

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Diseño de antenas compactas para aplicaciones de Energy Harvesting”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/A:

José Mezquita Fayos.

Tutor/a:

Eva Antonino Daviu

Marta Cabedo Fabrés

GANDIA, 2015

Resumen

Mi proyecto final de grado ha consistido en estudiar la teoría, diseñar, construir y medir una Rectenna para aplicaciones de Energy Harvesting. Para ello previamente hemos estudiado la teoría del diseño de las antenas y rectificadores, para diseñarlos adaptándolos a nuestras necesidades y simularlos con su correspondiente software informático para ver que la parte teórica y los resultados obtenidos de la simulación cumplen con nuestro objetivo marcado. Finalmente implementaremos conjuntamente estos circuitos (antena y rectificador) para obtener los prototipos que construiremos. Estos prototipos serán construidos y montados con los materiales adecuados y finalmente probados y medidos con los correspondientes aparatos de medida. Por último compararemos los resultados obtenidos de la simulación con los resultados obtenidos de las medidas reales de nuestro prototipo realizando un estudio detallado.

Palabras clave

Rectenna. Antena. Rectificador. Diseño. Captación de energía

Summary

My final Degree project has focused on studying the theory, the design, the implementation and the measurement of a Rectenna. Firstly, we have studied the theory of planar antenna design and rectifiers, in order to design them adapted to our needs and then we have simulated them with the corresponding software to meet our objectives. Finally we have jointly implemented these circuits (antenna and rectifier) in the prototypes we built. These prototypes have been fabricated with the appropriate materials and finally tested and measured with the corresponding devices. Finally we have compared the results of the simulations with the measurements of our prototype, to validate the results.

Keywords

Rectenna, Antenna, Rectifier Design, Energy harvesting

INDICE

1.INTRODUCCION	4
2.DISEÑO DE LA ANTENA A 2,4GHz.....	7
2.1 ANTENA MONOPOLO	7
2.1.1 Simulación de la antena monopolo	8
2.1.2 Resultados obtenidos de la simulación.....	11
2.1.3 Estudio paramétrico de la antena monopolo.....	14
2.1.4 Adaptación de la antena para la fabricación	16
2.2.ANTENA PARCHE RECTANGULAR	18
2.2.1.Simulación de la antena parche	20
2.2.2. Resultados obtenidos de la simulación	22
2.2.3 Estudio paramétrico de la antena parche	24
3 DISEÑO DEL CIRCUITO RECTIFICADOR	27
3.1.Rectificador de onda completa	27
3.1.1 Simulaciones.....	30
3.2 Rectificador de 4 diodos.....	33
3.2.1 Simulaciones.....	35
3.3 Elección	37
4 FABRICACIÓN Y MEDIDA DEL CONJUNTO	38
4.1 Elección de los componentes.....	38
4.2 Diseño del adaptador de $\lambda/4$ para las antenas diseñadas	39
4.3 Fabricación y medida de las antenas.....	41
4.4 Medidas de Energy Harvesting	44
5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	47
5.1 Agradecimientos.....	47
6 BIBLIOGRAFÍA	48

1. INTRODUCCION

Hoy en día todo el mundo tiene acceso a Internet y es cada vez mayor el uso de redes inalámbricas o redes Wi-Fi en nuestro entorno. Dichas redes radian una energía electromagnética lo suficientemente alta para dar servicio a su propósito y a la vez lo suficientemente baja para no resultar dañina para las personas. En conclusión hay energía en las redes Wi-Fi y de otros sistemas inalámbricos que podría ser aprovechada para otros fines.

Antes de introducirnos en el proyecto sería conveniente saber qué significa *Energy Harvesting*, que directamente de su traducción del inglés es Captación de Energía.

Nuestro proyecto se basará en el diseño de un sistema captador de energía formado por el conjunto de una antena de reducido tamaño y un rectificador para la banda de los 2,4 GHz. Se diseñarán dos tipos de antena diferentes utilizando software especializado, para evaluar las prestaciones de cada una. Al conjunto formado por una antena conectada a un rectificador, el cual convierte la tensión alterna en continua, se le llama Rectena [1]-[3]. El esquema general de una Rectena se muestra en la Fig. 1.1.

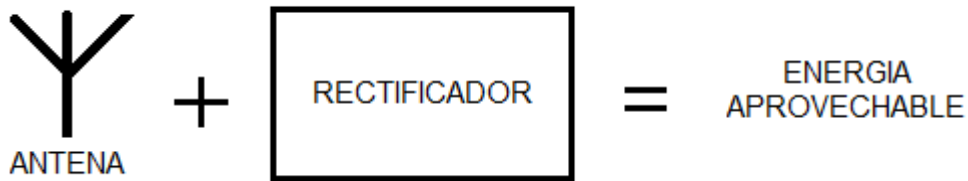


Figura 1.1. Esquema general de una rectena.

Esta energía captada puede ser acumulada por ejemplo en baterías especiales y pueden servir para alimentar dispositivos electrónicos de baja potencia como por ejemplo sensores de movimiento, detectores de humo o el timbre para llamar a una casa, como se muestra en la Fig. 1.2.

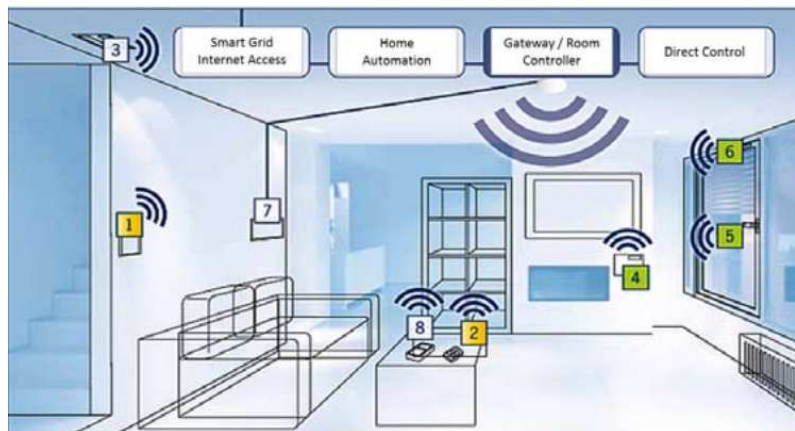


Figura 1.2. Ejemplo de sistema inalámbrico de Energy Harvesting en una casa inteligente [4].

Para el diseño de las antenas utilizaremos el software comercial de simulación electromagnética CST (*Computer Simulation Technology*) [5] y concretamente el paquete MicroWave Studio, mientras que para el diseño del rectificador emplearemos el programa de simulación de circuitos Microwave Office 2010 [6].

Dichas rectenas serán fabricadas con tecnología microstrip, construyéndose con la maquinaria necesaria y completándose con la inserción de los componentes electrónicos que complementarán el circuito rectificador.

Finalmente serán expuestas a campo abierto para que con la ayuda de los instrumentos de medida necesarios podamos medir cuanta energía podemos recibir.

La metodología seguida para realizar todo lo citado anteriormente se ha basado inicialmente en llevar a cabo un estudio teórico detallado de los tipos de antena monopolo y parche rectangular, estudiando cuales serían sus dimensiones ideales para una determinada frecuencia de trabajo y que tipo de alimentación sería la ideal entre muchos otros parámetros de interés.

Todo esto ha sido aplicado y simulado con el software informático CST citado anteriormente para, después de muchas pruebas y simulaciones, viendo parámetros tan importantes como el coeficiente de reflexión o el diagrama de radiación, saber elegir las dimensiones finales de que constarán nuestras antenas.

Para la parte de rectificación se han estudiado detalladamente dos de los circuitos rectificadores más comunes que existen hoy en día, el rectificador de onda completa con transformador y el rectificador de 2 etapas o comúnmente llamado de 4 diodos. Se ha profundizado en el estudio de la tensión de salida de dichos circuitos rectificadores en función de su entrada, así como en entender cuál es su funcionamiento y que efectos tienen cada uno de los componentes que lo integran.

Para verificar el comportamiento de dichos rectificadores y estudiarlos más a fondo se ha utilizado el software informático Microwave Office citado anteriormente. Como no sabemos cómo actuarán dichos rectificadores hasta que la antena no esté fabricada y montada para entregarnos potencia, se ha optado por insertar diferentes niveles de potencia de entrada que sean razonables para ver cómo reaccionan los diferentes rectificadores en función de su entrada.

Una vez diseñadas las antenas y los rectificadores se ha procedido a diseñar un pequeño circuito adaptador de impedancias de $\lambda/4$, para adaptar el grosor de las líneas del circuito rectificador, que viene fijado por las dimensiones de los diodos y condensadores que lo conforman (para ello hemos consultado previamente los catálogos correspondientes de los fabricantes), y a la línea de impedancia característica 50Ω que sale de la antena.

A continuación se han implementado en los diseños finales que se construirán sobre tecnología microstrip las dos antenas diseñadas conjuntamente con el rectificador elegido y el adaptador de $\lambda/4$. Así pues tendremos dos diseños: el primero formado por nuestra antena monopolo con el adaptador de $\lambda/4$ más el rectificador elegido, y el segundo formado por nuestra antena parche rectangular con el adaptador de $\lambda/4$ más el rectificador elegido.

Para el proceso de fabricación se han fresado sobre un sustrato microstrip los diseños finales de nuestras dos rectenas con las dimensiones simuladas anteriormente y a continuación se han insertado y soldado los componentes que forman el rectificador para dar por concluido dicho montaje.

Finalmente se han realizado varias medidas de nuestro montaje con los aparatos de medida pertinentes, comparándolos con los valores teóricos y simulados y realizando un informe detallado que se encuentra en esta memoria.

Entre los problemas encontrados durante todo el trabajo, cabría mencionar las dificultades asociadas a la fabricación de las antenas, que hizo necesario, por ejemplo, la modificación del tipo de alimentación a emplear en la antena monopolo para hacer posible la interconexión al circuito rectificador (tal y como se comenta en la memoria). Asimismo, también tuvimos un serio problema debido a que los diodos elegidos para el diseño del rectificador resultaron ser muy sensibles a la corriente estática, lo que llevó a tener que repetir la fabricación de las rectenas protegiendo adecuadamente los diodos para hacer posible la medida, ya que las primeras rectenas dejaron de funcionar al poco tiempo de fabricarlas. Por último, ha habido que probar varias configuraciones de medida para valorar cuál era el montaje más óptimo para las medidas que queríamos realizar. Para esto ha sido de gran valor la ayuda aportada por los técnicos del laboratorio del Grupo de Radiación Electromagnética del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) de la Universidad Politécnica de Valencia.

2. DISEÑO DE LA ANTENA a 2,4 GHz

2.1 ANTENA MONOPOLO

Una antena tipo dipolo es un tipo de antena muy básica formada por un dipolo en posición horizontal y un plano de masa separado a escasos milímetros de dicho dipolo. El plano de masa se puede situar perpendicular al dipolo o coplanar al mismo (en el mismo plano que el dipolo). El monopolo puede ser de hilo o presentar un perfil plano, si se realiza con tecnología impresa. En este trabajo se diseñará un monopolo coplanar en tecnología impresa. En todos los casos, el diagrama de radiación de la antena es omnidireccional, es decir radia en todas las direcciones del plano perpendicular al eje del monopolo por igual.

Algunas de las ventajas que este tipo de antenas pueden ofrecer son la posibilidad de miniaturización, la facilidad de integrarse tanto en superficies planas como no planas, la sencillez, la facilidad de producción en masa (por lo que los costes pueden ser muy reducidos), la posibilidad de adaptarse con circuitos integrados de microondas y la versatilidad en términos de impedancia, polarización y frecuencia de resonancia.

Entre las principales desventajas se pueden nombrar: baja potencia de radiación (por su estructura, no pueden soportar altas potencias en los componentes de una antena impresa), baja eficiencia, ancho de banda reducido, pérdidas importantes y son fácilmente afectadas por el factor térmico (sobre todo si se trabaja sobre substratos flexibles) [7].

La Fig. 2.1 muestra la geometría de la antena de tipo monopolo a diseñar. Para una primera aproximación del diseño de nuestra antena, las longitudes tanto del monopolo como del plano de masa se pueden apreciar en la figura.

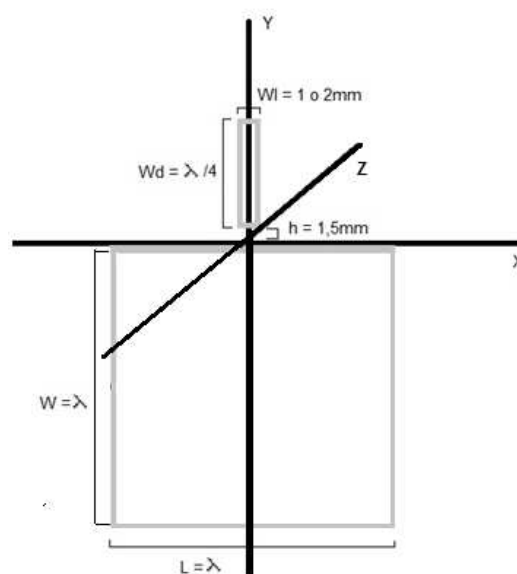


Figura 2.1. Antena de tipo monopolo plano coplanar con sus dimensiones.

Como se observa, los parámetros Wd y Wl son las dimensiones de nuestro dipolo, h es la separación con el plano de masa, y W y L son las dimensiones de nuestro plano de masa. En el eje Z se representará el grosor de los materiales a utilizar, comúnmente unos 0,002 mm (grosor del metal a emplear).

Nuestra antena en concreto trabajará en la frecuencia de los 2,4 GHz y para ello es muy importante saber cuál es nuestra longitud de onda λ a esa frecuencia, ya que ambas están inversamente relacionadas, es decir si aumenta λ disminuye nuestra frecuencia y viceversa, si disminuye nuestra λ aumenta nuestra frecuencia.

Así pues utilizando la fórmula que las relaciona obtenemos para una frecuencia de 2,4 GHz:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{2,4 * 10^9} = 125 \text{ mm}$$

siendo c la velocidad de la luz en el vacío.

2.1.1 Simulación de la antena monopolo

Ejecutamos el programa informático CST Microwave Studio en el cual diseñaremos nuestra antena. Nada más abrirse dicho programa seleccionamos en *Create New Project* alguna de las antenas que nos ofrecen (cualquiera sirve).

Lo primero de todo será crear nuestra antena formada por un dipolo y un plano de masa. Para crear nuestro monopolo, desde el menú de opciones en *Objects>Basic shapes>Brick*, se nos abrirá un menú en el cual podremos insertar nuestras coordenadas X Y Z , las cuales definirán las dimensiones de nuestro monopolo. También podemos definir variables, lo cual nos permitirá trabajar de una manera más cómoda, como se muestra en la Fig. 2.2.

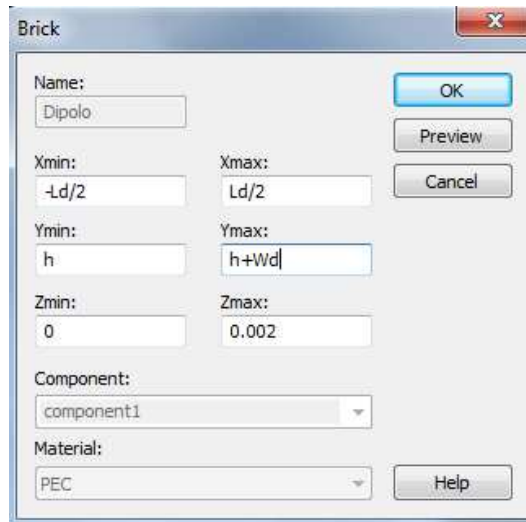


Figura 2.2. Creación del monopolo con CST.

Así pues, basándonos en lo mencionado anteriormente, hemos definido 3 variables que son:

- Wd : La longitud del monopolo, que será aproximadamente $\lambda/4 = 31,25\text{mm}$.
- h : Separación entre el monopolo y el plano de masa. Aproximadamente 1,5 mm.
- W : La anchura del dipolo, que será de 1 a 2 mm.

El plano Z representa el grosor de nuestros componentes. Suele ser de unos 0,002 mm. Seleccionamos un tipo de material PEC (*Perfect Electric Conductor*) para los metales.

Para crear nuestro plano de masa el procedimiento es el mismo. Desde el menú de opciones en Objects>Basic shapes>Brick, se nos abrirá un menú en el cual podremos insertar nuestras coordenadas X Y Z, tal y como muestra la Fig. 2.3.

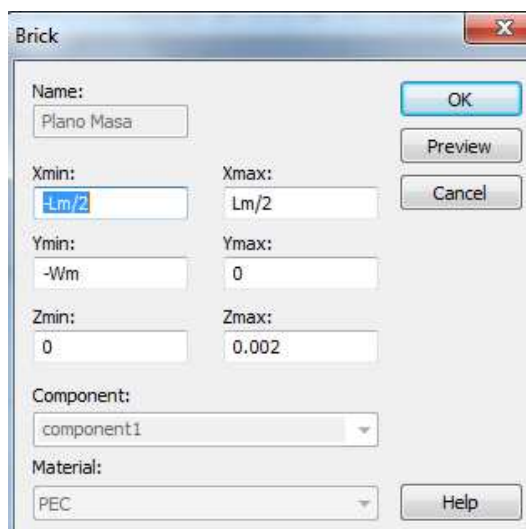


Figura 2.3. Creación del plano de masa con CST.

Así pues, hemos definido 2 variables que son:

- Lm : La anchura del plano de masa, que será $\lambda=125\text{mm}$.
- Wm : La longitud del plano de masa, que será $\lambda=125\text{mm}$.

El plano Z representa el grosor de nuestros componentes. Suele ser de unos 2 mm. Seleccionamos un tipo de material PEC (*Perfect Electric Conductor*) para el metal del plano de masa.

La representación de nuestra antena en el simulador queda como se muestra en la Fig. 2.4.

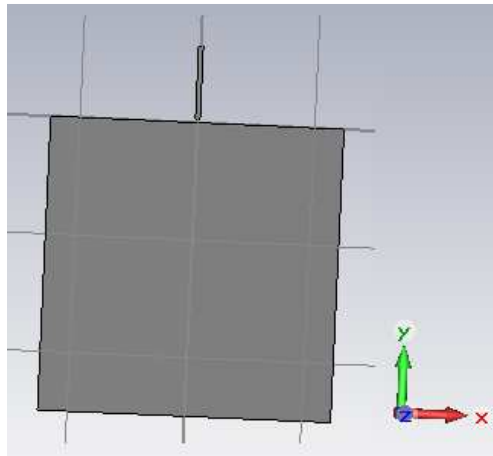


Figura 2.4. Geometría de la antena monopolo creada con CST.

A continuación debemos definir el puerto de entrada/salida por el cual podremos medir los parámetros de nuestra antena. Para ello, seleccionaremos *Objects>Pick>Pick edge Midpoint* y pulsaremos en el plano de masa; repetiremos la secuencia y pulsaremos en el monopolo. A continuación pulsaremos en *Discrete port* creando por fin nuestro puerto de salida, que será un puerto discreto (como un generador de tensión colocado en los puntos marcados). En la Fig. 2.5 se muestra con una flecha roja la posición del puerto discreto.

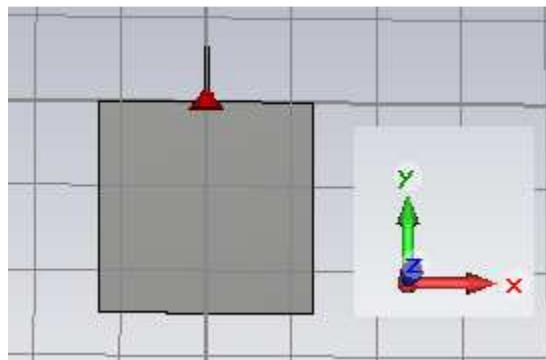


Figura 2.5. Antena monopolo creada con CST con un puerto discreto.

A continuación, debemos definir cuál será nuestra frecuencia de trabajo. Para ello, a la izquierda en nuestro navegador (Navigation Tree) seleccionaremos Field Monitors > New Field Monitors y en el siguiente menú en el apartado *Frequency* pondremos 2,4 y seleccionaremos Farfield/RCS. Después pulsaremos en Apply y en Ok.

También tendremos que definir nuestro rango de frecuencias de simulación (de 1,5 a 3 GHz), para ello pulsaremos sobre el icono *Frequency Range* e insertaremos en la frecuencia mínima 1,5 y en la frecuencia máxima 3.

Con esto ya podríamos simular nuestra antena, para ello desde el menú Solve> Transient Solver y ejecutamos la simulación.

2.1.2 Resultados obtenidos de la simulación

El primer resultado a observar es el factor de reflexión (parámetro S_{11}), que podemos ver desde nuestro programa en 1D Results>S-Parameters>S11. El coeficiente de reflexión nos interesa que sea lo más pequeño posible para que se refleje el mínimo de potencia posible en la conexión del cable a la antena. La Fig. 2.6 muestra el resultado obtenido.

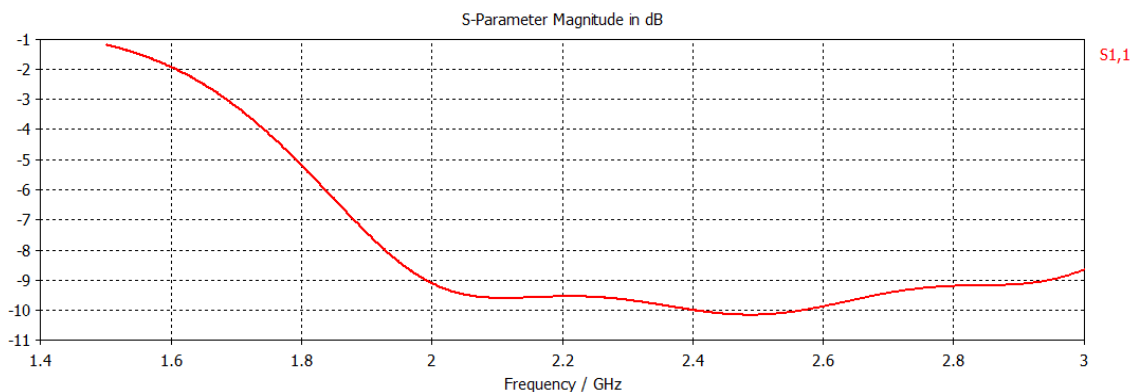


Figura 2.6. Coeficiente de reflexión (en dB) obtenido mediante el simulador CST para la antena de tipo monopolo diseñada.

Como observamos en la gráfica, el resultado está lejos de nuestro propósito, puesto que no obtenemos adaptación en la banda de 2,4 GHz. Para mejorar los resultados se puede ir disminuyendo o aumentando λ para que nuestra frecuencia de trabajo caiga en los 2,4 GHz que nos interesa. También podemos disminuir h , que es la distancia entre nuestro monopolo y nuestro plano de masa.

Tras realizar varias simulaciones variando estos dos parámetros, finalmente nuestras variables de interés deben tomar los siguientes valores:

- Para el dipolo: $Ld= 2\text{mm}$ y $Wd= 25\text{mm}$.
- Para el plano de masa: $Wd= 25\text{mm}$ y $Wm= 50\text{mm}$.

- Para la separación entre ambos: $h=1,30\text{mm}$.

El resultado final se muestra en la Fig. 2.7.

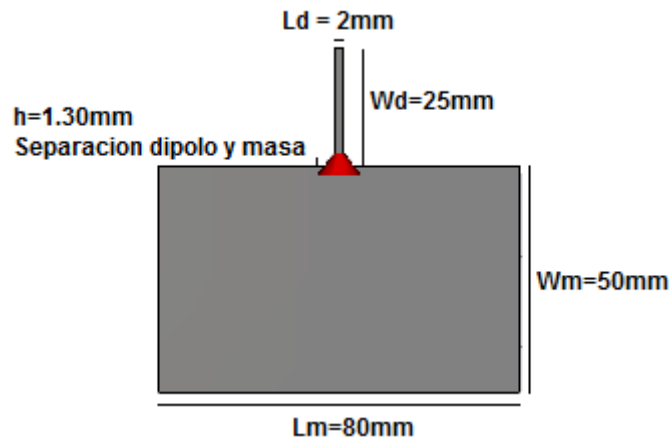


Figura 2.7. Dimensiones finales para la antena de tipo monopolo.

A continuación, volvemos a ejecutar la simulación y comprobaremos el nuevo coeficiente de reflexión, que se muestra en la Fig. 2.8.

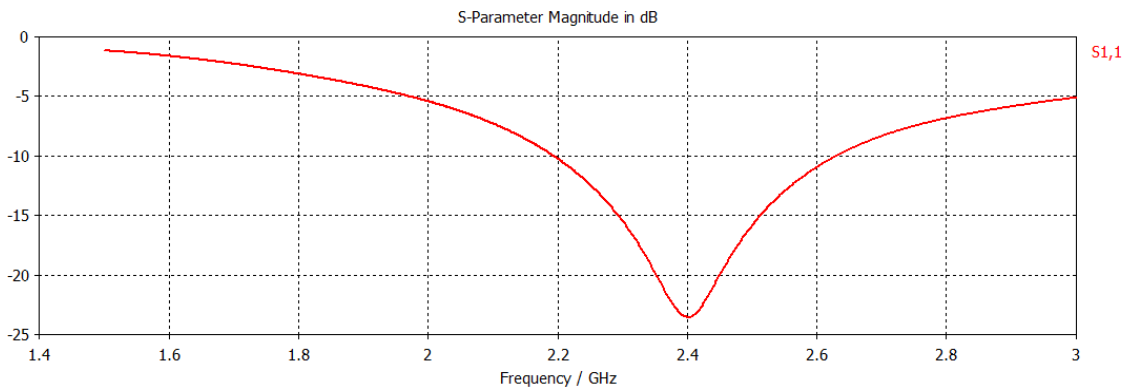


Figura 2.8. Coeficiente de reflexión (en dB) simulado para la antena de tipo monopolo optimizada.

Observamos ahora como nuestro factor de reflexión ha mejorado considerablemente y la antena muestra adaptación ($S_{11} < -10\text{ dB}$) alrededor de 2,4 GHz. Como se observa en la figura, el rango de frecuencias de operación de la antena se extiende desde 2,2 GHz a 2,62 GHz, lo que supone un ancho de banda del 17,42%. Dicho ancho de banda (BW) se ha calculado de la siguiente manera:

$$BW(\%) = \frac{f_{\text{superior}} - f_{\text{inferior}}}{f_{\text{corte}}} \times 100 = \frac{2,62 - 2,2}{2,2 + \left(\frac{2,62 - 2,2}{2}\right)} \times 100 = 17,42\%$$

Asimismo, podemos observar el coeficiente de reflexión simulado en la Carta de Smith (ver Fig. 2.9), lo cual nos proporciona información de cual es la impedancia de entrada de nuestra antena.

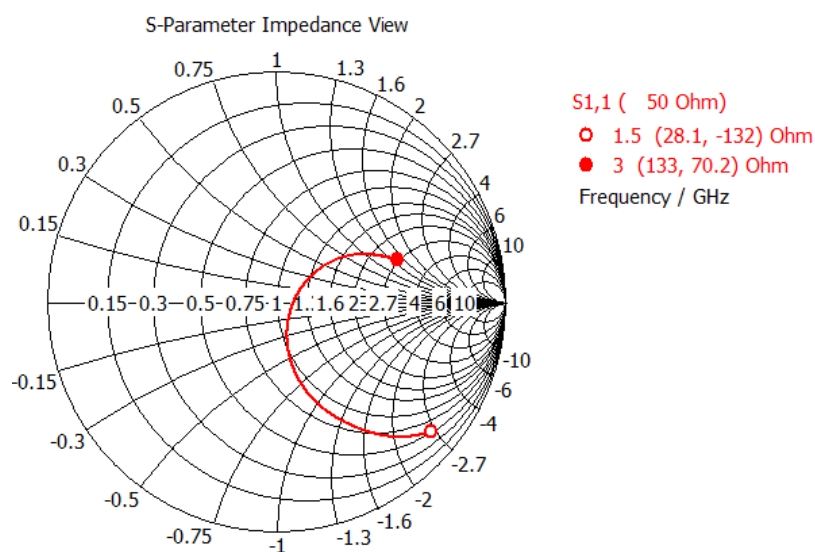
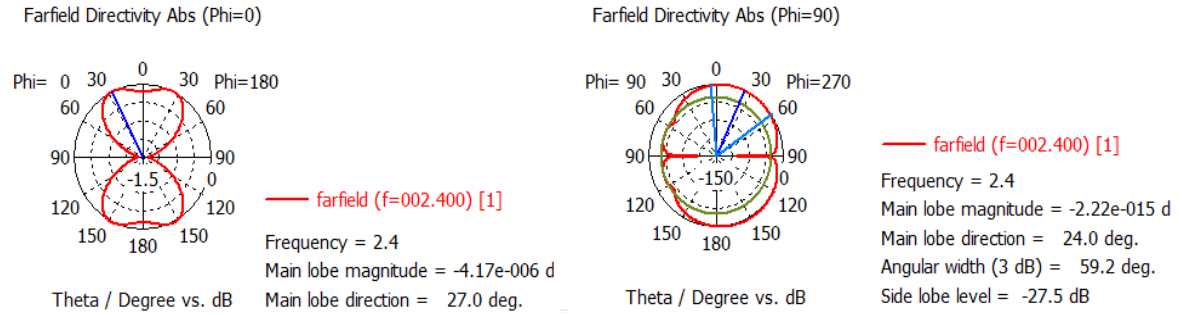


Figura 2.9. Representación del coeficiente de reflexión simulado en la Carta de Smith de impedancias.

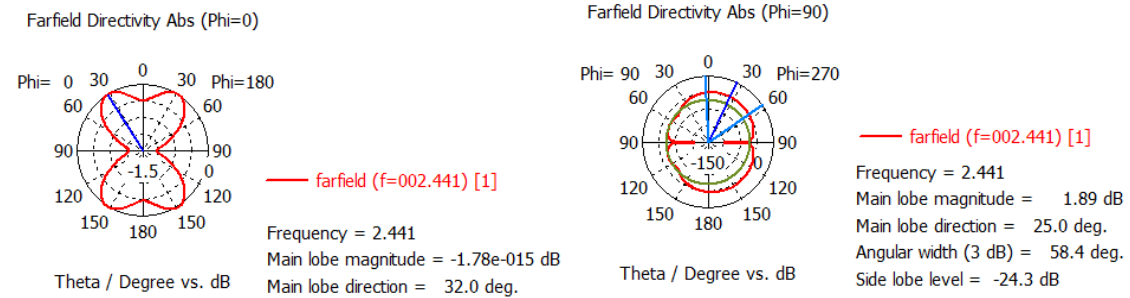
A continuación, pasaremos a obtener el diagrama de radiación mediante simulación. Nuestra antena tipo monopolo tiene una radiación omnidireccional, y debe captar las frecuencias de los estándares Wifi. El rango de frecuencias de los estándares utilizados por Wifi (IEEE 802.11.x) en la frecuencia de 2.4 GHz, en España, abarca desde el canal 1 hasta el 14, (2400-2483,5 MHz) [8]. Para comprobar que nuestro diagrama de radiación es el correcto necesitamos obtener los diagramas de radiación a la frecuencia más baja (2400 MHz), a la frecuencia media (2441,75 MHz) y a la frecuencia más alta (2483,5 MHz) de la banda.

Así pues, desde el navegador en Field Monitors> New Field Monitor insertaremos la frecuencia de 2,400 ya que estamos trabajando en GHz, marcaremos la casilla de Farfield/RCS Apply y Ok. Repetiremos la misma secuencia para las otras dos frecuencias y volveremos a simular el diseño. Desde el navegador en *Farfields* podremos los diagramas de radiación para cada una de las frecuencias pedidas.

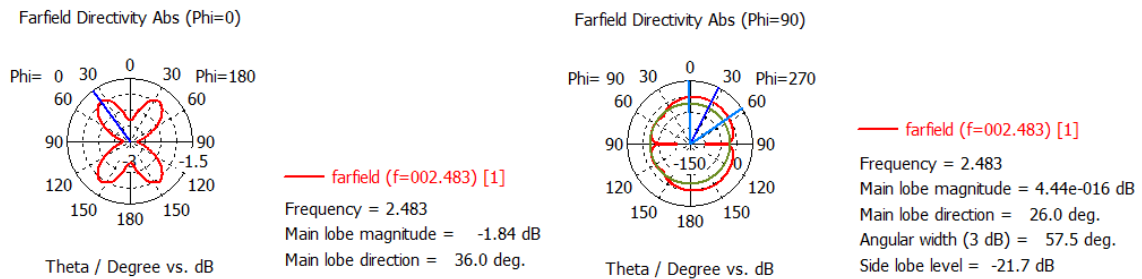
Los diagramas obtenidos resultan muy similares, como se puede observar en la Fig. 2.10, donde se muestra el diagrama de radiación en las diferentes frecuencias. Como se observa, en todas las frecuencias el diagrama de radiación presenta comportamiento omnidireccional, como era de esperar.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.10. Diagramas de radiación simulados para la antena de tipo monopolo optimizada: a) Frecuencia de 2400 MHz; (b) Frecuencia de 2441,75MHz y (c) Frecuencia de 2483,5 MHz.

2.1.3 Estudio paramétrico de la antena monopolo

En el diseño realizado es importante reducir el tamaño del plano de masa al máximo, para conseguir una antena lo más compacta posible.

A la hora de redimensionar el tamaño del plano de masa hasta encontrar su valor óptimo hemos ido probando diferentes longitudes y anchuras hasta encontrar las

dimensiones idóneas. El estudio paramétrico sirve para que dada una determinada estructura (es nuestro caso un cubo, Brick) podamos fácilmente tomar diferentes medidas dentro de la anchura y longitud máxima de nuestra estructura y observar cómo se modifica la frecuencia de trabajo.

Para ello desde el menú del programa ejecutaremos la siguiente secuencia: Solve>Transient Solver y en el siguiente menú elegir la opción Par. Sweep. A continuación pulsamos en New Par. e insertamos la variable Lm correspondiente al plano X de nuestro plano de masa; haremos que nos saque 10 muestras y seleccionamos en Result watch> Parameter-S y magnitud en dBs. Finalmente pulsamos Start.

El resultado obtenido se muestra en la Fig. 2.11, donde el parámetro Lm se extiende desde la curva 1 con un valor de 10 mm, hasta la curva 10 con un valor de 80 mm en saltos aproximados de 7,8 mm.

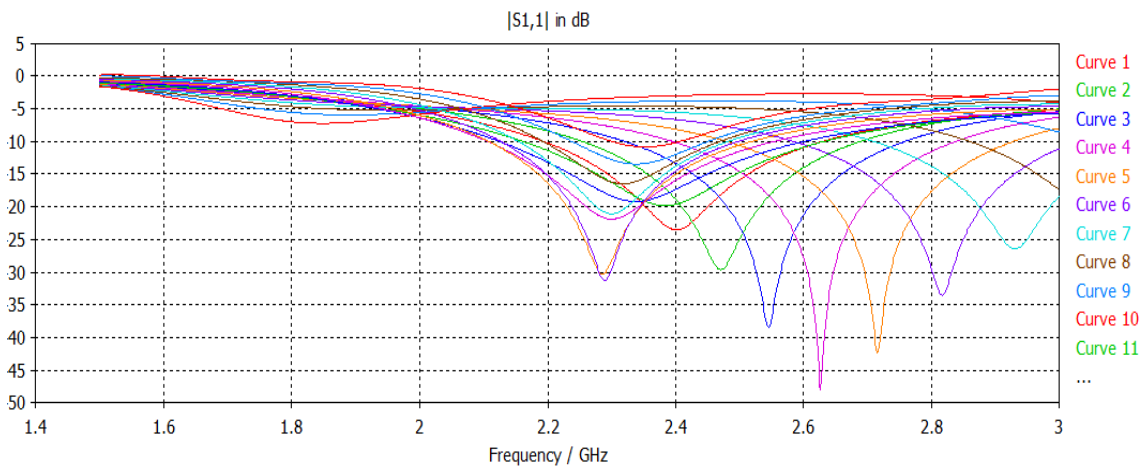


Figura 2.11. Coeficiente de reflexión (en dB) obtenido para diferentes valores de la anchura del plano de masa (parámetro Lm).

Para el parámetro Wm correspondiente al plano Y de nuestro plano de masa la secuencia es exactamente la misma cambiando la variable Lm por Wm . Volvemos a simular, obteniendo el resultado mostrado en la Fig. 2.12. El parámetro Wm engloba desde la curva 1 con un valor de 5 mm hasta la curva 10 con un valor de 50 mm, en saltos de 5 mm.

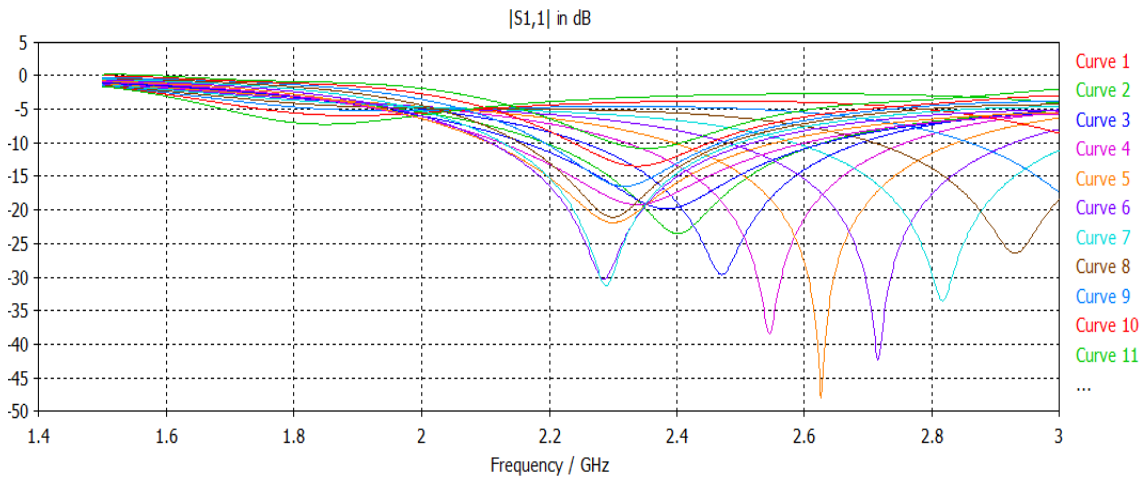


Figura 2.12. Coeficiente de reflexión (en dB) obtenido para diferentes valores de la longitud del plano de masa (parámetro W_m).

Los resultados prácticamente son los mismos. Se puede observar en las gráficas que al disminuir el valor de L_m o de W_m se observa que la curva del coeficiente de reflexión se desplaza hacia frecuencias mayores, ya que como habíamos comentado antes, a menor λ mayor frecuencia de trabajo y viceversa.

En la Fig. 2.13 se muestra la mejor curva de trabajo para nuestro propósito, correspondiente a unos valores de $W_m=50\text{mm}$ y $L_m=80\text{mm}$.

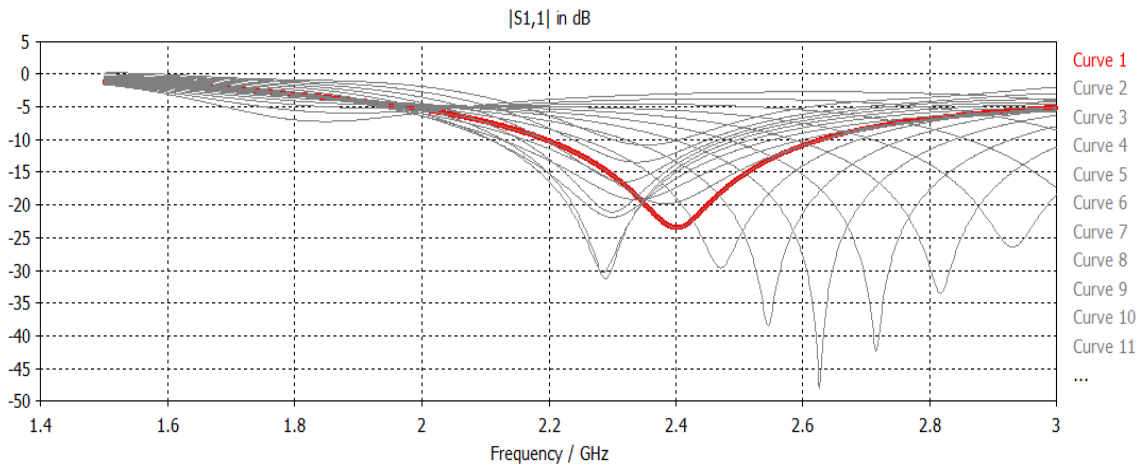


Figura 2.13. Curva óptima para el coeficiente de reflexión (en dB).

2.1.4 Adaptación de la antena para la fabricación

Para poder fabricar la antena monopolo y conectarla al circuito rectificador que se diseñará posteriormente es necesario hacer una serie de modificaciones en la geometría, debido a que la interconexión del puerto no es la adecuada. Por ello, se ha rediseñado la antena para que tenga una alimentación microstrip, aumentando también el tamaño del dieléctrico para que tenga la misma altura que el monopolo, y

así conseguir una mayor consistencia mecánica. A continuación se representa en la Fig. 2.14 el diseño final con sus correspondientes medidas:

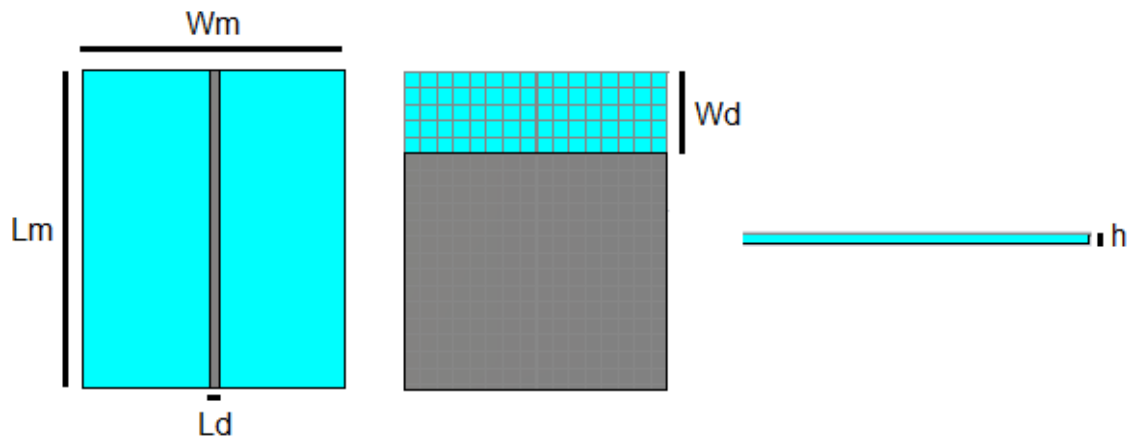


Figura 2.14 Estructura final de la antena: Vista superior (a la izquierda); vista inferior (en el centro) y vista lateral (a la derecha). El color azul corresponde al sustrato dieléctrico y el color gris al metal.

A continuación se muestra en la Fig. 2.15 las dimensiones finales para nuestro monopolo:

Nombre	Valor	Descripción
h	1,50mm	Grosor del dieléctrico.
Ld	2,91mm	Monopolo. Plano X.
Lm	80mm	Dieléctrico. Plano Y.
Wd	25mm	Añadido dieléctrico. Plano Y.
Wm	72mm	Dieléctrico. Plano X.

Figura 2.15 Dimensiones finales de la antena.

A continuación en la Fig. 2.16 se muestra el parámetro de eficiencia, en el cual se observa que dicha antena posee una eficiencia del 85,7%.

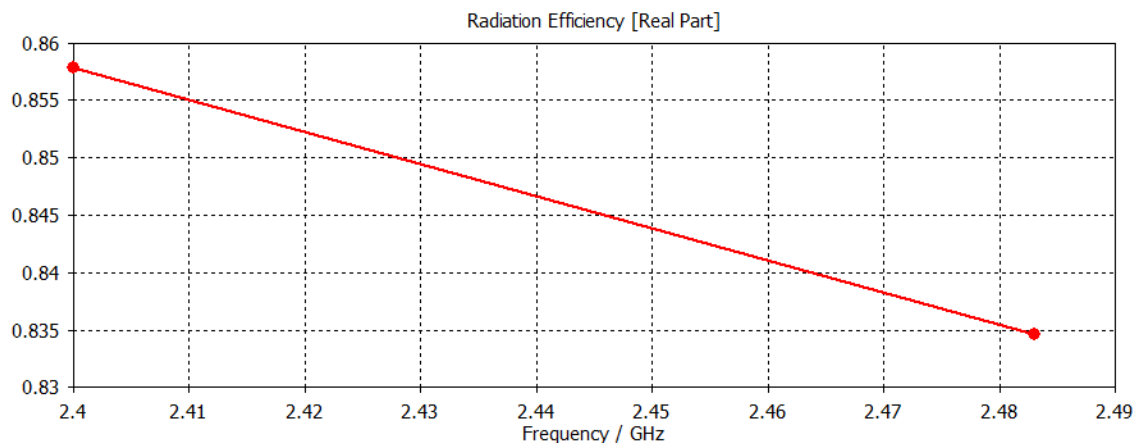


Figura 2.16 Eficiencia de la antena monopolo rediseñada.

2.2 ANTENA PARCHE RECTANGULAR

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

Algunas ventajas que este tipo de antenas puede ofrecer son: tendencia a la miniaturización al lograr dispositivos cada vez más pequeños y con componentes livianos, fáciles de integrar tanto en superficies planas como no planas, sencillas, de fácil producción en masa (por lo que los costes pueden ser muy reducidos), fáciles de adaptar con circuitos integrados de microondas, versátiles en términos de impedancia, patrón, polarización y frecuencia de resonancia.

Entre las principales desventajas de este tipo de antenas se puede nombrar: baja potencia de radiación (por su estructura no puede soportar altas potencias en los componentes de una antena *microstrip*), baja eficiencia, ancho de banda estrecho, pérdidas importantes en altas frecuencias y son fácilmente afectadas por el factor térmico (sobre todo si se trabaja sobre sustratos flexibles) [7].

A diferencia del dipolo/monopolo simple con radiación omnidireccional, la antena tipo parche radiará o captará potencia hacia/desde la dirección perpendicular al plano del parche (radiación *broadside*).

Las antenas tipo parche están formadas por una tira conductora de largo L , ancho W y grosor t , tal y como muestra la Fig. 2.17. La tira conductora se encuentra situada en la parte superior de un sustrato dieléctrico, el cual tiene un grosor h , una permitividad dieléctrica relativa ϵ_r y una permeabilidad magnética relativa μ_r (que suele ser igual a 1). En la parte inferior del sustrato dieléctrico se tiene un plano referenciado a tierra (plano de masa).

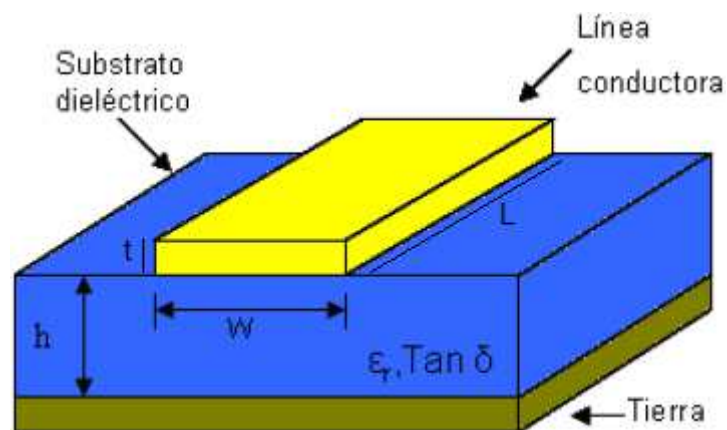


Figura 2.17. Geometría típica de una antena tipo parche.

Los rangos de medidas y características de los parámetros mencionados son los siguientes para un correcto funcionamiento de la antena [7]:

- El valor de t tiene que ser muy pequeño: $t \ll \lambda$.
- El valor de L puede variar dependiendo de la forma utilizada. Para un parche tipo rectangular se tienen los siguientes rangos: $\lambda/3 < L < \lambda/2$.
- El ancho del sustrato h debe ser por lo general: $h \ll \lambda$.

Nuestra λ de trabajo cambia siendo ahora de 59,6 mm debido a la incorporación de un dieléctrico. La permitividad eléctrica del sustrato dieléctrico por lo general se encuentra dentro de los rangos: $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Se debe buscar la menor permitividad posible para lograr una mejor eficiencia de la antena y un menor coste del sustrato.

Para alimentar nuestra antena tipo parche utilizaremos alimentación directa, que como su nombre indica requiere de un contacto directo entre la estructura de alimentación y la antena radiante. Los dos principales métodos de alimentación en esta categoría son: 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 llegarse a un compromiso entre las características esperadas de radiación y las características esperadas de la alimentación. En nuestro proyecto utilizaremos el método de alimentación por *microstrip*.

La alimentación por *microstrip* consiste en alimentar el elemento radiante conectándole directamente una línea *microstrip* (diseñada para tener la impedancia característica deseada). Este método es el más sencillo de realizar, sin embargo es el que peor eficiencia presenta en relación al ancho de banda y acoplamiento [7]. Existen dos formas principales de alimentar una antena por medio de *microstrip*: conectando la línea *microstrip* directamente en un borde de la antena o conectando la línea *microstrip* por medio de inserciones en la antena. Ambos casos se muestran gráficamente en la Fig. 2.18.

En el caso de la conexión directa al borde la antena, la variación en la posición de la línea *microstrip* en relación con el parche generará un mayor o mejor acoplamiento de impedancia. En el caso de la alimentación con *microstrip* por medio de inserciones, la profundidad de la inserción es la que dicta el acoplamiento de la impedancia. En nuestro caso hemos elegido la opción b) para acoplar nuestra línea de transmisión a 50Ω [7].

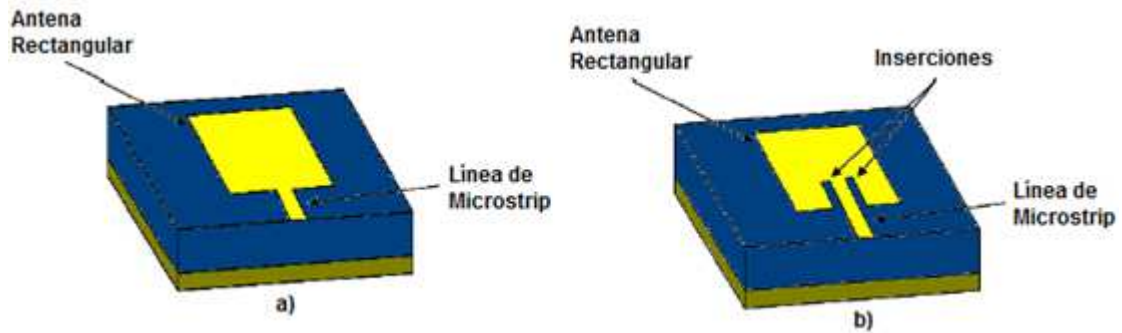


Figura 2.18. Alimentaciones por microstrip: a) Conexión directa de la línea de microstrip a la antena y b) Conexión de línea de microstrip con inserciones.

2.2.1. Simulación de la antena parche

En esta parte omitiremos algunos pasos en la creación de bricks que formarán nuestra antena tipo parche, porque ya se vio como crearlas en la simulación anterior. La estructura a crear es la mostrada en la Fig. 2.19.

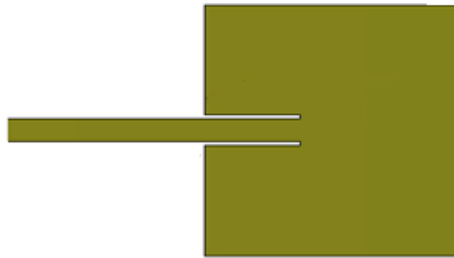


Figura 2.19. Geometría de la antena a crear.

Primero crearemos un brick central al cual le sumaremos otro brick, con la opción del programa Objects>Boolean>Add, quedando de la manera indicada en la Fig. 2.20.

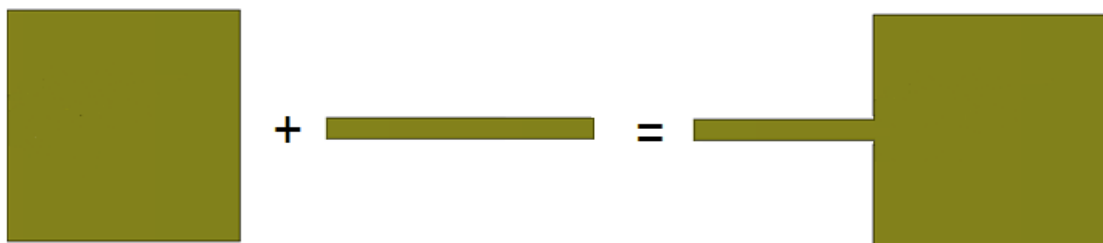


Figura 2.20. Procedimiento de creación de la antena parche con el simulador.

A continuación crearemos otros 2 bricks, los cuales le restaremos a la estructura con la opción del programa Objects>Boolean>Subtract, como se muestra en la Fig. 2.21.

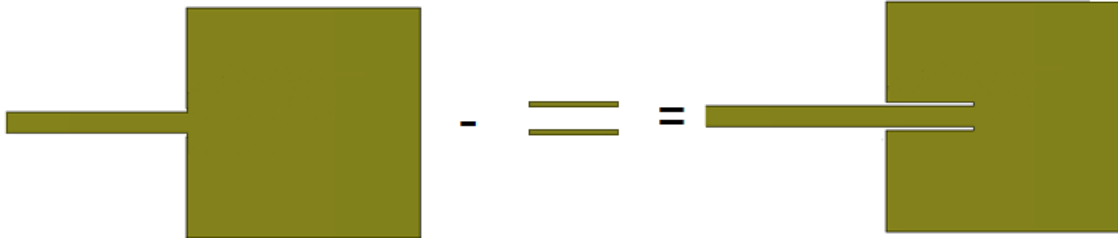


Figura 2.21. Procedimiento de creación de la antena parche final, incluyendo las inserciones.

Así pues necesitaremos en total 4 bricks para la creación de nuestra estructura.

El plano de masa y el dieléctrico tienen las mismas dimensiones. La permitividad dieléctrica de nuestro dieléctrico es de 4,4 y la tangente de pérdidas de 0,015, por lo que lo definiremos en las propiedades del mismo.

Para encontrar las dimensiones ideales de nuestra estructura y que esta trabaje en los 2,4 GHz se han ido variando los parámetros de nuestra antena, al igual que hemos hecho anteriormente, disminuyéndolos o aumentándolos hasta encontrar nuestro punto de trabajo ideal.

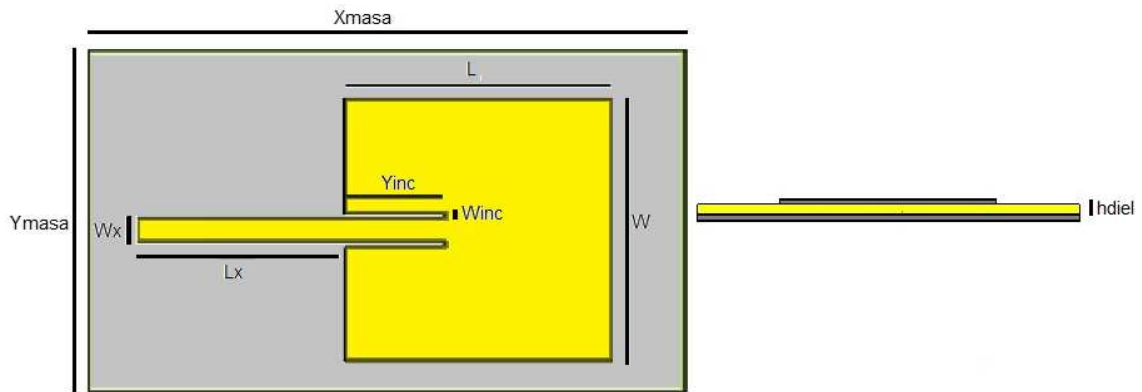
Finalmente y tras varias simulaciones la Fig. 2.22 muestra la estructura final vista desde arriba, desde detrás y de lado:



Figura 2.22. Estructura final de la antena: Vista superior (a la izquierda); vista inferior (en el centro) y vista lateral (a la derecha).

Como se observa en la vista superior (figura de la izquierda), tendríamos en la parte superior nuestro parche, en medio el dieléctrico y en la parte inferior el plano de masa.

Las variables y valores elegidos que forman nuestra estructura final son los mostrados en la Fig. 2.23.



Nombre	Valor	Descripción
L	29.3mm	Parche. Plano X (Principal)
Lx	30.7mm	Parche. Plano X (Palo)
W	32.7mm	Parche. Plano Y (Principal)
Winc	0.5mm	Parche. Plano Y (Vacio)
Wx	2.91	Parche. Plano Y (Palo)
Xmasa	85mm	Masa. Plano X
Yinc	11.8mm	Parche. Plano X (Vacio)
Ymasa	51mm	Masa. Plano Y
Hdiel	1.5mm	Altura dieléctrico.

Figura 2.23. Dimensiones finales de la antena.

El puerto de salida irá conectado entre nuestro plano de masa y nuestro parche, atravesando el dieléctrico, tal y como se observa en la Fig. 2.24.

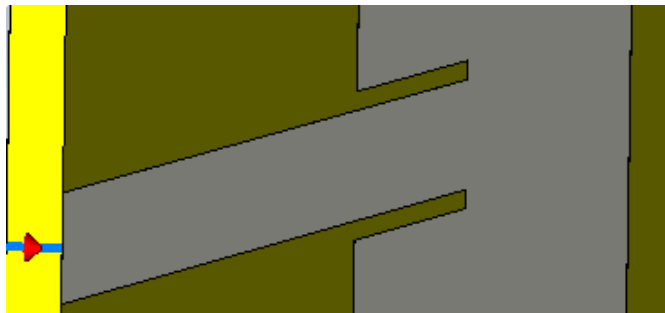


Figura 2.24. Conexión del puerto de alimentación.

2.2.2. Resultados obtenidos de la simulación

Finalmente se pasará a simular la estructura, observando principalmente el comportamiento del parámetro S tal y como se representa en la Fig. 2.25:

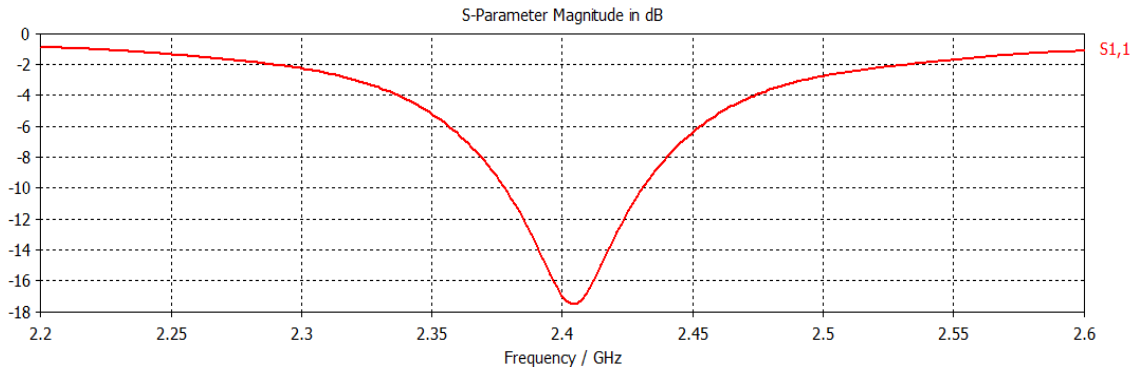
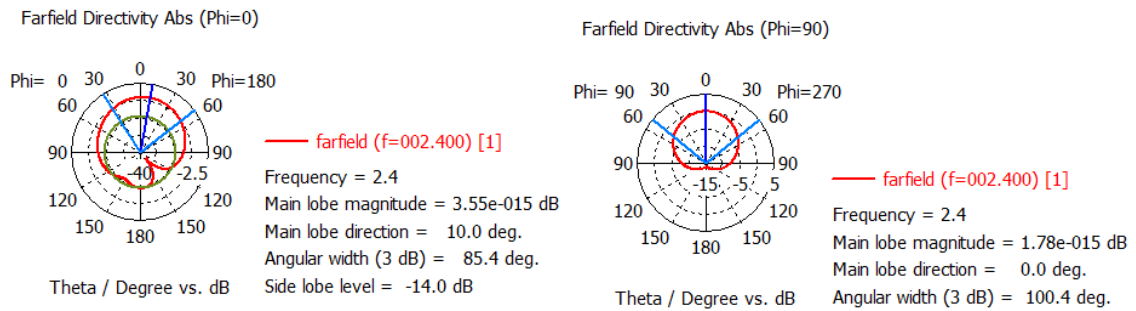


Figura 2.25. Coeficiente de reflexión (en dB) simulado para la antena de tipo parche optimizada.

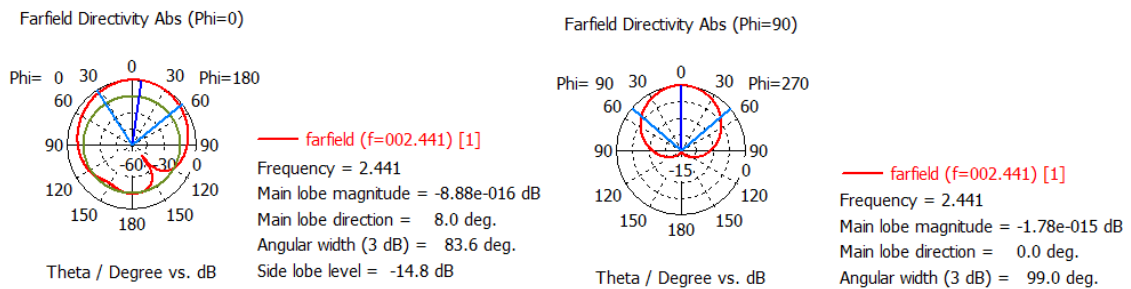
En la gráfica se observa perfectamente que cubriríamos con una buena recepción de señal los 14 canales que conforman la banda Wi-fi a 2.4Ghz en España.

Diagrama de radiación.

Los 14 canales que conforman la banda de trabajo Wi-fi de 2.4Ghz abarca desde los 2400 hasta los 2483Mhz. Así pues debemos asegurarnos que se cubra dicho servicio. Nuestro parche recibirá potencia solamente desde la dirección en que esté orientado. Así pues en la Fig. 2.26 se muestran los resultados de los diagramas de radiación de las distintas frecuencias. Se observa como en todas las frecuencias el diagrama irradia en función del plano en el que esté orientado.



a)



b)

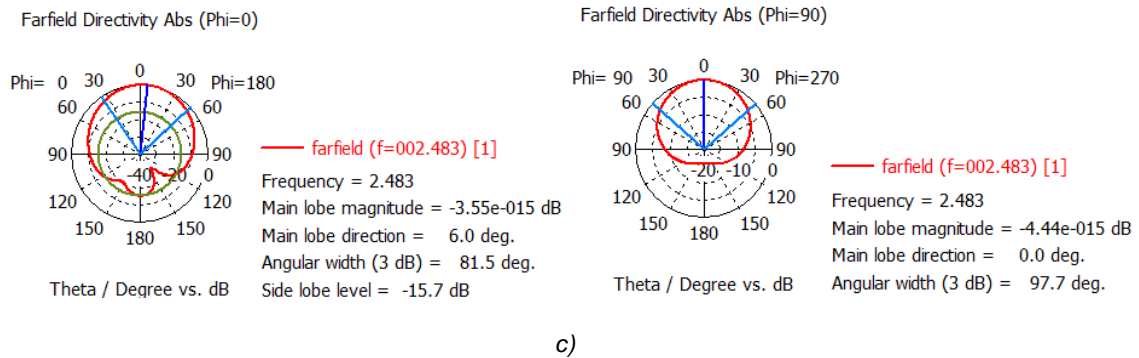


Figura 2.26. Diagramas de radiación simulados para la antena de tipo parche rectangular optimizada: a) Frecuencia de 2400 MHz; b) Frecuencia de 2441,75MHz y c) Frecuencia de 2483,5 MHz.

2.2.3 Estudio paramétrico de la antena parche

Realizaremos el estudio paramétrico sobre las variables que corresponden a nuestro plano de masa: Xmasa e Ymasa. Primero se realizará la simulación sobre la variable Xmasa desde 50 hasta 100 mm en 10 muestras y se observará el parámetro S tal y como se representa en la Fig. 2.27.

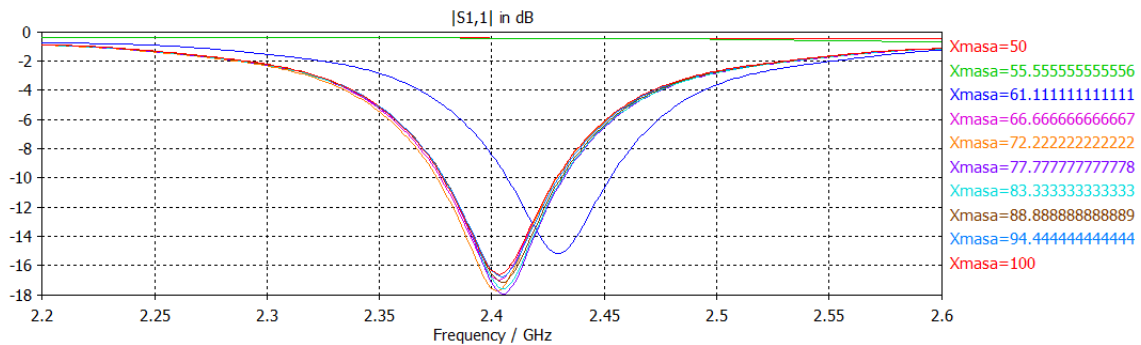


Figura 2.27. Coeficiente de reflexión (en dB) obtenido para diferentes valores de la anchura del plano de masa (parámetro Xmasa).

A continuación se mostrará el parámetro S de La variable Ymasa también en 10 muestras desde 24 hasta 76 mm tal y como se representa en la Fig. 2.28.

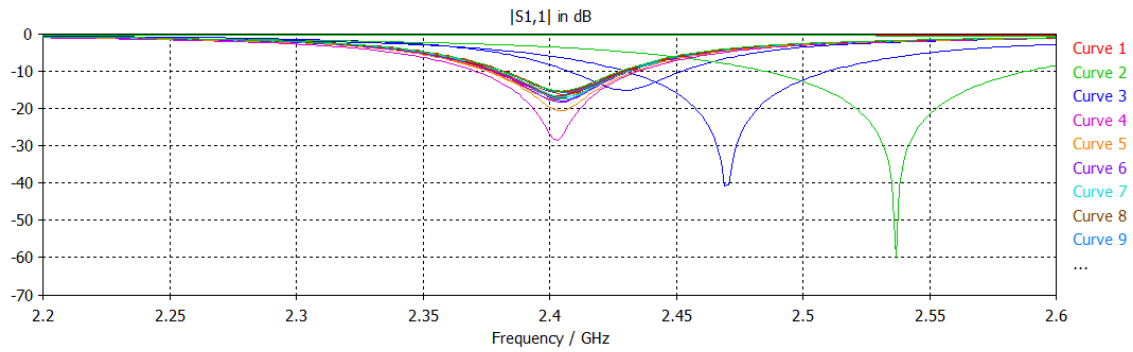


Figura 2.28. Coeficiente de reflexión (en dB) obtenido para diferentes valores de la anchura del plano de masa (parámetro Y_{masa}).

Coeficiente de reflexión

Nos interesa un valor por debajo de cero para nuestra parte real de la admitancia/impedancia y así se refleje toda la potencia en dicha frecuencia. Una vez simulado el circuito observaremos en las gráficas que se cumple dicho criterio. En la Fig. 2.29 es representada la admitancia (parte imaginaria).

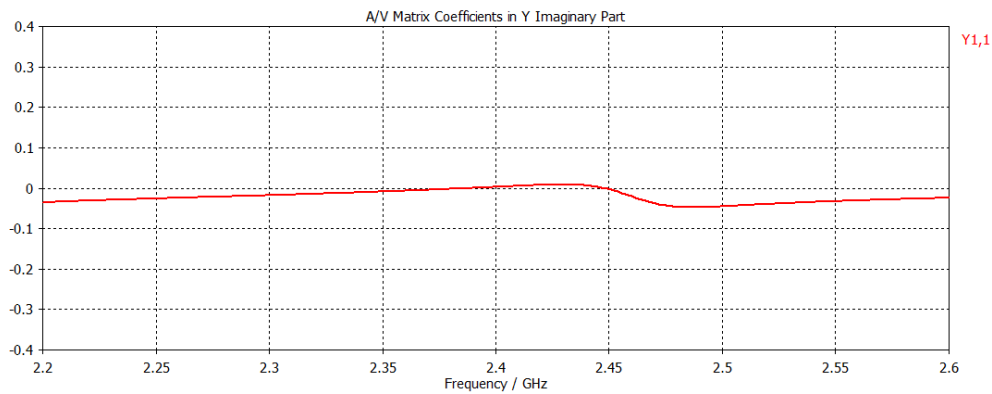


Figura 2.29. Admitancia. Parte imaginaria.

Se observa que en 2.4GHz el coeficiente de reflexión está prácticamente en cero.

A continuación se representa la impedancia (parte imaginaria) en la Fig. 2.30.

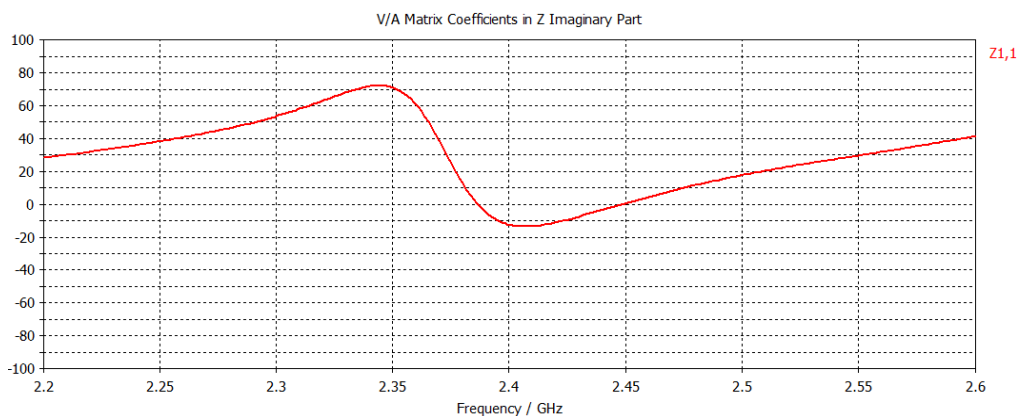


Figura 2.30. Admitancia. Parte imaginaria.

Se observa que en 2.4Ghz el coeficiente de reflexión está prácticamente en cero.

Otro parámetro muy importante para nuestra aplicación es la eficiencia de nuestra antena, ya que este parámetro da una idea de las pérdidas óhmicas que presenta la antena. La eficiencia simulada se muestra en la Fig 2.31, obteniendo valores en torno al 46 %.

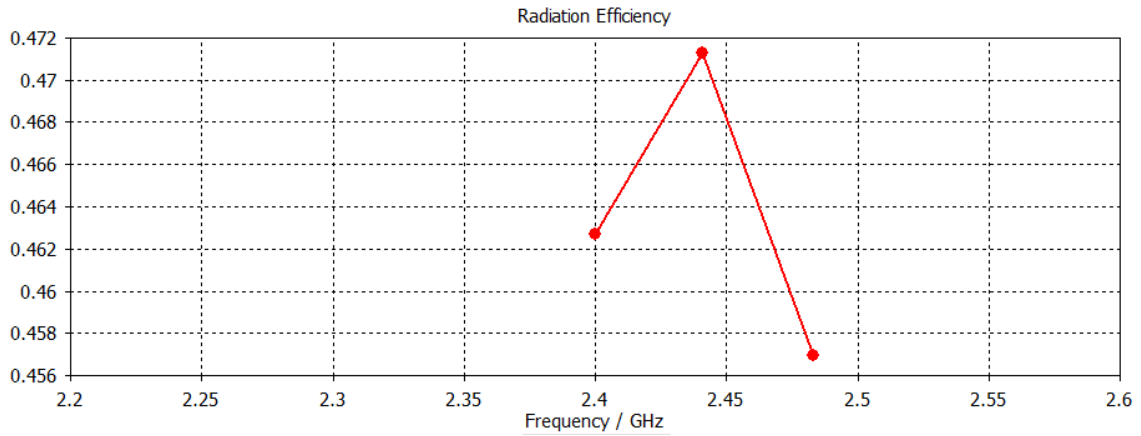


Figura 2.31. Eficiencia de la antena

3. DISEÑO DEL CIRCUITO RECTIFICADOR

Una vez diseñadas nuestras 2 antenas, nuestro siguiente paso es convertir dicha señal electromagnética (corriente alterna) captada por nuestras antenas en corriente continua. El proceso de convertir una señal de corriente alterna en corriente continua recibe el nombre de rectificación. En los siguientes apartados se estudiarán, simularán y se compararán dos de los rectificadores más usados en el diseño de rectennas, para finalmente elegir cual formará parte de nuestra estructura final.

3.1. Rectificador de onda completa.

La Fig. 3.1 muestra el esquema de un rectificador de onda completa, el cual vamos a estudiar detalladamente.

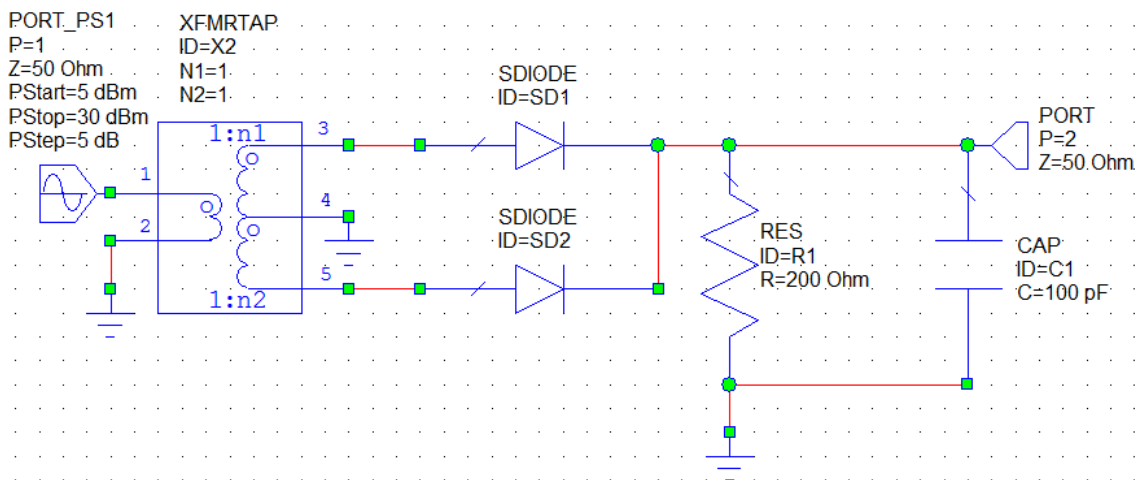


Figura 3.1. Esquema de un rectificador de onda completa.

Antes que nada vamos a analizar nuestro circuito empezando por el PORT_PS1 que no es más que un puerto de entrada adaptado a 50 Ω , donde se inyectaría directamente la señal que proviene de nuestra antena. A continuación tenemos un transformador, 2 diodos Schottky y una resistencia que conjuntamente forma nuestro rectificador de onda completa, un condensador que solo dejará pasar las tensiones altas y nuestro puerto de salida (PORT).

En cuanto al tipo de diodo, se ha elegido el Schottky por que se usa mucho en radio frecuencia, funciona igual que un diodo normal, es decir, se polariza de la misma manera (directa o inversa según el sentido de la corriente) pero con las diferencias de que su puesta en conducción es relativamente más baja (de 0,26V a 0,32V frente a 0,6V) por lo que se obtiene una respuesta más rápida (necesaria debido al inconveniente de captar poca potencia). Su principal inconveniente es su corriente inversa relativamente alta aunque no es un factor determinante para el presente estudio [6].

Vamos a estudiar el funcionamiento del rectificador mostrado en la Fig. 3.2, que aunque se diferencia del anterior por el hecho de que en este se emplean diodos normales, el funcionamiento es básicamente el mismo.

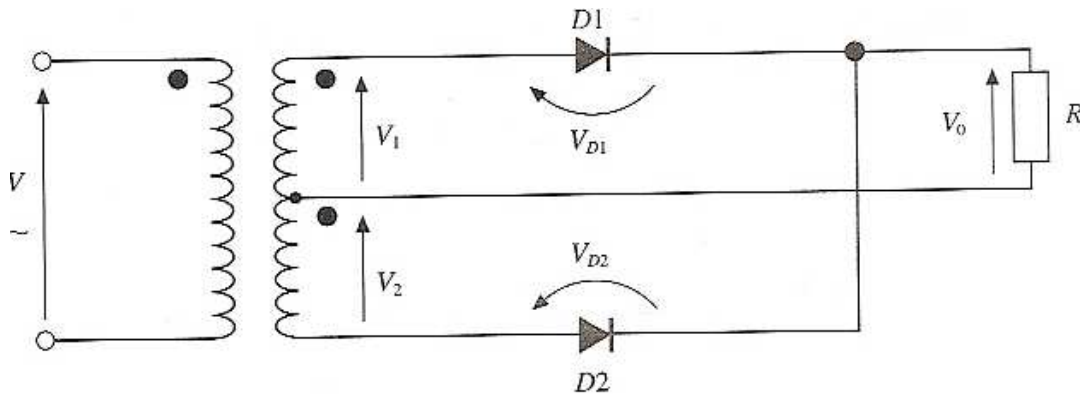


Figura 3.2. Rectificador de onda completa [9].

El transformador más elemental está formado por un núcleo de chapas de material ferromagnético sobre el que se bobinan dos devanados: primario y secundario, que constituyen dos circuitos eléctricos independientes.

Este circuito se compone de un transformador que posee un secundario con toma intermedia o derivación (en inglés llamada TAP), dos diodos y una resistencia de carga.

La toma intermedia permite que a la salida del transformador se obtengan dos fases en oposición, con idénticos valores absolutos instantáneos. A la salida del secundario del transformador obtenemos dos señales de igual amplitud, pero desfasadas 180° .

En la Fig. 3.3 se representan las señales V_1 y V_2 . El diodo D1 se comportará como un interruptor cerrado para el semiciclo positivo de la señal V_1 y recortará el semiciclo negativo de la misma. En cambio, el diodo D2 recortará los valores negativos de la señal V_2 . Como ambas señales están desfasadas, en cada semiciclo conducirá un diodo, pero en todo momento circulará una corriente por la resistencia R, siempre en el mismo sentido.

En la Fig. 3.3 podemos ver qué diodo conduce en cada semiperíodo. Nótese que, cuando el diodo se polariza inversamente, cae en él una tensión inversa igual al doble de la tensión V_1 (o V_2).

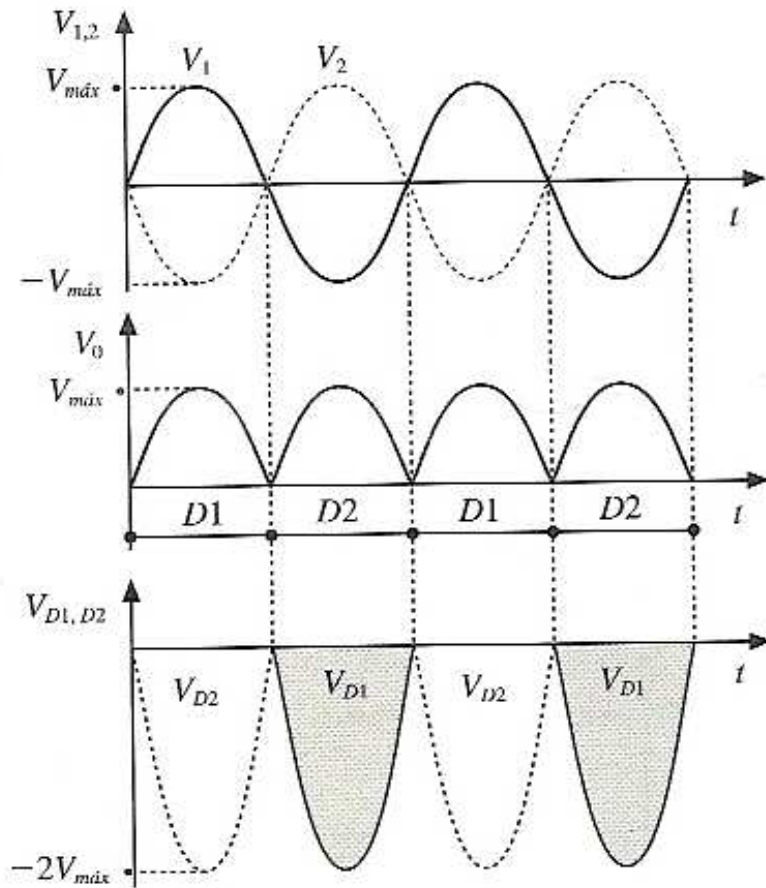


Figura 3.3. Formas de onda de tensión en los puntos indicados en la Fig. 3.2 [9].

Como los dos diodos están polarizados directamente sólo dejan pasar el semiciclo positivo de la señal. Finalmente, si colocamos un condensador a la salida del circuito, como se indica en la Fig. 3.1, éste se quedará con los picos más altos de la tensión de salida, suavizando la tensión continua de salida tal y como se aprecia en la Fig. 3.4

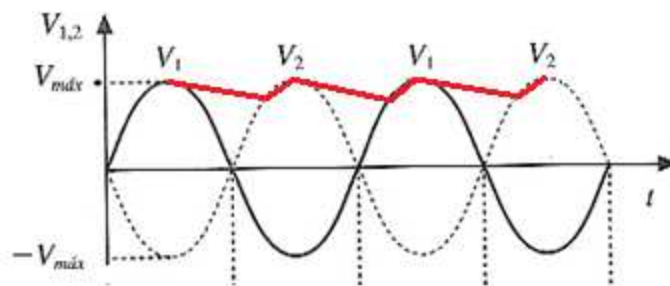


Figura 3.4 Efecto del condensador sobre los picos más altos de tensión [9].

Una de las desventajas de este circuito rectificador es que el transformador introduce muchas pérdidas, y este puede ser un grave problema debido a que nuestra antena captará muy poca potencia.

3.1.1 Simulaciones

Vamos a comprobar, simulando el circuito de la Fig. 3.1, que la teoría antes mencionada se cumple. Para ello vamos a simular primeramente la tensión de salida del circuito sin el condensador, para 20 dBm de entrada que se aprecia en la Fig. 3.4. Para ello mediremos la tensión de salida con un voltímetro digital en paralelo con la resistencia de carga, simulado en la Fig. 3.5 como el elemento V_METER.

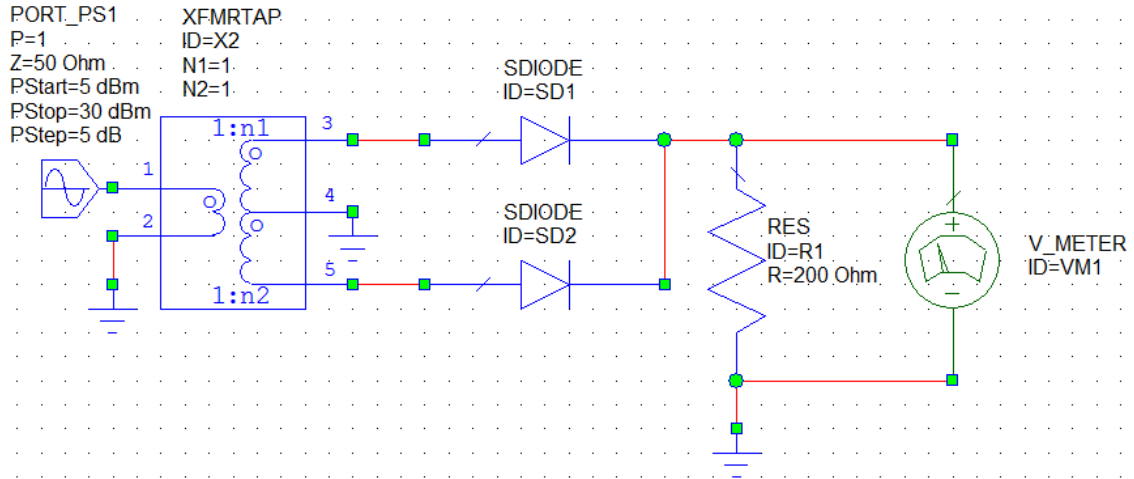


Figura 3.5. Esquemático del rectificador de onda completa para medir la tensión a la salida.

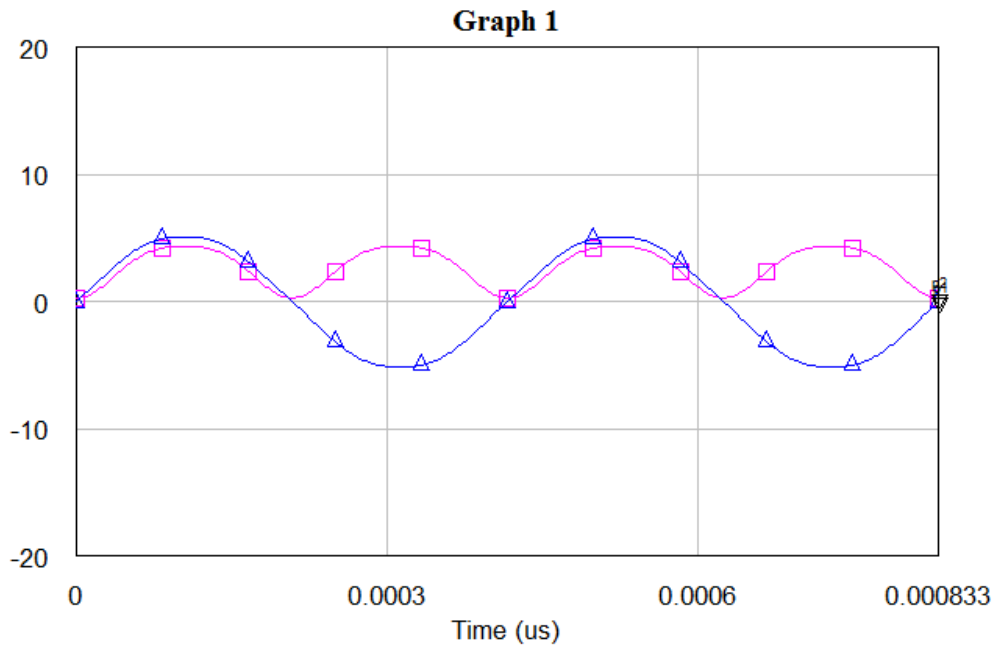


Figura 3.6. Tensión a la entrada (azul) y a la salida (rosa) para el circuito mostrado en la Fig. 3.5.

Podemos observar en la gráfica después de simular el circuito (Fig. 3.6), en color azul nuestro puerto de entrada, y en color rosa nuestro puerto de salida. Se observa claramente el efecto de nuestros diodos polarizados directamente, que solo dejan pasar los semiciclos positivos.

A continuación se simulará el mismo circuito, pero añadiéndole el condensador inicial que hemos quitado para observar su efecto. El circuito se muestra en la Fig. 3.7.

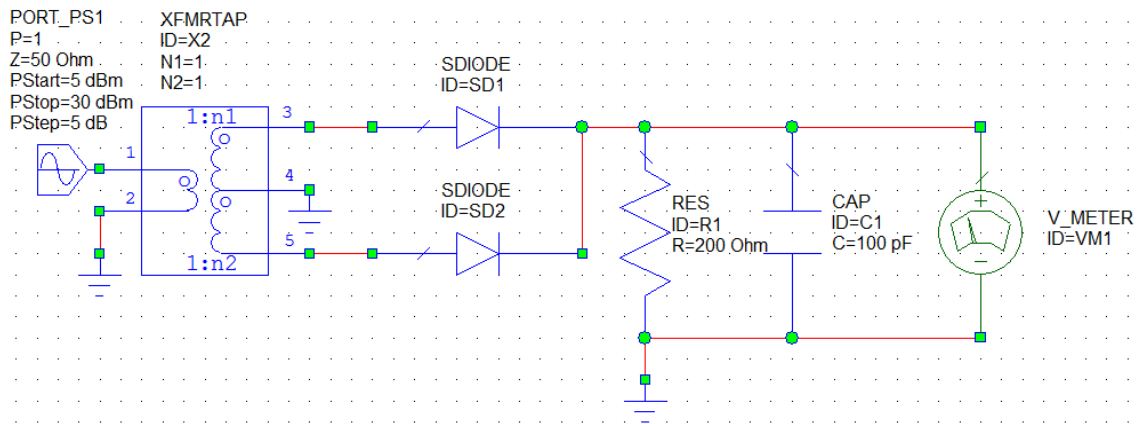


Figura 3.7. Esquemático del rectificador de onda completa (con condensador a la salida).

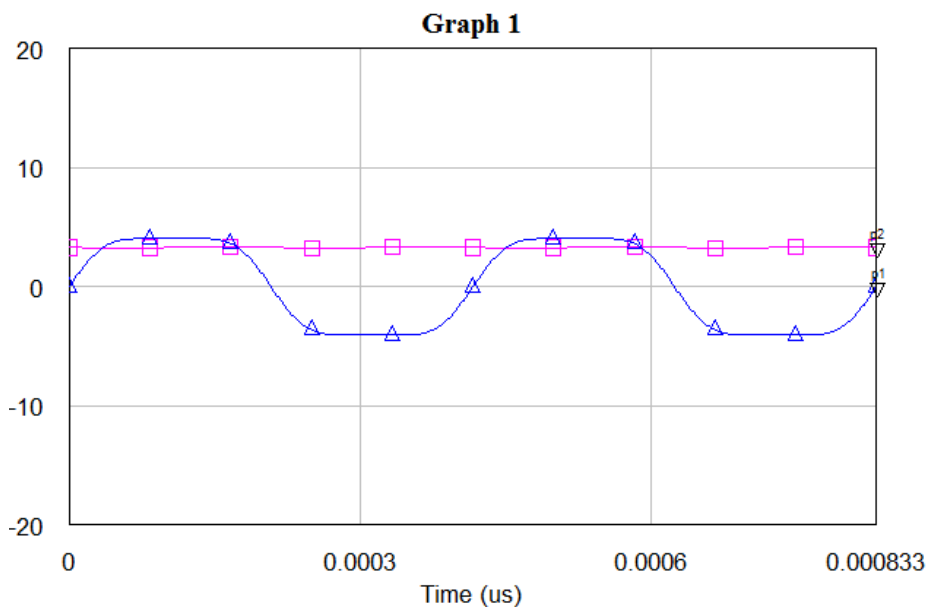


Figura 3.8. Tensión a la entrada (azul) y a la salida (rosa) para el circuito mostrado en la Fig. 3.4.

En la Fig. 3.8 se muestra la tensión a la entrada (en azul) y a la salida (en rosa). Podemos apreciar a la salida una señal de tensión prácticamente continua debido al efecto del condensador.

En la Fig. 3.9 se muestran los valores de tensión (continua) a la salida de nuestro circuito rectificador en función de la potencia que entrega nuestra antena receptora a la entrada. El color azul representa el puerto de entrada y el color rosa la tensión continua que se obtendría a la salida.

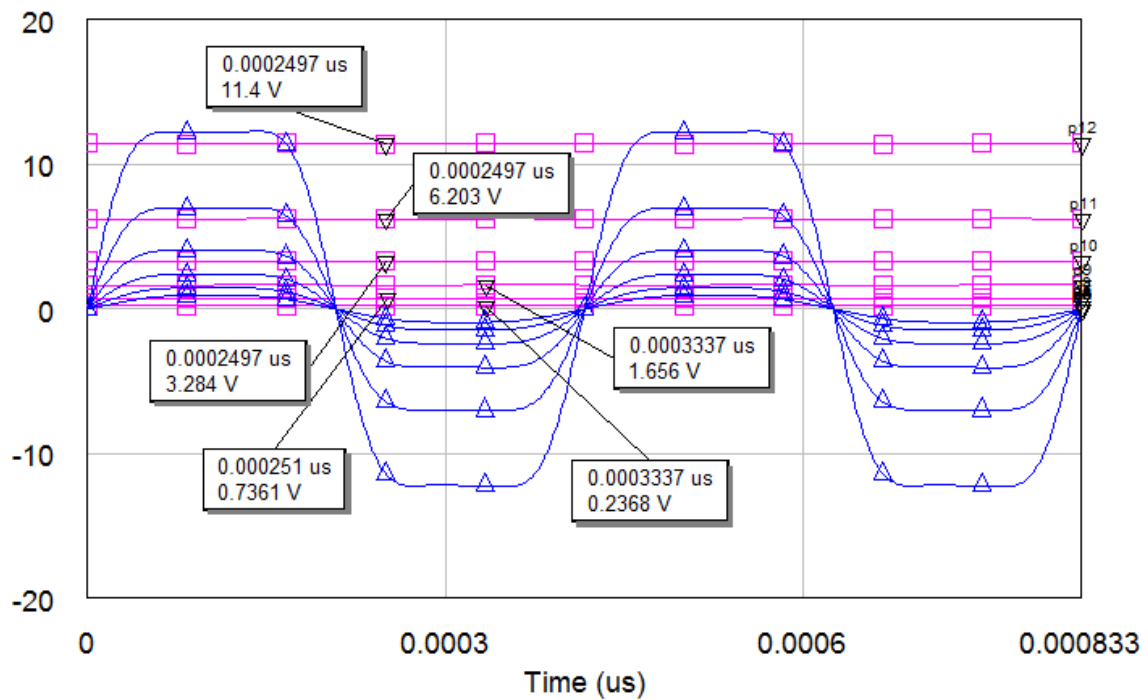


Figura 3.9. Diferentes niveles para la tensión a la entrada (azul) y a la salida (rosa) obtenidos.

En la siguiente tabla mostramos una relación de las diferentes señales de entrada y su respectiva salida en el circuito. Se puede apreciar como al aumentar los dBm que recibe nuestra antena aumenta la tensión de continua obtenida a la salida del rectificador.

Potencia a la entrada del rectificador	Voltaje DC salida del rectificador
5 dBm	0.2368 V
10 dBm	0.7361 V
15 dBm	1.656 V
20 dBm	3.284 V
25 dBm	6.203 V
30 dBm	11.4 V

3.2. Rectificador de 4 diodos.

Otro rectificador muy común y usado en las rectennas [2] es el rectificador de 2 etapas. Dicho rectificador recibe el nombre de multiplicador de Crockroft-Walton. La Fig. 3.10 muestra un esquemático de este rectificador, que en este caso tiene 2 etapas.

La ventaja principal de esta arquitectura es que, a partir de señales de AC de bajo nivel, genera a su salida una tensión de continua elevada. Su principal inconveniente reside en las pérdidas, que son tanto mayores cuanto mayor es el número de etapas.

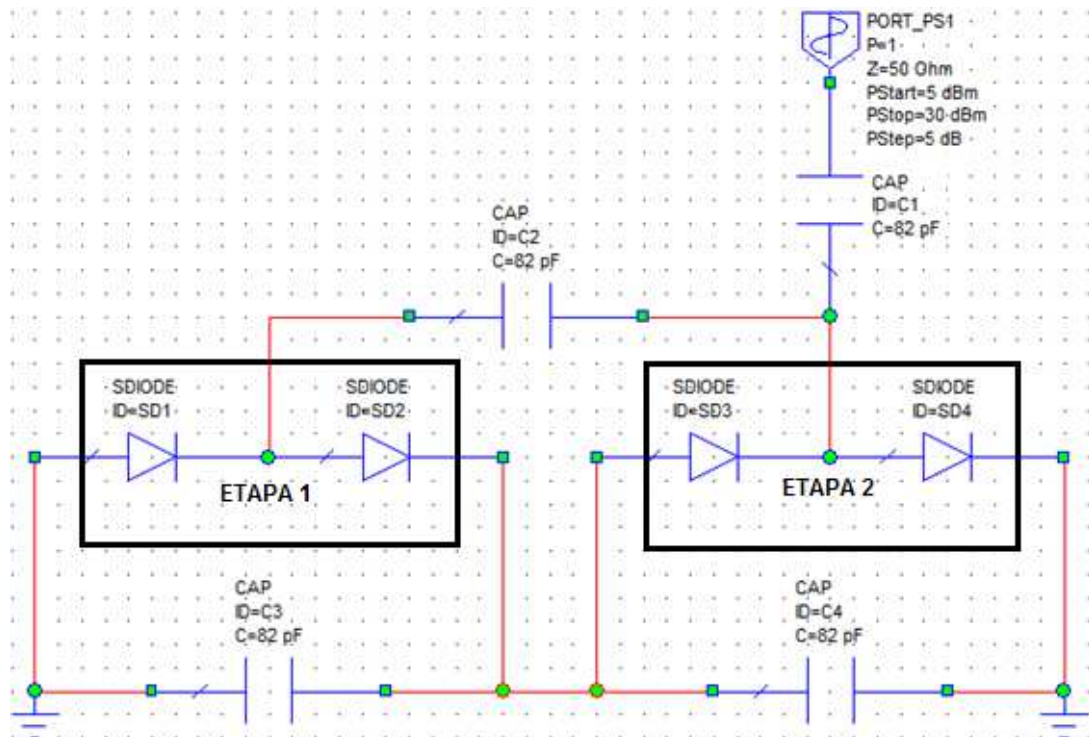


Figura 3.10. Esquemático de un rectificador Crockroft-Walton de dos etapas.

A continuación se representa en la Fig. 3.11 el circuito que corresponde a la celda básica de un multiplicador de tensión (1 Etapa).

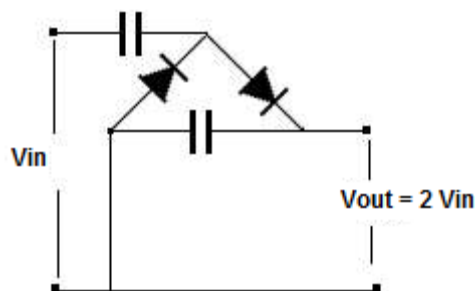


Figura 3.11. Celda básica de un multiplicador de tensión.

Como se puede ver, dicha celda (etapa) está formada por dos diodos y dos condensadores. El voltaje en continua V_{out} es 2 veces el voltaje de pico de la corriente alterna de entrada V_{in} . La salida es de tensión positiva. Esta celda básica, teóricamente, se puede repetir cuantas veces sea necesario, aunque en la práctica a partir de diez veces su rendimiento no resulta aceptable [10].

En el siguiente circuito representado en la Fig. 3.12 se han conectado 5 etapas multiplicadoras en serie, con lo cual el voltaje de salida (positivo) es aproximadamente 10 veces el voltaje de pico de la entrada ($V_{out}=10 V_{in}$).

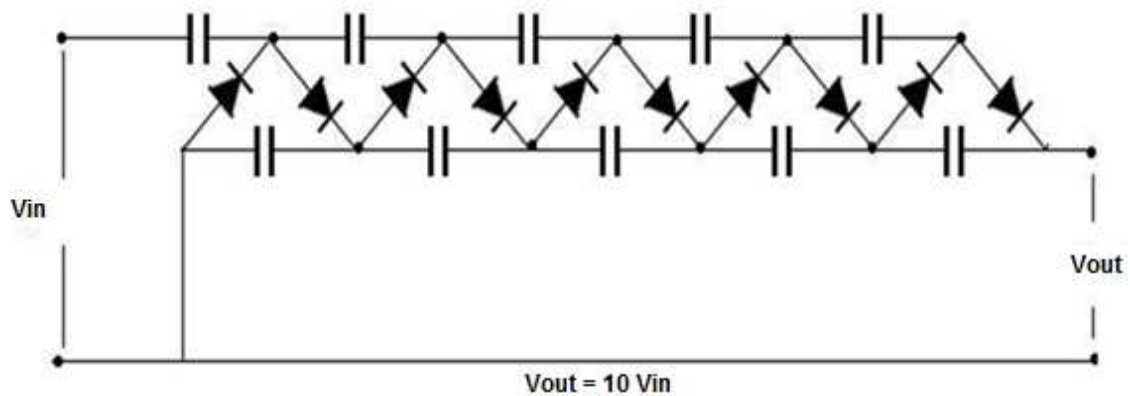


Figura 3.12. Circuito multiplicador de tensión de 5 etapas.

Para obtener voltajes negativos en vez de positivos basta con invertir el sentido de los diodos, pero resulta más conveniente construir un subconjunto que simplemente cambiando las entradas y las salidas para que proporcione voltajes negativos o positivos.

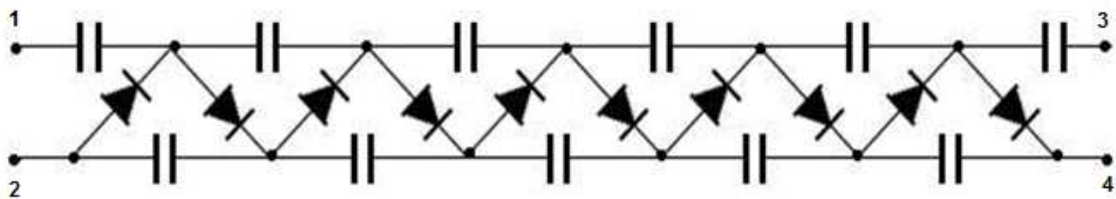


Figura 3.13. Circuito multiplicador de tensión de 5 etapas.

Como puede verse en la Fig. 3.13, si consideramos masa el terminal 2 y conectamos la entrada de alterna al 1, La salida 4 proporcionara frente a 2 una salida positiva. Para obtener salidas negativas se conecta la entrada de alterna a 3, consideremos masa a 4 y la salida la obtenemos en 2 (considerando masa en 4) [10].

3.2.1. Simulaciones

A continuación vamos a simular el circuito rectificador de Crockroft-Walton de dos etapas mediante el esquemático de AWR mostrado en la Fig. 3.14. Primero mediremos a la salida de la primera etapa y a continuación a la salida de la segunda etapa para comprobar que efectivamente se cumple el proceso de multiplicación para la misma señal de entrada.

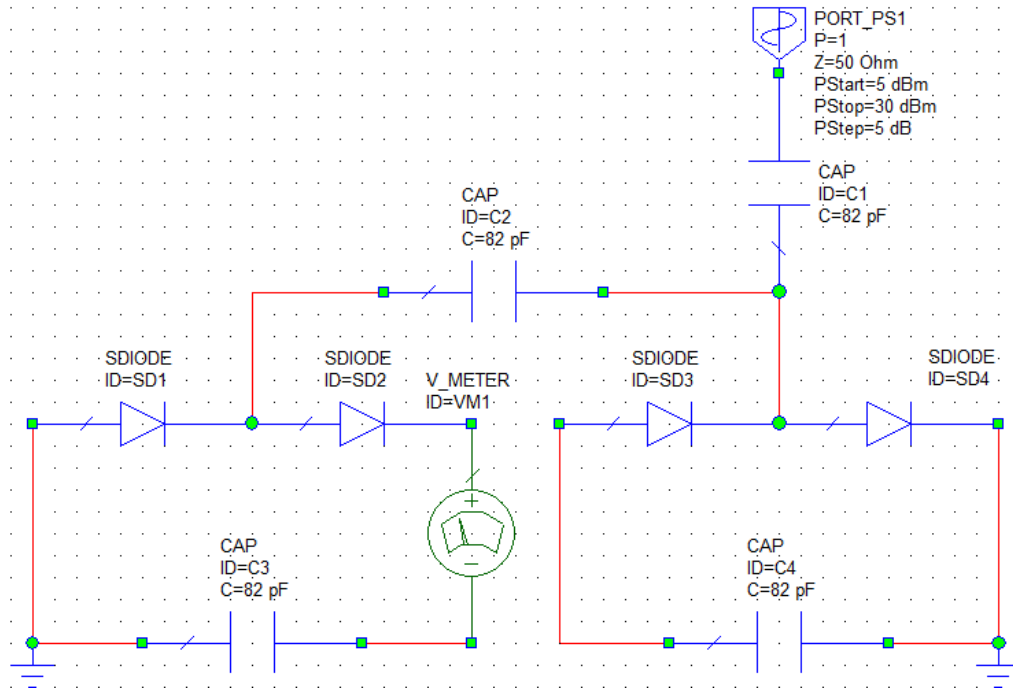


Figura 3.14. Esquemático del rectificador Crockroft-Walton de dos etapas a simular, con el montaje para medir la tensión a la salida de la primera etapa.

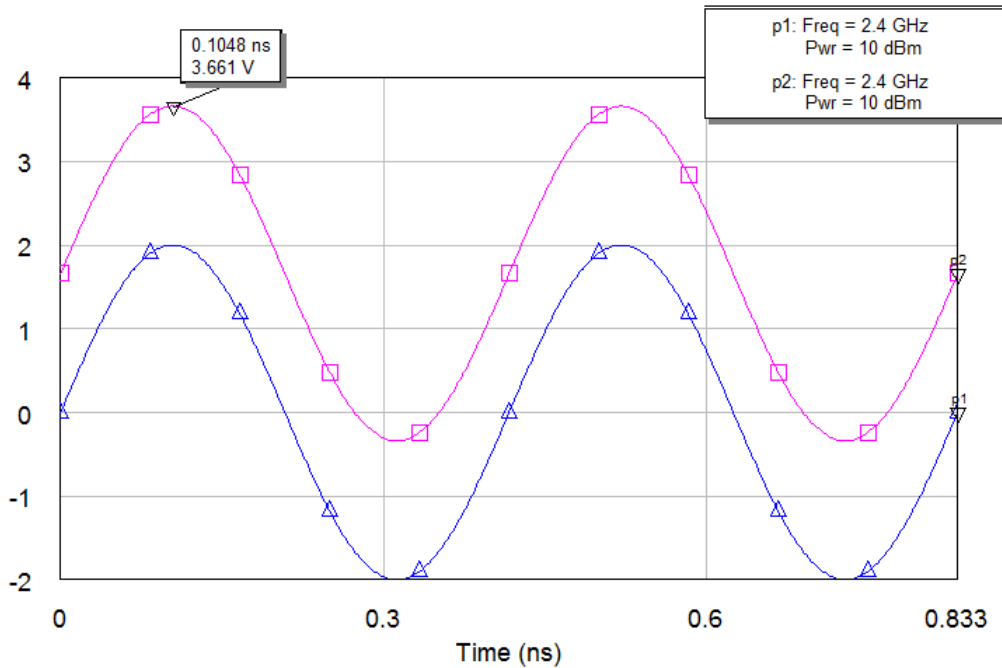


Figura 3.15. Tensión a la entrada (azul) y a la salida de la primera etapa (rosa).

Las tensiones a la entrada y a la salida de la primera etapa se muestran en la Fig. 3.15. Como se observa, para una entrada equivalente a 2 V obtenemos 3.661 V de salida, cumpliéndose aproximadamente la teoría para una etapa: $V_{out} = 2 V_{in}$. Hay que tener en cuenta que a mayor número de etapas más pérdidas tendremos.

Ahora vamos a medir en la segunda etapa del circuito rectificador, mediante el montaje mostrado en la Fig. 3.16.

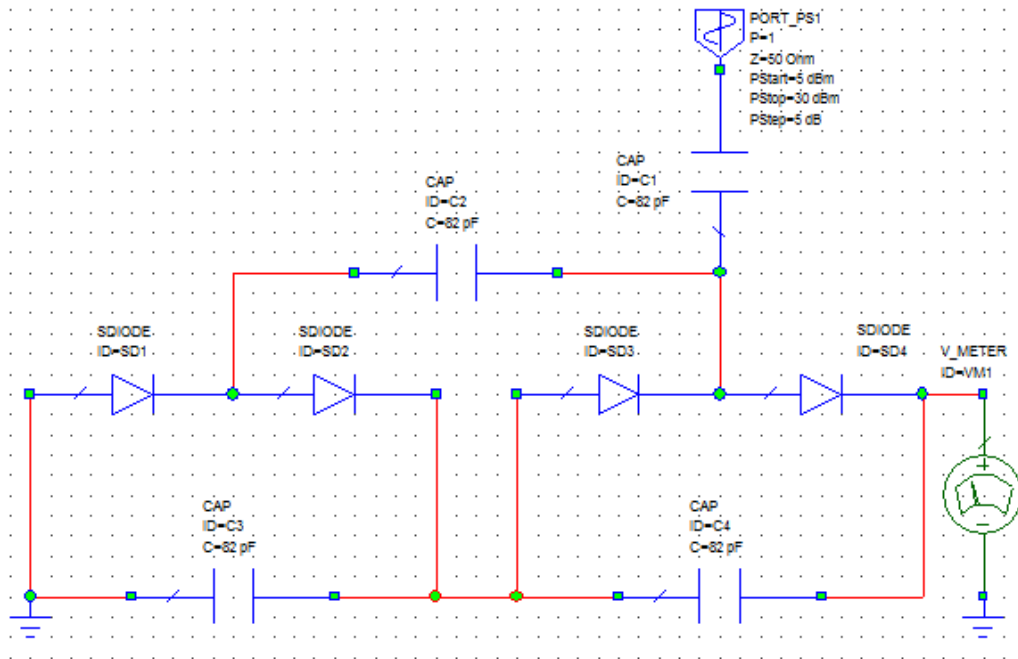


Figura 3.16. Esquemático del rectificador Crockroft-Walton de dos etapas a simular, con el montaje para medir la tensión a la salida de la segunda etapa.

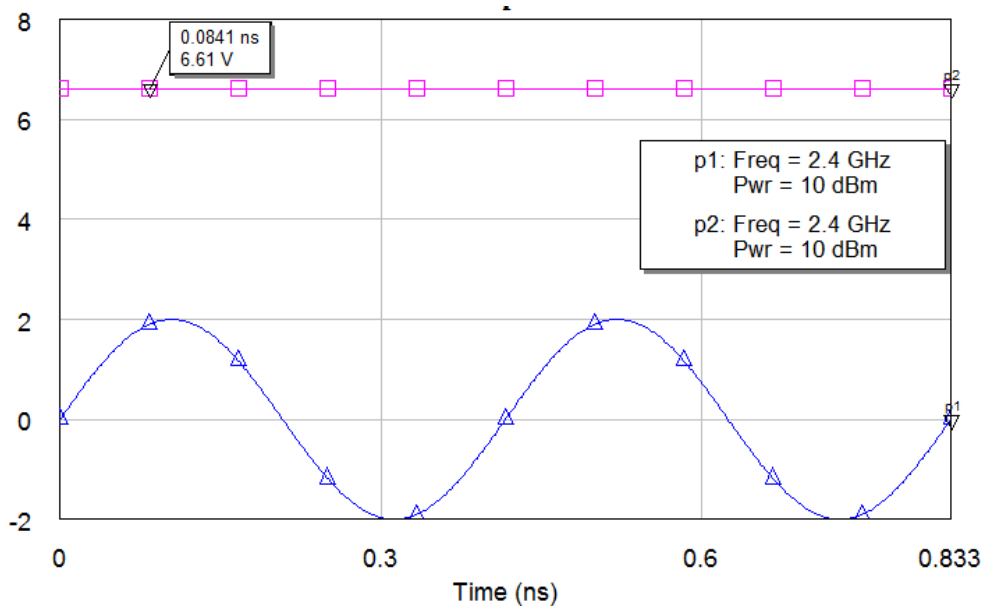


Figura 3.17. Tensión a la entrada (azul) y a la salida de la segunda etapa (rosa).

Como se observa en la Fig. 3.17, para una entrada equivalente a 2 V obtenemos 6.61 V de salida, cumpliéndose aproximadamente la teoría para una etapa: $V_{out} = 4 V_{in} = 4 \times 2 = 8 \text{ V}$ y tenemos 6.61 V. Hay que tener en cuenta que a mayor número de etapas más pérdidas tendremos.

Al igual que hemos hecho anteriormente con el otro rectificador, vamos a representar los valores de tensión a la salida de nuestro circuito rectificador en función de la potencia que obtenga nuestra antena receptora a la entrada. El resultado se puede observar en la Fig. 3.18 y en la tabla siguiente. El color azul representa nuestro puerto de entrada y el color rosa la tensión continua que se obtendría a la salida.

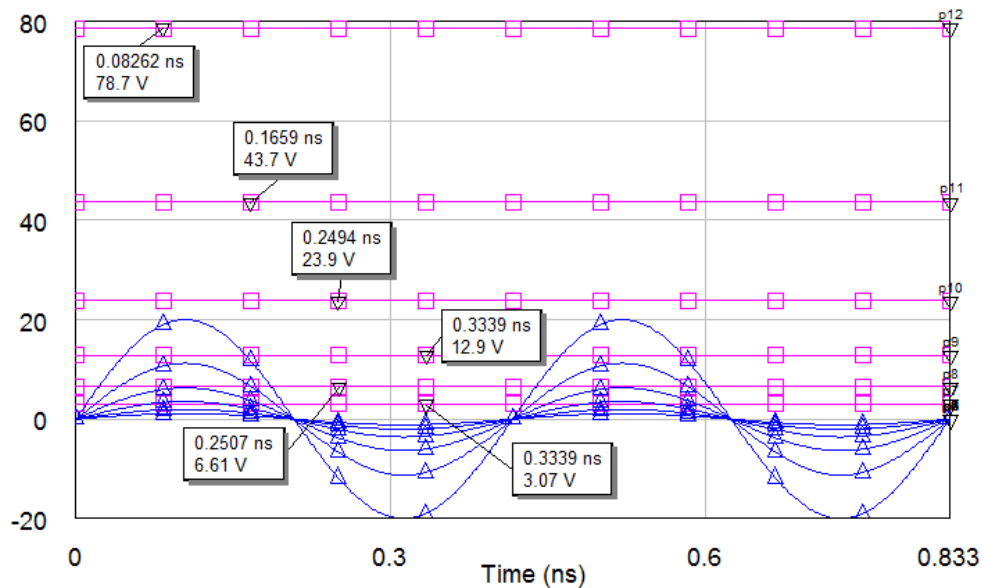


Figura 3.18. Diferentes niveles para la tensión a la entrada (azul) y a la salida (rosa) obtenidos para el rectificador Crockroft-Walton de dos etapas.

Potencia a la entrada del rectificador	Voltaje DC salida del rectificador
5 dBm	3.07 V
10 dBm	6.61 V
15 dBm	12.9 V
20 dBm	23.9 V
25 dBm	43.7 V
30 dBm	78.7 V

3.3. Elección.

Comparando los resultados de ambos rectificadores, los valores de salida en continua del rectificador de 4 diodos son muy superiores al rectificador de onda completa visto anteriormente. Así pues este será el rectificador que elegiremos para nuestros diseños, ya que dispondremos de una potencia de entrada baja (proporcionada por la antena diseñada) y necesitamos obtener el máximo de tensión continua a la salida. El circuito lo implementaremos con tecnología microstrip.

4. FABRICACIÓN Y MEDIDA DEL CONJUNTO ANTENA+RECTIFICADOR

4.1 Elección de los componentes

El siguiente paso es diseñar las pistas (layout) de nuestro circuito rectificador de 4 diodos para implementarlo conjuntamente en el mismo sustrato dieléctrico que las antenas diseñadas anteriormente. Además, deberemos diseñar un adaptador de impedancias de $\lambda/4$, para adaptar la impedancia de las antenas diseñadas (50Ω) a la impedancia de las pistas del circuito rectificador.

La anchura de las pistas del circuito rectificador vendrá determinada por las dimensiones del encapsulado tanto de los diodos Schottky como de los condensadores. Para saber dicha dimensión, consultaremos el catálogo de los fabricantes. Para los condensadores se ha elegido el modelo 0805 de la serie "U" [11] [12] designado para aplicaciones de comunicaciones del catálogo AVX RF que se muestra en la Fig. 4.1.

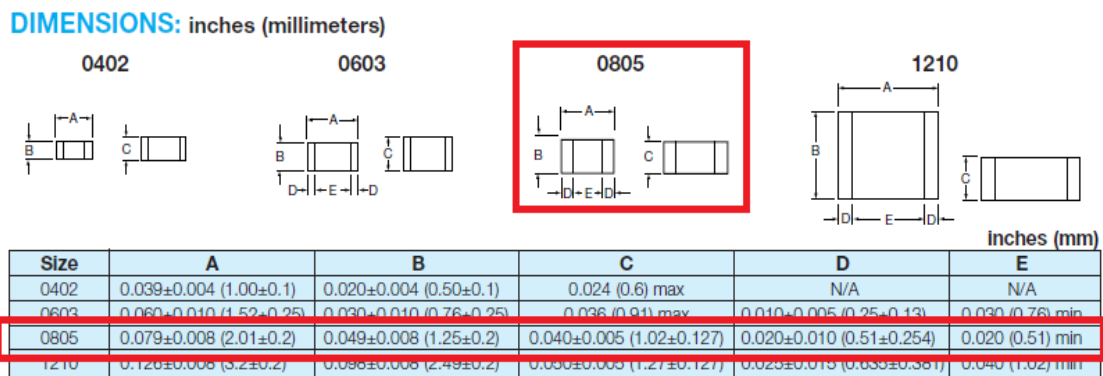


Figura 4.1 Dimensiones del condensador 0805 del catálogo AVX RF.

Para los diodos Schottky se ha elegido el modelo SOT-23 de la serie SMS 7621-005LF del catálogo de SkyWorks [14]. Internamente funcionan como dos diodos Schottky en serie por lo que necesitaremos solamente dos circuitos integrados de este modelo en vez de cuatro.

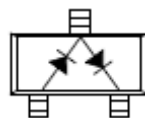


Figura 4.2 Diseño interno del circuito integrado modelo SOT-23.

En cuanto a sus medidas, son las mostradas en la Fig. 4.3:

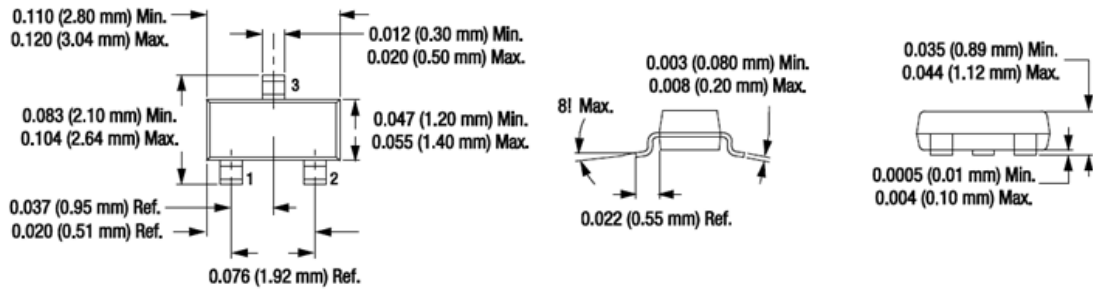


Figura 4.3 Medidas detalladas del diodo Schottky modelo SOT-23.

Finalmente, considerando las dimensiones mostradas de los condensadores y del circuito integrado correspondiente a los diodos Schottky, la anchura elegida para las pistas del circuito integrado es de 1,25 mm.

4.2 Diseño del Adaptador de $\lambda/4$ para las antenas diseñadas.

Para diseñar el adaptador de $\lambda/4$ que se puede ver en la Fig. 4.4 utilizaremos el software TXLINE (Fig. 4.5) incluido en el programa Microwave Office. Dicho software permite calcular la impedancia característica de una determinada línea de transmisión en función de la anchura y de las características del sustrato empleado..

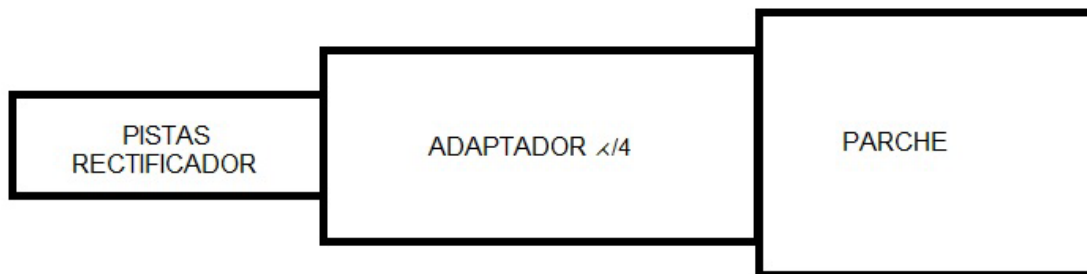


Figura 4.4 Adaptador de $\lambda/4$ ubicado entre el parche y el rectificador

Así pues para una $\epsilon_r=4.4$ de nuestro parche y un grosor de línea para las pistas del rectificador de 1,25mm obtenemos una impedancia característica de la línea del rectificador de 77,27 Ω .

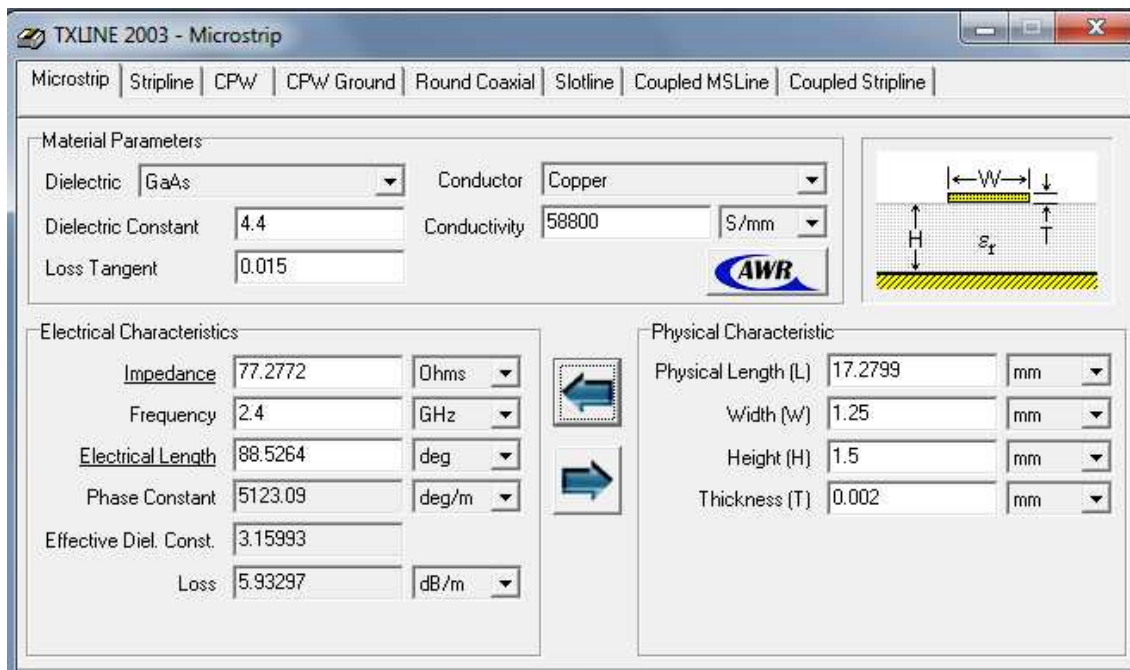


Figura 4.5 Software TXLINE incluido en el programa Microwave Office.

A continuación necesitamos calcular cual será la impedancia característica del adaptador de $\lambda/4$ para que adapte los 50 Ω de la antena diseñada a la impedancia de las pistas del circuito rectificador. Para ello recurriremos a la teoría del adaptador de $\lambda/4$ y calcularemos dicha impedancia característica de la siguiente manera:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{in} \times Z_L} = \sqrt{77,27 \times 50} = 62,15 \Omega$$

Esta será la impedancia característica del adaptador en $\lambda/4$. A continuación haremos el proceso contrario, es decir, insertaremos en el TX Line una impedancia de 62,15 Ω y una frecuencia de 2,4GHz para ver la anchura que necesitamos para la línea del adaptador de $\lambda/4$, obteniendo un valor de 1,95 mm.

Para saber la longitud de nuestro adaptador de $\lambda/4$ recurriremos a su fórmula:

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{59,6mm}{4} = 14,9 \text{ mm}$$

En la Fig. 4.6 se muestra el diseño final de nuestra antena tipo parche, junto con el layout del circuito rectificador de 4 diodos y el adaptador de impedancias. El mismo circuito rectificador y el mismo adaptador de impedancias se han empleado para la integración con la antena de tipo monopolo.

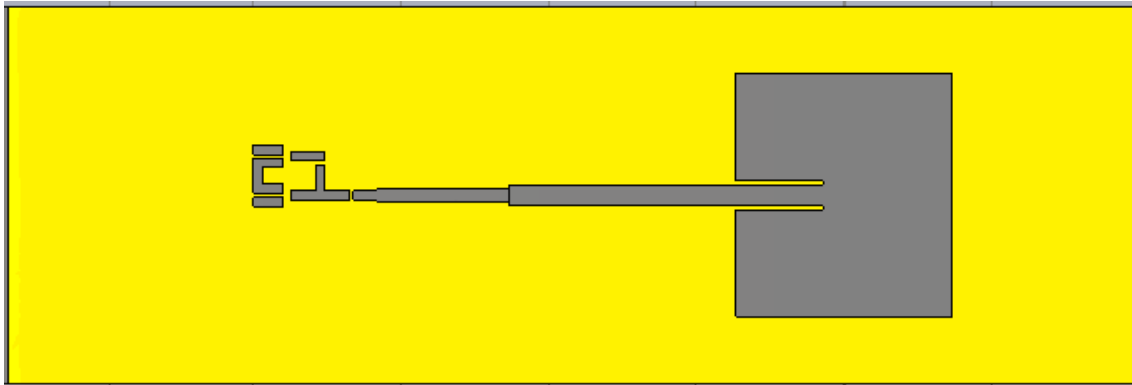


Figura 4.6 Diseño final de nuestra antena formada por el parche más el rectificador.

4.3 Fabricación y medida de las antenas

Para la fabricación del parche se ha utilizado la fresadora de control numérico CNC Datron M25 disponible en el laboratorio del Grupo de Radiación Electromagnética del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) de la UPV. En la Fig. 4.7 se puede ver un detalle de la fabricación de la antena tipo parche con la fresadora.

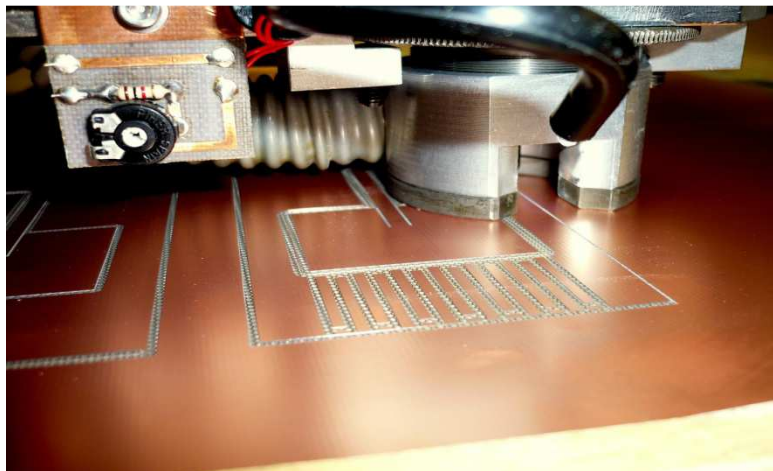


Figura 4.7 Fresadora Datron M25 construyendo el parche rectangular.

Se han construido dos prototipos de parche. El primero simplemente consta del parche rectangular y el segundo consta del parche rectangular más el circuito rectificador tal y como se aprecia en la Fig. 4.8.

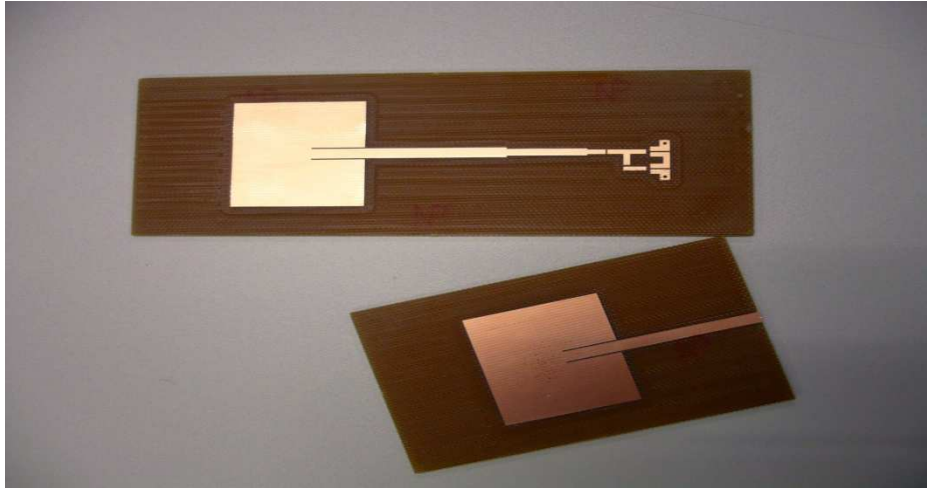


Figura 4.8 Prototipo construido del parche con y sin layout del rectificador

Seguidamente se muestra en la Fig. 4.9 como quedarían las pistas del rectificador con más detalle, una vez soldados los componentes que lo integran.

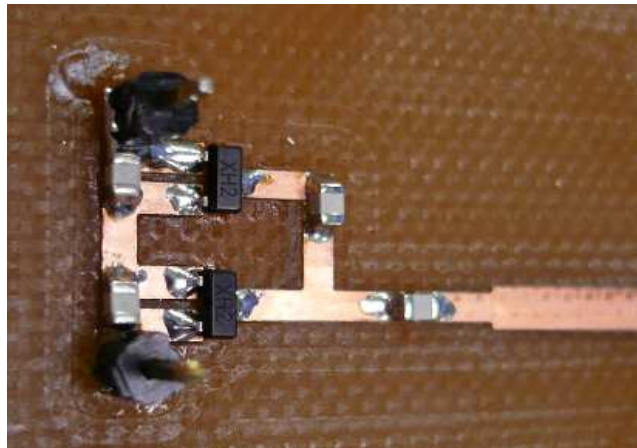


Figura 4.9 Pistas del circuito rectificador con los componentes soldados.

También vamos a mostrar el diseño construido de la antena monopolo en la siguiente figura (Fig. 4.10):

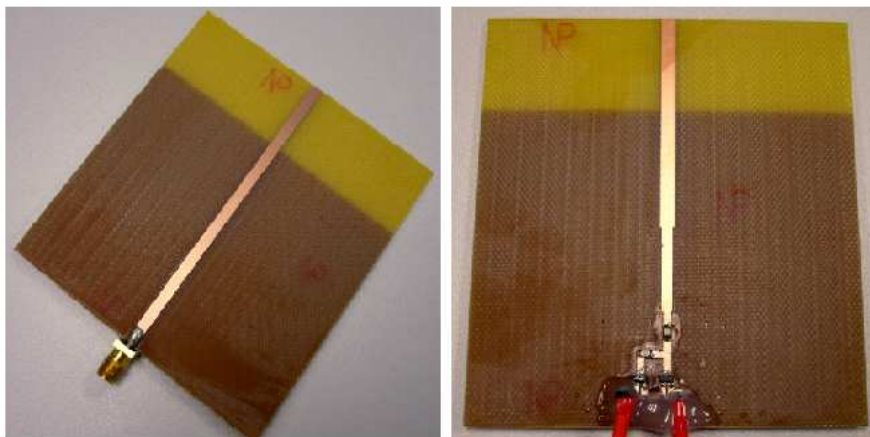


Figura 4.10 Prototipos finales de las antenas monopolo. A la izquierda sin circuito rectificador y a la derecha con el circuito rectificador y el adaptador de impedancias.

A continuación se ha medido el parámetro S_{11} del parche sin el circuito rectificador con el analizador de redes ZVA24 de Rohde & Schwarz disponible en el mismo laboratorio y obteniendo el resultado mostrado en la Fig. 4.11. Los resultados coinciden con los obtenidos en la simulación del capítulo 2.

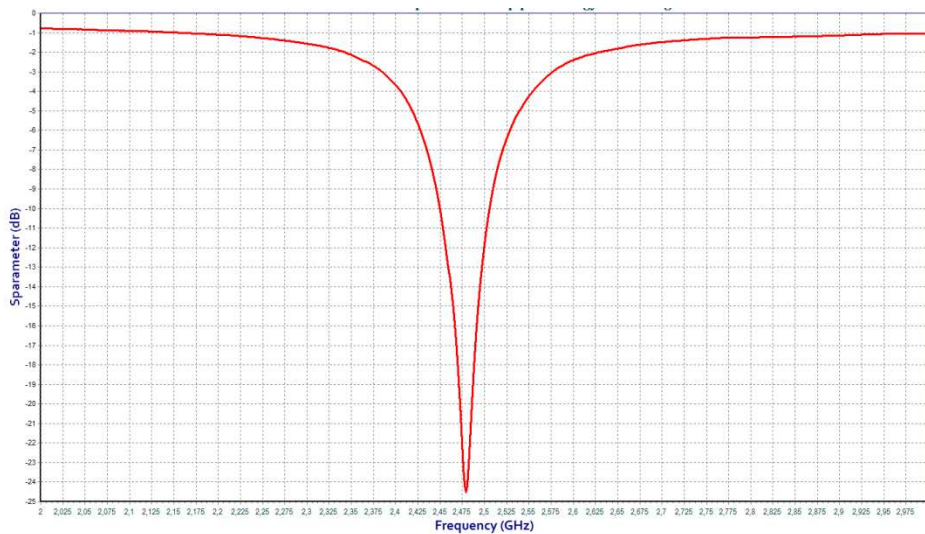


Figura 4.11 Medida del parche construido sin circuito rectificador.

Finalmente también se va a medir el parámetro S_{11} del monopolo tal y como se observa en la Fig. 4.12. Esta medida también coincide con la esperada en la simulación.



Figura 4.12 Medida del monopolo construido sin circuito rectificador.

4.4 Medidas de Energy Harvesting

Para realizar las medidas Energy Harvesting vamos a situar primeramente una antena transmisora que inyecte señal a cada una de las rectenas construidas.

El montaje de medida empleado se muestra en la Fig. 4.13. La antena tipo parche sin rectificador es el elemento radiante transmisor, el cual está conectada directamente al analizador de redes ZVA24 de Rohde & Schwarz que introducirá una señal que será emitida por el parche rectangular para que dicha señal sea recibida por los dos posibles modelos de antenas construidas con el rectificador. Estas antenas están conectadas a un equipo registrador de datos (Agilent 34970A Data Acquisition Unit) que registra la tensión continua a la salida de la rectena. Así pues nuestro parche será el transmisor y como receptores tendremos el parche o el monopolo, ambos con el circuito rectificador incluido.

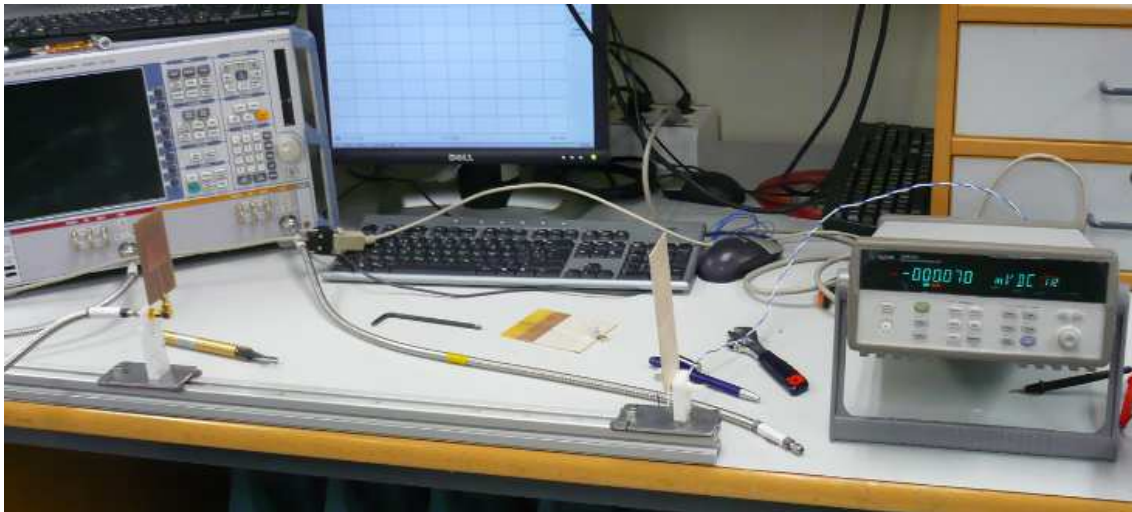


Figura 4.13 Montaje de medida Energy Harvesting de las antenas.

Seguidamente se va a proceder a efectuar medidas, incrementando y disminuyendo la señal de potencia a la entrada (potencia que será radiada por el parche) y también variando la distancia entre transmisor y receptor para que dichas medidas sean recogidas por el equipo registrador de datos.

En la siguiente tabla se muestra el voltaje obtenido (promediado entre 10 muestras tomadas en un corto intervalo de tiempo) para dos distancias distintas y para el parche actuando como receptor, inyectando una potencia de 7 dBm a la antena transmisora.

Potencia de entrada	Distancia	Voltaje obtenido
7dBm	10cm	22,8976 mV
7dBm	20cm	10,4842 mV

Observando la tabla de valores se aprecia fácilmente como al doblar la distancia que separa a transmisor y receptor (de 10 a 20 cm) el voltaje de continua medido en el parche cae aproximadamente a la mitad.

A continuación se muestran más valores de tensión para el parche, variando la distancia.

Potencia de entrada (dBm)	Distancia (cm)	Voltaje (mV)
10	10	41,69459775
10	15	25,88945325
10	20	18,93526175
10	30	9,35538425
10	40	3,949839
10	50	1,9688395
10	80	1,33046875

Se puede observar como el voltaje de salida en continua va decreciendo al ir aumentando poco a poco la distancia de separación, como era de esperar.

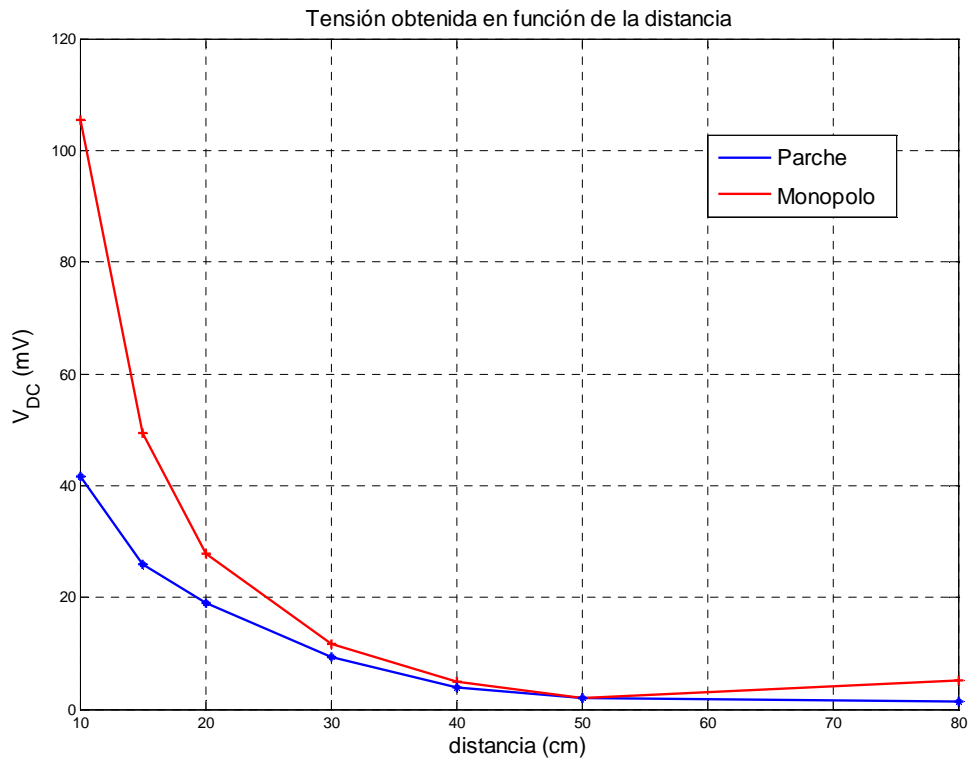
Ahora vamos a centrar nuestras medidas Power Harvesting en la antena monopolo. Para ello nuevamente el transmisor será el parche y el receptor la antena monopolo con el rectificador. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para 7 dBm de potencia de entrada y distintas distancias.

Potencia de Entrada	Distancia	Voltaje obtenido
7dBm	10 cm	60,5017 mV
7dBm	20 cm	14,4715 mV

Seguidamente se muestran más valores de tensión para el monopolo, para 10 dBm de potencia de entrada y a diferentes distancias.

Potencia de entrada (dBm)	Distancia (cm)	Voltaje (mV)
10	10	105,485345
10	15	49,3451875
10	20	27,82290475
10	30	11,651513
10	40	4,93122825
10	50	2,0705325
10	80	5,201798

A modo de comparativa, los valores de tensión obtenidos para el parche y el monopolo en función de la distancia entre las dos antenas se muestran en la Fig. 4.14.



Los resultados obtenidos varían en función de la distancia entre el parche transmisor y el monopolo receptor, tomando valores más altos a menor distancia y valores más bajos a mayor distancia. Si los comparamos con la medida anterior donde el receptor es el parche observamos que estos valores siguen siendo mayores, esto es debido, en parte a que nuestra antena monopolo tiene un diagrama de radiación omnidireccional, por lo tanto capta más potencia de las reflexiones que el parche.

Asimismo, se han medido las rectenas sin inyectarles directamente señal de una antena transmisora, obteniendo resultados muy similares a los que se muestran para una distancia de 80 cm.

Cabe comentar que los resultados finales de la medida proporcionan valores de tensión continua más bajos de lo esperado. Esto es debido, por una parte, a que la pérdidas del material dieléctrico empleado como sustrato (FR4) son muy altas, ya que se trata de un sustrato de bajo coste (y por tanto de baja calidad). En el parche, por ejemplo, ya que vio que la eficiencia de la antena era baja debido a esto. Convendría en futuros diseños emplear sustratos con menos pérdidas.

5. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

Este ha sido un trabajo muy satisfactorio para mí porque se ha aplicado la teoría y los conocimientos recibidos en el Grado de Sistemas de Telecomunicaciones, Sonido e Imagen concretamente en el campo de antenas, electrónica y medios de transmisión para realizar un prototipo de rectenna que finalmente ha sido construido y medido, pudiendo ver una aplicación real de los conceptos estudiados.

Los resultados finales obtenidos de los diseños se aproximan muy poco a los esperados teóricamente, ya que muchos son los factores que influyen en tal desajuste. Podríamos hablar desde la baja calidad del propio dieléctrico en el que han sido construidas nuestras antenas, que introduce muchas pérdidas, o la poca potencia que pueden llegar a captar, parámetro que viene reflejado en función de la proximidad de la antena a la fuente.

Hemos encontrado muchos problemas tanto a la hora de construir nuestra antena monopolo, lo que nos ha obligado a rediseñar dicha antena o contratiempos como que los diodos Schottky empleados son muy sensibles a la energía estática y se rompieron enseguida (hubo que reemplazarlos y poner una cinta electrostática para solucionar dicho problema).

Como líneas futuras de este trabajo se podrían plantear varias, todas ellas orientadas a mejorar la eficiencia de captación de energía de la rectena:

- Rediseñar las antenas y el rectificador empleando un substrato dieléctrico de mejor calidad.
- Estudiar otros adaptadores de impedancia para conectar la antena y el rectificador que sean más eficientes y tengan en cuenta la variación de la impedancia de entrada de la antena con la frecuencia.
- Estudiar y compara con otros circuitos rectificadores que sean más eficientes.

Además, si se diseñara una rectena en el futuro con mejor eficiencia en cuanto a captación de energía, se podrían realizar medidas en diferentes entornos y a diferentes horas del día y realizar una comparativa de energía obtenida en función de las condiciones del entorno. Igualmente se podría trabajar en otras bandas de frecuencia para ver si se obtiene más o menos energía del ambiente.

5.1 Agradecimientos.

Me gustaría antes que nada darle las gracias a Eva Antonino Daviu que ha sido mi tutora durante todo el desarrollo de este proyecto, por resolver todas mis dudas y ayudarme en todo lo posible, ya que sin ella no hubiera sido capaz de hacer este proyecto.

También agradecer a Antonio Vila Jiménez y Bernardo Bernardo Clemente, miembros del iTEAM por haber construido y medido las rectenas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Morcillo Sánchez, V. González Posadas, M. Midrio y D. Segovia Vargas, “*Diseño de una Rectena de onda completa de triple frecuencia*”, Dpto. de Teoría de la Señal y comunicaciones. Universidad Carlos III de Madrid. Avenida de la Universidad 30, 28911, Leganés, Madrid, Spain.
- [2] Dina Bousdar Ahmed, Francisco Yak Ng Molina, Carlos Camacho Peñalosa, “*Rectenna en banda S*”, Universidad de Málaga, Andalucía Tech, E.T.S.I Telecomunicación, Dpto. Ingeniería de Comunicaciones, Campus de Teatinos, 29071 Málaga
- [3] Brent Bauman, Andrew Christianson, Andrew Wegener ,William J. Chappell, “*Dynamic Visualization of Antenna Patterns and Phase-Array Beam Steering*”, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol 54, No.3, June 2012.
- [4] “Smart Home and Home Automation by EnOcean”: https://www.enocean-alliance.org/en/smart_home_automation/
- [5] Página web de CST: <http://www.cst.com>
- [6] Página web de AWR Microwave Office: <http://www.awrcorp.com/es/products/microwave-office>
- [7] A. Cardama, “Antenas”, Ediciones UPC (Universidad Politécnica de Catalunya), 2002.
- [8] Wifi 14 canales: <http://www.vicentenavarro.com/blog/2008/04/26/los-canales-wi-fi-en-la-banda-de-24ghz-80211bg/>
- [9] Victoria Ayllón, Alicia Díaz, M^a José Fernández, Pilar Díaz, “*Electrónica Analógica*”, Ed. Santillana S.A , 1^a Ed. España: Madrid, 1998. ISBN: 84-294-5379-2,
- [10] Rectificador de 4 etapas: <http://www.cientificosaficionados.com/tbo/mat/mat.html>
- [11] Página web del fabricante del Condensador: http://www.avx.com/techinfo_doclisting.asp?Category=RF+Microwave%2FThin+Film
- [12] Catálogo del Condensador: <http://www.avx.com/docs/Catalogs/useries.pdf>
- [13] Página web del fabricante del Diodo: <http://www.skyworksinc.com/>
- [14] Catálogo del Diodo: http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/Surface_Mount_Schottky_Diodes_200041Y.pdf