



**Diseño de una "rectenna" en la banda WiFi de  
2.45GHz para aplicaciones de captación de  
energía electromagnética**

---

Energy Harvesting

Director: George Goussetis, Jose Luis Gómez Tornero  
Paola Siljeström Galiana

7 de Septiembre de 2015

# Índice

1. Introducción .....	5
1.1 Las microondas.....	6
1.1.1 Definición .....	6
1.1.2 Aplicaciones de las microondas .....	7
1.2 Wi-Fi .....	8
1.2.1 Definición .....	8
1.2.2 Conceptos básicos.....	9
1.2.3 Ventajas.....	9
1.2.4 Desventajas .....	10
1.2.5 Frecuencia de operación .....	10
1.2.6 Intensidad de la señal.....	11
1.2.7 Canales .....	12
1.2.8 Aplicaciones.....	13
1.3 Energy Harvesting .....	13
1.3.1 Definición .....	13
1.3.2 Fuente de motivación.....	14
1.3.3 Componentes clave.....	15
1.3.4 Componentes opcionales.....	15
1.3.5 Aplicaciones Recolección de Energía .....	15
1.4 Objetivos y estructura del proyecto fin de carrera .....	16
2. Antena de parche .....	17
2.1 Definición .....	17
2.1.1 Ventajas.....	17
2.1.2 Desventajas .....	18
2.1.3 Características de las antenas microstrip.....	18
2.1.4 Estructura Típica.....	19
2.1.5 Tipos .....	20
2.1.6 Aplicaciones.....	21
2.2 Parámetros a destacar .....	21
2.2.1 Impedancia de entrada .....	21
2.2.2 Adaptación .....	22
2.2.3 Diagrama de radiación .....	22
2.2.4 Densidad de potencia.....	23

2.2.5 Ganancia.....	23
2.2.6 Directividad .....	23
2.2.7 Polarización .....	23
2.2.8 Ancho de banda.....	24
2.2.9 Eficiencia.....	24
2.3 Diseño.....	25
2.3.1 Substrato utilizado .....	25
2.3.2 Modelo de dimensiones.....	26
2.3.3 Ecuaciones.....	27
2.3.4 Modelado .....	30
2.3.5 Simulación .....	31
2.4 Fabricación .....	38
2.5 Testeo en el laboratorio .....	39
3. Rectificador .....	41
3.1 Definición .....	41
3.2 Tipos de rectificadores .....	41
3.2.1 Rectificador de media onda .....	42
3.2.2 Rectificador de onda completa .....	42
3.3 Red de adaptación.....	43
3.3.1 Breve introducción .....	43
3.3.2 Teoría.....	44
3.3.3 Diseño.....	44
3.3.4 Resultados .....	45
3.4 Etapa rectificadora .....	46
3.4.1 Breve Introducción .....	46
3.4.2 Diseño.....	46
3.4.3 Resultados .....	48
3.5 Etapa de filtrado.....	49
3.5.1 Breve Introducción.....	49
3.5.2 Teoría.....	49
3.5.3 Diseño.....	50
3.5.4 Resultados .....	51
3.6 Esquemático .....	52
3.6.1 Consideraciones .....	53

3.7 Simulaciones.....	53
3.7.1 LED.....	53
3.7.2 Resultado final.....	55
3. 8 Layout.....	56
3.9 Fabricación .....	57
3.9.1 Primer prototipo .....	57
3.9.2 Segundo prototipo .....	58
3.10 Testeo en el laboratorio .....	59
4. Antena rectificadora.....	62
4.1 Estructura total del dispositivo .....	62
4.2 Testeo con router wifi .....	63
4.2.1 Orientación de la antena.....	65
4.3 Limitaciones .....	66
5. Conclusión y líneas futuras.....	67
5.1 Conclusión .....	67
5.2 Líneas futuras .....	67
6. Referencias .....	68
6.1 Anexo I.....	69
6.2 Anexo II.....	70
6.3 Índice de figuras .....	72

## **1. Introducción**

Este proyecto trata sobre el proceso llevado a cabo para diseñar y finalmente implementar una antena rectificadora. Comúnmente conocida como rectenna, este dispositivo no es más que la unión de dos elementos, una antena y un rectificador.

Una rectenna es un tipo de antena que transforma la señal alterna recibida por la antena en una señal continua. Este proyecto tratara de lograr el dispositivo en cuestión usando una antena de parche y un rectificador de onda media. La rectenna en cuestión usará la energía wifi a 2,45 GHz, por su parte el rectificador estará formado por tres etapas, una red de adaptación a la entrada, para eliminar los armónicos no deseados, la etapa rectificadora, formada por un diodo schottky, y finalmente una etapa de filtrado para eliminar el efecto no lineal del diodo. El funcionamiento de todo ello quedará probado conectando un LED a la salida del rectificador, de ese modo quedará probado como hemos aprovechado la energía procedente de un router wifi a 2,45 GHz para alimentar un LED.

Hoy en día es imposible hablar de una rectenna del tipo descrito anteriormente sin mencionar los conceptos de microondas y energy harvesting (O recolección o cosechamiento de energía), por ello empezaremos explicando ambos, pues están directamente relacionados con los objetivos perseguidos en este proyecto.

## 1.1 Las microondas

### 1.1.1 Definición

Las microondas son ondas electromagnéticas definidas en un rango de frecuencias determinado, generalmente entre 300 MHz y 300 GHz, que supone un período de oscilación de 3 ns ( $3 \times 10^{-9}$  s) a 3 ps ( $3 \times 10^{-12}$  s) y una longitud de onda en el rango de 1 m a 1 mm.

A continuación se presentará una figura con el espectro electromagnético.

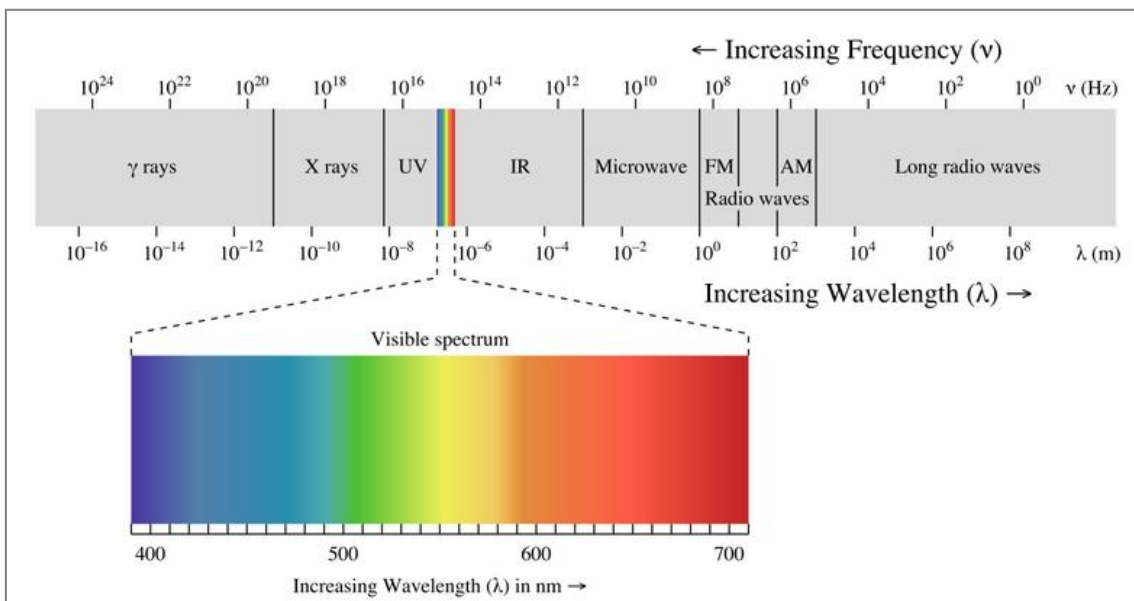


Figura 1: Espectro electromagnético.

El rango de las microondas está incluido en las bandas de radiofrecuencia, concretamente en las de UHF (ultra-high frequency - frecuencia ultra alta) 0,3-3 GHz, SHF (super-high frequency - frecuencia súper alta) 3-30 GHz y EHF (extremely-high frequency - frecuencia extremadamente alta) 30-300 GHz. Otras bandas de radiofrecuencia incluyen ondas de menor frecuencia y mayor longitud de onda que las microondas. Las microondas de mayor frecuencia y menor longitud de onda —en el orden de milímetros— se denominan ondas milimétricas.

La existencia de ondas electromagnéticas, de las cuales las microondas forman parte del espectro de alta frecuencia, fueron predichas por Maxwell en 1864 a partir de sus famosas Ecuaciones de Maxwell.

La banda de frecuencia en la que trabajan hace que se usen en un gran número de aplicaciones y que hoy en día se hayan convertido en indispensables. Algunas de las características más comunes de las microondas son:

- Antenas con ganancias elevadas y tamaño más reducidas, la ganancia de una antena depende de sus dimensiones eléctricas, es decir, de sus dimensiones físicas en relación a la longitud de onda. De modo que se pueden realizar antenas de mayor ganancia en microondas con menor tamaño.
- Mayor ancho de banda relativo, a frecuencias de microondas el ancho de banda relativo es mayor que en bandas de frecuencias menores.
- Dimensiones de los circuitos reducidos, debido al reducido valor de la longitud de onda.
- Teoría de análisis y diseño de circuitos diferente a la de los circuitos de baja frecuencia, debido a que las longitudes de onda son comparables a las dimensiones del circuito.
- Aplicación de las ecuaciones de Maxwell, debido a la variación rápida de las fases de las señales de microondas con la distancia.
- Transparencia de la ionosfera a frecuencias de microondas.
- Transparencia parcial de la atmosfera baja y propagación en línea recta.
- Interacción con la materia, permiten la transferencia de energía de la onda a las partículas de un material.
- Frecuencias de oscilación estables.
- Sección recta radar grande (RCS), de este modo aumentará el objetivo para detectar un blanco.

### 1.1.2 Aplicaciones de las microondas

Las aplicaciones basadas en la tecnología de las microondas son variadas y constituyen un campo de investigación interesante por sus posibilidades prácticas de las cuales algunas son:

- En las Comunicaciones
  - Comunicaciones vía satélite.
  - Enlaces terrestres (punto a punto).
  - Sistemas de comunicación personales (PCS).
  - Telefonía celular.
  - Radio localizadores.
- Industriales:
  - Medición del espesor de láminas metálicas y dieléctricas.
  - Medición del diámetro de alambres en operaciones de estirado.
  - Medición del contenido de humedad en papel y textiles.
  - Sellado de plásticos.
  - Instrumentos de medición: Analizador de redes, medidor de figura de ruido, analizador de espectros, medidores de potencia, etc.

- En la Agricultura:
  - Destrucción de hongos y gusanos en madera.
  - Eliminación de insectos, cocción y desecación de productos agrícolas y alimenticios.
- Otro:
  - Radares.
  - Monitores de velocidad de vehículos.
  - Diatermia (medicina, calentamiento profundo del cuerpo mediante radiaciones).

## **1.2 Wi-Fi**

### **1.2.1 Definición**

Wi-Fi es un mecanismo de conexión de dispositivos electrónicos de forma inalámbrica. Wi-Fi, es una marca comercial de Wi-Fi Alliance (una organización que adopta y certifica los equipos que cumplen con los estándares 802.11 de las redes inalámbricas de área local).

El objetivo tras la marca Wi-Fi es fomentar las conexiones inalámbricas y facilitar la compatibilidad de los distintos equipos. Todos los productos con conectividad Wi-Fi tienen certificada su interoperabilidad.

La denominación Wi-Fi fue creada por la agencia Interbrand, La intención era instaurar un nombre que fuera fácil de recordar. Muchos asociaron Wi-Fi a Wireless Fidelity (“Fidelidad Inalámbrica”).

En la actualidad, los estándares certificados por Wi-Fi son muy populares en todo el mundo. Este crecimiento amenaza la disponibilidad del espectro radioeléctrico, sobre todo cuando las conexiones deben concretarse a más de 100 metros de distancia (lo que aumenta el riesgo de interferencias).

La infraestructura de una conexión Wi-Fi incluye puntos de acceso (emisores remotos), routers (que reciben la señal que emite el operador de telefonía) y dispositivos de recepción (tarjetas USB, PCI o PCMCIA).



### 1.2.2 Conceptos básicos

Estos son algunos de los conceptos básicos que se deben conocer:

- Punto de acceso (AP/PA): Se trata de un dispositivo que ejerce básicamente funciones de puente entre una red Ethernet cableada y una red con Wi-Fi sin cables.
- Clientes Wi-Fi: Equipos portátiles (PDAs, Portátiles) con tarjetas Wi-Fi (PCMCIA, USB o MINI-PCI), y equipos de sobremesa con tarjetas Wi-Fi (PCI, USB o internas en la placa).
- SSID (Service Set Identification): Este identificador suele emplearse en las redes inalámbricas creadas con infraestructura. Se trata de un conjunto de servicios que agrupan todas las conexiones de los clientes en un solo canal.
- Roaming: Propiedad de las redes Wi-Fi por la cual los clientes pueden estar en movimiento e ir cambiando de punto de acceso de acuerdo a la potencia de la señal.

### 1.2.3 Ventajas

El punto fuerte de esta tecnología es la ausencia de cables, pudiendo unir un sinnúmero de dispositivos de diversas características, evitando a los usuarios los dolores de cabeza asociados a la búsqueda y la adquisición del cable adecuado para cada uno de ellos.

A ello hay que sumarle:

- La rapidez de instalación.
- Facilidad de funcionamiento.
- Gran escalabilidad.
- Reducción de costes. La ausencia de cables conlleva una reducción elevada de costes. Esto se logra mediante una combinación de factores, el coste relativamente bajo de los routers inalámbricos, sin necesidad de abrir zanjas, perforación u otros métodos que pueden ser necesarias para realizar las conexiones físicas.
- Ethernet inalámbrico. Wi-Fi se puede considerar de cierta manera una evolución de Ethernet. De modo que una de las ventajas fundamentales es que Wi-Fi y Ethernet, tanto las redes IEEE 802, comparten algunos elementos fundamentales.
- Flexibilidad. El acceso extendido, la reducción de costes, y la movilidad crean oportunidades para nuevas aplicaciones, así como la posibilidad de nuevas soluciones creativas para futuras aplicaciones.
- Movilidad de cara al usuario.

#### 1.2.4 Desventajas

- Poca seguridad, sin embargo, existen diversos protocolos de cifrado que permiten codificar la transmisión de los datos y garantizar su confidencialidad.
- La calidad de la conexión, pues es el resultado de una serie de factores, tales como la radiación electromagnética que generan los electrodomésticos, y esto afecta directamente la velocidad de transmisión.
- A pesar de su estandarización a nivel global, muchos dispositivos de diferentes marcas no son absolutamente compatibles con la tecnología WiFi, lo cual también repercute en la velocidad.
- Su radio de acción es limitado también, por lo cual resulta especialmente útil para conexiones hogareñas. Sin embargo, es necesario aclarar que un mismo router ofrece una transmisión mucho más estable y con un alcance mucho mayor al aire libre que en una casa, debido a las interferencias mencionadas en el párrafo anterior.
- La cercanía de dos o más puntos de acceso puede afectar la calidad de la comunicación.
- Existe un inconveniente en el hecho de usar frecuencias elevadas, y es que las señales transmitidas a altas frecuencias experimentan una mayor atenuación cuando pasa a través de obstáculos que las señales de menor frecuencia. Esto es porque parte de la energía es transferida al material del obstáculo, reduciendo la amplitud de la señal.

#### 1.2.5 Frecuencia de operación

Hay dos frecuencias de señalización utilizados actualmente por las redes Wi-Fi:

2.45 GHz	Está formada por 14 canales, cada uno con un ancho de banda de aproximadamente de 20 a 22 MHz que operan en la banda ISM. Es una banda llena puesto que muchos dispositivos funcionan a esta frecuencia.
5 GHz	Está formado por 13 canales, cada uno con un ancho de banda de aproximadamente de 20 MHz que operan en la banda U-NII. Esta banda no está tan ocupada como la anterior pero se prevé que empiece a estarlo en los próximos años.

Tabla 1: Frecuencias Wi-Fi.

### 1.2.6 Intensidad de la señal

Este concepto es importante de cara a este proyecto ya que será definitivo a la hora de probar su funcionamiento, y por ello será muy importante tenerlo en cuenta. Podemos decir que el nivel de la señal recibida es una función de la potencia de salida del transmisor, la frecuencia utilizada, la distancia recorrida por la señal, y las pérdidas sufridas durante el trayecto que se produce antes de que la señal se reciba.

Es fundamental dentro de esta sección hablar de la relación señal a ruido en recepción. El ruido es una función de la intensidad de la fuente de interferencia, la proximidad, y ancho de banda. Todos los receptores contienen una fuente de ruido inherente causada por los procesos físicos fundamentales como el movimiento térmico aleatorio de los portadores de carga.

Para obtener una mayor velocidad de transmisión se requiere en recepción una determinada señal a ruido (SNR), de modo que ambos conceptos están fuertemente relacionados. Si se quiere conseguir una SNR mayor:

- Teniendo en cuenta el posicionamiento del router, procurando siempre el mejor posicionamiento tanto para él como para los puntos de acceso, teniendo en cuenta las interferencias y obstáculos del emplazamiento.
- Una antena de alta ganancia, sobre todo en los puntos de acceso, pero también en las estaciones inalámbricas con SNR marginales. Además si es posible, estas antenas deberán proporcionar ganancia con muy poco ruido adicional. También ayudarán a este propósito, antenas direccionales para ayudar a filtrar las fuentes de interferencias de ruido.

Por supuesto todo ello dependerá del protocolo utilizado, a continuación mostraremos una gráfica con los distintos parámetros en función del protocolo de Wi-Fi utilizado.

	IEEE 802.11 Protocols			
	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n
Operating Frequency	5.3 GHz and 5.8 GHz	2.4 GHz		2.4 GHz or 5 GHz
Average Signal Range	~30 to 35 m			~60 to 70 m
Available Bandwidth per Channel	~20 to 22 MHz			20 or 40 MHz
Data Rate (Max.)	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	248 Mbps
Typical Throughput for Max Data Rate	18 to 22 Mbps	6 Mbps	18 to 22 Mbps	74 Mbps
Modulation Technique	OFDM	CCK or DSSS	OFDM	OFDM using MIMO and CB

Tabla 2: Parámetros de los distintos protocolos Wi-Fi.

### 1.2.7 Canales

Cuando se definió el standard IEEE 802.11 (protocolo que regula las redes locales inalámbricas), se especificó también los tres rangos de frecuencia disponibles para los dispositivos que desearan emitir de esta forma, 2.4 GHz, 3.6 GHz y 5 GHz. Como hemos especificado antes, la mayoría de dispositivos actuales operan en la franja de frecuencias cercana a 2.4 GHz. Cada rango de frecuencias fue subdividido, a su vez, en multitud de canales.

Un canal es cierta banda de frecuencia especificada para la transmisión de las señales electromagnéticas. La comunicación directa entre las estaciones inalámbricas ocurre en un canal.

El canal se establece durante la configuración del punto de acceso o router inalámbrico. En la estación inalámbrica, se selecciona el canal durante una exploración de redes disponibles.

Básicamente, una exploración es una búsqueda de redes disponibles dentro del alcance del dispositivo de exploración. Para que se considere compatible con Wi-Fi, el dispositivo debe ser capaz de buscar las redes disponibles. El dispositivo se puede dirigir para buscar en un canal en particular o todos los canales.

En este proyecto nos centraremos en la frecuencia de 2,45 GHz, que tiene 14 canales, separados por 5 MHz. Eso sí, cada país y zona geográfica aplica sus propias restricciones al número de canales disponibles. Por ejemplo, en Norteamérica tan sólo se utilizan los 11 primeros, mientras que en Europa disponemos de 13. El problema de esta distribución es que cada canal necesita 22MHz de ancho de banda para operar, y ello produce un solapamiento de varios canales contiguos.

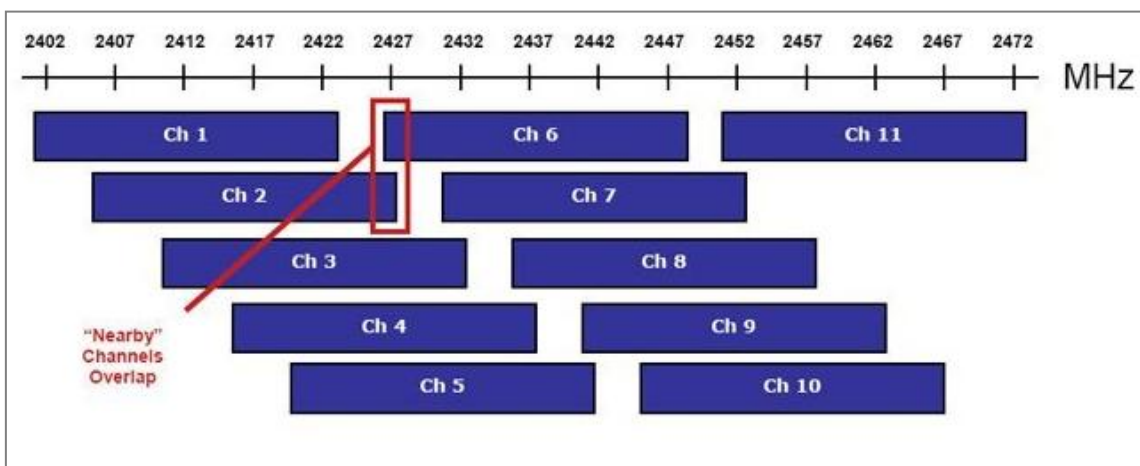


Figura 2: Canales Wi-Fi a 2.45 GHz.

Aquí aparece un concepto importante a tener en cuenta: el solapamiento. Algunos canales se pueden superponer a otros tal y como aparece en la figura, lo que provoca interferencias. Por ello si nuestra conexión Wi-Fi no va todo lo bien que debería, se puede solucionar esta situación cambiando el canal a otro menos usado entre los puntos de acceso cercanos y que no se superponga con ellos.

### 1.2.8 Aplicaciones

De entre las muchas aplicaciones de la tecnología Wi-Fi destacan las siguientes:

- Redes marginales: Sus primeras aplicaciones fueron de carácter marginal, éstas se referían a la instalación de redes en lugares de difícil acceso o que era complicada la instalación de una red cableada. Como ejemplos se tiene a los museos y edificios históricos.
- Redes corporativas en el escenario empresarial: Trata del caso más típico y para el cual fueron diseñadas este tipo de redes. Consiste en un conjunto de puntos de acceso esparcidos por toda la empresa formando así una red WLAN.
- Hot spot: Un hot spot inalámbrico permite que aquellos dispositivos que cuenten con WiFi se conecten a Internet a través de él. Los hot spots son redes WiFi abiertas al público de manera que cualquiera puede conectarse a ellas. Tienen una cobertura de unos 30 metros aproximadamente, en ocasiones son gratuitas y en otras se debe pagar para conectarse a ellos. Los hot spot son utilizados en hoteles, aeropuertos, restaurantes o en espacios abiertos.
- Redes domésticas.
- Redes internas en transportes.
- Redes en hospitales.
- Las aplicaciones de proceso y control industrial, donde las conexiones por cable son demasiado costosos o inconvenientes.
- Aplicaciones de emergencia que requieren una configuración inmediata y transitoria.
- Las aplicaciones móviles.
- Las cámaras de vigilancia.

## 1.3 Energy Harvesting

### 1.3.1 Definición

Se conoce como energy harvesting al proceso mediante el cual un dispositivo es capaz de aprovechar la energía residual presente en el ambiente para producir energía eléctrica que posteriormente será almacenada o utilizada para alimentar sistemas de bajo consumo. De este modo, se aprovechan otros tipos de energía presentes en el entorno para alimentar sistemas que pueden ser totalmente autónomos.

Existen numerosas fuentes de energía en nuestro entorno como pueden ser la propia radiación electromagnética de señales presentes en el aire (como son las señales de móviles o de difusión de televisión), la fuerza del viento (energía eólica), vibraciones o cambios de presión

(usando materiales piezoeléctricos), la luz (utilizando materiales fotosensibles como las células fotovoltaicas), los gradientes de temperatura presentes en el entorno (mediante el uso de materiales termoeléctricos basados en el principio de Peltier) o incluso la oxidación de algunos compuestos, como el azúcar en sangre.

Estas fuentes sólo son una pequeña parte de los mecanismos de energy harvesting presentes en la actualidad, donde se han desarrollado aplicaciones como sensores intracorporales que monitorizan variables médicas de forma autónoma obteniendo energía de la oxidación del azúcar en sangre, un sistema que permite extraer energía del propio movimiento de una persona y alimentar con ella su MP3 o una red de sensores situados en árboles que aprovechan la energía creada en su propio proceso metabólico para su suministro energético.

El valor de esta tecnología reside justamente en su capacidad de hacer que los sistemas a los que se adhiere tengan una autonomía prácticamente ilimitada siempre y cuando puedan seguir recolectando energía del ambiente, sin necesidad de conectarlos a la red eléctrica ni de substituir baterías. Además, es una solución válida para alimentar sensores situados en lugares de difícil acceso.

### **1.3.2 Fuente de motivación**

El avance conseguido técnicamente ha logrado conseguir que se puedan capturar pequeñas cantidades de energía del ambiente y transformarlos en energía eléctrica. Además, los avances en tecnología de microprocesadores han aumentado la eficiencia energética y la reducción de las necesidades de consumo de energía. En combinación, estos acontecimientos han despertado interés en la comunidad de ingeniería para desarrollar más y más aplicaciones que utilizan la recolección de energía o energy harvesting.

La cosecha de energía de una fuente natural, donde se despliega una aplicación remota, y donde dicha fuente de energía natural es esencialmente inagotable, es una alternativa cada vez más atractiva para las incómodas y costosas baterías. Esta fuente de energía esencialmente libre, diseñada e instalada correctamente, estará disponible durante todo el tiempo de vida de la aplicación, y no necesitará de ningún tipo de mantenimiento costoso o que implique un gran esfuerzo, si no simplemente de cierta supervisión.

Además, la recolección de energía se puede utilizar como una fuente de energía alternativa para complementar una fuente de alimentación primaria y para mejorar la fiabilidad de todo el sistema y evitar interrupciones de energía.

### 1.3.3 Componentes clave

Un sistema de recolección de energía requiere en general, una fuente de energía, como la vibración, el calor, la luz o el flujo de aire. Así como otros tres componentes electrónicos clave incluyendo:

1. Un dispositivo de conversión de energía tal como un elemento piezoeléctrico que pueda transformar la energía a energía eléctrica.
2. Un módulo de recolección de energía que captura, almacena y administra la energía para el dispositivo.
3. Una aplicación final capaz de habilitar la red inalámbrica de sensores o dispositivos de control y vigilancia.

### 1.3.4 Componentes opcionales

Además de los tres componentes clave mencionados anteriormente, en ciertas aplicaciones puede haber componentes clave adicionales que serían vitales para el funcionamiento de un sistema de captación de energía:

- Un dispositivo o módulo que posea una interfaz electrónica, para condicionar la energía capturada de una fuente de baja tensión (menos de 500 mV) y sea capaz de alimentar el módulo encargado de energy harvesting.
- Un dispositivo de almacenamiento de energía adicional, tales como baterías muy delgadas, ultra-condensadores y súper-condensadores.
- Un módulo de energía o potencia que gestione y regule la salida de potencia de los dispositivos de almacenamiento de energía suplementarios.

Hay que tener en cuenta que todos estos componentes clave opcionales requieren energía adicional para funcionar, y reducirán así la eficiencia global de la energía del sistema y añadirán espacio y coste. El equilibrio entre el coste y el beneficio de estos componentes adicionales debe ser evaluado cuidadosamente en cualquier sistema de recolección de energía en particular antes de su implementación final, pues cualquier componente adicional restará eficiencia global y energía a cada uno de los componentes de manera particular.

### 1.3.5 Aplicaciones Recolección de Energía

Muchas aplicaciones usadas cotidianamente son perfectamente idóneas para empezar a usar este método. Sistemas de redes de sensores inalámbricos, como los sistemas ZigBee a menudo se benefician de las fuentes de alimentación de captación de energía. Por ejemplo, cuando un nodo inalámbrico está desplegado en un sitio remoto donde un enchufe de pared o una batería no es fiable o no está disponible, la recolección de energía puede aumentar o suministrar energía solventando este problema. Y en otras situaciones, múltiples fuentes de energía se pueden utilizar para mejorar la eficiencia global y la fiabilidad de cualquier sistema.

Fuentes Comunes de Energy Harvesting:

- Energía mecánica - a partir de fuentes tales como la vibración y la tensión mecánica.
- Energía térmica - energía residual de los hornos, calentadores, y las fuentes de fricción.
- Energía en forma de Luz - capturada de la luz solar o artificial a través de sensores de fotos, fotodiodos, o paneles solares.
- Energía electromagnética - inductores, bobinas y transformadores.
- Natural Energy – energía del ambiente, tales 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 de bio-organismos o a través de acciones tales como caminar y sentarse.
- Otros – energía a partir de fuentes químicas y biológicas.
- 

Es importante señalar, que todas estas fuentes de energía son prácticamente ilimitadas y libres, entendiendo el sentido de la palabra, si pueden ser capturados en la ubicación del sistema o cercano a ella.

## **1.4 Objetivos y estructura del proyecto fin de carrera**

El objetivo principal de este proyecto final de carrera consiste en el diseño de una antena rectificadora, que no es más que una antena y un rectificador, como previamente mencionamos en la introducción. En esta sección explicaremos ambas partes con detalle.

Básicamente el objetivo de este proyecto será aplicar una señal wifi a 2,45GHz a la antena, y ésta, actuando como dispositivo receptor, se conectará a la entrada del rectificador. El rectificador por su parte convertirá la señal en alterna a su entrada a una señal continua, lo que quedará demostrado encendiendo un LED a la salida del rectificador.

El rectificador constará de tres etapas, una red de adaptación, la etapa rectificadora y una etapa de filtrado. Cada una de ellas la explicaremos con detenimiento a continuación.



## 2. Antena de parche

Para la realización de este proyecto hemos utilizado una antena microstrip de parche rectangular. En este capítulo explicaremos las distintas fases del diseño así como la teoría en la que se basa el mismo.

### 2.1 Definición

Una antena de parche o microstrip se basa en la tecnología de los circuitos impresos, consiste en un parche radiante que se imprime sobre un sustrato dieléctrico cubierto por un material conductor y un plano de tierra. El sustrato dieléctrico permite aislar el parche radiante del plano de tierra, el cual tiene tres parámetros que influyen en el diseño de la antena:

- Constante dieléctrica  $\epsilon_r$  o permitividad relativa.
- Grosor o altura  $h$  del sustrato.
- Pérdidas tangenciales  $\delta$ .

El origen de la tecnología microstrip son los striplines, una tira delgada de conductor en un dieléctrico recubierto en la parte superior e inferior por una capa metalizada (ambas con el mismo potencial, tierra). Todo ello empezó sobre los años 50 y supusieron un gran cambio al tratarse de una nueva forma de circuitería microondas compatible con la tecnología de circuitos impresos.

Para su realización también se considera el material de construcción y principalmente, la geometría del parche, que puede ir desde formas geométricas regulares hasta geometrías más complejas como tipo fractal.

#### 2.1.1 Ventajas

- Pequeño tamaño y poco peso.
- Ajustable a superficies no planas.
- Fabricación sencilla y económica a gran escala.
- Robustez mecánica (montado en superficies rígidas).
- Sencillez de realización de arrays.
- Fácil integración en equipos y circuitos.
- Adecuado para diseño CAD.

### 2.1.2 Desventajas

- Estructura resonante con pequeño ancho de banda.
- Perdidas en el sustrato (precisa sustratos de calidad tan  $\delta \leq 0.0020$ ).
- Poca pureza de polarización.
- Limitaciones de potencia.
- Baja eficiencia.
- Alto Q.
- Radiación espúrea de las líneas.
- Excitan ondas de superficie, que conviene tener en cuenta y en su caso eliminar.
- Presentan modos de alto orden.

### 2.1.3 Características de las antenas microstrip

Las antenas planas utilizan parches diseñados en tecnología microstrip, estos parches son una lámina metálica de tamaño resonante ( $0.25 \lambda_0 - 1 \lambda_0$ ), típicamente será la mitad de la longitud de onda de la señal en el espacio libre ( $0.5 \lambda_0$ ) que dará como resultado un parche resonante en el modo fundamental. El espesor de ésta lámina será muy delgado, comprendido entre  $18 \mu\text{m}$  y  $35 \mu\text{m}$ . El parche resuena en una de sus direcciones, a lo largo y radia en la otra, a lo ancho. El parche se sustenta sobre una lámina formada por un sustrato dieléctrico de un espesor típico entre  $0.005 \lambda_0$  y  $0.2 \lambda_0$ . Y una constante dieléctrica comprendida entre 1 y 12.

### 2.1.4 Estructura Típica

A continuación se muestra la estructura típica de una línea microstrip:

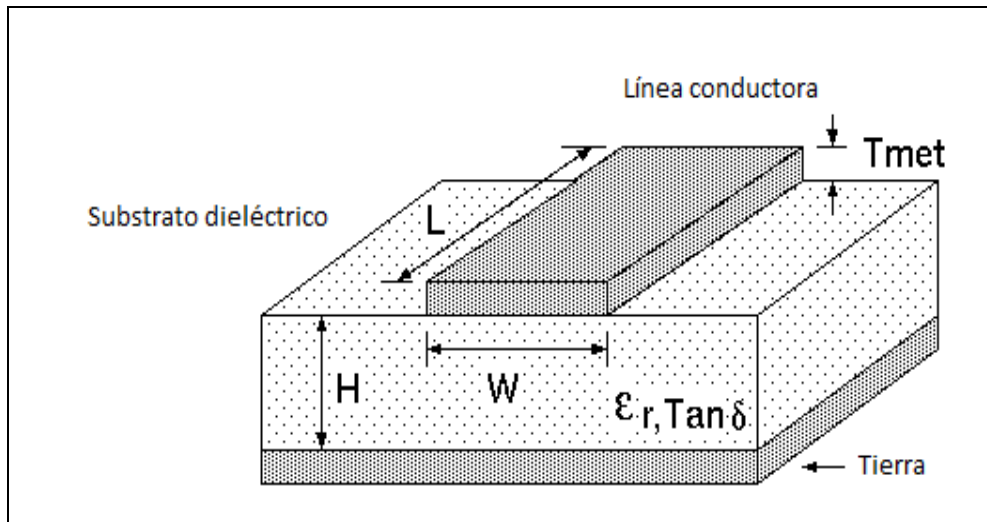


Figura 3: Estructura microstrip.

- Línea conductora o parche: Es una lámina metálica de tamaño resonante ( $0.25\lambda_0 - 1\lambda_0$ ). Su longitud suele ser  $0.5\lambda_0$  resonante en el modo fundamental. Es una línea muy delgada, típicamente entre  $18\mu\text{m}$  y  $35\mu\text{m}$ .
- Sustrato: Es la lámina dieléctrica que sustenta el parche, su espesor suele estar entre  $0.005\lambda_0$  y  $0.2\lambda_0$ . Su constante dieléctrica  $1 \leq \epsilon_r \leq 12$ .

Luego tenemos el plano de masa o tierra y la excitación, encargada de suministrar la energía RF a los parches.

Partiendo de esta estructura podemos encontrar desde las antenas de parche más sencillas hasta estructuras complejas combinando diferentes sustratos y parches en paralelo. El parche se diseña de tal forma que la radiación máxima sea normal a la superficie del mismo, lo cual depende del modo de excitación empleado.

### 2.1.5 Tipos

Podemos encontrar varios tipos de antenas de parche, cada uno de ellos con una forma geométrica distinta, de manera que se adecuarán a distintos propósitos. Todo ello abarca un abanico de posibilidades a la hora de incluir una antena de parche en un diseño.

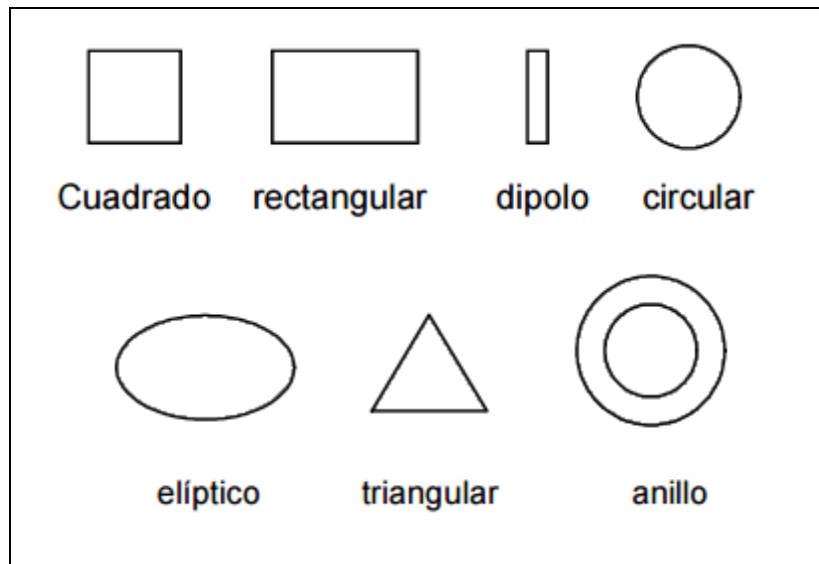


Figura 4: Tipos de antena parche.

En concreto nos centraremos en la antena de parche rectangular, pues es la que se ha utilizado en este proyecto.

### 2.1.6 Aplicaciones

Estas antenas son ampliamente utilizadas hoy en día por ello tienen un sinfín de aplicaciones, entre las que están

- Comunicaciones móviles (estaciones base, teléfono, automóvil).
- Rango de frecuencias de 100 MHz a 50 GHz.
- Aeronáutica: radares, comunicaciones, navegación, altímetro, sistemas de aterrizaje.
- Sistemas de vigilancia, identificación.
- Retransmisión de televisión en directo, radares de sensibilidad remotos, radiómetros.
- Náutica: comunicaciones, radar, navegación.
- Telemetría (guiado de misiles, sensores).
- Observación de la tierra.
- Biomédicas.

## 2.2 Parámetros a destacar

Ahora nombraremos los parámetros más importantes a tener en cuenta en el diseño, explicando brevemente cada uno de ellos.

### 2.2.1 Impedancia de entrada

La impedancia de entrada de la antena se define como la relación entre tensión y corriente en sus terminales de entrada. Dicha impedancia es por lo general compleja, su parte real se denomina resistencia y su parte imaginaria se denomina reactancia. En la impedancia de antena, la parte real  $R_a(\omega)$  y la parte imaginaria  $X_a(\omega)$  dependen ambas de la frecuencia, pudiendo expresarse como:

$$Z_a(\omega) = R_a(\omega) + jX_a(\omega) \quad (1)$$

Se define la resistencia de radiación como la relación entre la potencia total radiada por una antena y el valor eficaz de la corriente en sus terminales, elevada al cuadrado. Se define resistencia óhmica de una antena como la relación entre la potencia disipada por efecto de las pérdidas resistivas y la corriente en sus terminales al cuadrado. Por lo tanto la resistencia de antena la podemos considerar como la suma de la resistencia de radiación y la resistencia óhmica.

### 2.2.2 Adaptación

En transmisión y recepción, la antena suele estar conectada a una línea de transmisión, o bien directamente al transmisor o al receptor. Para medir el grado de reflexión de la potencia en una carga, se emplea el parámetro de dispersión  $S_{11}$  que nos da una idea de la transferencia de potencia hacia la antena. Dicho parámetro representa el coeficiente de reflexión en un bipuerto (la relación entre la onda reflejada respecto a la onda incidente) cuando no hay reflexión en la salida.

La fórmula que representa este parámetro es:

$$S_{11} = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (2)$$

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

### 2.2.3 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación de una antena es una representación gráfica de las propiedades direccionales de radiación de la antena a grandes distancias. Ya que a grandes distancias el campo magnético es directamente proporcional al campo eléctrico, la representación podría desarrollarse a partir de éste último. En este sentido, el plano E (plano que forma la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección) y el plano H (análogamente, plano formado por la dirección de máxima radiación y el campo magnético en dicha dirección), constituyen los planos más representativos. Ambos planos son perpendiculares y su intersección define la dirección de máxima radiación de la antena.

### 2.2.4 Densidad de potencia

La densidad de potencia radiada se define como la potencia por unidad de superficie en una determinada dirección. Se puede calcular a partir de los valores eficaces de los campos:

$$\vec{P}(\theta, \phi) = \text{Re}(\vec{E}x\vec{H}^*) \quad (3)$$

### 2.2.5 Ganancia

La ganancia de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igualdad de distancia y potencia entregada a la antena. Mientras que en la definición de directividad se habla de potencia radiada por la antena en la definición de ganancia se habla de la potencia que se le entrega a la antena, la diferencia entre ambas es la potencia disipada por la antena.

### 2.2.6 Directividad

Podemos definir la directividad de la antena como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección a una distancia dada y la densidad de potencia, que radiaría a esa misma distancia, una antena isotrópica que radiase la misma potencia que la antena. Si no se especifica la dirección angular se sobreentiende que la directividad se refiere a la dirección máxima de radiación.

### 2.2.7 Polarización

La polarización de una antena es la polarización de la onda radiada por dicha antena en una dirección dada. La polarización de una onda es la figura geométrica determinada por el extremo del vector que representa al campo eléctrico en función del tiempo, en una posición dada. Para ondas con variación sinusoidal dicha figura es en general una elipse. Hay una serie de casos particulares. Si la figura trazada es una recta, la onda se denomina linealmente polarizada, si es un círculo circularmente polarizada. El sentido de giro del campo eléctrico, para una onda que se aleja del observador, determina si la onda está polarizada circularmente a derechas si éste coincide con el giro de las agujas del reloj o a izquierdas en caso contrario.

### 2.2.8 Ancho de banda

En una antena se define como el rango de frecuencias dentro del cual el funcionamiento de la antena con respecto a una característica, se ajusta o cumple con un estándar especificado.

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

Donde  $f_{max}$  y  $f_{min}$  son las frecuencias que delimitan el rango de frecuencias donde se cumplen las especificaciones y  $f_0$  la frecuencia central.

### 2.2.9 Eficiencia

Se puede definir como la relación entre la potencia radiada por una antena y la potencia entregada a la misma, o lo que es lo mismo la relación entre la ganancia y la directividad. La eficiencia está entre 0 y 1, si una antena no tiene pérdidas, la directividad y la ganancia son iguales. Se puede obtener también a partir de las resistencias de radiación y óhmicas teniendo en cuenta que es la relación entre la potencia total radiada y la potencia entregada a la antena.

$$e = \frac{P_r}{P_{in}} = \frac{G}{D} \quad (5)$$



## 2.3 Diseño

El parche rectangular es con diferencia la estructura más usada. Es muy fácil analizar este tipo de antenna en ambos modelos, tanto con el modelo de línea de transmisión, como con el modelo de cavidad. En este Proyecto se realiza el diseño y posterior análisis usando el modelo de líneas de transmisión, al adecuarse más a las necesidades prácticas del mismo.

### 2.3.1 Substrato utilizado

A la hora de construir un dispositivo el substrato utilizado tiene una gran importancia. En este caso, las ecuaciones que se usarán para calcular las dimensiones de la antenna quedarán determinadas por el valor del substrato, con lo que la elección del mismo también cobrará gran importancia.

También es importante la elección del mismo puesto que el substrato proporcionará a la antenna microstrip cierta robustez mecánica. En el medio dieléctrico del substrato será por el que se propagarán las ondas de superficie, lo que hará que parte de la energía se disipe en la radiación, haciendo que las propiedades de la antenna se vean afectadas negativamente.

Normalmente un substrato dieléctrico está definido por los siguientes parámetros:

- Constante dieléctrica: Determina la tendencia de un material a polarizarse ante la exposición de un campo eléctrico.
- Tangente de pérdidas: Determina las pérdidas de energía electromagnética de un determinado material.

El ancho de banda en términos de frecuencia de una antenna microstrip depende en gran medida tanto del grosor del substrato, como de la constante dieléctrica del mismo. Un substrato de gran grosor con una baja constante dieléctrica puede aumentar el ancho de banda de la antenna. Sin embargo si el grosor del substrato aumenta demasiado:

- Será difícil integrar la antenna con otros circuitos.
- Las pérdidas debido a las ondas de superficie degradarán la eficiencia de la antenna.

Respecto a la constante dieléctrica, si es baja:

- Aumentará en ancho de banda, pues son inversamente proporcionales.
- Aumentará la radiación.

Grosor del sustrato (h)	Constante dieléctrica( $\epsilon$ )	Tangente de pérdidas (tg( $\delta$ ))
Ancho de banda	Ancho de banda	Ancho de banda
Integración con otros circuitos	Máxima radiación	Máxima radiación
Resonancia		

Tabla 3: Dependencia del sustrato.

Con lo que resumiendo, desearemos que nuestra antena tenga un constante dieléctrica y tangente de pérdidas bajas y un grosor lo más alto posible.

Teniendo en cuenta dicha dependencia, y los sustratos disponibles, utilizamos el Taconic TLX-9-620.

### 2.3.2 Modelo de dimensiones

En esta sección simplemente mostraremos una gráfica que muestra la estructura de la antena, y la geometría de la misma. Es importante destacar la nomenclatura asociada a cada una de las longitudes, pues en el capítulo siguiente se mostrará cómo se calcularon cada una de ellas.

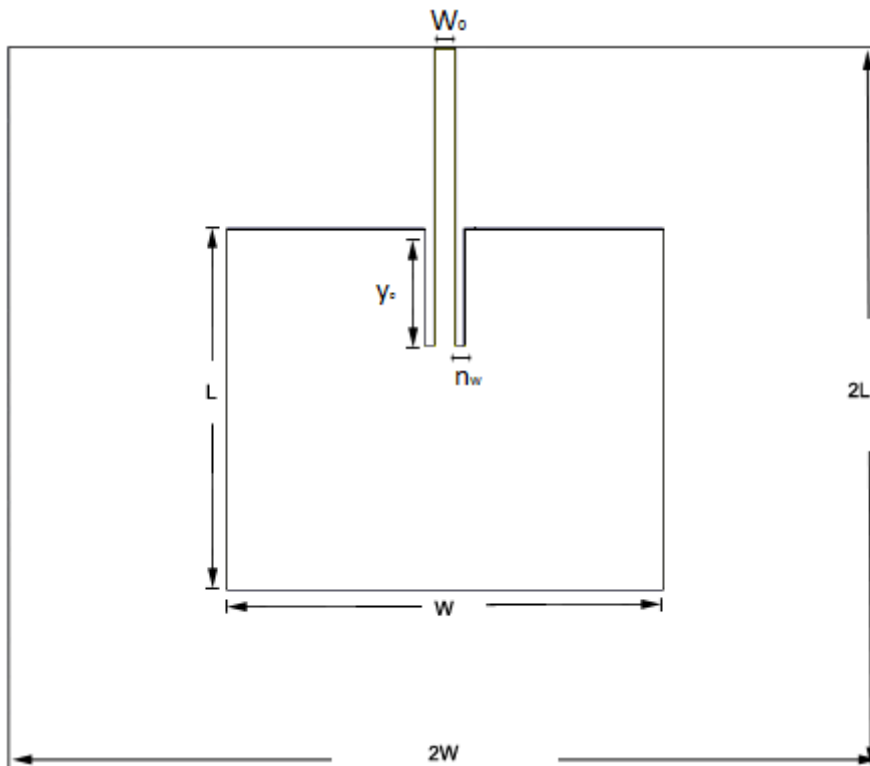


Figura 5: Dimensiones de la antena.

### 2.3.3 Ecuaciones

Para comenzar el diseño lo primero es obtener las ecuaciones del parche. Para ello utilizamos el modelo de líneas de transmisión como hemos mencionado anteriormente. A continuación veremos las ecuaciones que usaremos para calcular las dimensiones del parche.

Empezaremos calculando la anchura del parche,  $W$ :

$$W = \frac{c_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (6)$$

Donde  $c_0$  es la velocidad de la luz,  $f_r$  es la frecuencia de resonancia y  $\epsilon_r$  es la constant dieléctrica relative del substrato.

Para calcular la constante dieléctrica efectiva:

○ Si  $\frac{W}{h} > 1$ :

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta}{h} = h \cdot 0.412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (8)$$

La longitud del parche:

$$L = \frac{c_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (9)$$

\* Es importante tener en cuenta que la anchura y longitud calculados hasta ahora son la anchura del parche. La anchura y longitud de la antenna total serán por convenio, y para un óptimo resultado, 2 veces las del parche.

Para calcular  $W_0$ :

$$A = \left(\frac{Z_0}{60}\right) \sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{\epsilon_r+1}} \cdot \left(\frac{0.23+0.11}{\epsilon_r}\right) \quad (10)$$

○ if  $A \geq 1.52$ :

$$W_0 = h \cdot \left(\frac{8 \cdot e^A}{(e^{2A}-2)}\right) \quad (11)$$

○ if  $A < 1.52$ :

$$B = \frac{60 \cdot \pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (12)$$

$$W_0 = \frac{2h}{\pi} \cdot \left(B - 1 - \log(2B - 1) + \left(\frac{\epsilon_r-1}{2\epsilon_r}\right)\right) \cdot \left(\log(B - 1) + 0.39 - \frac{0.11}{\epsilon_r}\right) \quad (13)$$

Para calcular  $y_0$ :

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (14)$$

$$I_1 = \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 \sin\theta^3 d\theta \quad (15)$$

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2} \quad (16)$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[ \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 J_0(k_0 L \sin\theta) \sin\theta^3 d\theta \quad (17)$$

$$y_{01} = \left(\frac{L}{\pi}\right) \sec(\sqrt{2Z_0(G_1 + G_{12})}) \quad (18)$$

$$y_{02} = \left(\frac{L}{\pi}\right) \sec(\sqrt{2Z_0(G_1 - G_{12})}) \quad (19)$$

La razón por la que hay dos  $y_0$  es porque las ecuaciones dan dos posibles soluciones, siendo ambas válidas. Escoger una u otra dependerá de los resultados obtenidos con cada una de ellas, eligiendo la que proporcione el mejor.

Para calcular  $n_w$ :

$$n_w = \frac{(3 \cdot 10^{11}) \cdot (4.65 \cdot 10^{-12})}{\sqrt{2 \epsilon_r f_r 1 \cdot 10^{-9}}} \quad (20)$$

Para calcular las dimensiones del puerto:

$$W_{port} = 6 \quad (21)$$

$$H_{port} = 5h + (G_{thickness} \cdot 10^{-3}) \quad (22)$$

*\*Estas dimensiones no están en la estructura mostrada en la sección 4.3.2, pero básicamente calcularán la anchura y altura que el programa debe considerar para tener en cuenta el conector que irá conectado en la línea de alimentación de la antena.*

A la hora de elegir el substrato, se probó con varios tipos dentro de una primera selección, para ver con cuál de ellos se conseguían mejores resultados. Esto implica que las dimensiones de la antena cambiarán constantemente, por razones prácticas se creó una función en Matlab para poder obtener los valores de las dimensiones de manera más directa, así como otra función para calcular la posición de cada una de las dimensiones en el editor del programa. (Ambos códigos disponibles en el Anexo I).

### 2.3.4 Modelado

Una vez tenemos los valores de las dimensiones de nuestra antena pasamos a modelarla. Para ello usaremos el software ANSYS HFSS. El primer paso será importar nuestro sustrato para poder modelarla teniéndolo en cuenta, para ello se añadirá en la biblioteca de sustratos, lo que habrá que hacer manualmente.

Tras ello se modelará teniendo en cuenta las dimensiones previamente calculadas en el punto 2.3.3. A continuación veremos en la siguiente gráfica el diseño final.

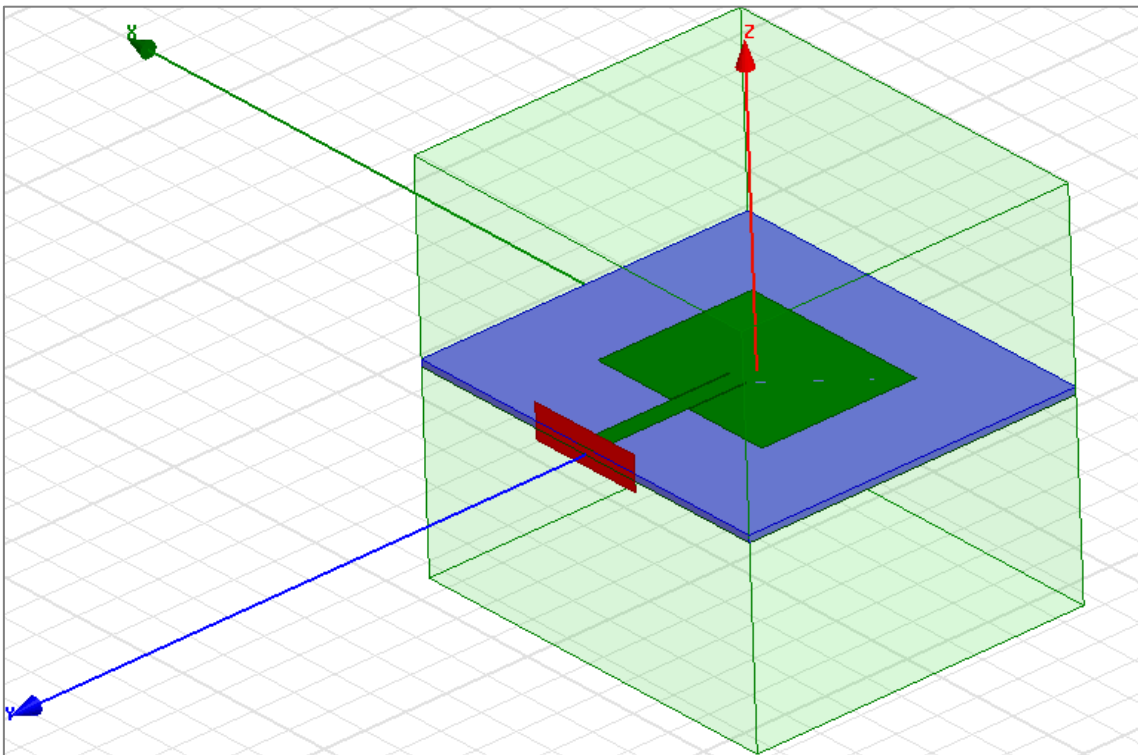


Figura 6: Antena de parche rectangular.

Éste es nuestro diseño de antena de parche rectangular final. Un dato a tener en cuenta es que es importante añadirle cierta longitud extra para poder tener en cuenta el conector. Si no se vería afectado el funcionamiento de la misma.

### 2.3.5 Simulación

En este capítulo mostraremos los resultados de la simulación de la antena. Básicamente mostraremos los parámetros más importantes teniendo en cuenta el propósito de la misma.

#### 2.3.5.1 Parámetro $S_{11}$

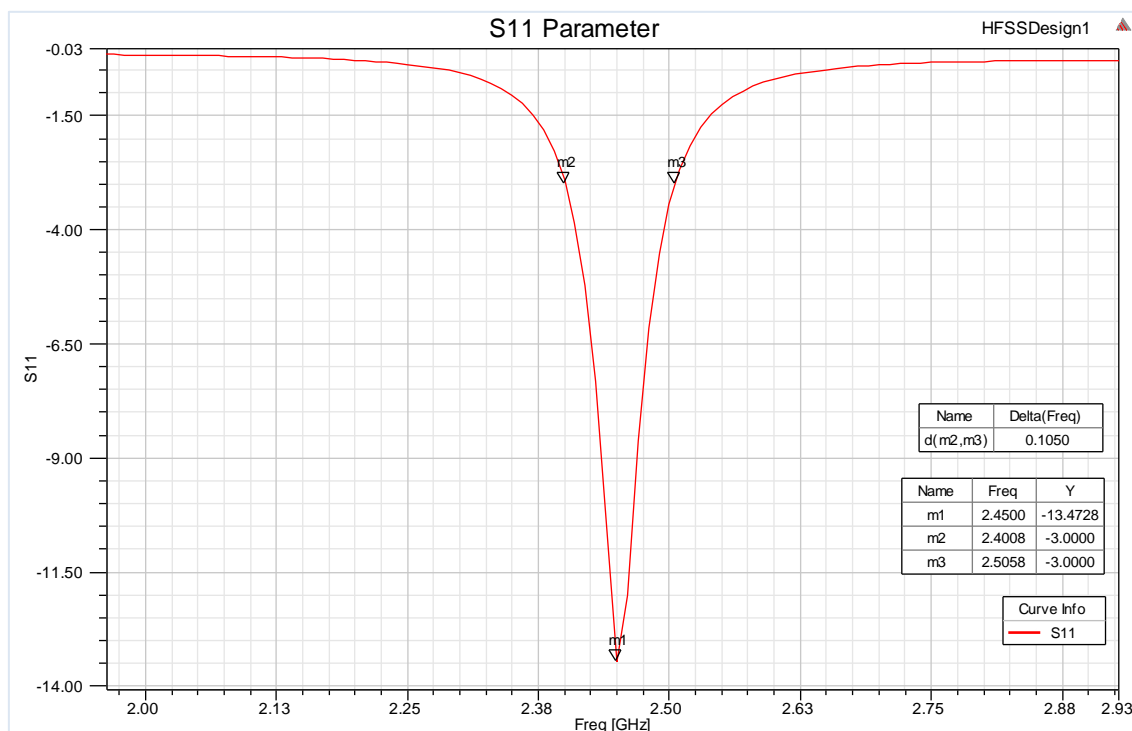


Figura 7: Antena  $S_{11}$ .

En esta gráfica podemos ver el parámetro  $S_{11}$ , este parámetro nos da una idea de lo que refleja la antena y de lo que transmite. En esta gráfica vemos como la antena lo refleja todo menos la frecuencia deseada, 2,45GHz. Además es muy importante tener en cuenta el ancho de banda, para tener una idea podemos ver con los marcadores m2 y m3, cómo se consigue un ancho de banda de alrededor de 100 MHz a -3dB. Con ello se consigue un ancho de banda considerable teniendo en cuenta éste tipo de antena, y el mayor conseguido de entre todos los substratos empleados.

Al principio la frecuencia de resonancia aparecía desplazada, con lo que disminuimos la longitud del parche, puesto que tal y como podemos ver en (9), la frecuencia de resonancia es inversamente proporcional a la longitud del mismo, con lo que disminuyendo L conseguiremos aumentar la frecuencia de resonancia. Es importante destacar que se debe disminuir la longitud en muy pequeña medida, en nuestro caso 0.2mm, fue en media, la medida que lograba el resultado óptimo en casi todas las simulaciones hechas con los diferentes substratos.

### 2.3.5.2 Diagrama de radiación

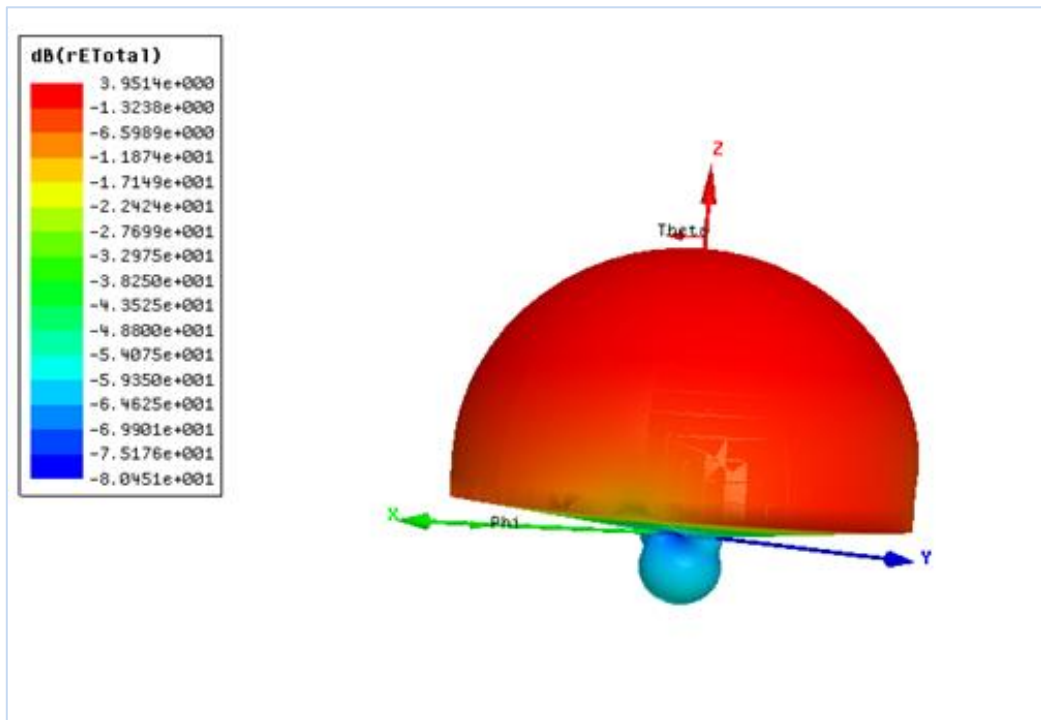
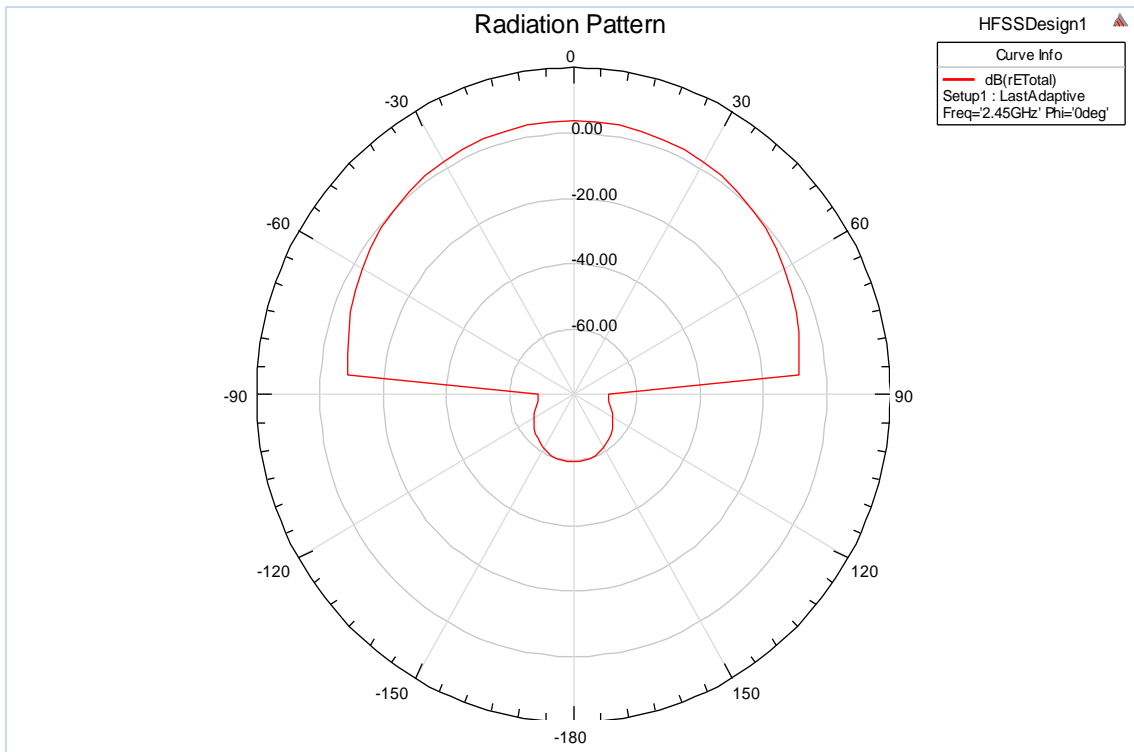


Figura 8: Diagrama de radiación en 3D.

En el diagrama de radiación de una antena se muestra gráficamente las propiedades direccionales de radiación de la antena a grandes distancias. El plano E (plano que forma la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección) y el plano H (análogamente, plano formado por la dirección de máxima radiación y el campo magnético en dicha dirección), constituyen los planos más representativos. Ambos planos son perpendiculares y su intersección define la dirección de máxima radiación de la antena.

En este caso vemos cómo la dirección de máxima radiación se encuentra en el eje z. esto, tal y como era de esperar, nos hace ver que radia en dirección perpendicular al parche. Básicamente radiará únicamente en la superficie del parche, con lo que transmitirá y radiará de la manera mostrada en la gráfica.





**Figura 9: Diagrama de radiación horizontal (plano E).**

En esta gráfica podemos ver un corte transversal, del diagrama de radiación anterior. Vemos cómo el máximo de radiación se encuentra en 0 grados. Como en la parte inferior del eje no hay ningún tipo de radiación, y cómo la intensidad de radiación va disminuyendo progresivamente en los extremos, es decir en 90° y -90 °.

### 2.3.5.2 Ganancia

A continuación mostraremos la gráfica de la ganancia:

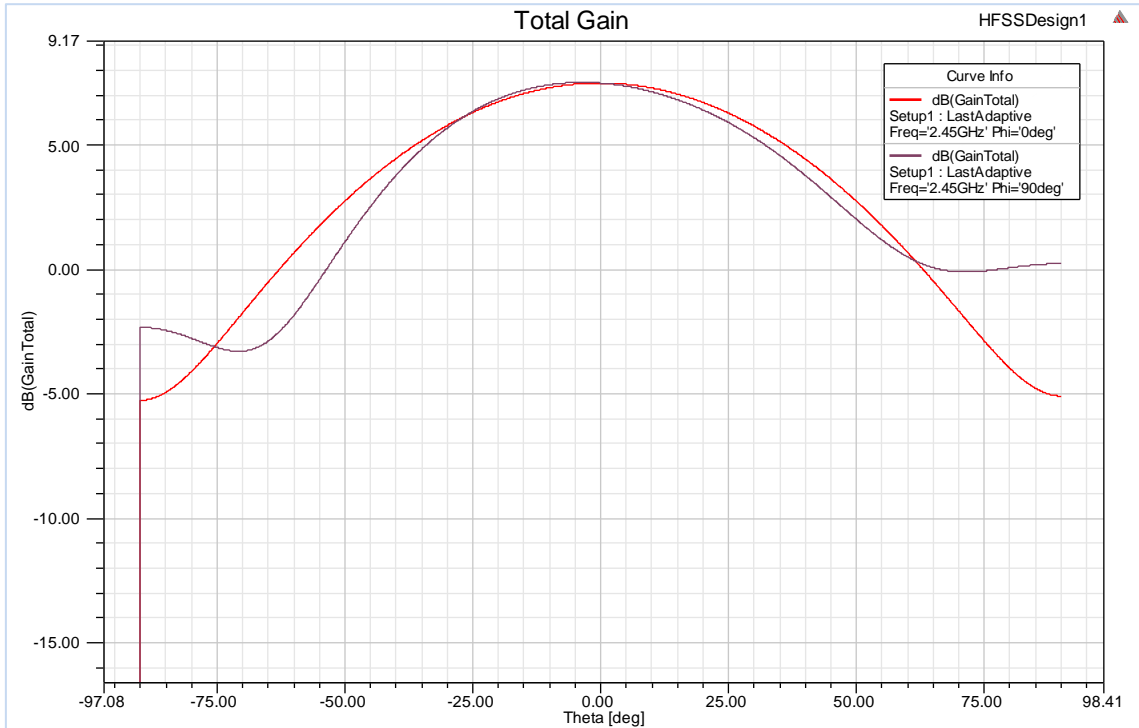


Figura 10: Ganancia.

En esta gráfica se muestra la ganancia en los puntos más interesantes, siendo Phi (0 °) y Phi (90 °), pues son los puntos de campo eléctrico y magnético respectivamente. Básicamente la ganancia nos informa de la potencia entregada a la antena, aquí podemos ver cómo en la dirección máxima de propagación la ganancia es de 7.42 dB.

### 2.3.5.3 Directividad

En la siguiente gráfica se muestra la directividad:

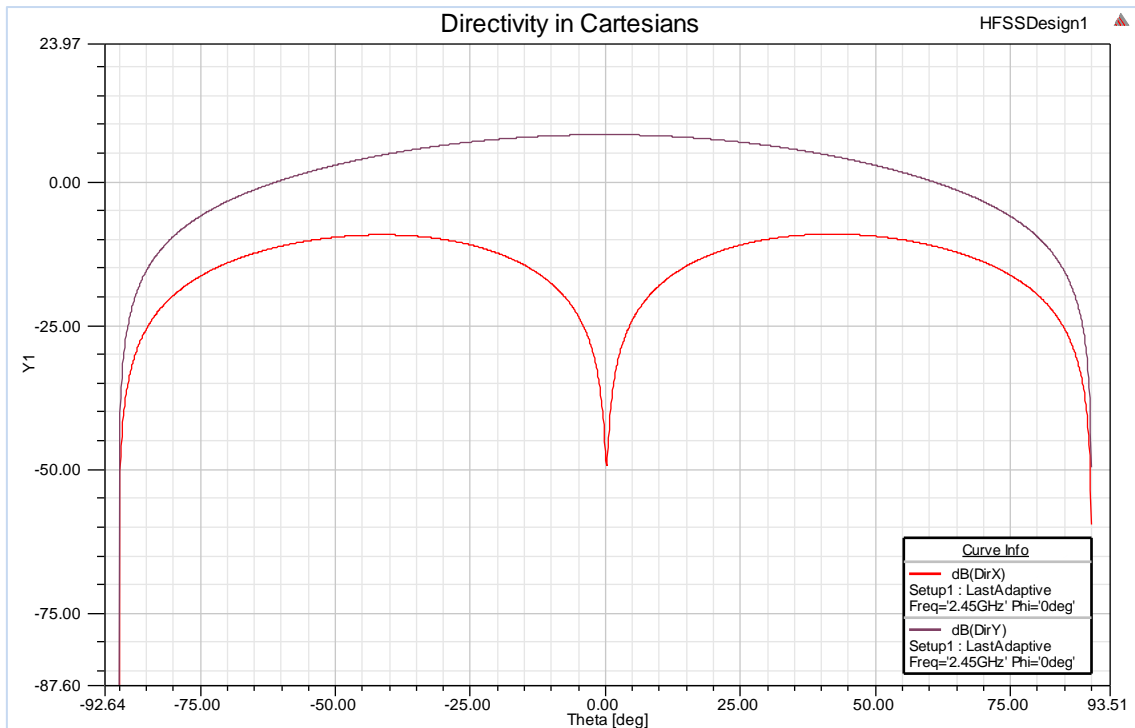


Figura 11: Directividad.

La directividad es la propiedad que tiene una antena de transmitir o recibir la energía irradiada en una dirección particular. En esta gráfica se muestra la directividad de la antena respecto de Theta en los ejes x e y. Podemos ver cómo no es una antena muy directiva, pero rara vez se consigue que las antenas de parche lo sean.

### 2.3.5.4 Eficiencia

En la siguiente gráfica podemos ver la eficiencia de la antena:

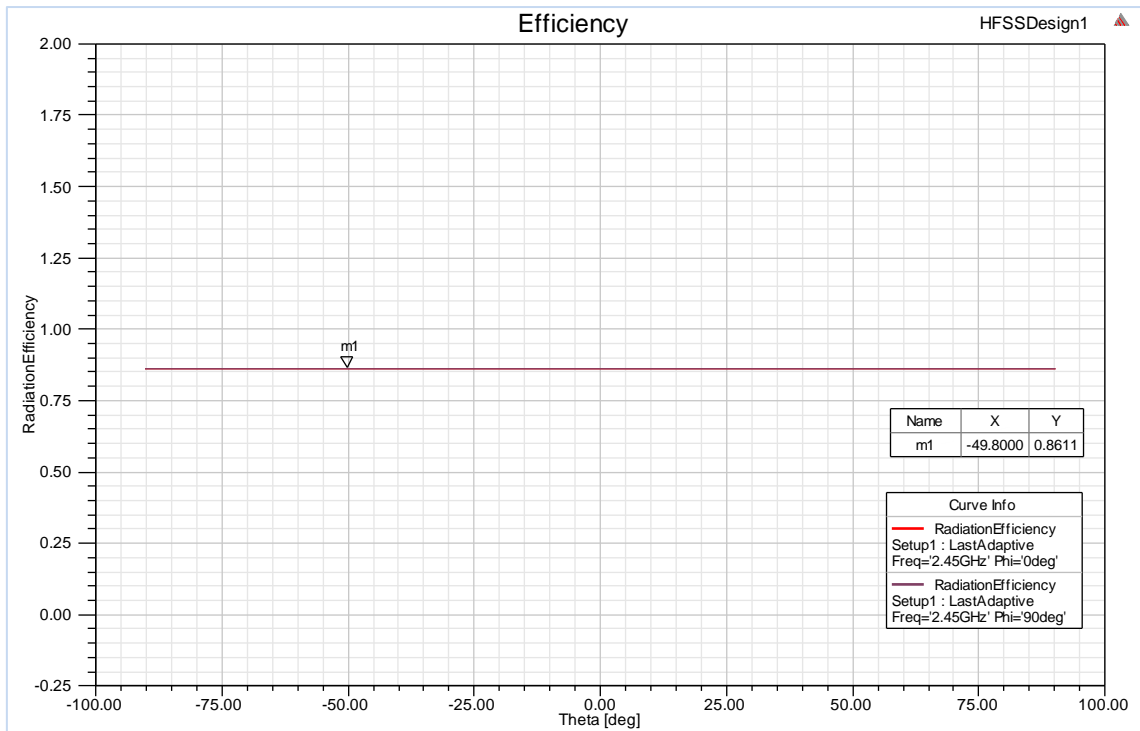


Figura 12: Eficiencia.

La eficiencia no es más que la relación entre la potencia radiada y la potencia entregada a la antena. Es decir, la relación entre ganancia y directividad (ver en (5)). Aunque la ganancia y la directividad de nuestra antena no son muy altas, podemos ver que la eficiencia sí lo es, esto implica que la ganancia y la eficiencia de nuestra antena son muy parecidas, pues el máximo valor que puede tener la eficiencia es de 1, y nosotros conseguimos 0.8611.

### 2.3.5.5 Axial Ratio

Podemos ver ahora el axial ratio:

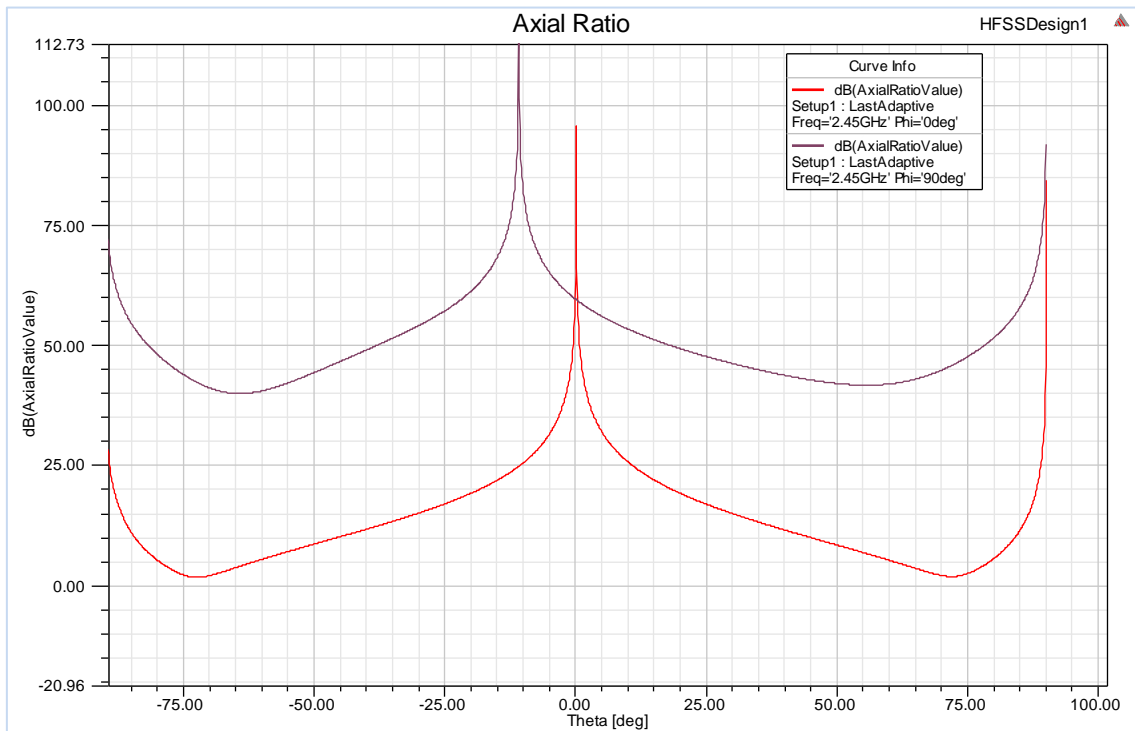


Figura 13: Axial Ratio.

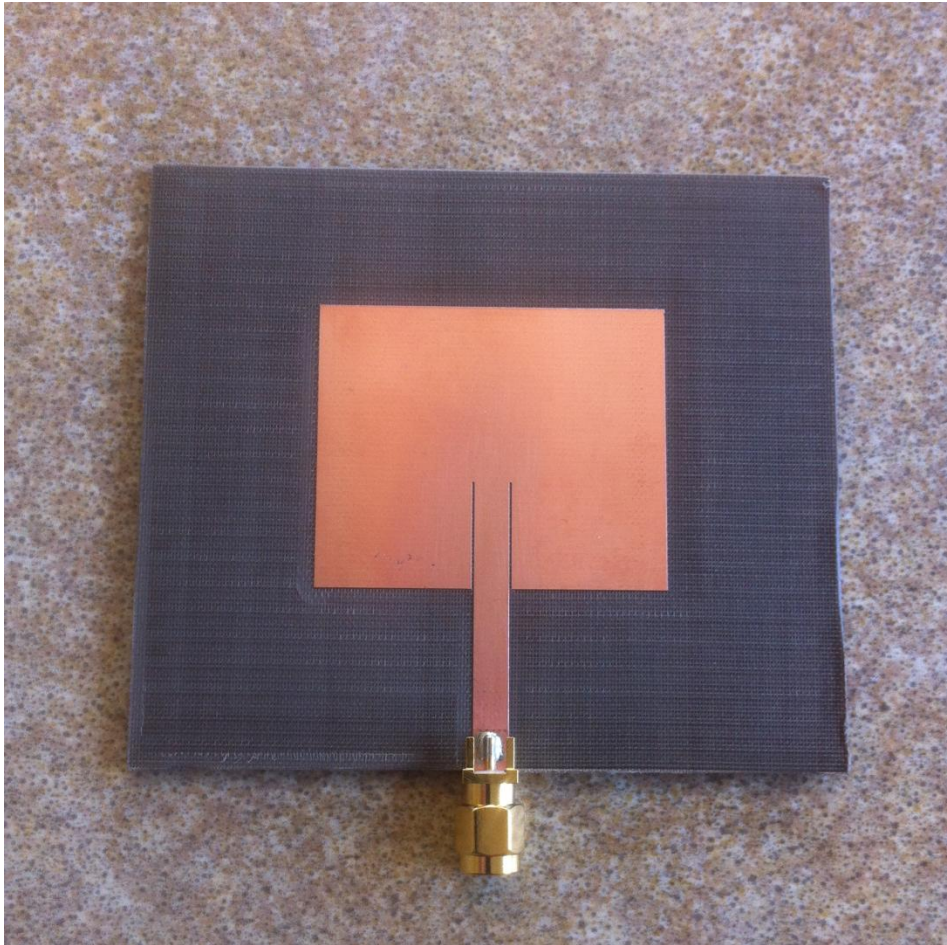
El axial ratio de una antena es la relación existente entre ambas componentes, aquí se muestra el axial ratio en las dos direcciones de campo, Phi (0°) y Phi (90°). Vemos cómo la gráfica cambia abruptamente para ambas alrededor de 0°, que es la máxima dirección de propagación, esto indica que justo en ese punto es cuando ambas componentes difieren más.

Todo ello nos indica la polarización lineal de la antena, pues si el axial ratio fuera constante implicaría que ambas componentes son iguales, y eso implica polarización circular.

## 2.4 Fabricación

Una vez obtuvimos los resultados deseados procedimos con la construcción del prototipo. Exportamos el layout para su posterior fabricación, teniendo en cuenta el sustrato elegido y el conector que posteriormente habrá que usar.

Aquí se muestra una imagen del prototipo final:



**Ilustración 1: Primer prototipo de la antena.**

Para su fabricación usamos el sustrato TLX-9-620, y un conector SMA macho.

## 2.5 Testeo en el laboratorio

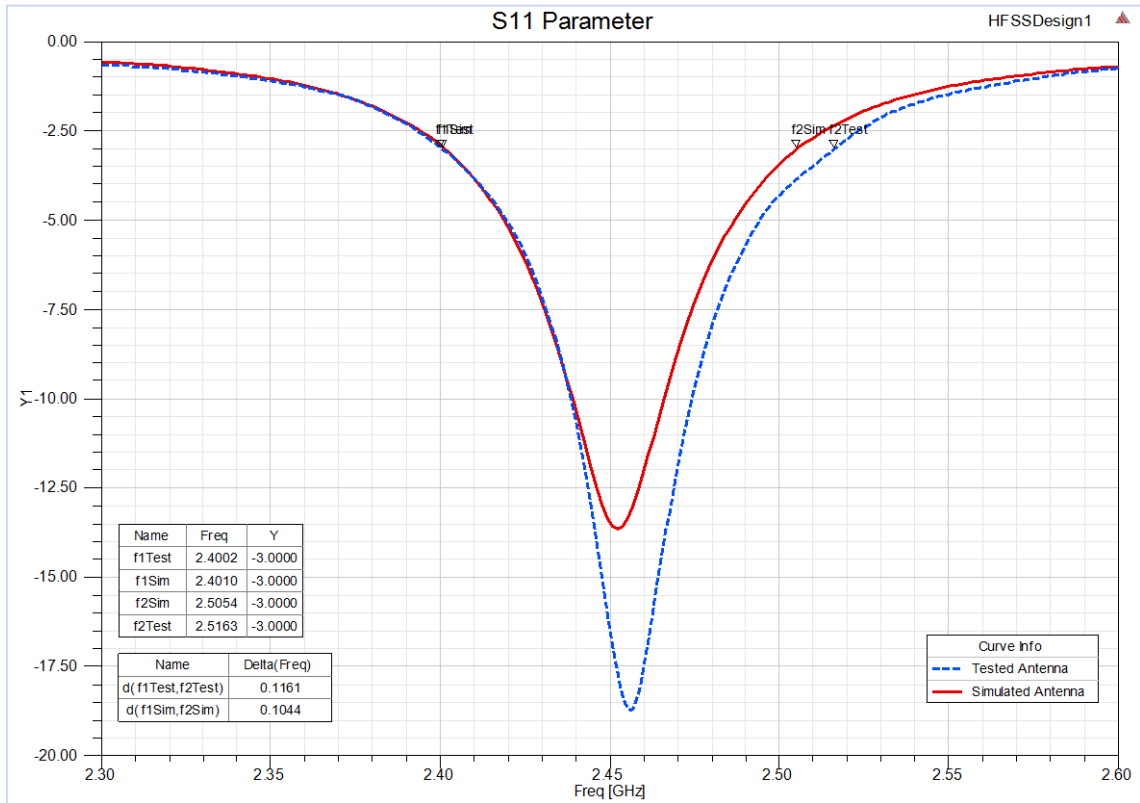
Una vez obtuvimos el prototipo pasamos a testear el mismo en el laboratorio.



**Ilustración 2: Testeando la antena.**

Le introdujimos a la antena una señal a una frecuencia de 2.45GHz, para poder ver su parámetro  $S_{11}$ , y ver si coincidía con el obtenido en las simulaciones previas a la fabricación.

De manera inesperada el resultado mejoró el obtenido en las simulaciones. Para tener una idea de la diferencia existente entre ambas y poder hacer una comparación de manera más práctica, superpusimos las gráficas:



**Figura 14: Comparación.**

En la gráfica podemos observar como el ancho de banda obtenido con nuestro prototipo aumenta en 10% con respecto al obtenido en las simulaciones. Podemos observar la diferencia en el ancho de banda en uno de los cuadros mostrados en la gráfica. Además podemos ver cómo el mínimo se acentúa más en la antena testeada (Línea azul discontinua).



### 3. Rectificador

El rectificador diseñado en este proyecto consta de tres etapas:

- Red de adaptación.
- Etapa de rectificación.
- Etapa de filtrado.

De manera gráfica:

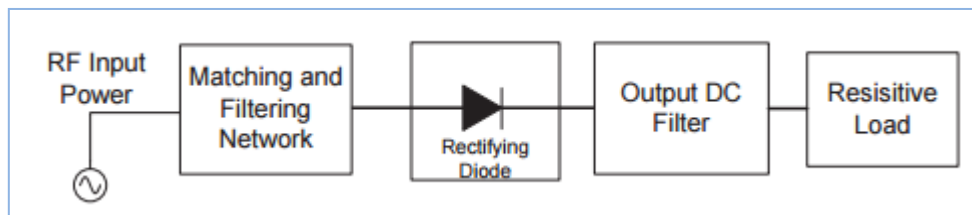


Figura 15: Esquema del rectificador.

Más adelante trataremos cada una de estas secciones por separado, pero antes, haremos una breve introducción de qué es un rectificador y los tipos existentes.

#### 3.1 Definición

Un rectificador es un dispositivo capaz de transformar la corriente alterna en corriente continua. El elemento más importante en un rectificador es el diodo, ya que es el elemento gracias al cual se consigue la rectificación. Antes de avanzar, veremos los tipos de rectificadores que hay, y las diferencias de cada uno de ellos.

#### 3.2 Tipos de rectificadores

Podemos encontrar dos tipos de rectificadores:

- Rectificador de media onda, formado por un único diodo.
- Rectificador de onda completa. Dentro de este tipo podemos distinguir:
  - Rectificador con transformador de toma intermedia, formado por dos diodos.
  - Rectificador con puente, formado por cuatro diodos.

### 3.2.1 Rectificador de media onda

El rectificador de media onda es un circuito que elimina la mitad de la señal que recibe en la entrada, en función de cómo esté polarizado el diodo, si la polarización es directa, eliminará la parte negativa de la señal, y si la polarización es inversa, eliminará la parte positiva.

Gráficamente:

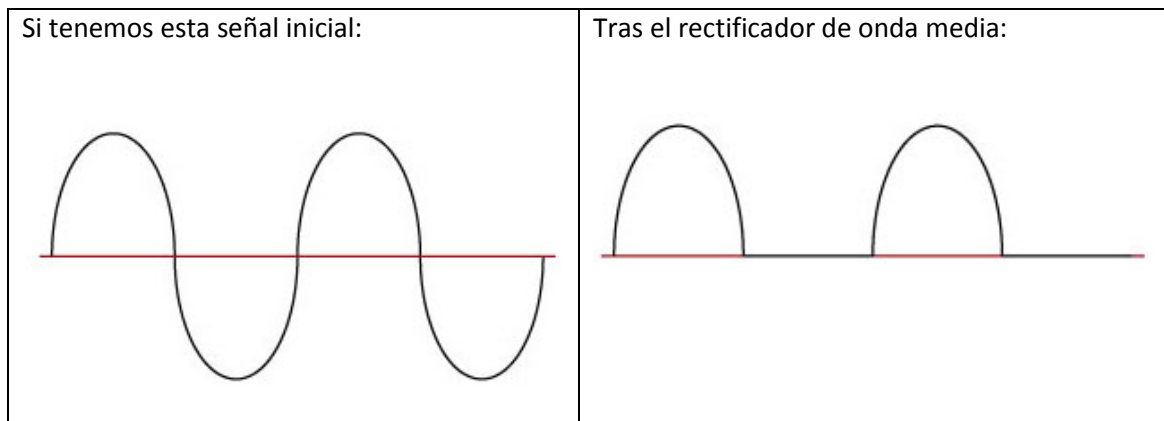


Figura 16: Efecto producido por el rectificador de media onda a la señal.

### 3.2.2 Rectificador de onda completa

El circuito rectificador de onda completa es el tipo más empleado en las fuentes de alimentación de los equipos, debido a que con él se obtiene una corriente continua muy parecida a la que proporcionan las pilas o las baterías. A diferencia del rectificador de media onda, en este caso, la parte negativa de la señal se convierte en positiva o bien la parte positiva de la señal se convertirá en negativa, según se necesite una señal positiva o negativa de corriente continua.

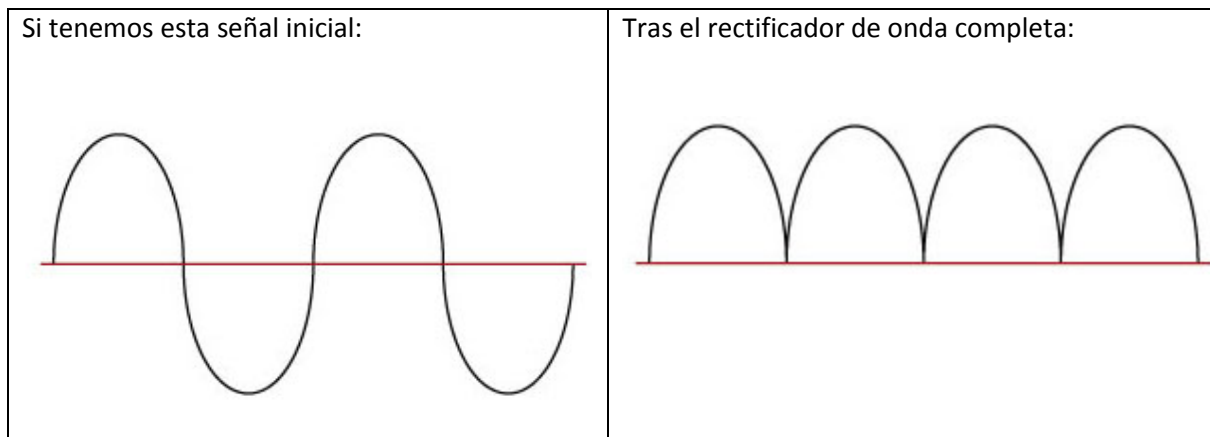


Figura 17: Efecto producido por el rectificador de onda completa a la señal.

Hoy en día el rectificador de onda completa es el más utilizado, pues a la vista de la gráfica anterior, aprovecha la parte negativa de la señal, haciendo que sea más eficiente el diseño. Previamente hemos nombrado los tipos de rectificador de onda completa que se pueden encontrar, sin embargo no serán explicados al no ser ninguno de ellos usados posteriormente en el diseño.

### 3.3 Red de adaptación

#### 3.3.1 Breve introducción

La red de adaptación utilizada en la primera fase de nuestro rectificador es para eliminar los armónicos indeseados. Nuestro dispositivo estará centrado en 2.45 GHz, con la red de adaptación nos aseguramos de que esa sea la única frecuencia a la salida de la misma. Para el diseño de un rectificador real se deberán tener en cuenta los tres primeros armónicos. Con lo que nuestra red de adaptación se encargará de eliminar el segundo armónico, a 4.9 GHz, y el tercero, a 7.35 GHz.

### 3.3.2 Teoría

Inicialmente para el diseño de esta red nos basamos en la siguiente estructura:

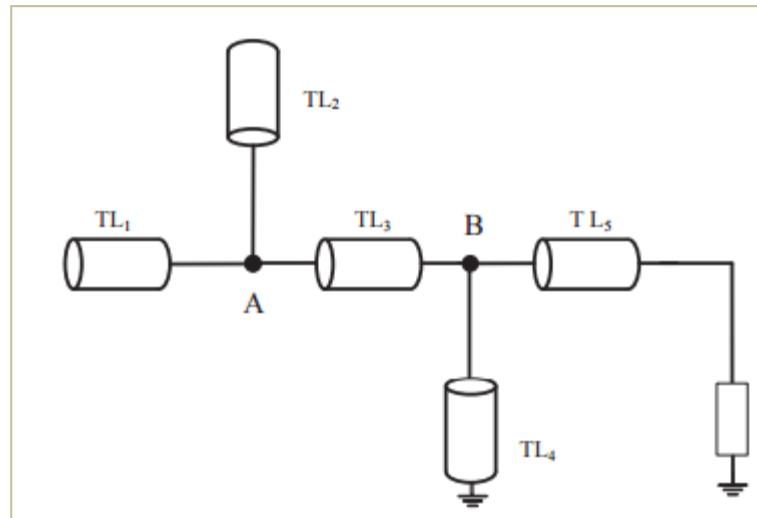


Figura 18: Esquemático de la red de adaptación.

La longitud de la línea  $TL_2$  es  $\lambda/4$  a  $3f_0$ , donde  $f_0$  es la frecuencia del modo fundamental. Con ello se consigue un cortocircuito en el punto A, por lo tanto, el tercer armónico en el punto A será eliminado, o dicho de otra manera, no se propagará más allá de este punto. Haciendo que  $TL_1$  sea también  $\lambda/4$  a  $3f_0$ , la baja impedancia de entrada de  $TL_2$  se transformará en una alta impedancia reactiva a la salida del transistor. De manera análoga con el segundo armónico,  $TL_4$  es un línea  $\lambda/4$  a  $2f_0$  acabada en cortocircuito, ello hará que en el punto B tengamos un circuito abierto. Las longitudes de  $TL_1$  y  $TL_3$  se han diseñado separadamente y al mismo tiempo teniéndose en cuenta la una a la otra para lograr la impedancia deseada eliminando el segundo y tercer armónico.

Este diseño, mostrado en el artículo científico “Design of a rectifier for 2.45 GHz wireless power transmission” por Defu Wang y Renato Negra, fue el diseño inicial del rectificador, sin embargo, aunque fue el diseño del que se partió, tras optimizar el diseño y adaptarlo a los fines perseguidos en este proyecto el resultado fue distinto. Mostraremos el resultado del diseño final en el siguiente punto.

### 3.3.3 Diseño

Como hemos dicho anteriormente aunque nos basamos en el diseño mostrado en el punto 3.3.2, nuestro diseño final fue completamente distinto, aquí podemos ver cómo difieren ambos esquemas, en este diseño se eliminó la línea  $TL_5$ , pues no estaba orientada a los propósitos buscados en este proyecto. También se variaron los valores de longitud y anchura de las líneas al optimizarlas.

En la siguiente gráfica se muestra el esquemático final del mismo. Para poder simular y acercar nuestro diseño a la realidad de manera más precisa se utilizó el software Microwave Office, también conocido como AWR.

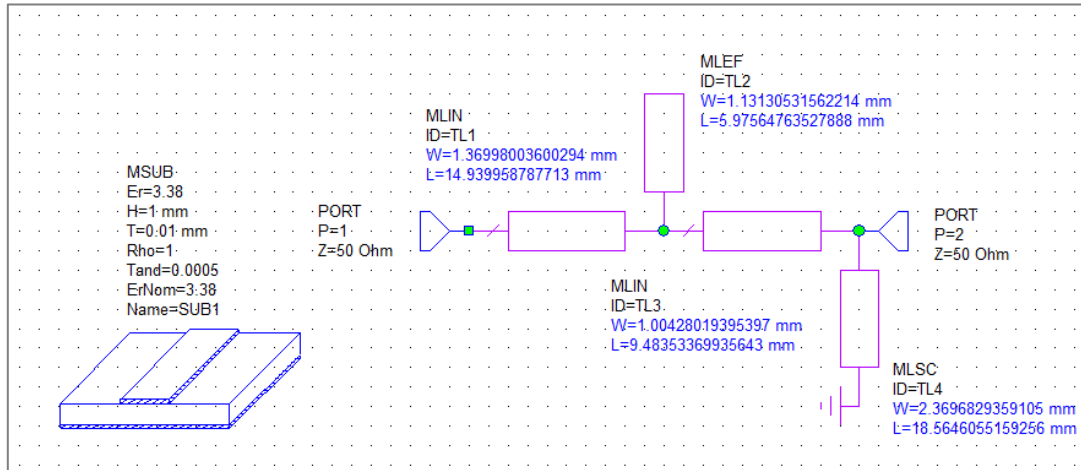


Figura 19: Esquemático de la red de adaptación.

### 3.3.4 Resultados

En esta gráfica se muestra el esquemático de la red de adaptación conseguido inicialmente, con el primer sustrato utilizado. Esos son los valores obtenidos tras la optimización para obtener la siguiente gráfica:

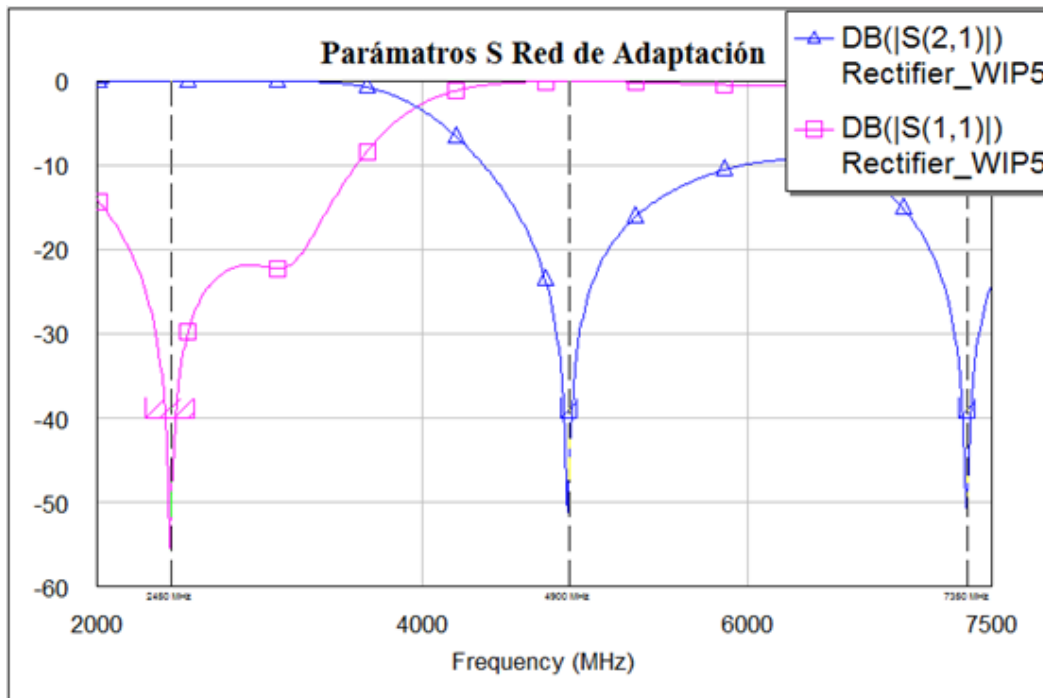


Figura 20: Parámetros S de la red de adaptación.

En la figura podemos observar como el parámetro  $S_{11}$  obtiene un mínimo en 2.45GHz, esto significa que no reflejará la frecuencia fundamental, pero sí el resto de frecuencias indeseadas. Por otro lado tenemos el parámetro  $S_{12}$ , en la gráfica se observa como tiene dos mínimos a 4.9 GHz aproximadamente, y a 7.35 GHz. Esto implica que no transmitirá esas frecuencias. Debemos recordar que al estar en escala logarítmica el 0 será el nivel máximo de señal.

Así pues, se consiguen los objetivos deseados para la red de adaptación.

## 3.4 Etapa rectificadora

### 3.4.1 Breve Introducción

En esta etapa trataremos la parte más importante del rectificador, el diodo. En esta etapa se utilizó el harmonic balance<sup>[1]</sup>, una herramienta que ofrece Microwave Office, con ella podremos evaluar el comportamiento no lineal del diodo.

Básicamente en la sección 3.2 hemos explicado que cambios aplicará el diodo a la señal que se le introduzca. Con lo que pasaremos directamente a explicar el proceso. El diodo elegido será un diodo schottky<sup>[2]</sup>, en concreto el HSMS2850, básicamente se añadió un diodo ofrecido por la librería de componentes de AWR, y se volcaron los parámetros obtenidos en la hoja de especificaciones de este diodo en concreto para poder tenerlo en cuenta en la simulación.

### 3.4.2 Diseño

En cuanto al diseño de esta etapa, lo primero que decidimos fue si usar un rectificador de onda media, o uno de onda completa.

Cabe pensar que se obtendrían mejores resultado, entendiéndose como valores más altos de voltaje y corriente, usando un rectificador de onda completa. Sin embargo, los resultados obtenidos en las simulaciones, y la complejidad que aportaba al diseño hicieron que nos decantáramos por un rectificador de onda media.

Sin embargo, los valores obtenidos a la salida no eran lo suficientemente altos como para poder encender el LED, ni siquiera siendo éste de bajo consumo. Con lo que optamos por añadir un amplificador de voltaje, cuya estructura mostramos a continuación:

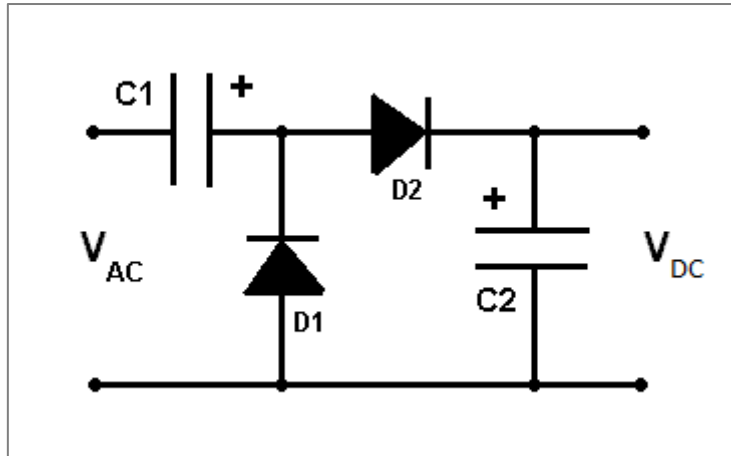


Figura 21: Amplificado de voltaje.

Cuando nos encontramos con un semiciclo negativo de la señal AC, D1 se activa y el condensador C1 empieza a cargarse con la polaridad mostrada en la figura. Cuando llega el semiciclo positivo de la señal el diodo D1 deja de funcionar y se activa D2, cargando C2 con la combinación de la tensión aplicada a la entrada (V) y el voltaje de C1(también V),dejando a C2 con una tensión total de 2V. D2 bloquea el voltaje del ciclo negativo y carga el primer condensador C1. La tensión en C2 coincide con la tensión a la salida de nuestro dispositivo, con lo que la tensión a la salida será 2V también. De esta manera hemos doblado la tensión a la entrada.

A continuación veremos una imagen del esquemático con dicha configuración:

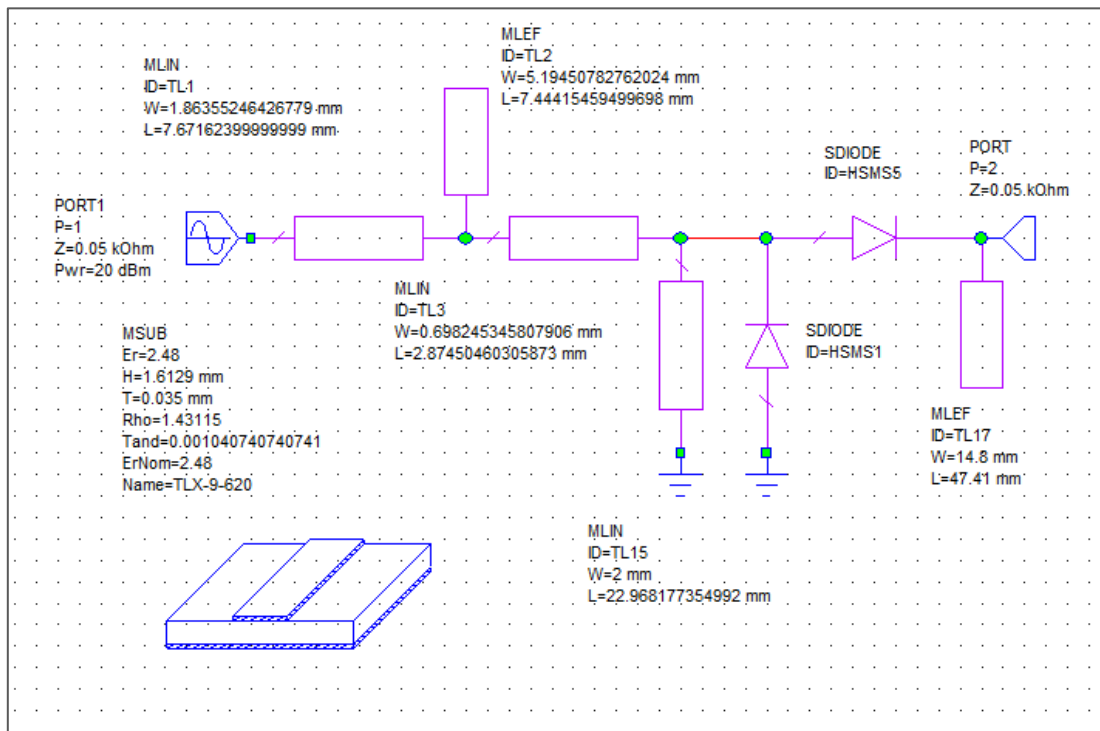


Figura 22: Esquemático una vez añadido la etapa rectificadora.

En la figura podemos ver que el condensador C1 no aparece, esto se debe a que tras varias simulaciones en nuestro diseño carecía de relevancia. En las simulaciones C1 no aplicaba ninguna mejora significativa al resultado, pensamos que el motivo de que no sea necesario puede ser la red de adaptación.

### 3.4.3 Resultados

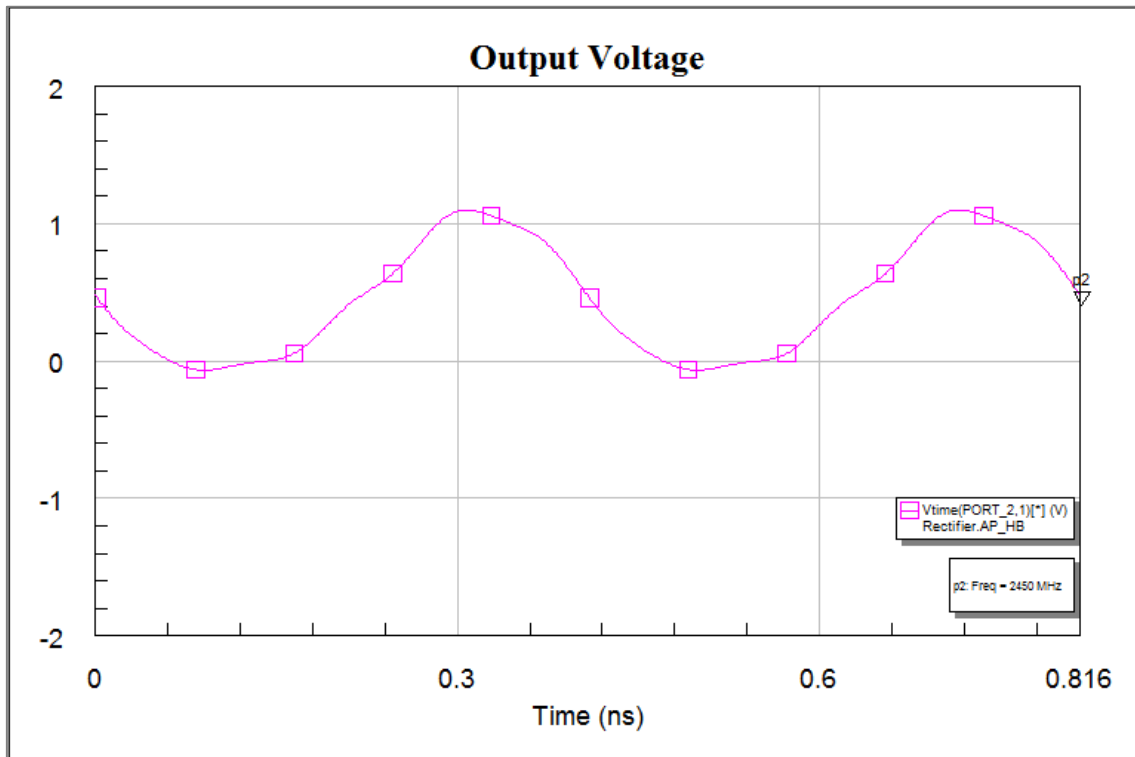


Figura 23: Salida del diodo.

En la figura vemos como obtenemos la respuesta esperada a la salida del diodo, es interesante ver cómo se ha eliminado el semiciclo negativo de la señal. Por supuesto, al usar un diodo real, la respuesta no es ideal, pero con esta gráfica nos hacemos una idea del efecto inmediato del diodo. Cabe destacar que al haber añadido la estructura del multiplicador de voltaje anteriormente mencionada, se obtuvo prácticamente el doble de tensión que cuando únicamente añadimos un diodo.

Sin embargo, aunque se haya eliminado la parte negativa de la señal, es cierto que aún dista mucho de ser continua, eso nos lleva a nuestra siguiente etapa, el filtro.



## 3.5 Etapa de filtrado

### 3.5.1 Breve Introducción

Al ser el diodo un elemento no lineal, también introducirá componentes no lineales a su salida, y para poder obtener una respuesta final lo más favorable posible, convendría filtrarlas. Con el filtro conseguiremos darle uniformidad a la señal convirtiéndola en una tensión constante.

Para esta etapa en un principio probamos con varias configuraciones microondas de filtros pasabajo, sin embargo, los resultados obtenidos una vez añadidos al diseño nos hicieron descartarlos e ir a por la opción más sencilla, un condensador.

### 3.5.2 Teoría

Los condensadores en microondas son ampliamente utilizados, sin embargo, se suele recurrir a su equivalente en líneas de transmisión al tratar con circuitos microondas debido a su fácil integración con el resto del diseño y a que suele ser la solución más económica.

El equivalente microondas de un condensador lo explicaremos a continuación.

De acuerdo con la teoría de las líneas de transmisión, la admitancia de entrada de una línea de transmisión en circuito abierto es la siguiente:

$$Y_{in} = jY_c \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} l\right) \quad (23)$$

Sabiendo que:

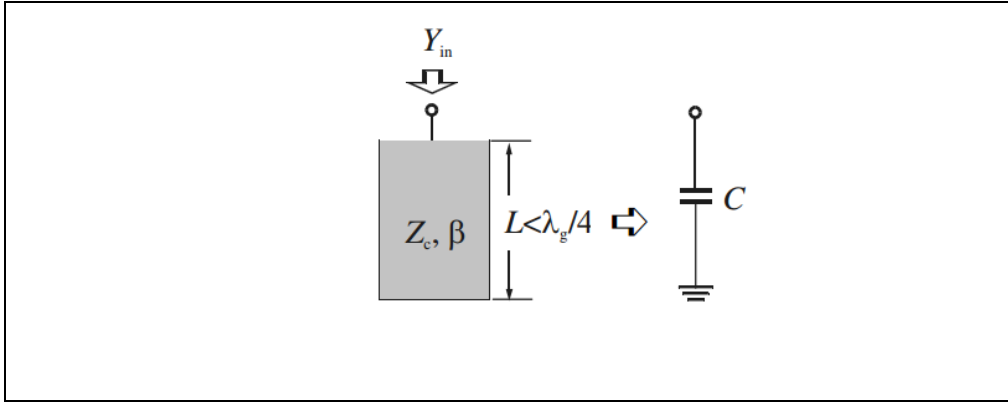
$$Y_c = \frac{1}{Z_c} \quad \text{y} \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \quad (24)$$

(x)

Donde  $l$  es la longitud del stub. Por lo tanto, si  $l < \lambda_g/4$ , su admitancia de entrada será capacitiva. Si  $l$  fuera menor, por ejemplo,  $\lambda_g/8$ , su admitancia de entrada podría ser aproximada por:

$$Y_{in} = jY_c \left(\frac{2\pi}{\lambda_g} l\right) = j\omega \left(\frac{Y_c l}{v_p}\right) \quad (25)$$

Donde  $v_p$  es la velocidad de fase de la propagación del stub.



### 3.5.3 Diseño

Una vez sabemos cuál es el equivalente microondas de un condensador lo introdujimos en nuestro diseño en AWR. Previamente hicimos las simulaciones añadiendo un condensador de la librería de componentes del programa para ver el valor que tendríamos que darle al mismo. Resultó que para conseguir el mejor resultado el valor del mismo era increíblemente alto, por ello añadimos dos líneas en cortocircito. Una vez añadidas optimizamos sus valores de longitud y altura para conseguir la salida buscada.

A continuación se muestra una imagen del esquemático una vez añadido el filtro:

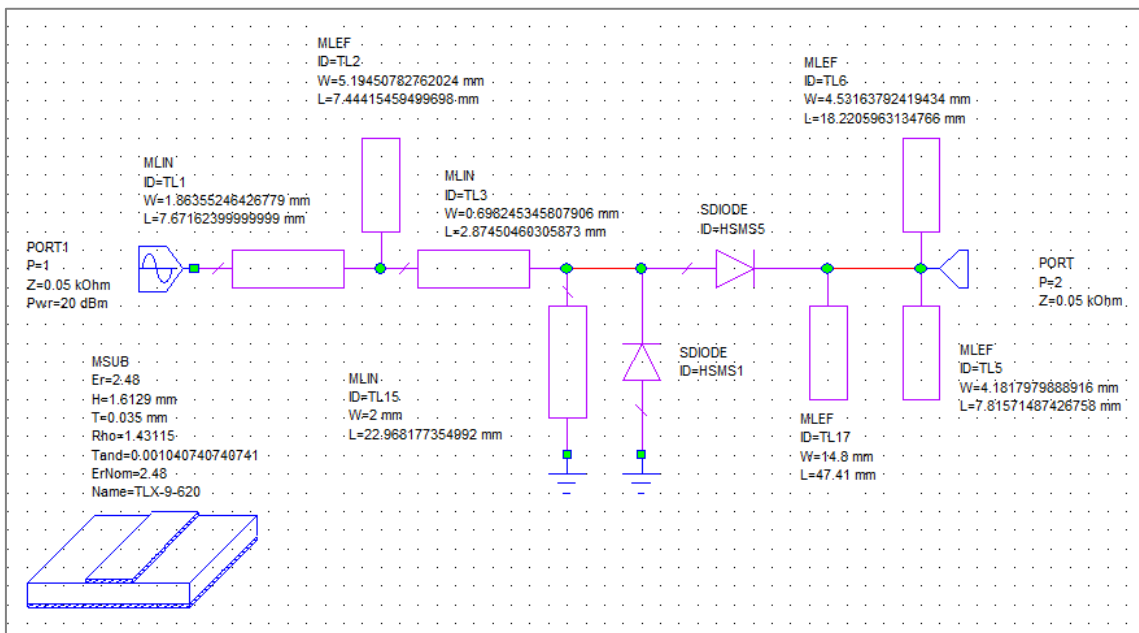


Figura 24: Esquemático del diseño una vez añadido el filtro.

### 3.5.4 Resultados

Al ser el resultado final es mismo que se obtiene a la salida del filtro mostraremos el resultado final en la sección 3.7 (Simulaciones).



### 3.6.1 Consideraciones

Cuando tenemos el diseño final de cada una de las etapas y se ha obtenido el resultado final buscado, se ha de adecuar el diseño para que su posterior fabricación sea más sencilla y práctica, es por ello que se han añadido ciertos componentes extra. El motivo de cada uno ellos se explicarán a continuación:

- El componente MTEE\$, este componente básicamente se pone para poder conectar líneas de distinta anchura.
- El componente MVIA1P, que modela un cortocircuito al final de la línea de transmisión, este componente internamente está formado por dos líneas de transmisión, una línea normal y otra acabada en circuito abierto, perforada para conectar la unión de esas dos líneas a la masa del sustrato.
- Además habrá que añadir líneas en todos aquellos puntos que vayan conectados a componentes no lineales que haya que soldar posteriormente. Para conectar estos componentes se necesitará cierta longitud extra, pues al conectarlos directamente a la línea afectaría al funcionamiento de la misma. Por esa razón se añaden líneas de transmisión extra, cuyo único propósito es la conexión de los componentes externos. Estas líneas podemos encontrarlas en los extremos de los diodos, así como a la entrada y salida. A la entrada, teniendo en cuenta las dimensiones del conector SMA elegido, y a la salida el LED que irá conectado.

## 3.7 Simulaciones

En esta sección mostraremos el resultado final de nuestro rectificador, no sin antes profundizar un poco en el LED conectado a su salida.

### 3.7.1 LED

Para comprobar el funcionamiento de nuestro dispositivo de manera inmediata, se pensó conectarle un LED a la salida. Se eligió un LED de bajo consumo debido a que los valores de tensión y corriente obtenidos a la salida eran relativamente bajos. Por ello elegimos el diodo KP-2012SURCK de skyworks. Éste diodo en concreto funcionaría con una tensión de 1.7 V y 2 mA. Justo los valores conseguidos con nuestro rectificador.

Sin embargo, no basta con conseguir esos valores a la salida. Se debe de tener en cuenta en el diseño del esquemático, para que las simulaciones se acerquen de manera más real al comportamiento del dispositivo una vez fabricado. De esta manera el software estará teniendo en cuenta la característica I-V del LED.

Sin embargo, para ello debe añadirse un diodo de la librería de componentes e introducir los parámetros del LED. Todo ello parece un paso sencillo, pero los parámetros no se mostraban en la hoja de especificaciones del mismo, con lo que hubo que modelar la característica I-V del diodo y hacer que fuera lo más fiel posible a la característica I-V del LED en cuestión para luego obtener los parámetros a introducir en AWR.

Nos ha parecido interesante introducir esto en el proyecto para que el lector pueda hacerse una idea de la complejidad que suponía añadir este componente.

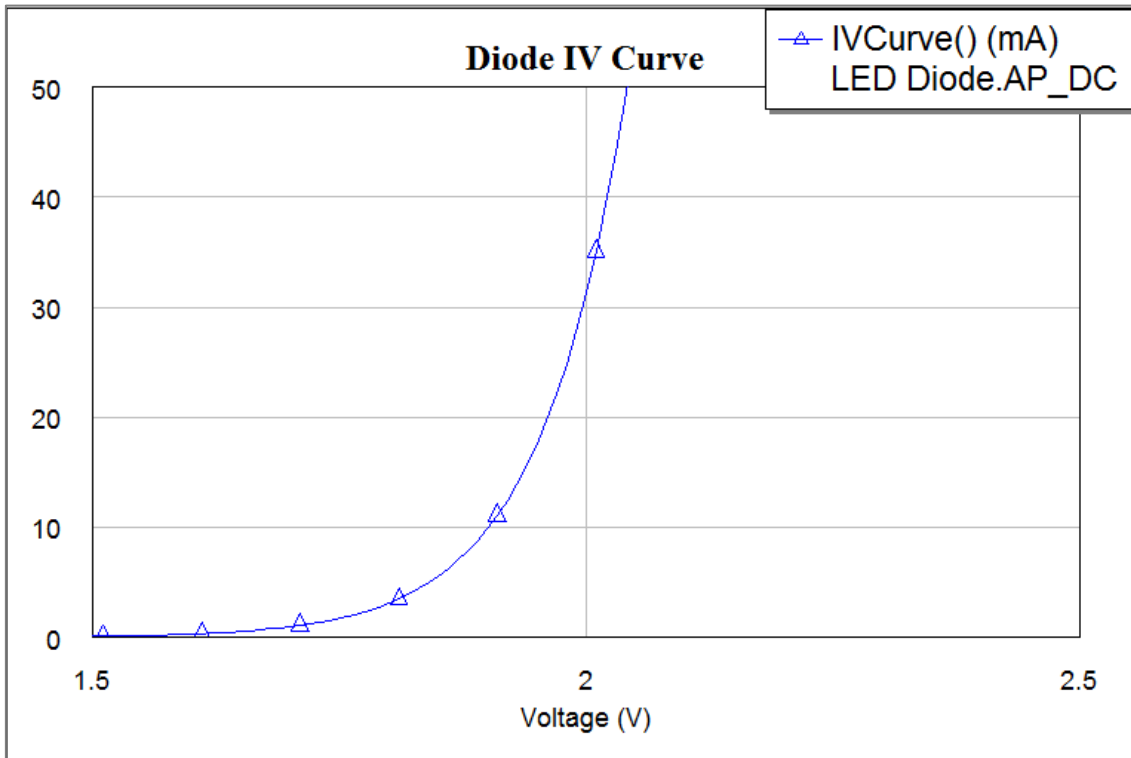


Figura 25: Característica I-V del diodo.

Aquí se muestra la característica I-V del diodo, siendo muy parecida a la del LED añadido.

### 3.7.2 Resultado final

A continuación se muestra el resultado final, el objetivo principal de este proyecto, la señal continua conseguida a la salida del rectificador.

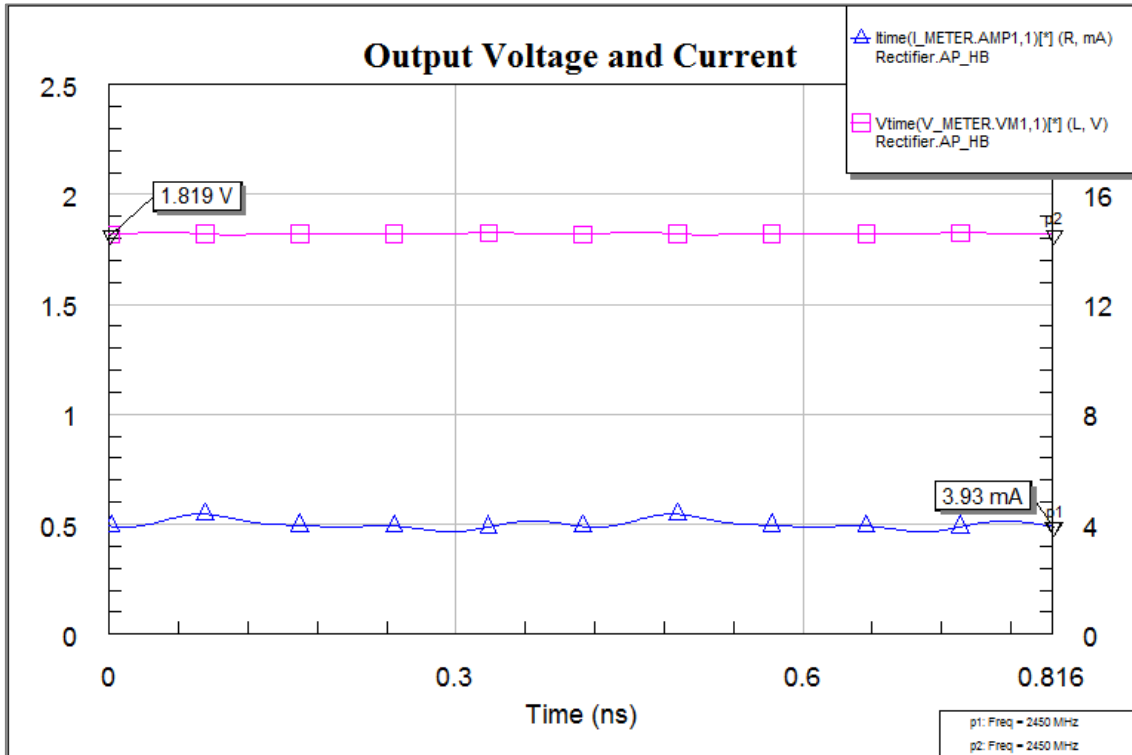


Figura 26: Voltaje y corriente a la salida.

En la gráfica vemos los valores máximos obtenidos. El eje de la izquierda indica los valores de voltaje en voltios, con lo que únicamente concierne a la señal rosa. Mientras que el eje de la derecha indica los valores de corriente en miliamperios, con lo que es el eje en el que nos debemos centrar con respecto a la señal azul. Una vez explicado esto, vemos como se obtienen 1.819 V y 3.93 mA, todo ello suponiendo 20 dBm a la entrada del rectificador.

Este resultado se consigue tras optimizar prácticamente todos los valores de las líneas, exceptuando los valores de las líneas que forman la red de adaptación (anteriormente optimizados en la etapa de adaptación), para conseguir el máximo valor de voltaje y corriente posible.

### 3.8 Layout

Una vez conseguido los resultados buscados, se procede a la fabricación del prototipo. Veamos el layout final del diseño.

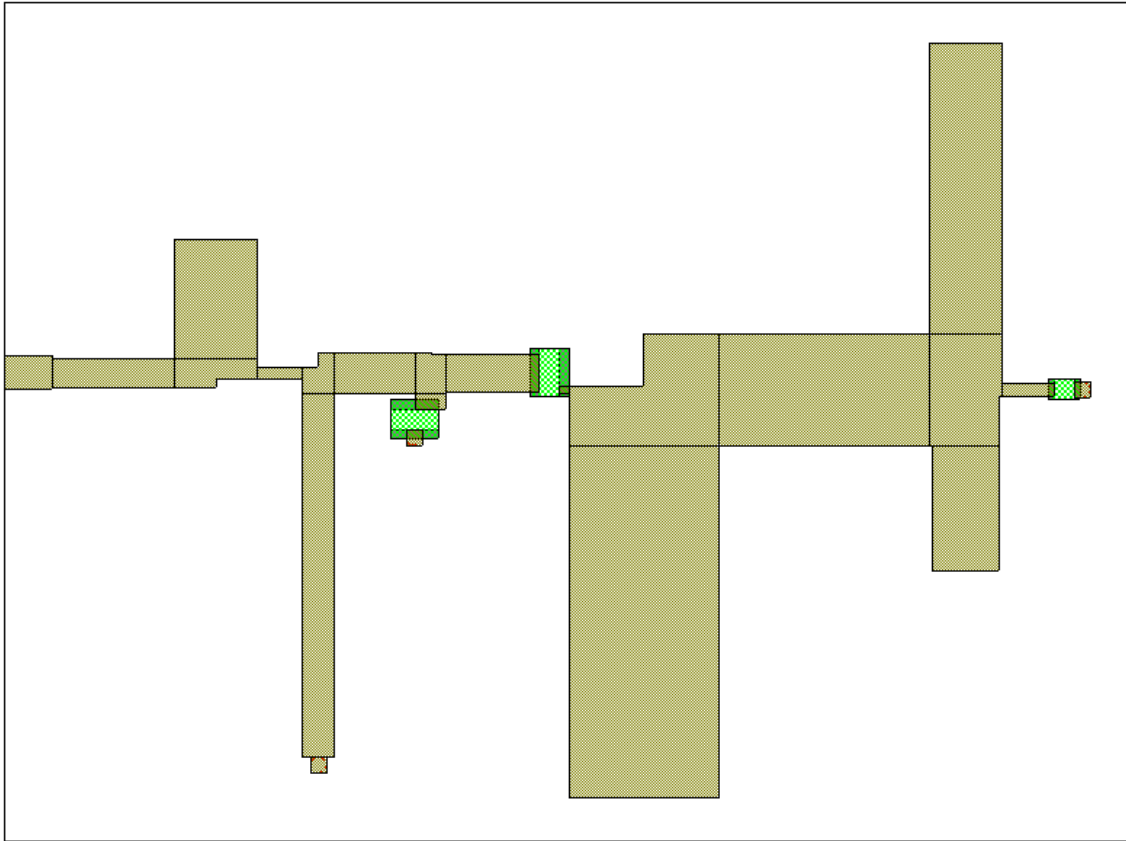


Figura 27: Layout del rectificador.

Microwave Office incluye una opción para poder ver el layout del diseño y obtener una aproximación de cómo quedará nuestro prototipo una vez fabricado.

Esta gráfica no está a escala pero es de vital importancia a la hora de realizar el diseño para prever cómo será el resultado final. Es muy importante comprobar el layout para poder realizar variaciones en el esquemático, si vemos que las dimensiones no son las correctas, o que quizá no estamos considerando los componentes a soldar una vez tengamos el circuito impreso, habrá que modificar el diseño.

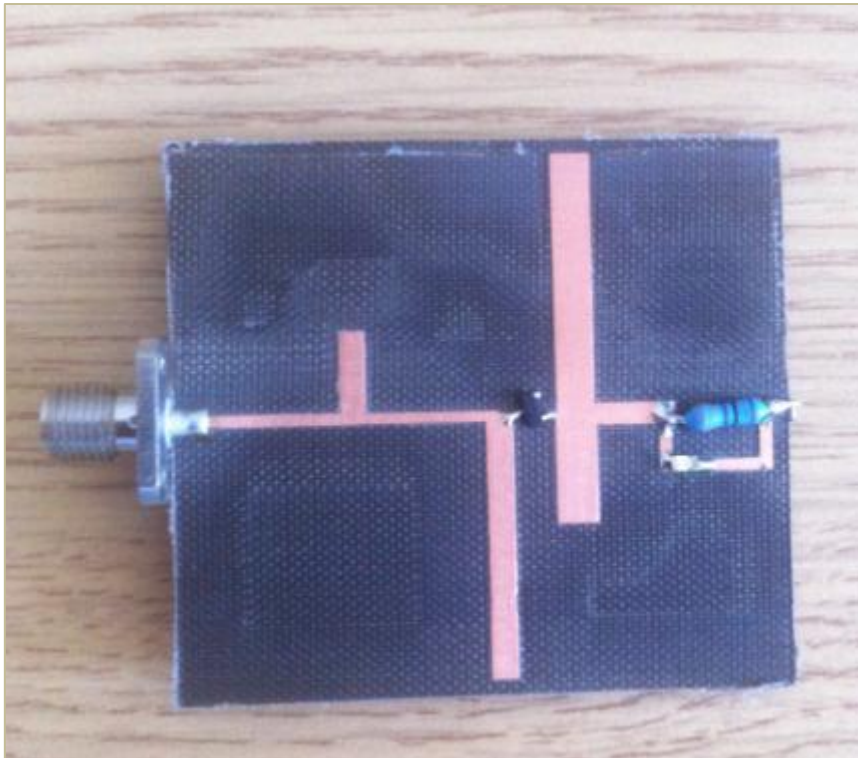
Los pequeños cuadrados verdes indican la conexión de un elemento externo, en este caso, dos diodos schottky en medio, y el LED a la derecha del parche.



## 3.9 Fabricación

### 3.9.1 Primer prototipo

Este es el primer prototipo del rectificador, cabe destacar que no funcionó, pero nos pareció interesante mostrarlo para tener una idea más cerca del proceso de diseño.



**Ilustración 3: Primer prototipo del rectificador.**

Al realizar este primer prototipo pasamos por alto muchos detalles, no solo detalles en la calidad de diseño, fáciles de modificar de cara a un segundo prototipo, sino detalles teóricos, que afectaban al funcionamiento del mismo. No tuvimos en cuenta el LED conectado a la salida, básicamente nos cercioramos de obtener a la salida los valores de tensión y corrientes necesarios para encender el LED, pero no tuvimos en cuenta el componente, su característica I-V, y el resto de parámetros que describen su funcionamiento.

### 3.9.2 Segundo prototipo

A continuación mostraremos una gráfica del segundo prototipo realizado.

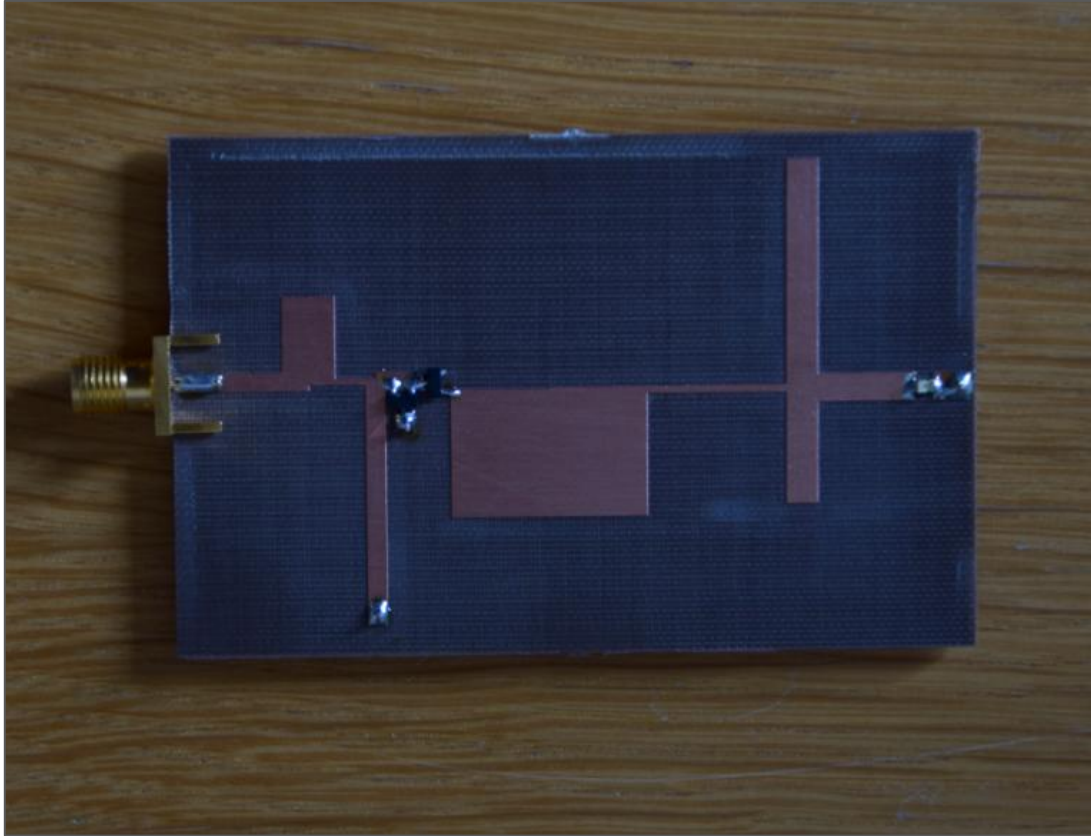


Ilustración 4: Segundo prototipo del rectificador.

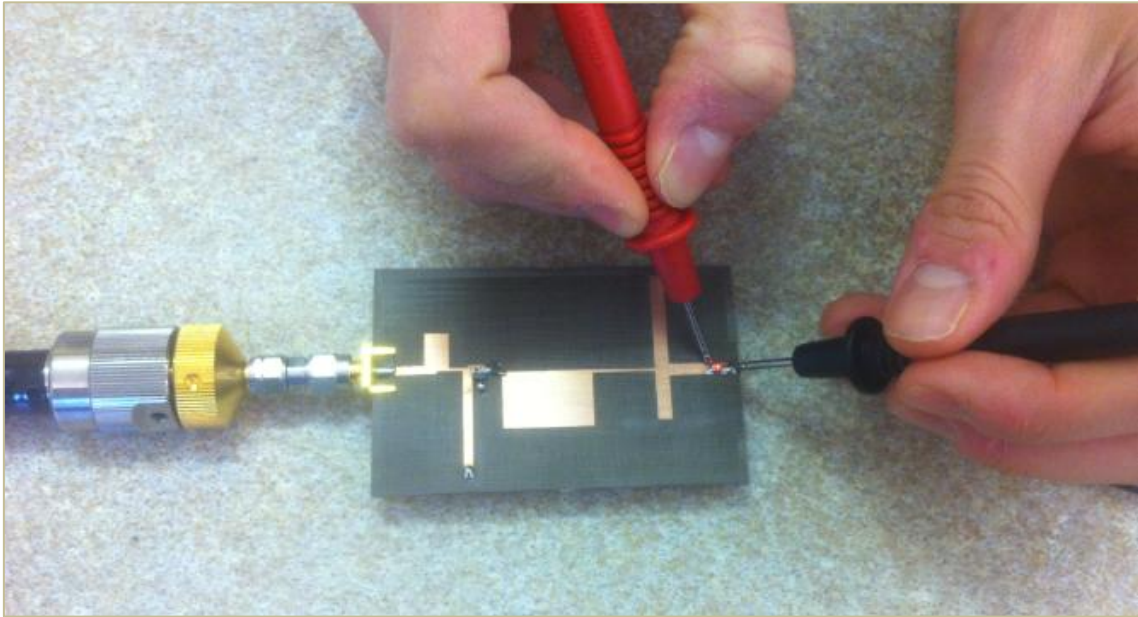
Es fácil darse cuenta de la gran mejora con respecto al primero, este diseño no solo tiene la base teórica necesaria para hacerlo funcionar, si no que fue diseñado físicamente para ser más práctico e integrable.

En este prototipo tuvimos en cuenta el LED conectado a la salida. Fue particularmente difícil tenerlo en cuenta al no adjuntar su hoja de especificaciones su característica I-V. Por ello hubo que jugar con los parámetros hasta que conseguimos una característica I-V muy similar a la mostrada en la hoja de especificaciones. Una vez tuvimos esto en cuenta hicimos que el prototipo fuera una versión más real y eficiente que el primer prototipo realizado.

### 3.10 Testeo en el laboratorio

En esta sección mostraremos los valores obtenidos en el laboratorio testeando el rectificador.

Sabemos que en las simulaciones el valor que le dimos a la entrada fue de 20 dBm, aunque ese valor fue un tanto optimista, no conseguíamos resultados con una potencia menor, por ello fue el primer valor que probamos en el laboratorio.



**Ilustración 5: Midiendo el voltaje a la salida del rectificador.**

Fuimos variando los valores de potencia en el Analizador de espectros para poder ver cuál era el valor umbral en el que empezaba a funcionar nuestro rectificador. Seguidamente se muestra una tabla en la que vemos cómo varía el voltaje a la salida en función de la potencia que le demos a la entrada.

Potencia (dBm)	Voltaje (V)	Potencia (dBm)	Voltaje (V)
-5	0.258	8	1.194
-4	0.291	9	1.338
-3	0.328	10	1.495
-2	0.369	<b>11</b>	<b>1.621</b>
-1	0.415	12	1.681
0	0.467	13	1.716
1	0.525	14	1.745
2	0.591	15	1.772
3	0.665	16	1.798
4	0.749	7	1.726
5	0.843	18	1.851
6	0.947	19	1.873
7	1.064	20	1.874

**Tabla: Tensión a la salida del rectificador.**

Vemos como está en color rojo la casilla donde la potencia es igual a 11dBm, el motivo es que justo ese es el valor en el que nuestro LED empieza a encenderse, si bien su luz no es muy intensa, éste es el valor umbral en el que nuestro rectificador prueba su funcionamiento.

A continuación veremos varias imágenes donde vemos cómo va variando la intensidad del LED, el ir introduciendo cada vez más potencia.

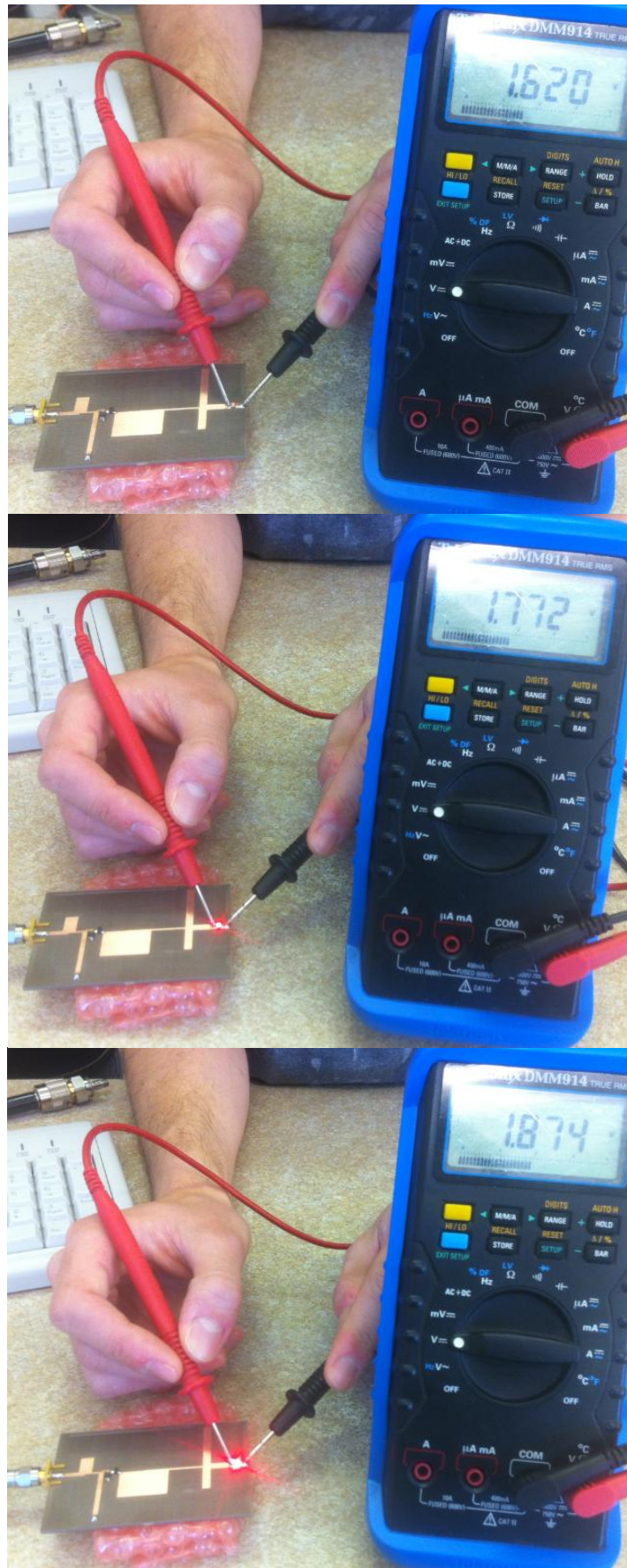


Ilustración 6: Medida de tensión en función de la potencia.

## 4. Antena rectificadora

En este capítulo mostraremos imágenes del dispositivo completo en las que se muestra su funcionamiento.

### 4.1 Estructura total del dispositivo

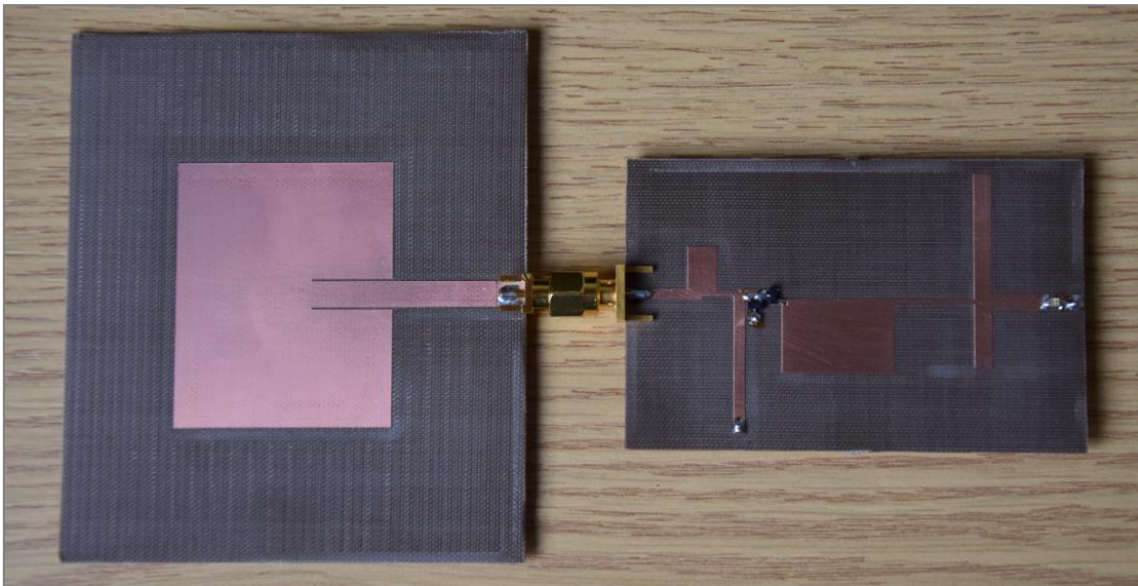
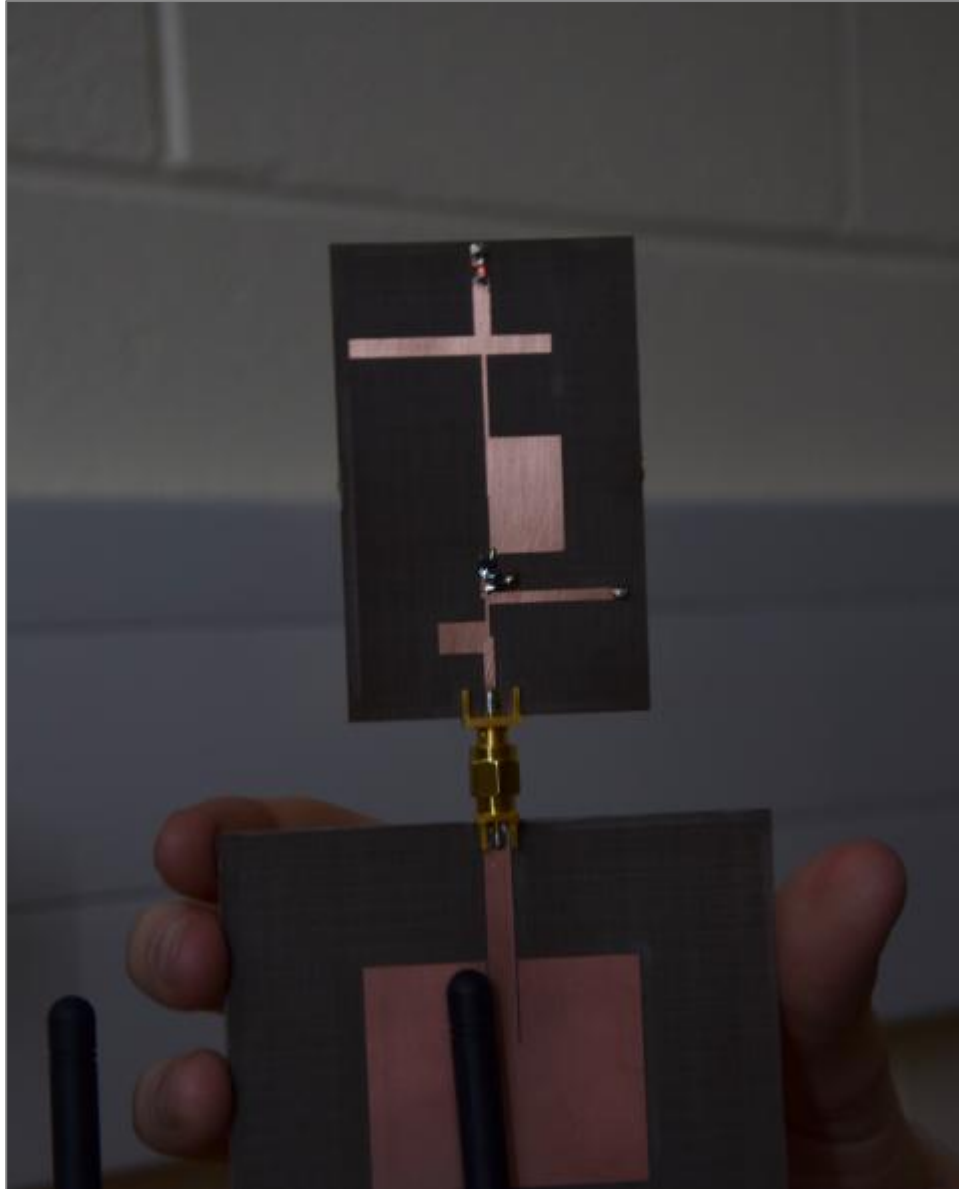


Ilustración 7: Antena rectificadora.

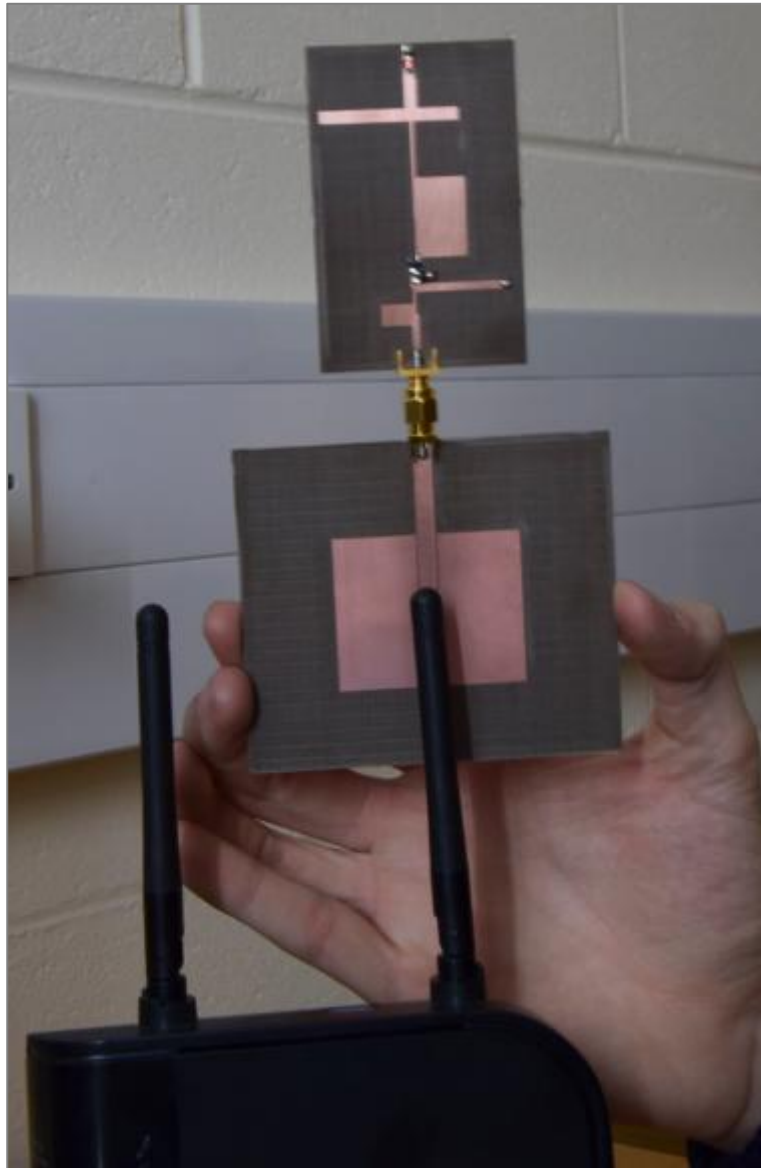
Aquí se muestra una imagen del dispositivo completo, vemos cómo está conectado por dos conectores SMA. En este caso se eligió que el rectificador llevara el conector hembra para que fuera más fácil el testeado del mismo a la hora de conectarlo al analizador de espectros. El conector por supuesto aporta ciertas pérdidas de potencias, y al estar hechos ambos en el mismo sustrato podrían haberse evitado haciéndolo todo en el mismo, sin embargo, como primer prototipo pensamos que debíamos probar cada uno por separado para que en caso de no funcionar pudiéramos focalizar el error.

## 4.2 Testeo con router wifi

En esta sección podemos ver la imagen que prueba el funcionamiento de nuestro dispositivo.



**Ilustración 8: Antena rectificadora probando su funcionamiento (I).**



**Ilustración 9: Antena rectificadora probando su funcionamiento (II).**

Se probó el funcionamiento usando un router wifi cualquiera, de hecho, en la imagen anterior podemos ver las antenas del mismo, dos dipolos. Se puede observar el LED encendido, el parte superior de la imagen. Por supuesto la potencia que necesita el rectificador a su entrada es muy alta, y sólo en determinados momentos el LED alcanzaba su luminosidad máxima, debido a los picos de luz procedentes de la señal wifi. El resto del tiempo se iluminaba de la misma manera mostrada en la imagen.



Como antes hemos visto en la tabla de valores de voltaje con respecto a la potencia, con 11dBm el LED entraba en funcionamiento y empezaba a iluminar, algo que facilitó en gran manera poder ver el funcionamiento del dispositivo.

#### 4.2.1 Orientación de la antena

En esta sección hablaremos de la relevancia de la orientación del dispositivo con respecto al router.

Al utilizar una antena de parche rectangular, la radiación de la antena, como explicamos en el capítulo 3/sección x, está centralizada en el parche de manera que el dispositivo debe situarse justamente como muestra la imagen x. También es importante tener en cuenta el diagrama de radiación del router utilizado, lo que puede ser un poco complicado si no se sabe el tipo de antena que lo conforma. En nuestro caso el router mostrado en la figura posee dos dipolos, cuyo patrón de radiación es el siguiente:

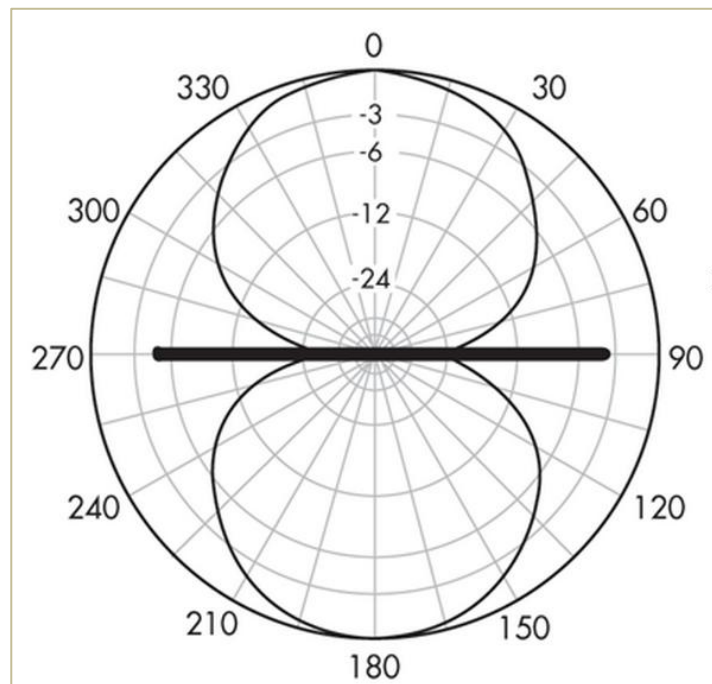


Figura 28: Diagrama de radiación horizontal de un dipolo de media onda.

En la imagen anterior se muestra el diagrama de radiación horizontal (Campo E) de un dipolo de media onda. Sin introducirnos mucho en las características de esta antena, vemos como teniendo en cuenta el diagrama de radiación de nuestra antena y en

concordancia con su diagrama de radiación, la mejor manera para colocar el dispositivo es la mostrada en la imagen 9.

### 4.3 Limitaciones

Desafortunadamente las limitaciones que tiene nuestro dispositivo al ser el primer prototipo son varias y todas ellas a tener en cuenta para los futuros modelos:

- No se consigue funcionamiento a una distancia de más de 3 cm.
- Aunque no se pudo medir la corriente a la salida del rectificador, pudimos estimar la eficiencia de manera aproximada, siendo ésta menor del 10%.
- Funciona únicamente orientado correctamente.
- Debe de conocerse el tipo de antena utilizada en el router wifi para aplicar la orientación correcta.
- En Europa la potencia de un router wifi no supera los 20dBm, algo a tener en cuenta en nuestro dispositivo dado que antes de fabricarlo y testarlo, era el mínimo valor de potencia que nos aseguraba los valores necesarios para el funcionamiento del LED.
- Las dimensiones del dispositivo hacen que no sea fácilmente integrable para aplicaciones de pequeño tamaño.
- El tipo de antena utilizado no tiene el diagrama de radiación más adecuado. Es importante que la antena sea capaz de recibir la mayor parte de señal, en nuestro caso, la antena sólo recibía por el parche, lo que hace que no llegue toda la potencia de señal necesaria al rectificador.
- Las limitaciones experimentadas en el laboratorio no nos permitieron hacer todas las medidas necesarias para establecer todas las mejoras pertinentes.

## **5. Conclusión y líneas futuras**

### **5.1 Conclusión**

En este proyecto se ha diseñado, fabricado y testeado una antena rectificadora, (rectenna). Formada por una antena y un rectificador.

Respecto a la antena, se ha utilizado una antena microstrip rectangular. Hemos visto paso a paso el diseño, simulación y fabricación de la misma. Los resultados son, que aunque se ha demostrado su eficacia, quizá otro tipo de antena habría sido más adecuado. Sus limitaciones son su diagrama de radiación, dificultando que llegue toda la potencia necesaria al rectificador, su poco ancho de banda y poca pureza de polarización. Por otra parte el hecho de ser una antena de parche hará que sea muy fácil de integrar con otros dispositivos.

Respecto al rectificador, se concluye que tienen gran importancia la etapa de filtrado de armónico y la de filtrado. Aunque se ha conseguido el objetivo se propone seguir el estudio en busca de un prototipo que aporte mayor eficiencia, ya que en nuestro prototipo la eficiencia conseguida continúa siendo muy baja.

### **5.2 Líneas futuras**

Se propone seguir la investigación con objetivo de crear un prototipo más eficiente. Esto se podría conseguir eliminando las pérdidas de inserción de los conectores al integrar la unión antena-rectificador en la misma placa, y mejorando ambos dispositivos por separado. Por parte de la antena se propone crear una antena más directiva y de mayor ganancia, con lo que se probaría con distintas estructuras, una antena de parche circular o un dipolo o monopolo.

Respecto al rectificador toda mejora queda orientada a la eficiencia, probando con sustratos que optimicen el diseño, o quizá ajustando más el filtrado.

## 6. Referencias

- *"Microwave Engineering"*. **David M. Pozar**.
- *"Design of a rectifier for 2.45 GHz wireless power transmission"*. **Defu Wang y Renato Negra**.
- *"Transmisión por Soporte Físico; Ejercicios resueltos de circuitos pasivos y activos de microondas"*, Universidad Politécnica de Cartagena, Editorial MORPI, S.L., 1ª Edic. Marzo 2006 (ISBN: 84-95781-70-0). **J.L. Gómez Tornero y A. Álvarez Melcón**.
- *"Antenna Theory"*. **Constantine A. Balanis**.
- *"Modern Antenna Design"*. **Thomas A. Milligan**.
- *"Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques"*. **Vendelin, Pavo y Rohde**.
- *"Ejercicios de Subsistemas de Microondas"*, Universidad Politécnica de Cartagena, Editorial MORPI, S.L., 1ª Edic. Enero 2013 (ISBN: 978-84-96997-97-4). **J.L. Gómez Tornero**.

## 6.1 Anexo I

<sup>[1]</sup>Harmonic Balance: Es un método que aplica una robusta técnica para el análisis de ciertos no lineales de alta frecuencia, tales como amplificadores, multiplicadores, etc. El método se desarrolló alrededor de 1990, para conocer de manera más detallada cómo funciona visite

[https://awrcorp.com/download/faq/english/docs/Simulation/hb\\_analysis.html](https://awrcorp.com/download/faq/english/docs/Simulation/hb_analysis.html).

<sup>[2]</sup>Diodo Schottky: Llamado así en honor del físico alemán Walter H. Schottky, es un dispositivo semiconductor que proporciona conmutaciones muy rápidas entre los estados de conducción directa e inversa, y muy bajas tensiones umbral. Se dice que es un dispositivo semiconductor "*portador mayoritario*". Esto significa que, si el cuerpo semiconductor está dopado con impurezas tipo N, solamente los portadores tipo N (electrones móviles) desempeñarán un papel significativo en la operación del diodo y no se realizará la recombinación aleatoria y lenta de portadores tipo N y P que tiene lugar en los diodos rectificadores normales, con lo que la operación del dispositivo será mucho más rápida.

## 6.2 Anexo II

### - Código Matlab

```
function [patchDim, feedlineDim, insetDim, subsDim, portDim, patchPos,
feedlinePos, insetPos, subsPos, portPos] = insetFeedLinePatchAntenna( Z0, Er,
H, gndThickness, fr, flag_y0, flag_pos, flag_conn )
% 'insetFeedLinePatchAntenna' calcula las dimensiones físicas de una
% antena de parche con insets, además de la posición de los puntos clave
para
% recolocarla en el software HFSS.
% IMPORTANTE: todas las dimensiones y posiciones vienen dadas en mm.
% Hay que tener en cuenta que la antena está orientada de la siguiente
% manera:
% - La longitud del parche a lo largo del eje Y.
% - La anchura del parche a lo largo del eje X.
% - El puerto en  $y = 2*L$ .
%
% insetFeedLinePatchAntenna( Z0, Er, H, gndThickness, fr, flag_y0,
flag_pos )
%
% - Z0: impedancia que debe tener la entrada de la antena.
% - Er: permitividad relativa del dieléctrico del sustrato.
% - H: espesor del sustrato (en mm).
% - gndThickness: espesor del cobre (en micrometros). En algunos
% datasheets viene como 'Untreated copper side', siempre y cuando ambas
% caras tengan distintos espesores.
% - fr: frecuencia de resonancia de la antena.
% - flag_y0: para elegir uno de los dos posibles valores de y0.
%   * 1, para usar el valor y0_minus.
%   * 0, para usar el valor y0_plus.
% - flag_pos: para elegir una de las dos posibles orientaciones de la
% antena.
%   * 1, para colocar la antena centrada en el origen de coordenadas.
%   * 0, para colocar la antena 'encajada' en el plano XY.
% - flag_conn: para tener o no en cuenta la soldadura de 4mm de un
% conector SMA.
%   * 1, para tenerlo en cuenta.
%   * 0, no se tiene en cuenta.

% patchDim | subsDim
W = 1e3*(3e8/(2*fr))*(sqrt(2/(Er+1)));

Ereff = (Er+1)/2+((Er-1)/2)*(1+(12*(H/W)))^(-0.5);
Al_h = H*(0.412*((Ereff+0.3)*((W/H)+0.264))/((Ereff-
0.258)*((W/H)+0.8)));
L = 1e3*((3e8/(2*fr*sqrt(Ereff)))-2*Al_h);

patchDim = [W L];

% W0
A = (Z0/60)*sqrt((Er+1)/2+((Er-1)/(Er+1))*(0.23+0.11/Er));
if A >= 1.52
    W0 = H*(8*exp(A))/(exp(2*A)-2);
else
    B = (60*pi^2)/(Z0*sqrt(Er));
```

```

W0 = H*(2/pi)*(B-1-log(2*B-1)+((Er-1)/(2*Er))*(log(B-1)+0.39-
0.11/Er));
end

% y0
% G1
k0 = 2*pi*2.45e9/3e8;
I1 = integral(@(x) (sin(0.5*k0*(1e-
3*W)*cos(x))/cos(x)).^2*(sin(x)).^3,0,pi);
G1 = I1/(120*pi^2);

% G12
int = @(x) (sin(0.5*k0*(1e-3*W)*cos(x))/cos(x)).^2*besselj(0,k0*(1e-
3*L)*sin(x)).*(sin(x)).^3;
G12 = (1/(120*pi^2))*integral(int,0,pi);
% y0
if(flag_y0 == 0) % y0_plus
y0 = (L/pi)*acos(sqrt(2*Z0*(G1+G12)));
elseif(flag_y0 == 1) % y0_minus
y0 = (L/pi)*acos(sqrt(2*Z0*(G1-G12)));
else
error('Input flag_y0 incorrect. Only values 0 or 1 are valid.');
```

```

end

% insetDim
nW = (3e11*4.65e-12)/(sqrt(2*Erefff)*fr*1e-9);
insetDim = [W0+2*nW y0];

% Dimensiones del puerto
portW = 6*W0;
portH = 5*H+(1e-3*gndThickness);
portDim = [portW portH];

% Cálculo de posiciones
if(flag_pos == 0) % Posicionada desde el origen
subsPos = [0 0 0];
patchPos = [W/2 L/2 H];
insetPos = [W-W0/2-nW 1.5*L-y0 H];
feedlinePos = [W-W0/2 1.5*L-y0 H];
portPos = [W-portW/2 2*L H-portH/2];
elseif(flag_pos == 1) % Centrada
subsPos = [-W -L 0];
patchPos = [-W/2 -L/2 H];
insetPos = [-W0/2-nW L/2-y0 H];
feedlinePos = [-W0/2 L/2-y0 H];
portPos = [-portW/2 L H-portH/2];
else
error('Input flag_pos incorrect. Only values 0 or 1 are valid.');
```

```

end

% Conector
if(flag_conn == 1) % Con conector
subsDim = [2*W 2*L+4 H];
feedlineDim = [W0 y0+L/2+4];
portPos(1,2) = portPos(1,2)+4;
elseif(flag_conn == 0) % Sin conector
subsDim = [2*W 2*L H];
feedlineDim = [W0 y0+L/2];
else
error('Input flag_conn incorrect. Only values 0 or 1 are valid.');
```

```

end
end
end

```

Tabla 4: Cálculo de las dimensiones de la antena.

```

function [ w ] = anchuraMicrostrip( Z0, Er, H )
% Introducimos la impedancia de la línea, la permitividad relativa y
% el espesor de la línea microstrip. El valor devuelto será la anchura.
A = (Z0/60)*sqrt((Er+1)/2)+((Er-1)/(Er+1))*(0.23+0.11/Er);
if A >= 1.52
    w = H*(8*exp(A))/(exp(2*A)-2);
else
    B = (60*pi^2)/(Z0*sqrt(Er));
    w = H*(2/pi)*(B-1-log(2*B-1)+((Er-1)/(2*Er))*(log(B-1)+0.39-0.11/Er));
end
end

```

Tabla 5: Calculo de la anchura de la línea microstrip.

### 6.3 Índice de figuras

Figura 1: Espectro electromagnético. ....	6
Figura 2: Canales Wi-Fi a 2.45 GHz. ....	12
Figura 3: Estructura microstrip. ....	19
Figura 4: Tipos de antena parche. ....	20
Figura 5: Dimensiones de la antena. ....	26
Figura 6: Antena de parche rectangular. ....	30
Figura 7: Antena $S_{11}$ . ....	31
Figura 8: Diagrama de radiación en 3D. ....	32
Figura 9: Diagrama de radiación horizontal (plano E). ....	33
Figura 10: Ganancia. ....	34
Figura 11: Directividad. ....	35
Figura 12: Eficiencia. ....	36
Figura 13: Axial Ratio. ....	37
Figura 14: Comparación. ....	40
Figura 15: Esquema del rectificador. ....	41
Figura 16: Efecto producido por el rectificador de media onda a la señal. ....	42
Figura 17: Efecto producido por el rectificador de onda completa a la señal. ....	43
Figura 18: Esquemático de la red de adaptación. ....	44
Figura 19: Esquemático de la red de adaptación. ....	45
Figura 20: Parámetros S de la red de adaptación. ....	45



Figura 21: Amplificado de voltaje.....	47
Figura 22: Esquemático una vez añadido la etapa rectificadora. ....	47
Figura 23: Salida del diodo. ....	48
Figura 24: Esquemático del diseño una vez añadido el filtro.....	50
Figura 25: Característica I-V del diodo. ....	54
Figura 26: Voltaje y corriente a la salida. ....	55
Figura 27: Layout del rectificador. ....	56
Figura 28: Diagrama de radiación horizontal de un dipolo de media onda.....	65

Tabla 1: Frecuencias Wi-Fi.....	10
Tabla 2: Parámetros de los distintos protocolos Wi-Fi. ....	11
Tabla 3: Dependencia del sustrato.....	26
Tabla 4: Cálculo de las dimensiones de la antena.....	71
Tabla 5: Calculo de la anchura de la línea microstrip.....	72

Ilustración 1: Primer prototipo de la antena.....	38
Ilustración 2: Testeando la antena.....	39
Ilustración 3: Primer prototipo del rectificador. ....	57
Ilustración 4: Segundo prototipo del rectificador. ....	58
Ilustración 5: Midiendo el voltaje a la salida del rectificador. ....	59
Ilustración 6: Medida de tensión en función de la potencia.....	61
Ilustración 7: Antena rectificadora.....	62
Ilustración 8: Antena rectificadora probando su funcionamiento (I). ....	63
Ilustración 9: Antena rectificadora probando su funcionamiento (II). ....	64

