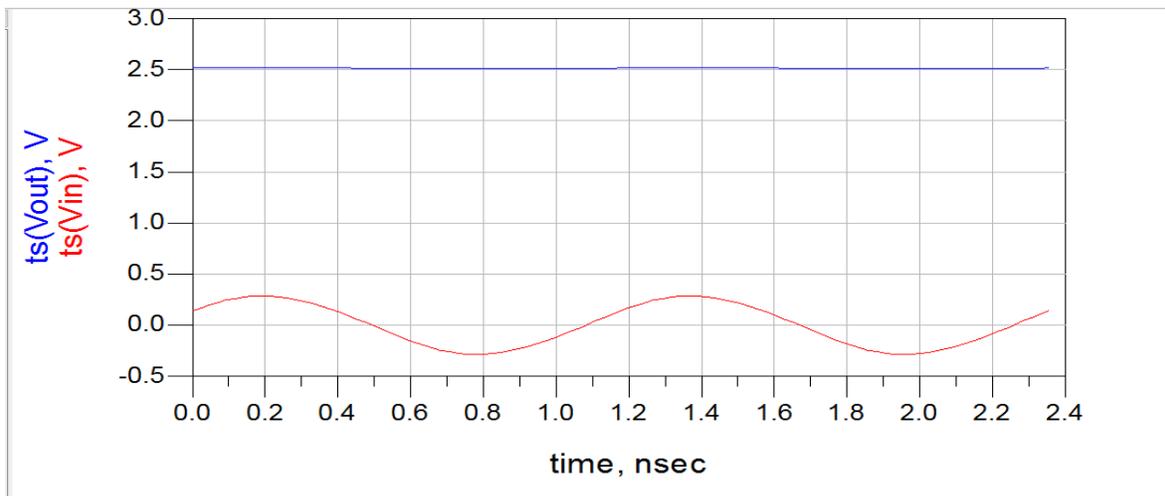


Figura 3.45) Grafica del sistema con acoplamiento de impedancias

Como se puede observar, la salida del sistema aumenta significativamente respecto a la entrada del sistema, lo que ratifica lo importante que es utilizar la etapa de acoplamiento de impedancias.

Como punto siguiente se simula un doblador de voltaje de dos etapas, realizando las mismas muestras que con el de una etapa.

Diseño en ADS de un doblador de voltaje de dos etapas:

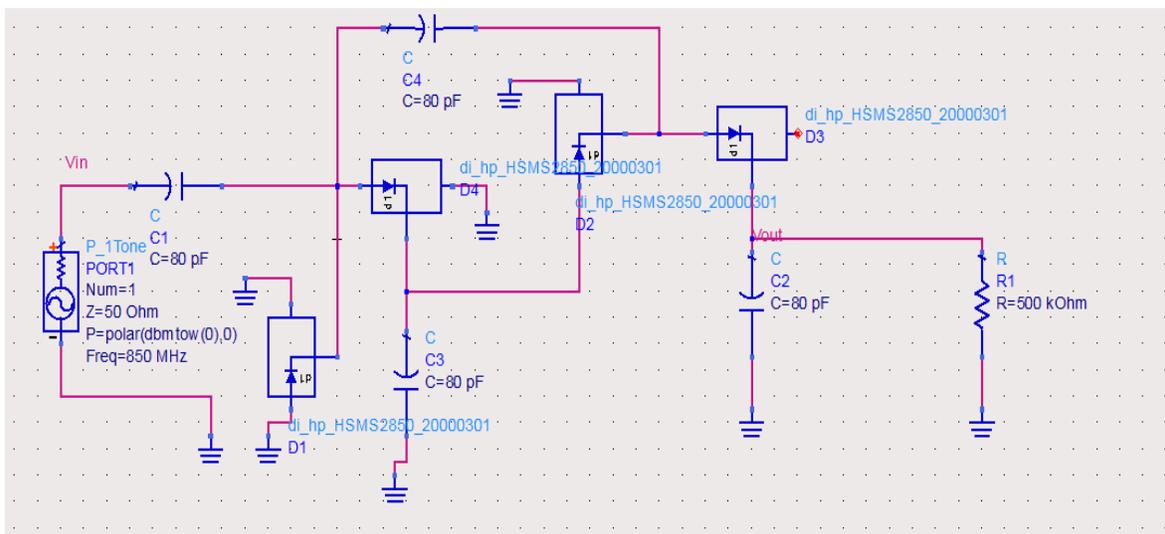
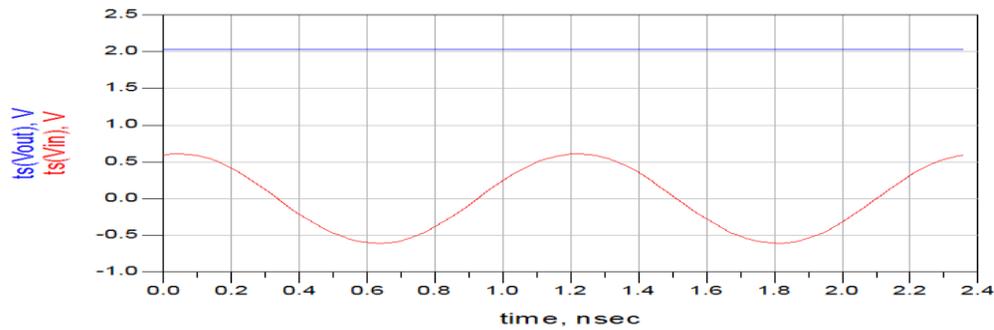


Figura 3.46) Doblador de voltaje de dos etapas

La imagen anterior muestra un doblador de voltaje de doble etapa simulado en ADS. Se utilizó una fuente con impedancia  $Z=50 \Omega$ , y frecuencia de 850 MHz para simular la antena del sistema.

Para poder observar el desempeño de esta configuración se procede a hacer la simulación. Cabe mencionar que la forma de obtener la gráfica en ADS en un sistema como éste es utilizando la configuración de balance armónico, que sirve para obtener funcionamientos de sistemas que trabajan a altas frecuencias, como éste caso.

Se presenta la gráfica del doblador de voltaje de dos etapas:



3.47) Gráfica del doblador de voltaje de dos etapas

En la gráfica se puede observar la salida contra la entrada; se observa un valor aproximado de entrada de 0.6 V, y la salida es de aproximadamente 2.1 V. El sistema funciona de buena manera, ya que la salida debería ser el doble de un doblador de voltaje de una etapa. En el diseño anterior, la salida nos dio aproximadamente 1.1 V, por lo que la salida de éste sistema debería ser el doble de ésta, y 2.1 V se acerca bastante al resultado esperado.

A continuación se introduce la etapa de acoplamiento con los valores de capacitor e inductor obtenidos a través de la carta Smith de ADS, y el diseño queda de la siguiente manera:

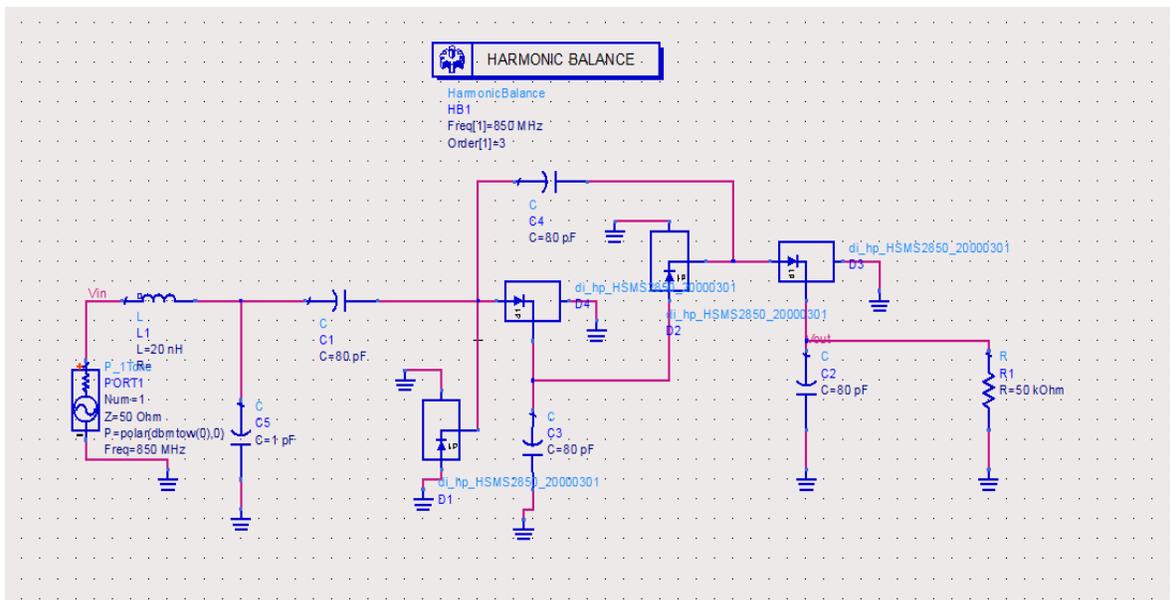


Figura 3.48) Doblador de voltaje de dos etapas con acoplamiento de impedancias

El funcionamiento de éste diseño debería ser mejor después de que se haya introducido la etapa de acoplamiento, ahora se obtiene la gráfica del sistema utilizando el balance armónico de ADS y los resultados son los siguientes:

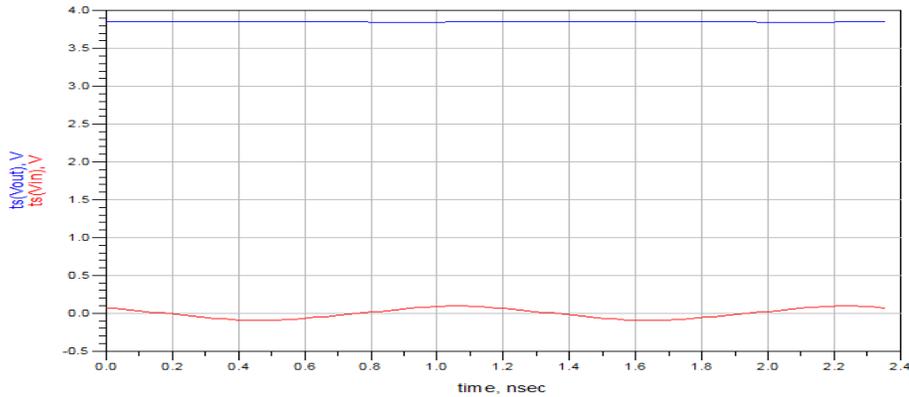


Figura 3.49) Grafica del doblador de dos etapas con acoplamiento de impedancias

En la gráfica anterior se puede observar el aumento en la salida del sistema. Esto nos indica que como habíamos mencionado el introducir la etapa de acoplamiento sirve para mejorar la eficiencia del sistema.

Después de haber simulado el sistema con los elementos seleccionados, se procede a avanzar y realizar las próximas actividades.

Como refuerzo de estas actividades se dan a conocer un conjunto de ecuaciones que ayudan a conocer el valor del voltaje en CD de salida de un sistema rectificador de media onda o de onda completa en el cual la entrada es una señal alterna. Es importante señalar que el circuito utilizado en este sistema es un circuito doblador de voltaje, por lo que estas ecuaciones no se utilizarían, pero para aportación en un sistema rectificador, estas ecuaciones son de gran utilidad.

- En el caso de un rectificador de media onda, el procedimiento para obtener el voltaje cd, a partir de una señal de ac es el siguiente:

$$V_{CD} = \int_0^T \frac{V_{MAX} \text{sen} \omega t}{T} d\omega t \quad \rightarrow \quad V_{CD} = \frac{V_{MAX}}{T} \int_0^T \text{sen} \omega t d\omega t$$

$$V_{CD} = \frac{V_{MAX}}{T} [-\text{cos} \omega t] \int_0^T \quad \rightarrow \quad v_{CD} = \frac{V_{MAX}}{2\pi} [-\text{cos} \omega t] \int_0^\pi$$

$$V_{CD} = \frac{V_{MAX}}{2\pi} [-\text{cos} 180^\circ + \text{cos} 0^\circ] \quad \rightarrow \quad V_{CD} = \frac{V_{MAX}(2)}{2\pi} \quad \rightarrow \quad V_{CD} = \frac{V_{MAX}}{\pi}$$

$$V_{CD} = 0.31 V_{MAX}$$

- En el caso de un rectificador de onda completa, el procedimiento para obtener el voltaje cd, a partir de una señal de ac es el siguiente:

$$V_{CD} = \int_0^T \frac{V_{MAX} \text{sen} \omega t \, d\omega t}{T} \quad \rightarrow \quad V_{CD} = \int_0^T \frac{V_{MAX} \text{sen} \omega t \, d\omega t}{T}$$

$$V_{CD} = \frac{V_{MAX}}{T} [-\text{cos} \omega t] \int_0^T \quad \rightarrow \quad v_{CD} = \frac{V_{MAX}}{\pi} [-\text{cos} \omega t] \int_0^\pi$$

$$V_{CD} = \frac{V_{MAX}}{\pi} [-\text{cos} 180^\circ + \text{cos} 0^\circ] \quad \rightarrow \quad V_{CD} = \frac{V_{MAX}(2)}{\pi} \quad \rightarrow \quad V_{CD} = \frac{2V_{MAX}}{\pi}$$

$$V_{CD} = 0.63 V_{MAX}$$

#### 4.- DISEÑO DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA EN RADIOFRECUENCIA

Habiendo simulado el sistema rectificador y teniendo la antena lista, se unen las partes de la antena mediante un cable coaxial con un conector RG-58 macho al circuito rectificador con diodos Schottky. A continuación se presenta la forma del sistema final.

- En primer lugar está el circuito rectificador, junto con la etapa de acoplamiento:



Figura 3.50) Circuito rectificador con acoplamiento de impedancias

- Ésta es la antena

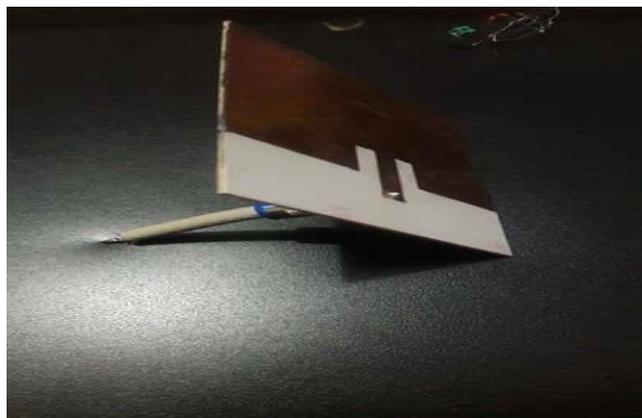


Figura 3.51) Antena del sistema

- Después se obtiene el sistema completo:

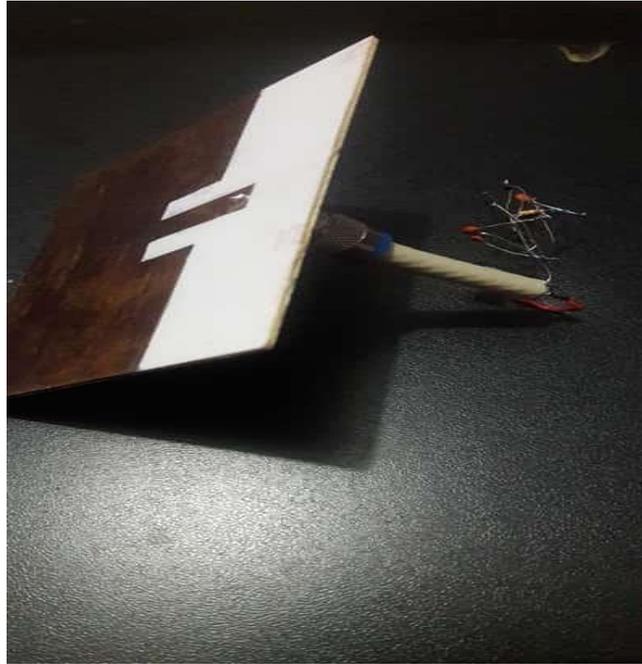


Figura 3.52) Sistema completo del sistema

Éste es el sistema resultante el cual probaremos en algunas partes donde encontremos antenas radiadores de energía en RF.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS

Habiendo realizado las simulaciones, y construido el sistema, en compañía de mi asesor nos dirigimos a una ubicación en la que pudiéramos probar nuestro sistema de recolección y tener la posibilidad de irnos acercando a la antena transmisora, cabe mencionar que ésta antena fue verificada para conocer si emitía señales en la banda GSM 850 MHz.

Los resultados de las mediciones obtenidas se muestran a continuación; primero en imágenes y con las lecturas se elaborará una tabla para visualizar de mejor manera los resultados.

- A una distancia aproximada de 200 metros, y con el sistema colocado de frente a la antena transmisora.



Figura 4.1) Prueba del sistema a 200 metros de una antena radiante

Se obtuvo una lectura de 0.7 mV, que era un resultado que teníamos esperado, teniendo en cuenta los estudios que habíamos analizado anteriormente en el estado del arte de este tipo de sistemas.



Figura 4.2) Resultado de la medición en la salida del sistema

- Posteriormente nos acercamos más a la antena transmisora, a una distancia aproximada de 100 metros. Y se obtuvieron los siguientes resultados



Figura 4.3) Prueba del sistema a 100 metros de una antena radiante

Un voltaje de 2.9 mV, que es más de lo que se obtuvo en la medición anterior



Figura 4.4) Resultado de la medición en la salida del sistema

- Posteriormente nos acercamos más a la antena transmisora, aproximadamente a 50 metros. Obteniendo los siguientes resultados



Figura 4.5) Sistema a 50 metros de una antena radiante



Figura 4.6) Probando el sistema a 50 metros de una antena radiante

Se obtuvo un voltaje de 7.1 mV. Superando las mediciones que habíamos hecho anteriormente.



Figura 4.7) Resultado de la medición en la salida del sistema

De los resultados obtenidos, se presenta una pequeña tabla que muestran los datos.

Frecuencia de la antena transmisora	Distancia (metros)	Voltaje (mV)
850 MHz	200	0.7
850 MHz	100	2.9
850 MHz	50	7.1

Figura 4.8) Tabla de resultados obtenidos

Con éstos resultados, pudimos saber junto a mi asesor, que el sistema estaba recolectando las pequeñas señales de RF emitidas por la antena de la que estábamos dependiendo y seguramente también de otras antenas en otras ubicaciones.

Aunque la cantidad de energía captada fue pequeña, teníamos en cuenta que esto iba a ser así debido a que la cantidad que se puede recolectar al aire libre es considerablemente pequeña, aunque existen dispositivos que trabajan a potencias en el orden de los microwatts.

# CAPITULO V

## RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

El diseño de un sistema de antena para recolectar energía electromagnética en RF fue presentado en éste reporte.

Realizar el diseño de un sistema de antena para RF tiene sus complicaciones principalmente al unir los elementos para el sistema. En el caso de los diodos Schottky utilizados en este proyecto, el tamaño fue el principal inconveniente ya que son más pequeños que un grano de arroz, y los pines son realmente pequeños para poder conectarlos a los demás elementos. Sin embargo, con el cuidado requerido, se pueden unir todos los elementos, cuidando no mover bruscamente el sistema. Todo esto se puede solucionar teniendo la tecnología necesaria para realizar un circuito con elementos de éste tamaño.

Se recomienda obtener conocimiento y habilidad en Software como lo son HFSS y ADS para poder tener mejor entendimiento en temas como éstos.

La cantidad de energía que se puede captar al aire libre es poca, y en ocasiones no es suficiente para activar y hacer funcionar a dispositivos que necesitan una determinada potencia para funcionar, sin embargo, existen dispositivos o sensores que funcionan en el orden de los microwatts, y es ahí donde este sistema puede funcionar. La ventaja que tenemos al utilizar un sistema como éste es dejar de necesitar baterías u otra fuente de energía necesarias para alimentar los dispositivos mencionados.

La residencia realizada en el CICESE sirvió de experiencia y sobre todo una gran oportunidad para aportar el conocimiento adquirido a lo largo de la ingeniería. El departamento de Electrónica y Telecomunicaciones del Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada y principalmente mí asesor quedaron satisfechos con lo realizado en este tiempo de residencia.

Un aporte como éste en esta línea de investigación servirá para seguir avanzando y así tener antecedentes que sirvan para estudiantes e investigadores a obtener mejores resultados en este tipo de sistemas.

Un sistema como éste está presto para mejoras significativas; arreglos de antenas (arrays) para mayor recolección de energía, mayor cobertura en otras bandas de RF, diseño diferente de la antena, disminución del tamaño, en fin, son mejoras que pueden fácilmente ser tema para posteriores proyectos de investigación.

## REFERENCIAS

- [1] M. Piñuela, P. D. Mitcheson, y S. Lucyszyn, "Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, no. 7, pp. 2715–2726, Julio 2013.
- [2] Chaoyun Song, Yi Huang, Senior Member, IEEE, Jiafeng Zhou, Jingwei Zhang, Sheng Yuan, and Paul Carter, "A High-Efficiency Broadband Rectenna for Ambient Wireless Energy Harvesting," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 8, Febrero 2015.
- [3] Zehua Zhou, #Weiwei Liao, \*Qingfeng Zhang, Fangzhou Han and Yifan Chen, "A Multi-band Fractal Antenna for RF Energy Harvesting", *IEEE Antennas Propag*, Marzo. 2016
- [4] E. M. Ali, N. Z. Yahya, N. Perumal, M. A. Zakariya, "Design of RF to dc rectifier at gsm band for energy harvesting applications", *A Journal of Engineering, Science and Society*, Enero 2014