



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

PROYECTO FIN DE CARRERA

Diseño de un respondedor
pasivo para un radar armónico
de detección de objetos
enterrados en nieve

Autor: Gonzalo Solís Gonzalez

Tutor: José Luis Vázquez Roy

Leganés, Mayo de 2014

Título: Diseño de un respondedor pasivo para un radar armónico de detección de objetos enterrados en nieve

Autor: Gonzalo Solís Gonzalez

Director: José Luis Vázquez Roy

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 7 de Mayo de 2014 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

SECRETARIO

VOCAL

PRESIDENTE

Agradecimientos

Agradezco a mi mujer Yolanda y mis padres todo lo que me han aguantado y apoyado, sin los cuales seguramente no habría llegado hasta este punto de mi formación académica. Lo dedico también a mi hermana que también lo ha sufrido y por supuesto a mi hijo Erik que al final me ha visto terminar la carrera.

Resumen

El presente proyecto se basa en el sistema actual de búsqueda de víctimas de avalanchas conocido como Recco con el fin último de incrementar el número de rescates con éxito en este tipo de accidentes. Para ello nos proponemos ensayar un tipo de antena de parche que pueda ser útil para futuras mejoras del dicho sistema abriendo así una nueva línea de investigación.

El principal objetivo es conseguir una unidad de microondas para las frecuencias de 0,9 GHz y 1,8 GHz, para ello usaremos un tipo de antena de parche con alimentación por acoplo de proximidad sobre tecnología de circuito impreso.

Además de la antena añadiremos un circuito doblador, basando el conjunto en el funcionamiento tipo radar armónico autónomo, el cual, con una sola antena y sin alimentación externa para la electrónica implicada es capaz de recibir en f_0 y transmitir en $2f_0$ simultáneamente.

El PFC se dividirá en dos partes claramente diferenciadas, correspondientes a los dos bloques anteriormente descritos, la antena y el circuito. Para cada uno de los bloques se seguirán prácticamente los mismos pasos que serán los habituales en este tipo de estudios. A partir de unas especificaciones y un catálogo de componentes dadas obtendremos el diseño (dimensiones, formas, conexiones, etc.) que más se ajusten a los requerimientos previos. A continuación, llevaremos las dimensiones y valores obtenidos al software de simulación CST [16] para la antena y Microwave Office [17] para el circuito para comprobar y optimizar en caso que sea necesario, para obtener una respuesta lo mas fiel posible.

Después de todos estos pasos diseñaremos los fotolitos para a continuación obtener las placas de circuito impreso. Montaremos el circuito físico y una vez montado, comprobaremos el funcionamiento mediante el uso de diferentes analizadores en pruebas en cámara anecoica.

Abstract

This Project deals with the improvement of the nowadays rescue systems used with avalanche victims. The final goal is to increase the number of success rescues in these kind of mountain accidents.

The technology used is based in autonomous harmonic radar which, with just a single antenna and no external power is able to receive at f_0 and transmit at $2f_0$ at the same time.

This project deals with the study of the nowadays rescue systems used with avalanche victims. The final goal is to increase the number of success rescues in these kind of mountain accidents. To do this we propose to test a type of patch antenna that may be useful for future improvements of the system and opens a new line of research.

The main objective is to get a microwave unit for frequencies 0.9 GHz and 1.8 GHz, for what we will use a type of patch antenna powered by direct coupling on printed circuit technology.

Apart from the antenna we will also design a circuit doubler, basing the set in harmonic radar operation, which, with a single antenna without external power supply for the electronics involved is able to receive at f_0 and transmit at $2f_0$ simultaneously.

The PFC will be divided into two different parts corresponding to the two blocks described above, the antenna and the circuit. For each of the blocks similar steps will be followed, all of them typical in this kind of studies. From a specification and a catalog of components given we will obtain the design (dimensions, shapes, links, etc..) that best meet the previous requirements. Then take the dimensions and values obtained to simulation software CST [16] for the antenna and Microwave Office [17] for the circuit to test and optimize if necessary, to get an answer as accurate as possible.

After these steps we will design the photoliths in order to get the physical PCB. Then we will mount the physical circuit and once mounted, check the operation by using different analyzers in anechoic chamber tests .

Índice general

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	17
1.1 Introducción.....	17
1.1.1 Grupo <i>Arva</i> :	18
1.1.2 Grupo <i>Recco</i> :	19
1.2 Objetivos.....	21
1.3 Fases del desarrollo	22
1.3.1 Estudio.....	22
1.3.2 Diseño.....	22
1.3.3 Simulación	23
1.3.4 Fabricación	23
1.3.5 Medidas reales	24
1.4 Medios empleados	24
2. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	27
2.1 Antena.....	27
2.1.1 Alimentación simple en el lado a	28
2.1.2 Alimentación simple en el lado b	31
2.1.3 Alimentación doble	32
2.2 Circuito	37
2.2.1 Potencia de entrada al circuito	39
2.2.2 Diodo simple.....	41
2.2.3 Diodo doble paralelo.....	43

2.2.4 Diodo doble antiparalelo.....	44
2.3 Prototipos físicos	48
2.3.1 Medidas circuitales.....	51
2.3.1.1 Antena	51
2.3.1.2 Circuito	52
2.3.2 Medidas funcionales	55
3. CONCLUSIONES	61

Índice de figuras

<i>Figura 1. Siniestros por avalanchas en EEUU 1950 - 2013[10]</i>	18
<i>Figura 2. Ejemplos de radiobalizas ARVA comerciales</i>	19
<i>Figura 3. Ejemplo Recco de rescatador</i>	20
<i>Figura 4. Ejemplo de tag Recco de accidentado</i>	20
<i>Figura 5. Esquema básico de funcionamiento del sistema</i>	20
<i>Figura 6. Profundidades (en sistema imperial) de enterramiento de víctimas</i>	21
<i>Figura 7. Pérdidas introducidas por la capa de nieve</i>	21
<i>Figura 8. Esquema de puertos de la antena</i>	23
<i>Figura 9. Esquema de antena de parche alimentada por acoplo de proximidad</i>	24
<i>Figura 10. Esquema de capas de la antena</i>	28
<i>Figura 11. Esquema básico de antena con alimentación simple en el lado a</i>	28
<i>Figura 12. Coeficiente de reflexión S11 de antena con alimentación simple en el lado a y dimensiones 135 mm x 135 mm</i>	29
<i>Figura 13. Representación antena con alimentación simple y dimensiones 135 mm x 135 mm</i>	29
<i>Figura 14. Representación antena con alimentación simple en lado a y dimensiones 65 mm x 135 mm</i>	30
<i>Figura 15. Coeficiente de reflexión S11 de antena con alimentación simple en el lado a y dimensiones 65 mm x 135 mm</i>	30
<i>Figura 16. Representación antena con alimentación simple en lado b y dimensiones 65 mm x 135 mm</i>	31
<i>Figura 17. Coeficiente de reflexión S11 de antena con alimentación simple en el lado b y dimensiones 65 mm x 135 mm</i>	31
<i>Figura 18. Coeficiente reflexión S11 óptimo de antena con alimentación simple en el lado b y dimensiones 65 mm x 135 mm</i>	32
<i>Figura 19. Representación antena con doble alimentación</i>	32

<i>Figura 20. Parámetros S de antena con doble alimentación</i>	33
<i>Figura 21. Parámetros S de antena con doble alimentación adaptada y optimizada</i> ..	34
<i>Figura 22. Vista superior antena con doble alimentación adaptada y optimizada</i>	34
<i>Figura 23. Vista capa de alimentadores de antena con doble alimentación adaptada y optimizada</i>	35
<i>Figura 24. Diagrama de radiación 3D a 0,9 GHz</i>	35
<i>Figura 25. Detalle de la radiación posterior a 0,9 GHz</i>	35
<i>Figura 26. Diagrama de radiación 3D a 1,8 GHz</i>	36
<i>Figura 27. Detalle de la radiación posterior a 1,8 GHz</i>	36
<i>Figura 28. Diagrama de bloques del tag</i>	38
<i>Figura 29. Equivalentes funcionales del tag a f_0 y $2f_0$</i>	38
<i>Figura 30. Balance de potencias</i>	40
<i>Figura 31. Esquemático de circuito con diodo simple</i>	41
<i>Figura 32. Parámetros S de circuito con diodo simple</i>	42
<i>Figura 33. Esquemático de circuito con diodo doble paralelo</i>	43
<i>Figura 34. Parámetros S de circuito con diodo doble paralelo</i>	43
<i>Figura 35. Esquemático de circuito con diodo doble antiparalelo</i>	44
<i>Figura 36. Parámetros S de circuito con diodo doble antiparalelo</i>	44
<i>Figura 37. Esquemático de circuito con diodo sencillo con 1 red de adaptación tanto a la entrada como a la salida</i>	45
<i>Figura 38. Parámetros S de circuito con diodo sencillo con 1 red de adaptación tanto a la entrada como a la salida</i>	45
<i>Figura 39. Esquemático de circuito con diodo sencillo con 2 redes de adaptación a la entrada</i>	46
<i>Figura 40. Parámetros S de circuito con diodo sencillo con 2 redes de adaptación</i> ..	46
<i>Figura 41. Esquemático de circuito óptimo con líneas de alimentación de la antena</i> ..	47
<i>Figura 42. Parámetros S de circuito óptimo con líneas de alimentación de la antena</i>	47
<i>Figura 43. Layout de la capa de las líneas de alimentación de la antena para fabricar</i>	48
<i>Figura 44. Layout de circuito para fabricar</i>	48
<i>Figura 45. Cotas de prototipo físico de la antena</i>	49
<i>Figura 46. Cotas de prototipo físico del circuito</i>	49
<i>Figura 47. Prototipo físico de la capa de líneas de alimentación de la antena</i>	50
<i>Figura 48. Prototipo físico completo de la antena</i>	50
<i>Figura 49. Prototipo físico del circuito doblador</i>	50
<i>Figura 50. Montaje final de antena y circuito</i>	51
<i>Figura 51. Parámetros S del prototipo de la antena</i>	51
<i>Figura 52. Comparativa de respuesta simulada vs. real del comportamiento circuital de la antena</i>	52
<i>Figura 53. Respuesta del circuito con $P_{IN}=5$ dBm</i>	52
<i>Figura 54. Respuesta del circuito con $P_{IN}=0$ dBm</i>	53
<i>Figura 55. Respuesta del circuito con $P_{IN}=-5$ dBm</i>	53
<i>Figura 56. Respuesta del circuito con $P_{IN}=-10$ dBm</i>	53
<i>Figura 57. Respuesta del circuito con $P_{IN}=-15$ dBm</i>	54
<i>Figura 58. Diagrama de bloques para la prueba de laboratorio de la antena</i>	55
<i>Figura 59. Diagrama esquematizado de radiación con misma polarización de T_x y R_x</i>	56
<i>Figura 60. Diagrama esquematizado de radiación con polarización perpendicular de T_x y R_x</i>	56

<i>Figura 61. Diagrama esquematizado de radiación con diferencia de polarización 45° de Tx y Rx</i>	<i>57</i>
<i>Figura 62. Medida de potencias real P_{IN} vs P_{OUT}</i>	<i>57</i>
<i>Figura 63. Balance de potencias real P_{IN} vs P_{OUT}.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 64. Pérdidas introducidas por la capa de nieve.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 65. Barrido de antena de rescatador en su azimut.....</i>	<i>59</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Valores objetivos de parámetros S del circuito tag</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2. Parámetros técnicos de familia HSMS-28X</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3. Pérdidas de conversión de circuito a 885MHZ vs 900 MHz</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 4. Aislamiento de circuito a 885MHz vs 900 MHz.....</i>	<i>55</i>

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

El presente proyecto surge a raíz de la situación actual del mercado de dispositivos de búsqueda y rescate de individuos sepultados por avalanchas y los métodos utilizados para tal fin.

En los últimos años venimos viviendo una extraordinaria popularización de los deportes de montaña, gracias a la bajada de precios del material mínimo necesario y de la gran aceptación de programas televisivos que acercan al gran público este medio natural que, en ocasiones puede tornarse realmente hostil incluso mortal si no se tiene el conocimiento adecuado. Este hecho sumado a la escasa formación ofertada por las distintas federaciones de montaña hace que el número de accidentes crezca exponencialmente como puede observarse en la siguiente figura.

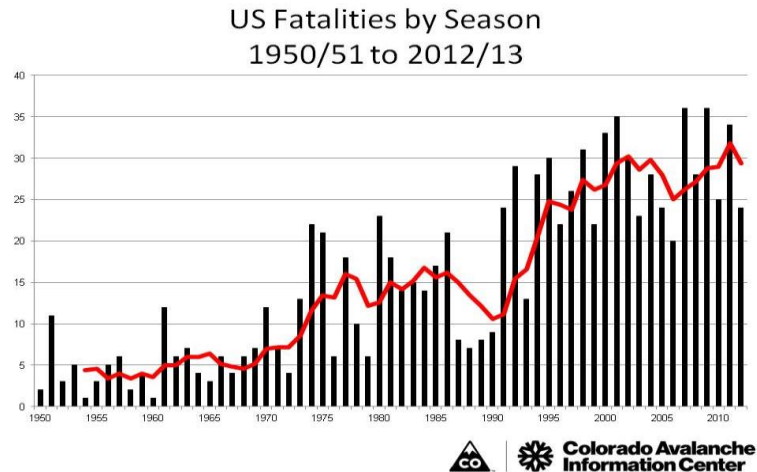


Figura 1. Siniestros por avalanchas en EEUU 1950 - 2013[10]

Entre los accidentes de montaña mas difundidos por los medios de comunicación, por su espectacularidad y por su alto potencial mortal son los causados por aludes de nieve. El rescate en este tipo de siniestros se basa en un pilar fundamental, la rapidez. Para un montañero sepultado por una avalancha la premura con la que el equipo de rescate le localice bajo el manto de nieve y le saque a la superficie es vital, aproximadamente durante los primeros 15 minutos la posibilidad de supervivencia de la víctima supera el 90%, a partir de ese momento las posibilidades descienden drásticamente situándose entorno al 25% después de 45 minutos [6]. Es en este punto donde la tecnología puede aportar todo su potencial para ayudar a salvar vidas.

Actualmente en el mercado, los instrumentos con los que cuentan los equipos de rescate son sondas y radiobalizas de rastreo diseñados para un uso principalmente a pie, debiendo mantener el rescatador su equipo transmisor/receptor lo mas cercano posible al manto de nieve. En diversas pruebas y estudios que se han realizado desde helicópteros se constató que la efectividad de las radiobalizas decrece significativamente conforme la altura sobre el manto de nieve crece. En este sentido se plantea el presente proyecto para buscar una mejora sustancial de la respuesta de estos dispositivos.

Comercialmente existen dos grandes grupos de radiobalizas claramente diferenciados. Ambos grupos se componen básicamente de dos elementos o dispositivos, el que lleva el accidentado y el que lleva el rescatador, la diferencia viene del comportamiento de dichos dispositivos:

1.1.1 Grupo Arva:

- **Rescatador:** En este caso el equipo de rescate lleva un elemento receptor como el de la siguiente figura de tamaño similar a un teléfono móvil convencional.



Figura 2. Ejemplos de radiobalizas ARVA comerciales

Dicho receptor rastrea la recepción de una señal de 457 kHz emitida por el transmisor que tiene el accidentado. Una vez encontrada dicha señal el dispositivo estima la distancia y la dirección de la que proviene la señal de la víctima y lo presenta mediante una interfaz de usuario mas o menos intuitiva. A partir de ahí es labor del rescatador interpretar la interfaz y caminar en la dirección correcta hasta colocarse encima del accidentado y proceder a palear nieve hasta llegar al herido.

- **Accidentado:** El dispositivo que porta el accidentado es el mismo que el del rescatador con la diferencia de estar funcionando en un simple modo emisión a 457 kHz. La principal desventaja de este grupo de radiobalizas es que el éxito del rescate depende del correcto funcionamiento del dispositivo de la víctima, que no funcionará en caso que se quede sin batería, haya sufrido un golpe durante la avalancha y se haya roto o que el usuario no se haya acordado de llevarlo en modo transmisor desde el inicio de su actividad deportiva.

1.1.2 Grupo *Recco*:

- **Rescatador:** El dispositivo que porta el equipo de rescate es ligeramente más grande que en el grupo anterior, como se puede ver en la Figura 3, debido a que tiene un funcionamiento algo más complejo que en el caso del Arva. En esta ocasión simultanea emisión a 0.9 GHz y recepción a 1.8 GHz. Esta conversión de frecuencias se realiza en el dispositivo que porta el accidentado, cuyo funcionamiento veremos en el siguiente punto. Con la señal recibida se procede del mismo modo que en el grupo del Arva, el dispositivo traduce el nivel y la procedencia de la señal, la presenta en la interfaz de usuario y es el propio rescatador el que interpreta los datos ofrecidos para llegar lo antes posible a la posición donde se encuentra sepultada la víctima.



Figura 3. Ejemplo Recco de rescatador

- **Accidentado:** Se trata de un tipo de reflector, o tag, con la particularidad de recibir a f_0 y transmitir a $2f_0$ al mismo tiempo gracias a la presencia de un elemento no lineal. Debido a esta simplicidad de funcionamiento es relativamente sencillo colocarlo en cualquier prenda de ropa que forme parte del equipo habitual de un montañero. Esto evita el mal funcionamiento o funcionamiento incorrecto que se podían dar en el caso del Arva, es decir, el montañero no tiene ni que preocuparse de encenderlo ni de asegurarse que tiene batería suficiente y muy poco probable que se dañe por un golpe durante la avalancha. Un ejemplo de un reflector tipo Recco puede observarse en la figura a continuación.



Figura 4. Ejemplo de tag Recco de accidentado

En la siguiente figura exponemos el funcionamiento básico del sistema que vamos a diseñar. En ella se puede apreciar los 3 pasos principales de la comunicación. Primero el rescatador transmite en f_0 y recibe el tag que porta la víctima. En segundo lugar el propio tag duplica la frecuencia de la señal recibida. Por último el tag transmite en $2f_0$ y recibe el rescatador.

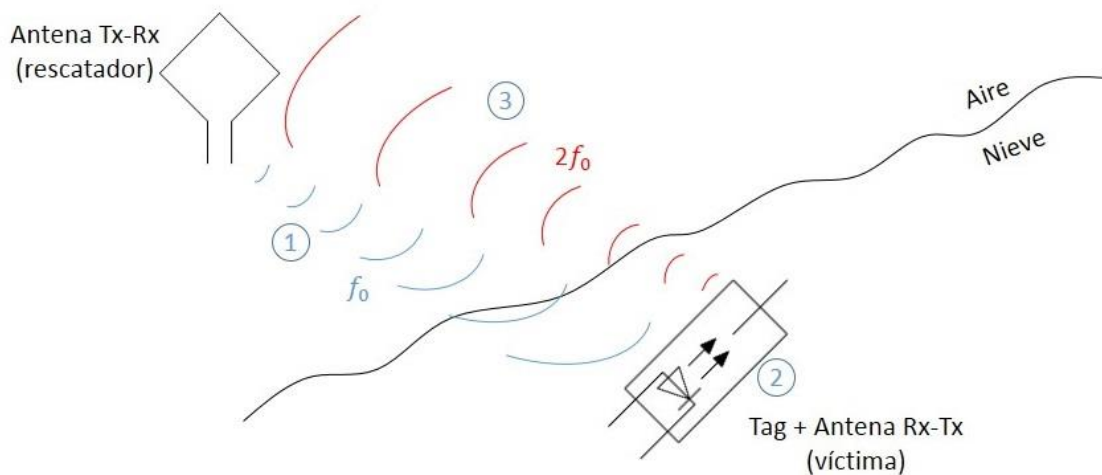


Figura 5. Esquema básico de funcionamiento del sistema

1.2 Objetivos

Según el CAIC [10], como se puede ver en la Fig. 6 aproximadamente a 2m de profundidad (7ft) la probabilidad de supervivencia es prácticamente nula, en parte debido a la deficiente respuesta del sistema Recco actual.

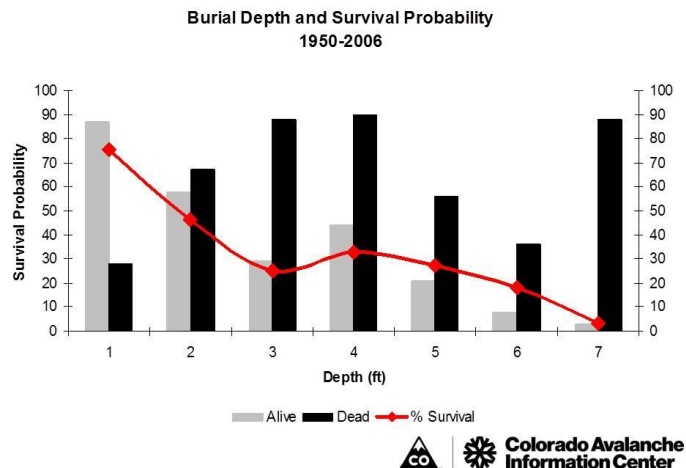


Figura 6. Profundidades (en sistema imperial) de enterramiento de víctimas

Por tanto, nos pondremos como objetivo principal la mejora y optimización del sistema detector Recco para una distancia $T_x - R_x$ de 2 m en espacio libre, no obstante como objetivo secundario intentaremos forzar una respuesta óptima del sistema a 15 m también en espacio libre. La razón de buscar una respuesta óptima a 15 m es que la capa de nieve introduce mucha atenuación como se deduce del estudio de la Universidad de Zaragoza [3] titulado “*Modeling of Through-the-Snow Electric Field Propagation for Rescue Systems*”.

En dicho estudio se centran en las frecuencias utilizadas en los dispositivos tipo ARVA, es decir en 433 MHz y 2.45 GHz pero, interpolando de la gráfica que publicaron, mostrada a continuación podemos estimar que las pérdidas a 15 m introducidas por la capa de nieve son aproximadamente unos 15 dB.

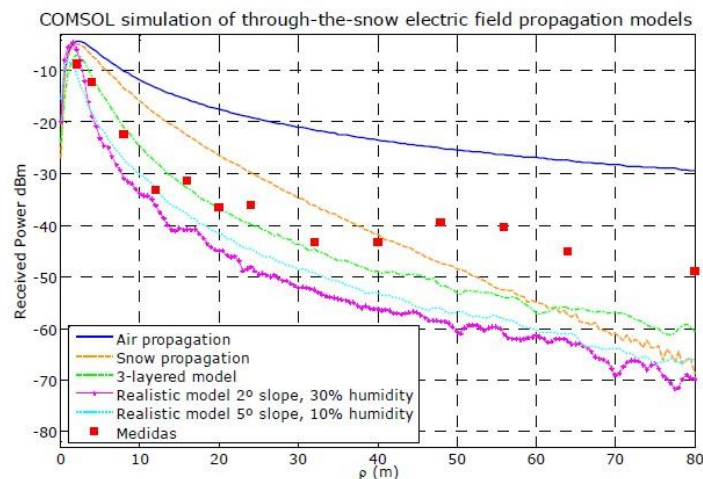


Figura 7. Pérdidas introducidas por la capa de nieve

1.3 Fases del desarrollo

1.3.1 Estudio

En esta primera fase llevaremos a cabo un trabajo de documentación y estudio de la tecnología actual disponible en el mercado. Esta visión global nos permite fijar y definir los objetivos del proyecto.

Una vez definidas las metas del proyecto realizamos una comparativa y valoración de las distintas ramas de la radiofrecuencia y microondas para determinar que tipo de dispositivo puede satisfacer mejor nuestras demandas de rendimiento.

1.3.2 Diseño

Una vez elegida la tecnología de radar armónico, nos dedicaremos por un lado a diseñar una antena capaz de dar un rendimiento óptimo a una f_0 y a su correspondiente $2f_0$.

Para facilitar la optimización de los distintos elementos del sistema diseñaremos la parte circuital y la antena por separado con la misma impedancia de referencia (50Ω) para posteriormente ensamblar ambos prototipos.

Por un lado, para la parte circuital/tag nos fijaremos en las pérdidas de conversión a f_0 (S_{21}), adaptaciones de ambos puertos de entrada y salida (S_{11} y S_{22}) y aislamiento a $2f_0$ (S_{12}), teniendo los siguientes objetivos:

Parámetro	Valor objetivo
S_{21}	-6 dB
S_{11}	-10 dB
S_{22}	-10 dB
S_{12}	-20 dB

Tabla 1. Valores objetivos de parámetros S del circuito tag

Por otro lado, para el diseño de la antena nos fijaremos en la adaptación del puerto 1 a f_0 y del puerto 2 a $2f_0$ (objetivo -10 dB) y el aislamiento entre el puerto 2 y el 1 a $2f_0$ y entre el 1 y el 2 a f_0 (objetivo -20 dB), comprobando mediante simulaciones los diagramas de radiación. A continuación mostramos un esquema de la antena que esperamos diseñar donde se pueden ver los puertos previamente enunciados.

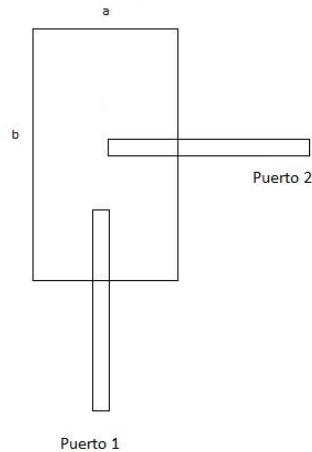


Figura 8. Esquema de puertos de la antena

En cuanto a las potencias emitidas por el equipo del rescatador las vamos a fijar entre 0.5W y 1 W

1.3.3 Simulación

A continuación de la fase de diseño llevaremos a cabo las simulaciones correspondientes de los prototipos virtuales usando software específico de diseño y simulación para obtener las respuestas tanto circuital como funcional que posteriormente compararemos con los resultados obtenidos con los prototipos físicos reales.

1.3.4 Fabricación

Para la fabricación de los prototipos, mandamos los diseños a oficina técnica y, una vez recibidos hacemos el montaje de los conectores, componentes y sustratos necesarios.

Esperamos que el prototipo, obtenido tendrá un tamaño considerable, aspecto no preocupante puesto que el llegar a un diseño compacto y comercializable excede ampliamente el alcance el presente proyecto, que simplemente pretende ser una primera aproximación al uso de este tipo de antenas en dispositivos de rescate, así como poner en práctica un procedimiento de diseño empleando técnicas de análisis de onda completa [16] y técnicas circuitalas convencionales [17].

1.3.5 Medidas reales

La fase de medidas reales la dividimos igualmente en dos. Con la primera medimos la respuesta circuital de los prototipos para obtener los correspondientes parámetros S funcionando en condiciones no lineales o de “gran señal”, y con la segunda evaluamos la respuesta funcional del conjunto del sistema para conseguir el diagrama de radiación de la antena.

1.4 Medios empleados

Para las fases de diseño y simulación utilizaremos herramientas software específicas como el CST Studio Suite 2010 [16] para la parte de la antena y el AWR Microwave Office [17] para la parte del circuito doblador.

Para la realización de las medidas reales utilizaremos el siguiente hardware:

- **Agilent NS181A MXG Analog Signal Generator.**- Para generar la señal de 900 MHz
- **HP 8594E Spectrum Analyzer.**- Para analizar la señal de 1,8 GHz generada por el circuito doblador.
- **Agilent E8364B PNA Network Analyzer.**- Para medir los parámetros S

Trabajaremos con tecnología de circuito impreso tanto para la antena como para el circuito del TAG sobre sustrato de bajo coste como la fibra de vidrio. El único elemento concentrado que utilizaremos será el diodo schotkky, de este modo evitaremos las pérdidas que puedan introducir este tipo de elementos. Ante tal limitación, las redes de adaptación del elemento no lineal las construiremos con elementos distribuidos, en concreto stubs paralelos.

En el caso de la antena, emplearemos un parche con excitación por acoplo de proximidad, introduciendo así un importante componente de innovación. Se trata de una antena microstrip con alimentación por proximidad, lo que permite mayor flexibilidad a la hora del diseño y optimización de los diferentes elementos de la antena por separado. El esquema básico de una antena de este tipo se muestra en la siguiente figura.

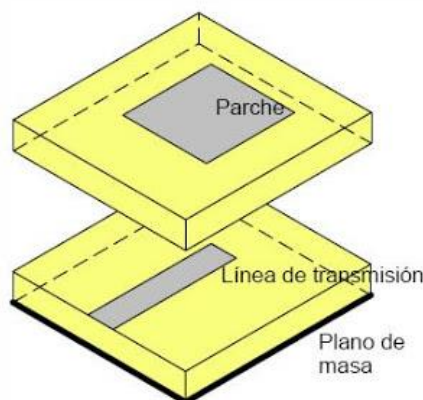


Figura 9. Esquema de antena de parche alimentada por acoplo de proximidad

El funcionamiento básico de una antena microstrip consiste en que el parche forma una cavidad resonante en el dieléctrico (en nuestro caso será espuma) siendo la dirección principal de radiación la perpendicular al eje del parche (para los modos TM_{10} y TM_{01}) y contraria al plano de masa.

En concreto en el tipo de alimentación elegido, acoplo de proximidad, funciona de tal modo que pese a no tener contacto físico entre la línea de transmisión y el parche, las líneas del campo que circula por la línea de transmisión se acoplan al parche durante el recorrido de la línea por debajo del mismo.

Para añadir otro punto innovador diseñaremos una antena con dos puertos para no duplicar antenas en el tag y así utilizar el mismo elemento para recibir a f_0 y transmitir a $2f_0$ simultáneamente.

Capítulo 2

Desarrollo del proyecto

Como ya se ha comentado, el objetivo del presente proyecto es la optimización y mejora de la tecnología actual de los dispositivos conocidos como Recco.

El sistema completo consta de dos partes claramente diferenciadas, estas son, un emisor/receptor que porta el equipo de rescate, y un *tag* que actúa también como emisor/receptor y que porta la víctima que ha quedado atrapada por la avalancha.

Dividiremos el diseño del TAG en dos bloques, la antena de parche por un lado y el circuito de recepción/alimentación por otro.

2.1 Antena

Por la propia idea de funcionamiento del TAG la antena que utilizemos debe ser la misma para recibir en f_0 y para emitir en $2f_0$. Para ello lo que haremos será utilizar un parche rectangular y, por debajo separadas del parche con una capa de espuma dos líneas microstrip sobre fibra de vidrio, una perpendicular al lado a del parche y otra perpendicular al lado b. Así mismo añadir que usaremos una antena con plano de masa, cuyo tamaño va a reducirse en la medida de lo posible para este tipo de antena y que esto afectará al proceso de optimización de este elemento.

A continuación mostramos el esquema de las capas que tendrá el diseño de la antena:

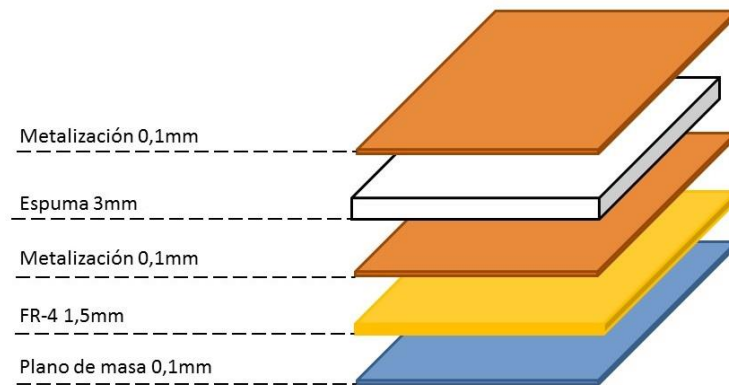


Figura 10. Esquema de capas de la antena

Para una primera aproximación del diseño del parche, podemos basar nuestros cálculos en la siguiente fórmula:

$$f_c = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}}$$

Siendo L la dimensión a o b para f_0 o $2f_0$ respectivamente.

Asumiendo dieléctrico aire tenemos un resultado de un $b \approx 80,32\text{cm}$ y un $a \approx 40,16\text{cm}$. Este resultado se usará como punto de partida en el proceso de optimización.

2.1.1 Alimentación simple en el lado a

Un primer esquema de la antena con una sola línea μ strip de alimentación por acoplo, como se ha explicado en el punto 1.4 sería como sigue:

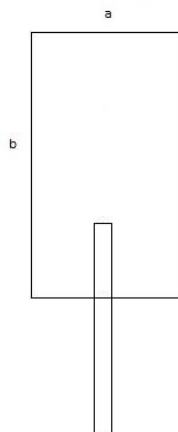


Figura 11. Esquema básico de antena con alimentación simple en el lado a

La frecuencia de funcionamiento de la antena según el esquema anterior vendrá determinada por la longitud a .

Para el diseño del parche rectangular haremos una primera aproximación mediante un parche cuadrado usando condiciones de contorno “Open + Add Space”, por el cual llegamos a una respuesta como la mostrada en la figura 12 para unas dimensiones del parche de 135mm x 135mm como el mostrado en la figura 13.

En cuanto a la línea de alimentación, se ha diseñado para que su impedancia característica sea 50Ω . En la simulación en CST utilizamos un puerto de guíaonda para excitar la estructura colocado en el plano perpendicular al plano del parche y con unas dimensiones de 33,6 mm x 26 mm.

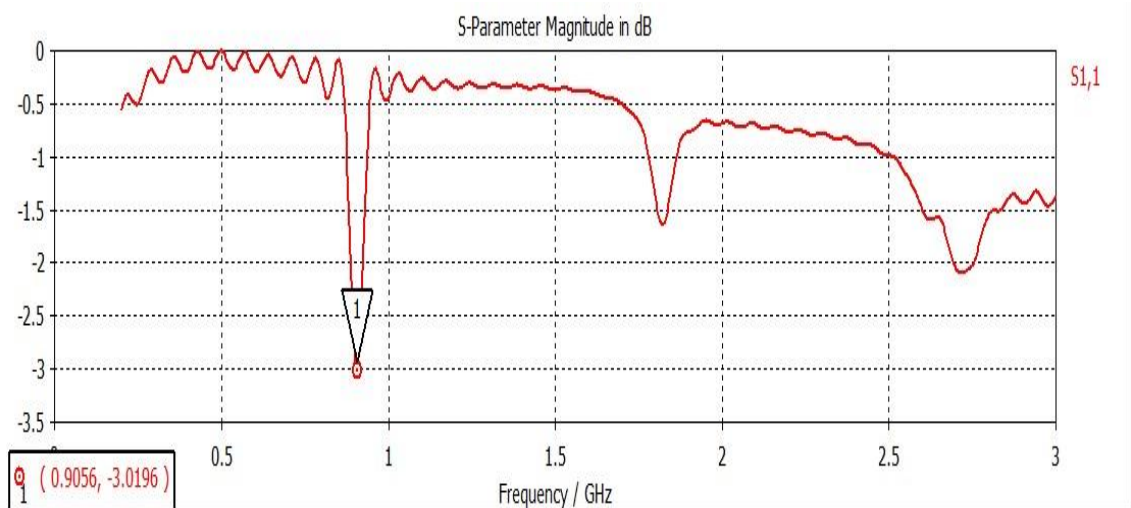


Figura 12. Coeficiente de reflexión S₁₁ de antena con alimentación simple en el lado a y dimensiones 135 mm x 135 mm

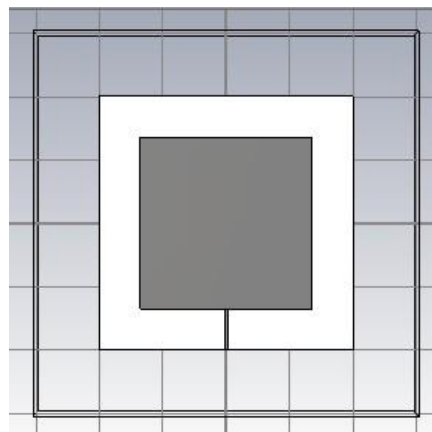


Figura 13. Representación antena con alimentación simple y dimensiones 135 mm x 135 mm

Como se puede observar a f_0 tenemos un nivel de adaptación bastante pobre, además de registrarse otros modos superiores que pueden interferir en el funcionamiento del sistema que buscamos a $2f_0$. Para mejorarlo reduciremos la dimensión de a, pasando a un parche rectangular, llegando a una adaptación óptima de -12dB con unas dimensiones de a=65mm y b=135mm con un parche como el mostrado en la figura 14, obteniendo la respuesta mostrada en la figura 15.

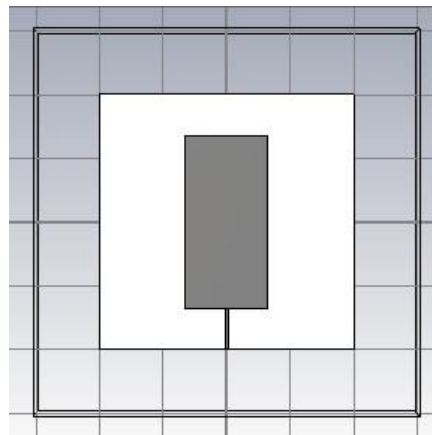


Figura 14. Representación antena con alimentación simple en lado a y dimensiones 65 mm x 135 mm

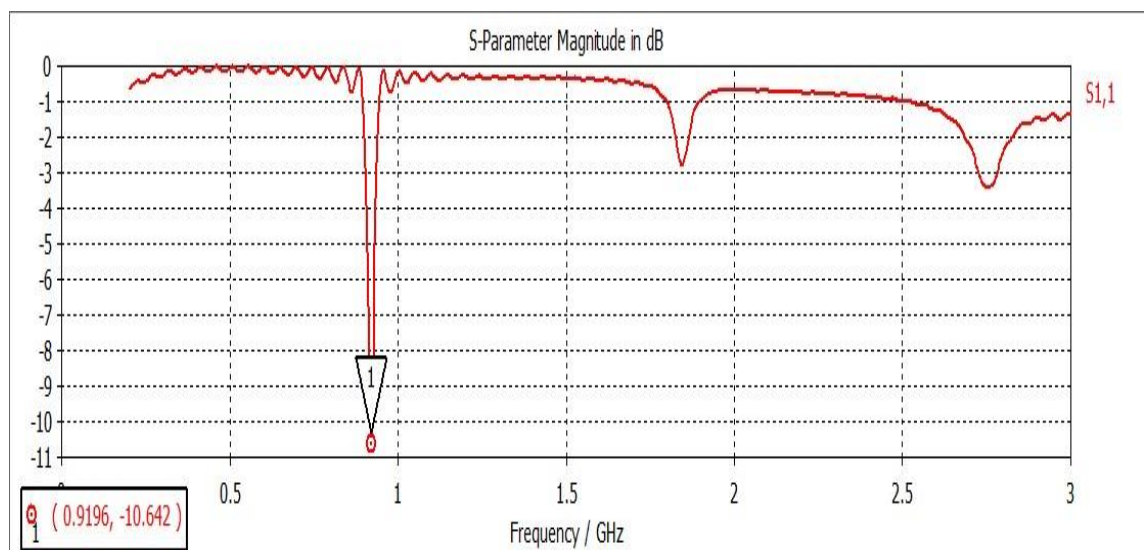


Figura 15. Coeficiente de reflexión S₁₁ de antena con alimentación simple en el lado a y dimensiones 65 mm x 135 mm

Una vez tenemos optimizado este diseño con una sola línea de alimentación en el lado a, procedemos al diseño con una sola línea de alimentación en el lado b.

2.1.2 Alimentación simple en el lado b

Para este segundo diseño partimos de las dimensiones del parche del punto anterior y cambiamos la línea de alimentación al lado b según se puede ver en la siguiente figura.

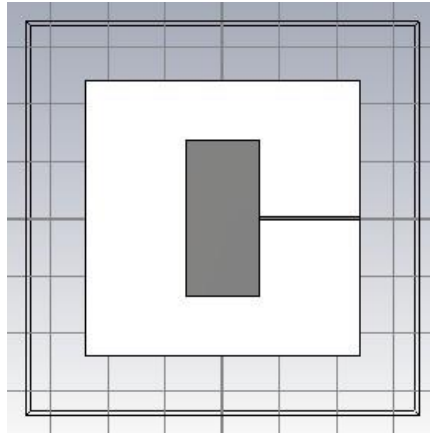


Figura 16. Representación antena con alimentación simple en lado b y dimensiones 65 mm x 135 mm

Corriendo la simulación vemos que, como cabía esperar, a $2f_0$ tenemos un pico negativo del parámetro S11. Decimos que cabía esperar porque el lado a, que en este segundo caso es el lado que determina la frecuencia de resonancia del parche, es aproximadamente $2/b$ por tanto el primer pico negativo de S11 se desplaza a $2f_0$.

En cuanto al nivel de S11 en el pico de $2f_0$ observamos en la siguiente figura que no es demasiado profundo.

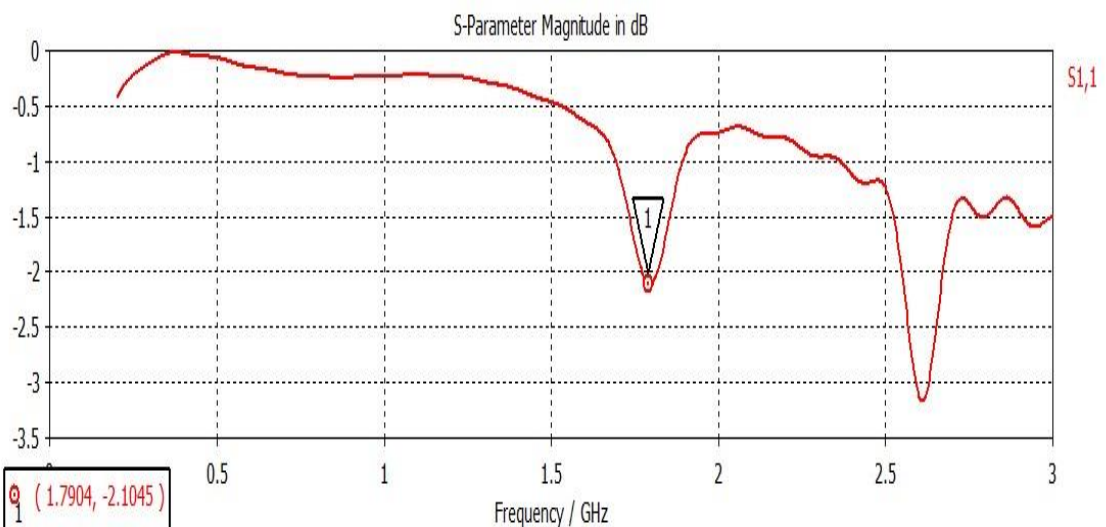


Figura 17. Coeficiente de reflexión S11 de antena con alimentación simple en el lado b y dimensiones 65 mm x 135 mm

Esto significa que la adaptación del parche según el presente esquema a $2f_0$ no es demasiado buena, -2 dB siendo alrededor de -10 dB el nivel deseable según lo especificado en los requisitos iniciales expuestos en el punto 1.3.2. Para mejorar este nivel probamos a variar la longitud del tramo acoplado de la línea de alimentación, observando muy pocos cambios significativos, siendo la mejor adaptación conseguida la mostrada en la siguiente figura.

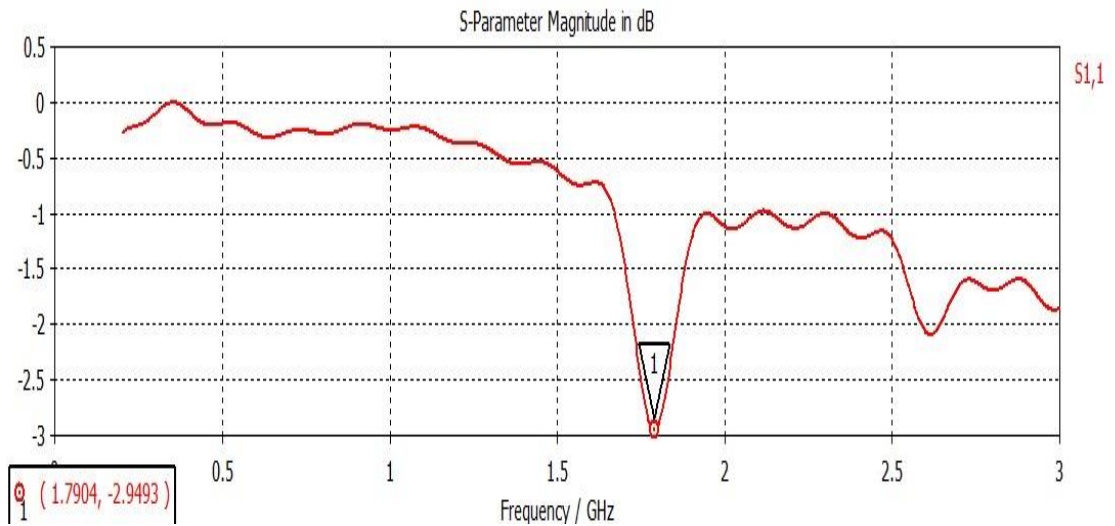


Figura 18. Coeficiente reflexión S11 óptimo de antena con alimentación simple en el lado b y dimensiones 65 mmx135 mm

En este punto pasaremos a juntar ambas líneas de alimentación en un tercer diseño en el que nos acercaremos al diseño final de la antena.

2.1.3 Alimentación doble

Trasladando directamente las dimensiones calculadas en los puntos 1 y 2 tenemos el diseño de la fig. 19 obteniendo la respuesta mostrada en la fig. 20.

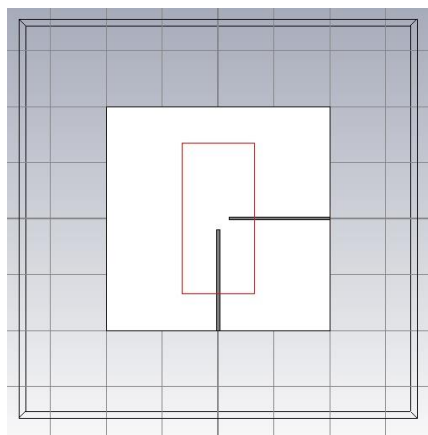


Figura 19. Representación antena con doble alimentación

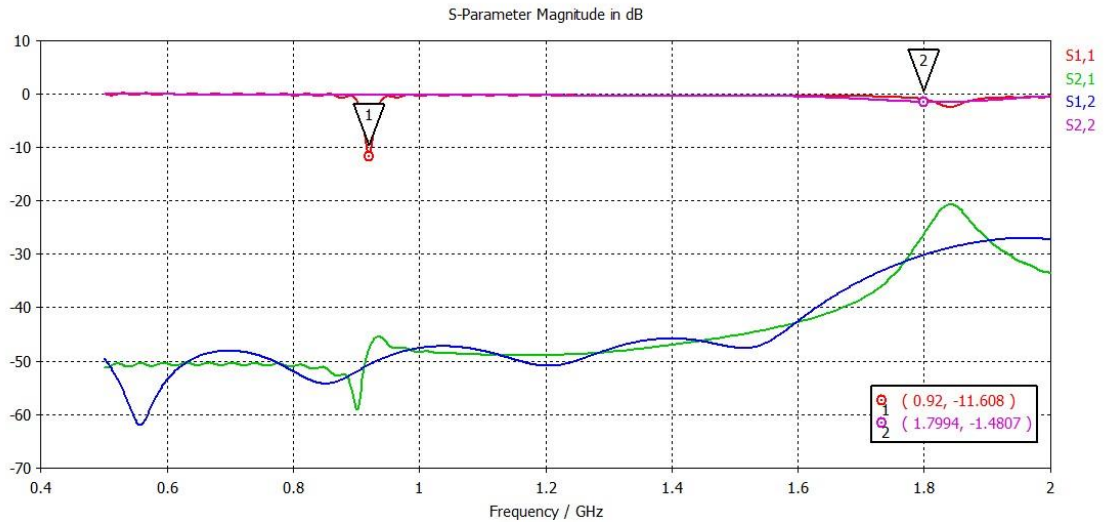


Figura 20. Parámetros S de antena con doble alimentación

Se pueden observar a f_0 y $2f_0$ unos buenos valores de S11, S12 y S21. Para S11 tenemos un nivel de -11.6 dB, indicativo de una muy buena adaptación en la línea de alimentación del lado a. Para S12 y S21 tenemos unos niveles de entre -20 y -50 dB, que confirman el escaso acoplamiento entre ambas líneas de alimentación.

Sin embargo el S22 sigue mostrando un acoplamiento muy pobre a $2f_0$. Como ya vimos en el punto 2, la variación de la longitud del acoplamiento a la antena del alimentador del lado b reporta escasa mejoría. Probamos entonces con un desplazamiento u *offset* de dicho alimentador respecto al eje central del lado b, obteniendo igualmente muy pobre mejoría por lo que decidimos dejar el alimentador centrado en el eje del lado b. Probamos como tercer método de adaptación un ensanchamiento de la parte acoplada del alimentador, mediante el cual observamos una rápida y notable mejoría de la adaptación, llegando a un nivel de -12.66dB para unas dimensiones de 65x137mm de la parte ensanchada/acoplada del alimentador (ver Fig. 23). Las dimensiones de dicho ensanchamiento se muestran en la Fig. 45.

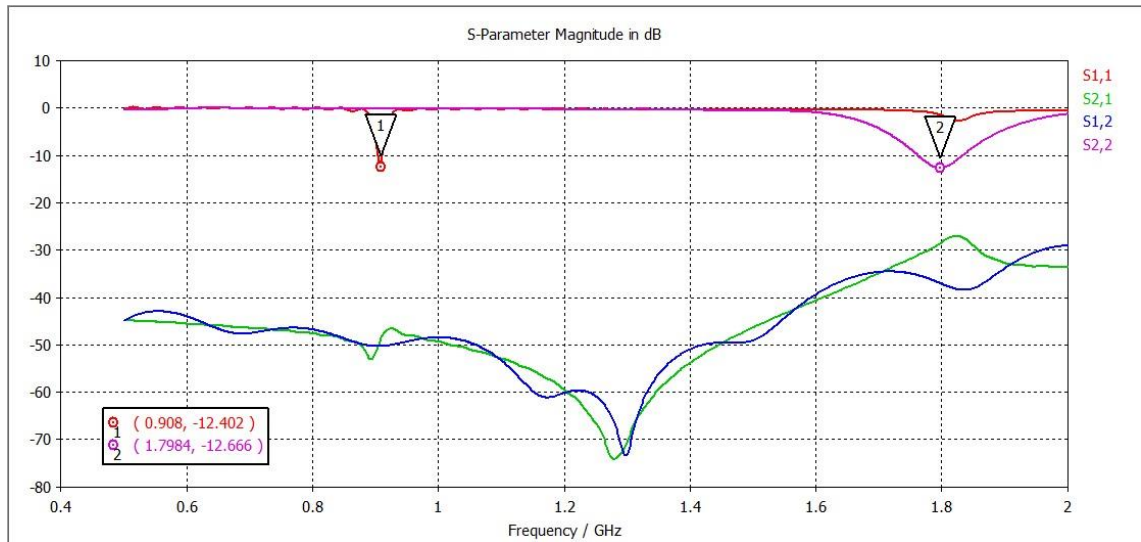


Figura 21. Parámetros S de antena con doble alimentación adaptada y optimizada

Con las optimizaciones de niveles anteriores se ha desplazado ligeramente los picos de adaptación, hecho que corregimos aumentando un par de mm el lado b.

El diseño de la antena por tanto queda como se muestra en las Fig. 22 y 23.

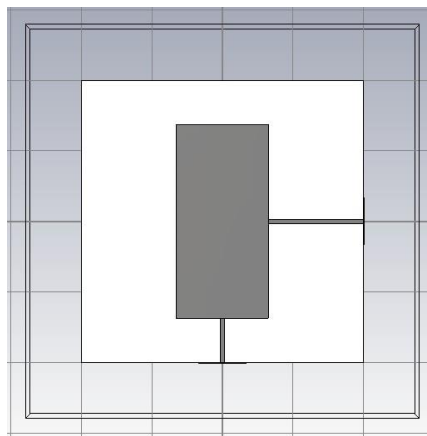


Figura 22. Vista superior antena con doble alimentación adaptada y optimizada

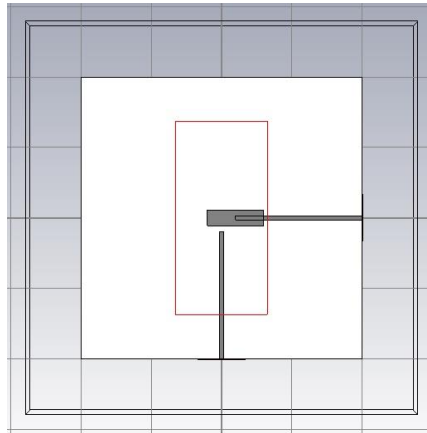


Figura 23. Vista capa de alimentadores de antena con doble alimentación adaptada y optimizada

Como última parte de la simulación pero no menos importante, analizamos y evaluamos los diagramas de radiación 3D a 0,9 GHz y 1,8 GHz:

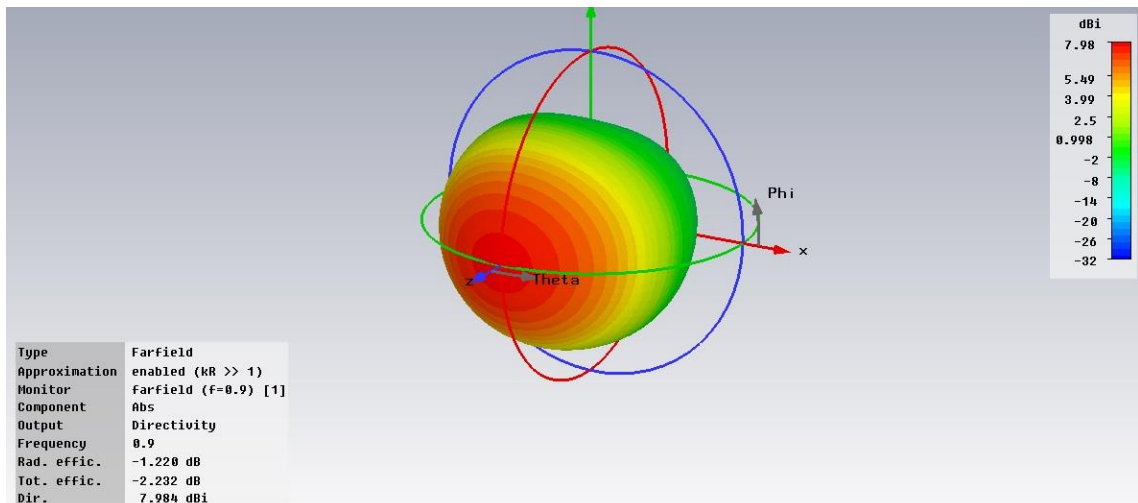


Figura 24. Diagrama de radiación 3D a 0,9 GHz

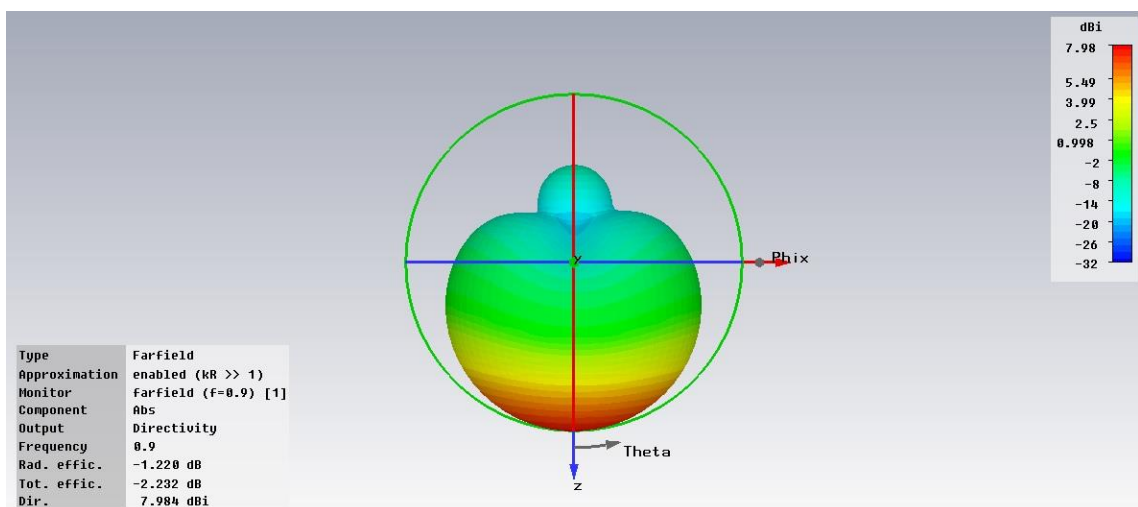


Figura 25. Detalle de la radiación posterior a 0,9 GHz

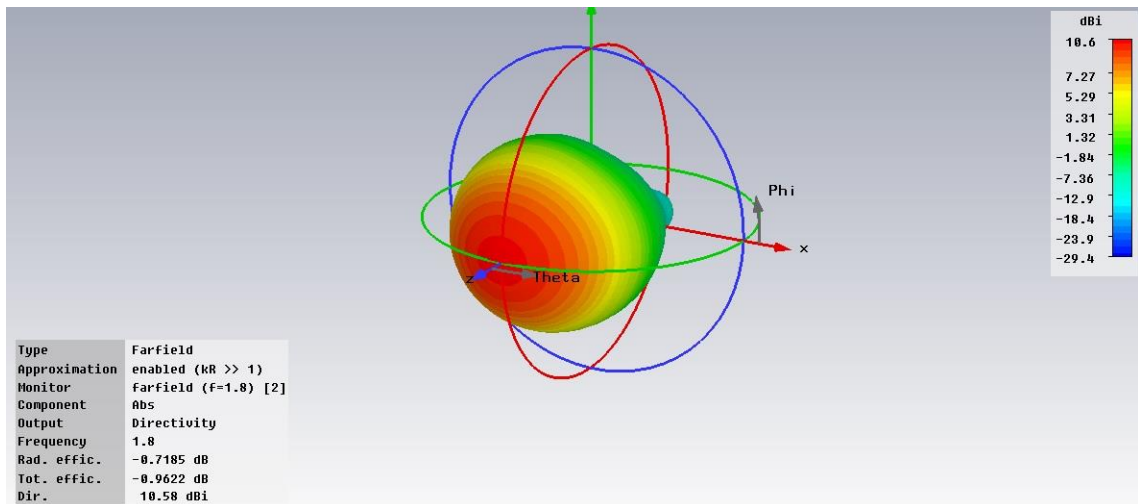


Figura 26. Diagrama de radiación 3D a 1,8 GHz

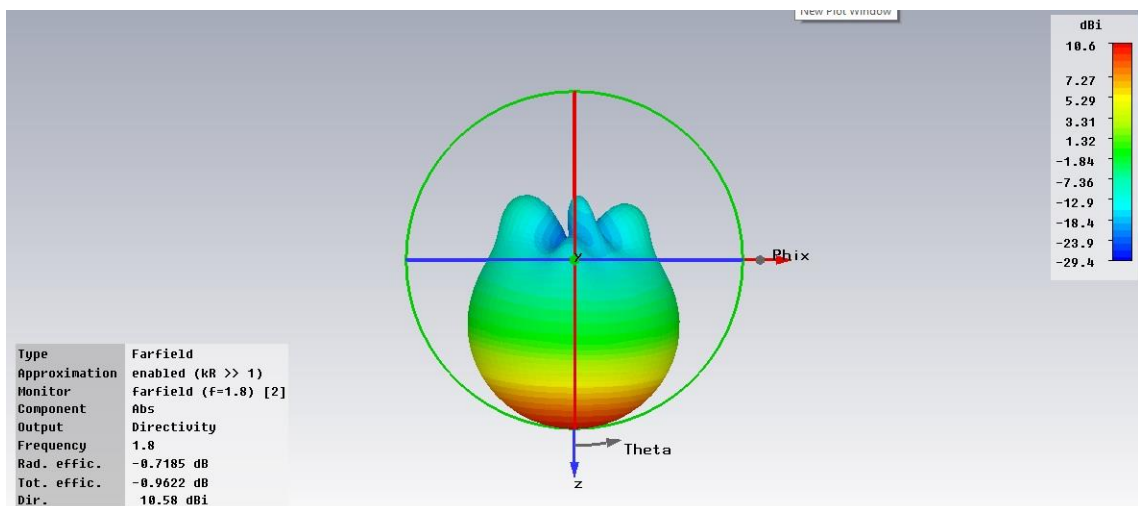


Figura 27. Detalle de la radiación posterior a 1,8 GHz

De los diagramas anteriores vemos una directividad relativamente alta y una radiación en $-z$ prácticamente nula debido al plano de masa del prototipo, hecho altamente útil para el objetivo de funcionamiento de nuestro sistema, ya que llevaría a equívoco en la localización de la víctima si recibiésemos $2f_0$ como radiación trasera, por lo que nos interesa que sea lo mas baja posible.

2.2 Circuito

Para alimentar la antena utilizaremos un circuito doblador pasivo basado en el comportamiento no lineal del diodo Schotkky por el cual es capaz de generar a su salida armónicos de la señal de entrada. Para nosotros es extremadamente útil dicho modo de trabajo puesto que nos aprovecharemos del armónico $2f_0$ generado por el diodo. De esta manera tenemos claramente diferenciadas las señales de recepción y transmisión, lo que redundará en un tratamiento sencillo de ambas señales en el dispositivo de búsqueda que portan los equipos de rescate.

Utilizaremos un diodo Schotkky de la familia HSMS-282X de Agilent Technologies [18] cuyos parámetros son:

SPICE Parameters

Parameter	Units	HSMS-282x
B_V	V	15
C_{J0}	pF	0.7
E_G	eV	0.69
I_{BV}	A	1E-4
I_S	A	2.2E-8
N		1.08
R_S	Ω	6.0
P_B	V	0.65
P_T		2
M		0.5

Tabla 2. Parámetros técnicos de familia HSMS-28X

Este diodo es el elemento no lineal que va a generar el segundo armónico de la señal recibida, armónico que va a ser radiado por la antena a través del alimentador del lado b que irá conectado a la salida del circuito que nos ocupa. A continuación mostramos un diagrama de bloques del sistema completo del tag.

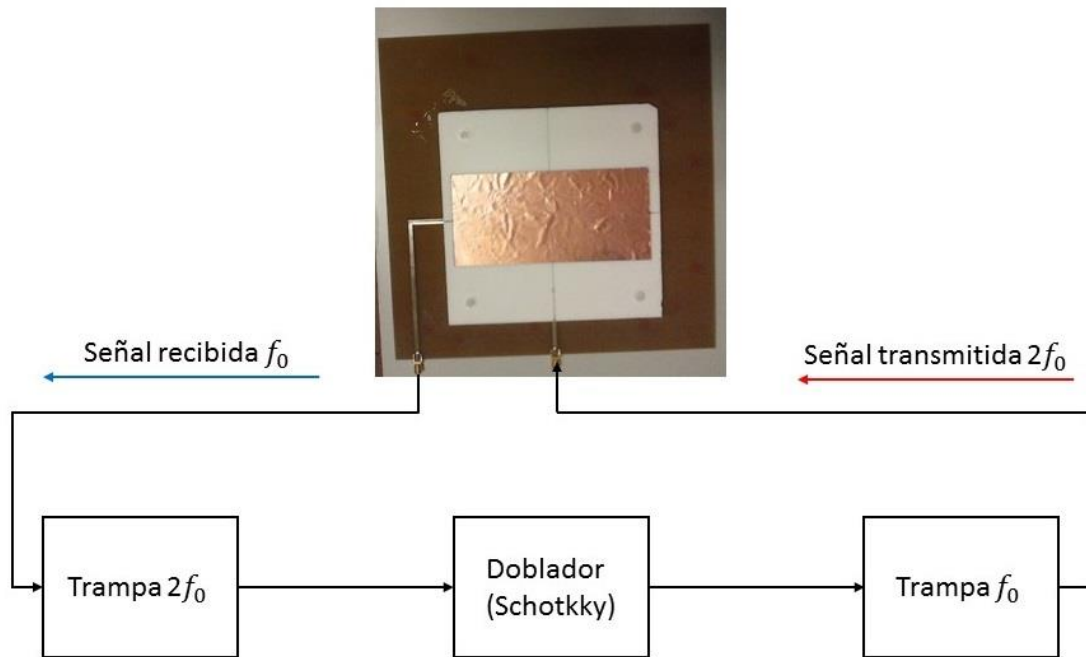


Figura 28. Diagrama de bloques del tag

Una de las premisas básicas que debe cumplir el diseño del circuito es simplicidad y tamaño reducido. Hay que tener en cuenta que este circuito, junto con el parche de la antena se pretende integrar en alguna de las prendas habituales en la vestimenta de invierno de los montañeros. Incluso, la situación ideal sería que las dimensiones del circuito fueran inferiores a las del parche para que el montaje pudiera realizarse debajo del mismo.

Además del diodo el circuito se completa con dos “trampas” que impiden el paso de la señal a una cierta frecuencia, una a la entrada y otra a la salida. Estas trampas se construyen a partir de stubs acabados en corto y abierto de longitudes $\lambda/4$ tal y como se describe a continuación: Ambas trampas constan de un simple stub paralelo de longitud $\lambda/4$ a f_0 . La diferencia entre ambas viene en que en la de entrada el stub está terminado en cortocircuito para presentar un corto a $2f_0$ y un abierto a f_0 ; por el contrario en el de salida el stub está terminado en circuito abierto de tal modo que presenta un abierto a $2f_0$ y un corto a f_0 . El equivalente circuital de cada trampa serían un circuito resonador paralelo LC a f_0 o $2f_0$ según sea la trampa de la entrada del circuito o la de la salida. A continuación se muestra, de forma circuital, el comportamiento del tag para f_0 y $2f_0$.

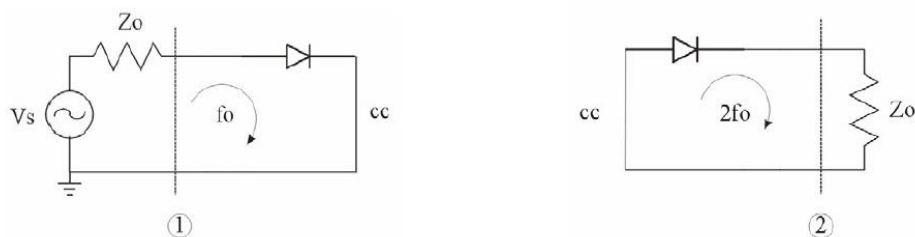


Figura 297. Equivalentes funcionales del tag a f_0 y $2f_0$

Asumiendo que el nivel de potencia inyectada al diodo será suficiente en una primera aproximación no nos planteamos la necesidad de adaptar impedancias, no

obstante sería algo a tener en cuenta en caso de no conseguir un nivel de potencia de salida suficiente.

De tal modo, con idea de maximizar el nivel del segundo armónico a la salida del elemento no lineal, probaremos varias configuraciones del bloque del diodo, estas son, un solo diodo, dos diodos en paralelo y dos en antiparalelo.

2.2.1 Potencia de entrada al circuito

Para que las simulaciones sean lo mas parecidas posibles al comportamiento real del futuro dispositivo físico haremos cálculo previo de la potencia recibida por el tag que equivaldrá a la potencia de entrada del circuito doblador, que deberá ser al menos -20 dBm para que el circuito no lineal funcione correctamente tal y como demostraron simulaciones preliminares. Esto lo haremos mediante de balance de potencias del sistema rescatador (T_x) – accidentado (R_x) para distintos valores de P_{tx} .

Como hemos explicado en el apartado 1.2 trabajaremos para lograr una respuesta óptima del sistema a una distancia de 15m. Teniendo siempre presente que la potencia transmitida no puede ser muy alta, por limitaciones físicas del transmisor que debe portar el equipo de rescate, haremos un simple balance de potencias en espacio libre para obtener una estimación inicial de los valores de potencia requeridos haciendo un barrido de distancias entre 10 y 20 m y potencias transmitidas entre 0.5 W y 1 W (especificaciones iniciales, ver 1.3.2), obteniendo la tabla 2.

Para dicho balance consideraremos el mismo tipo de antena T_x y R_x , estimando un valor medio para las ganancias para incluir la incertidumbre de no conocer la orientación del tag en una situación real, es decir tomaremos $G_{tx}=G_{rx}=5\text{dB}$. En la siguiente gráfica mostramos los valores obtenidos para dicho balance:

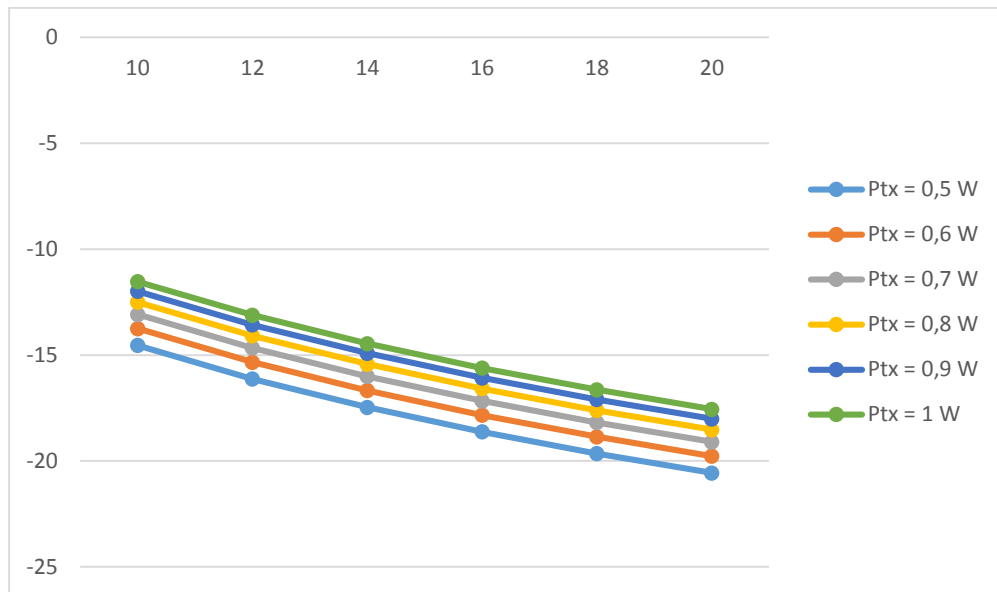


Figura 30. Balance de potencias

Poniéndonos en el peor caso para una distancia de 15m diseñaremos el prototipo del circuito para una potencia de entrada al mismo de -5 dB.

Es conveniente tener presente el estudio *Modeling of Through-the-Snow Electric Field Propagation for Rescue Systems de la Universidad de Zaragoza [3]* en el que se estudian y modelan las características de propagación de los diferentes sustratos implicados en el caso que nos ocupa.

Buscando siempre elegir la topología mas simple que cumpla las especificaciones trabajaremos primeramente sobre tres tipos de diseños sobre tecnología microstrip y sustrato FR-4 de 5mm; uno con un solo diodo y dos con dos diodos, uno de ellos en paralelo y otro en antiparalelo.

Para esta primera aproximación, y con motivo de poder comparar resultados de las tres posibles topologías utilizaremos la misma potencia de entrada en los tres diseños y, puesto que son pruebas para comparar los tres diseños, no vemos necesario utilizar la potencia óptima para nuestro propósito final, por lo que usaremos una potencia de 0 dBm.

Cabe también destacar que para estos tres primeros diseños no realizamos optimización de las dimensiones de los tramos de líneas puesto que lo que pretendemos es realizar un estudio *grosso modo* para descartar los dos peores diseños.

2.2.2 Diodo simple

Como hemos comentado en el punto 1.4 utilizaremos el software de análisis circuital ‘AWR-Microwave Office’ [17]

Para este primer caso de estudio utilizaremos el siguiente esquema eléctrico con líneas ideales:

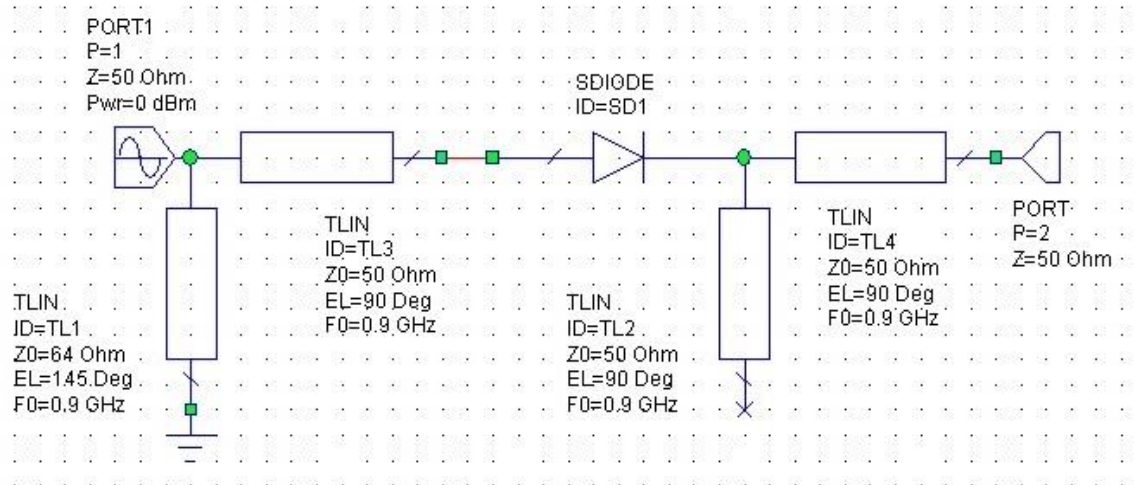


Figura 31. Esquemático de circuito con diodo simple

Cabe destacar que, pese a que el diseño mas lógico sería poner el stub de la salida directamente en el puerto, comprobamos que la respuesta es mucho mejor con la configuración mostrada en la figura anterior.

Obteniendo los siguientes parámetros S en gran señal, dependiendo la respuesta del circuito del nivel de potencia de entrada. Los parámetros en los que nos fijaremos son:

- LSS_{11} a f_0 : Adaptación para la señal de f_0 del puerto 1 o puerto de entrada al circuito tag.
- LSS_{21} a f_0 : Pérdidas de conversión entre el puerto 1 y 2 para la señal de f_0 .
- LSS_{12} a $2f_0$: Aislamiento entre el puerto 2 y 1 para la señal de $2f_0$

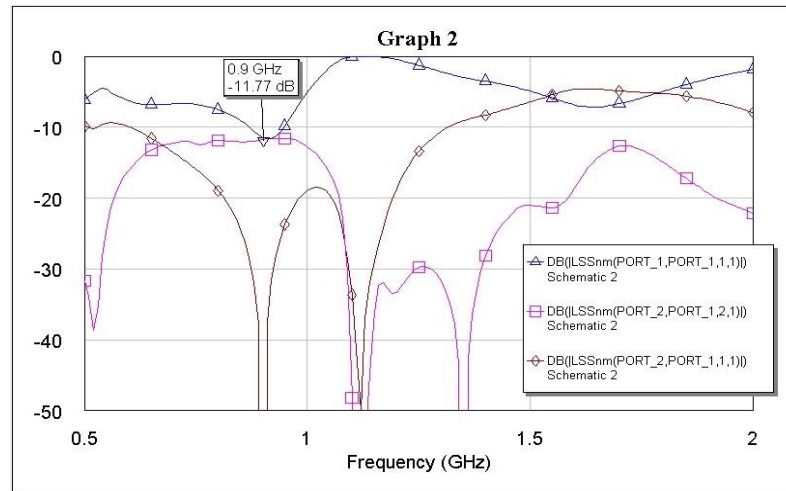


Figura 32. Parámetros S de circuito con diodo simple

Cabe destacar que usaremos los parámetros anteriormente explicados para todas las medidas del diseño de ahora en adelante con el fin de comparar mas fácilmente los diseños.

El esquema resulta sencillo a la par que efectivo, por ello que los parámetros S a f_0 presentan unos niveles cercanos a los óptimos, no obstante con margen de mejora. Dicha posible mejora la dejaremos para mas adelante, una vez estudiados el resto de diseños planificados, en caso que elijamos éste como mejor diseño.

2.2.3 Diodo doble paralelo

En este segundo caso de estudio utilizaremos el siguiente esquema eléctrico:

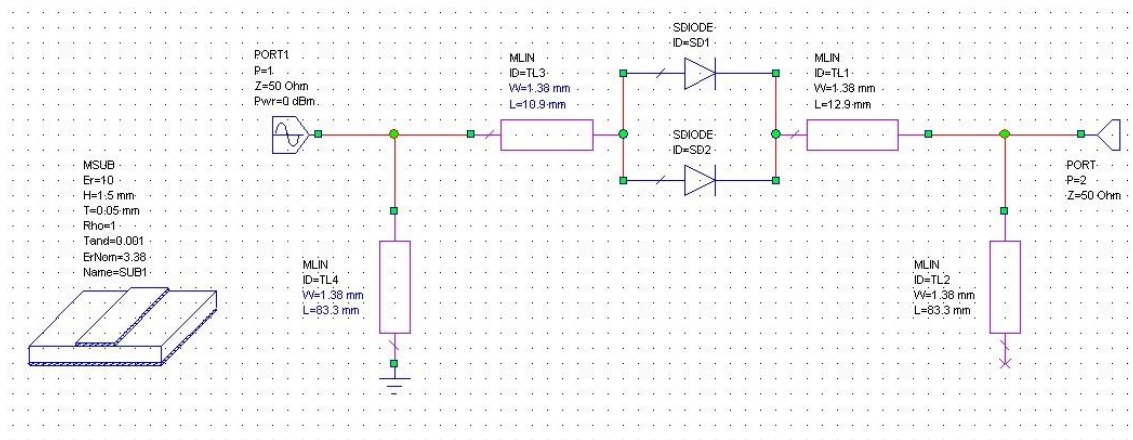


Figura 33. Esquemático de circuito con diodo doble paralelo

Cabe destacar que los tramos de línea a la entrada y a la salida del bloque de diodos transformarán las impedancias que presentan en elemento no lineal, es decir, actúan como adaptadores de impedancia para hacerlo coincidir con las impedancias de los puertos de entrada y salida respectivamente, obteniendo la siguiente respuesta:

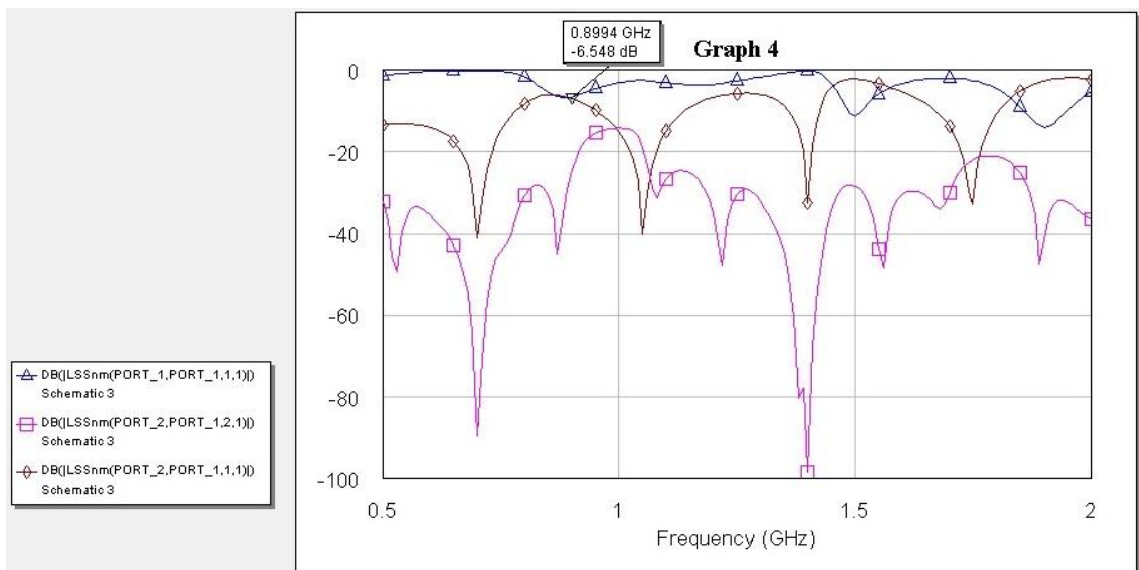


Figura 34. Parámetros S de circuito con diodo doble paralelo

A partir del primer esquema cabría esperar que añadiendo un diodo más en paralelo la respuesta no podía sino mejorar. Sin embargo la realidad es muy distinta, no solo no mejoran los parámetros S sino que empeoran ligeramente.

Por esta razón descartamos este segundo diseño de cara a la solución final del proyecto.

2.2.4 Diodo doble antiparalelo

Para el último caso de estudio utilizaremos el siguiente esquema eléctrico:

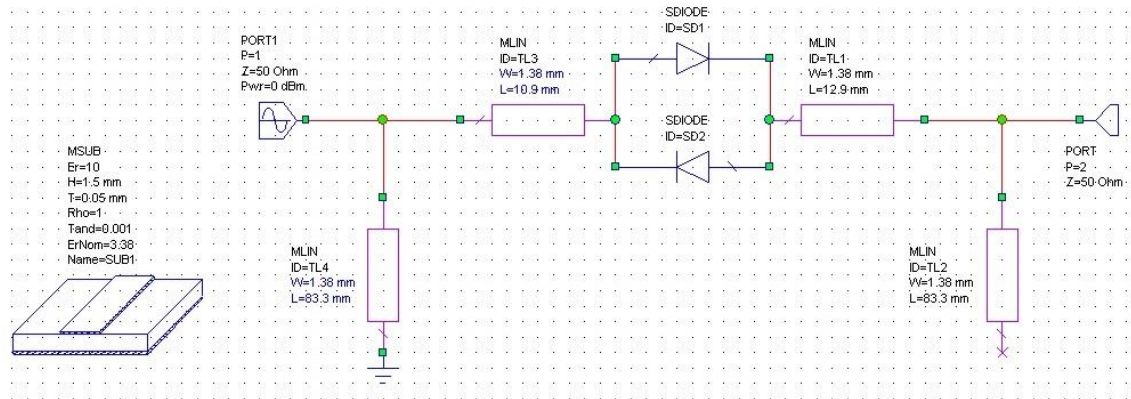


Figura 35. Esquemático de circuito con diodo doble antiparalelo

Obteniendo la siguiente respuesta:

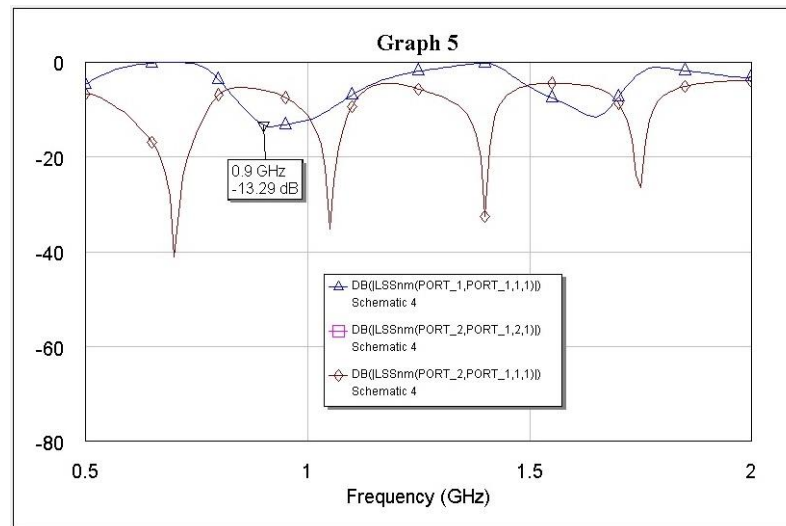


Figura 36. Parámetros S de circuito con diodo doble antiparalelo

En vista de los resultados obtenidos en el caso de los diodos paralelos esperamos una respuesta similar, sin embargo los niveles y las gráficas son realmente malos, en especial S_{21} . Analizando dicho parámetro llegamos a la conclusión de que las corrientes que provocan cada diodo por separado son opuestas entre si y por tanto se anulan mutuamente y no favorecen la conversión.

Por lo anteriormente explicado descartamos este tercer diseño.

Pese a que la comparación no es del todo homogénea por haber usado líneas tipo ideal *tlin* en el primer diseño y líneas tipo real *mlin* en el segundo, la respuesta del primero no sería muy diferente a la obtenida, por tanto elegimos

definitivamente el primer diseño por dos importantes razones, mejor rendimiento y sencillez de construcción.

Retomando el esquema del primer caso intuimos que la respuesta puede ser sustancialmente mejorada añadiendo redes de adaptación a la entrada. Siguiendo siempre el objetivo de la simplicidad en el diseño y mínimo tamaño posible, elegimos un primer tipo de red de adaptación consistente en una simple línea de en la entrada y la salida del circuito cuya longitud y anchura se ajustarán convenientemente como se muestra en la siguiente figura:

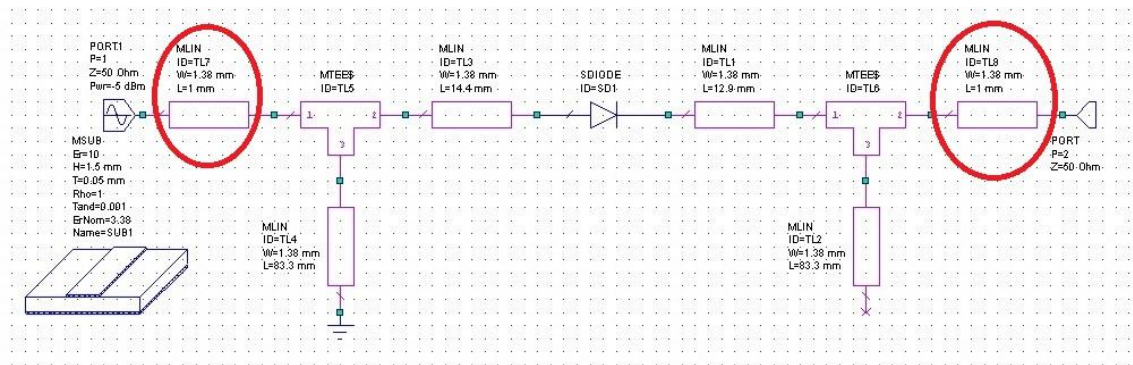


Figura 37. Esquemático de circuito con diodo sencillo con 1 red de adaptación tanto a la entrada como a la salida

Simplemente con este sencillo bloque de adaptación se observa una buena mejoría de los niveles de los parámetros S:

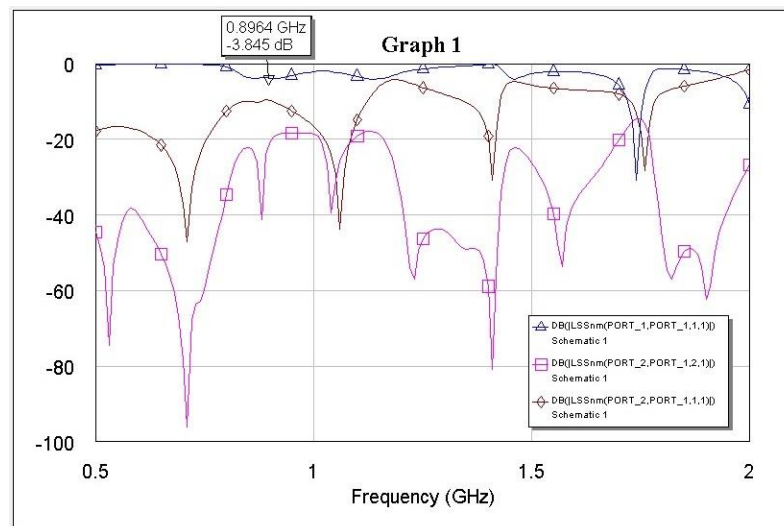


Figura 38. Parámetros S de circuito con diodo sencillo con 1 red de adaptación tanto a la entrada como a la salida

Cabe destacar que tanto este diseño como el siguiente los vamos a optimizar para una potencia de entrada de -5 dBm para acercarnos mas a la real que tendremos en el funcionamiento práctico del circuito doblador.

Intentamos una mejor adaptación mediante otra red de adaptación a la entrada que se comporta como una red de rechazo para reforzar la respuesta de la trampa a $2f_0$ a la entrada por lo que tenemos una mejora sustancial del parámetro LSS_{11} como se puede observar en la figura 39. Podríamos añadir tantos adaptadores como quisiéramos pero, teniendo siempre en mente el criterio de simplicidad y mínimo tamaño, determinamos que el diseño óptimo que cumple con dicho criterio y con una funcionalidad altamente efectiva debe contar con dos redes de adaptación. De tal modo tendríamos un diseño final como el mostrado en la siguiente figura donde remarcamos en rojo la red de adaptación/rechazo introducida.

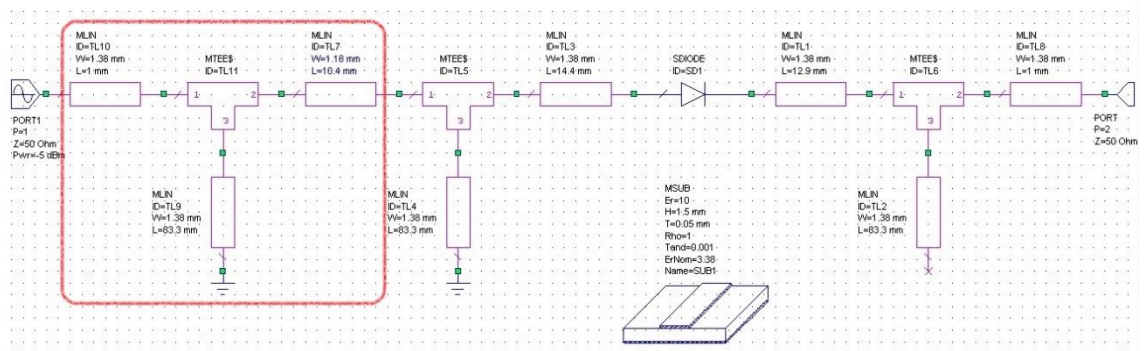


Figura 39. Esquemático de circuito con diodo sencillo con 2 redes de adaptación a la entrada

Obteniendo una respuesta como la siguiente:

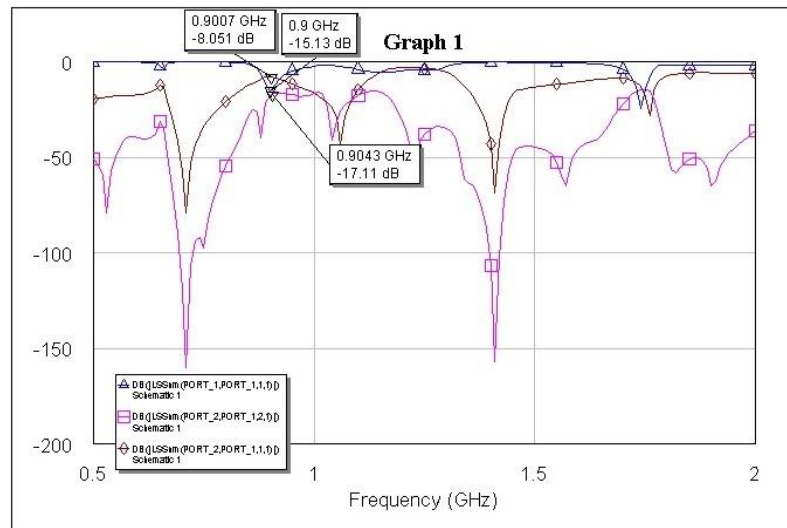


Figura 40. Parámetros S de circuito con diodo sencillo con 2 redes de adaptación

Vemos que los parámetros S son realmente buenos por lo que podemos dar por muy bueno este diseño.

Por último alargamos y doblamos las líneas de entrada y salida para que así cuadren con el diseño de la antena con las dos líneas de alimentación y forzamos el diseño a una potencia de entrada al circuito de -11 dBm para asegurar el óptimo funcionamiento del sistema a una distancia aproximada, según nuestra estimación inicial, de 25 m. De tal modo tenemos este esquemático:

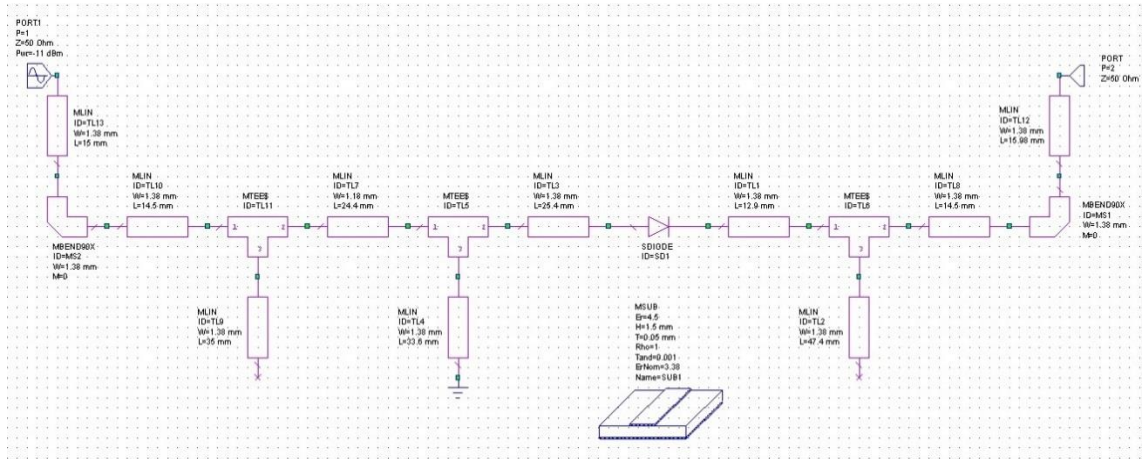


Figura 41. Esquemático de circuito óptimo con líneas de alimentación de la antena

Obteniendo una respuesta como la siguiente:

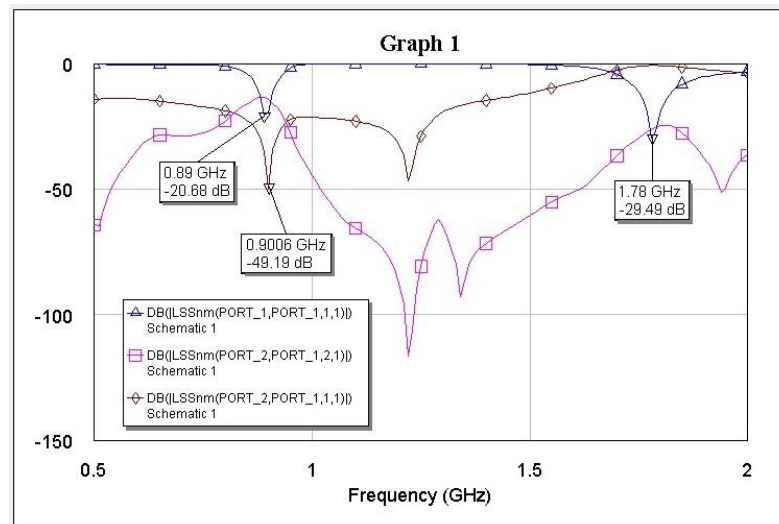


Figura 42. Parámetros S de circuito óptimo con líneas de alimentación de la antena

Por tanto, en este punto estamos listos para enviar a fabricar ambas placas, del parche y del circuito, por separado para tener posibilidad de hacer el análisis real del comportamiento de las mismas individualmente y en conjunto conectadas mediante dos juegos de conectores SMA macho-hembra.

2.3 Prototipos físicos

A partir de los esquemáticos definitivos explicados en el punto anterior generamos los siguientes layouts para la antena y el circuito respectivamente:

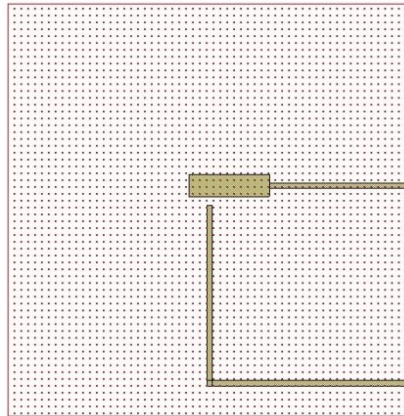


Figura 43. Layout de la capa de las líneas de alimentación de la antena para fabricar

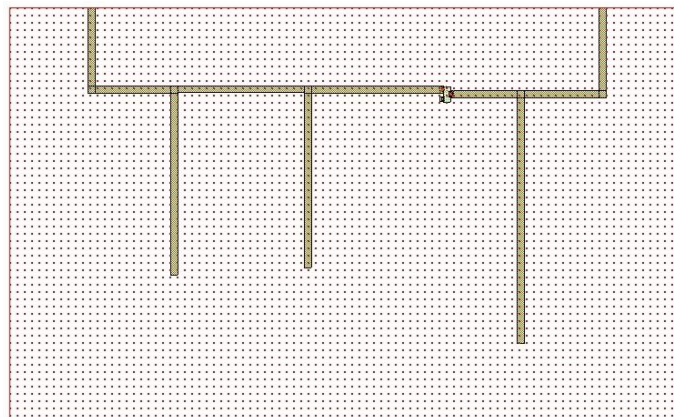


Figura 44. Layout de circuito para fabricar

Hay que tener en cuenta que, por facilidad de interpretación de las figuras anteriores, no se muestran a escala real, pero para posibilitar una correcta interpretación de los layout mostramos a continuación los mismos con las diferentes dimensiones:

Gonzalo Solis Gonzalez

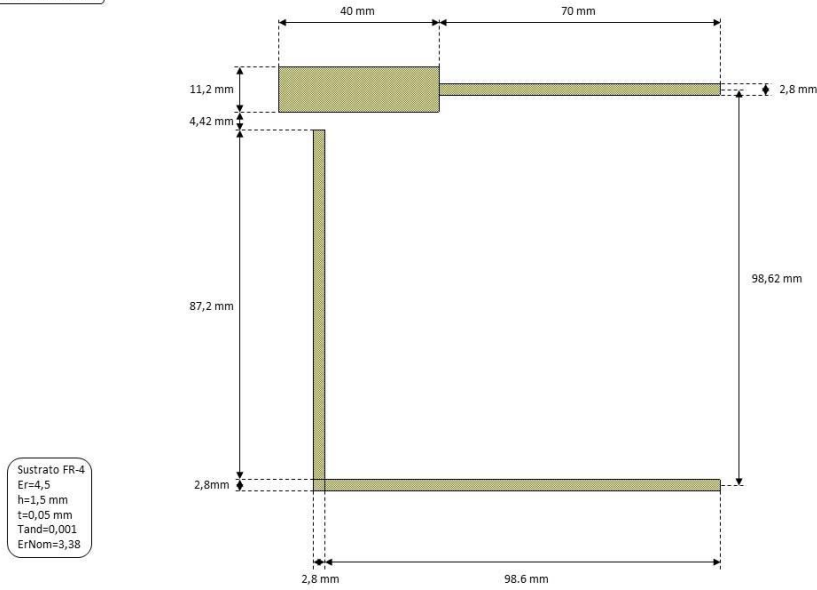


Figura 45. Cotas de prototipo físico de la antena

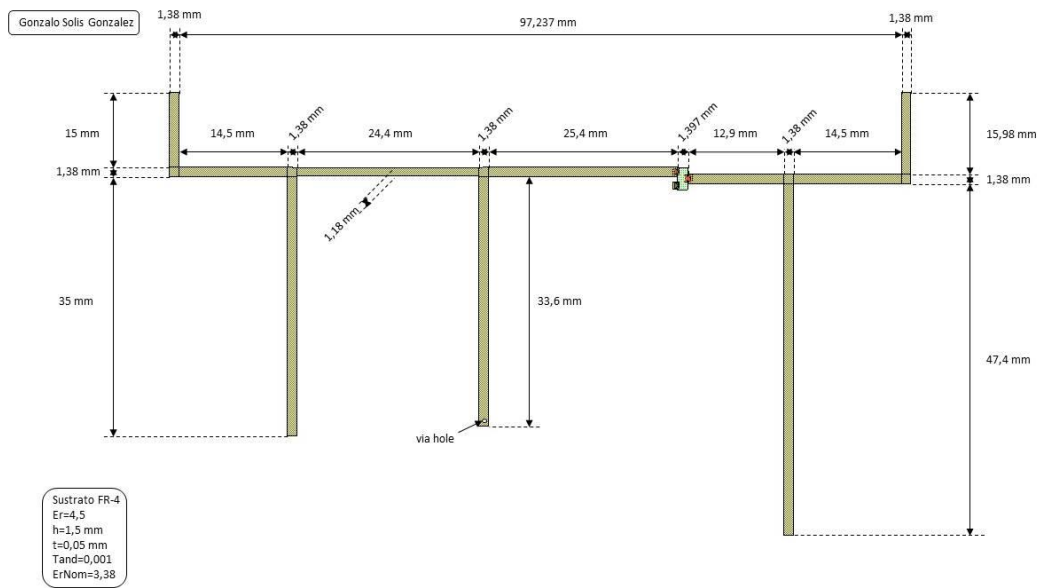


Figura 46. Cotas de prototipo físico del circuito

Como hemos anunciado previamente fabricamos los prototipos de la antena y del circuito en dos placas separadas de tal modo que los conectores de ambas coincidan para poder medir los modelos por separado y en conjunto. Los prototipos son los mostrados en las siguientes cuatro figuras.

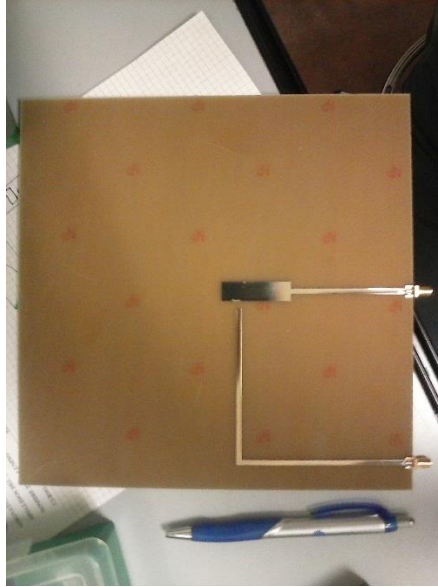


Figura 47. Prototipo físico de la capa de líneas de alimentación de la antena

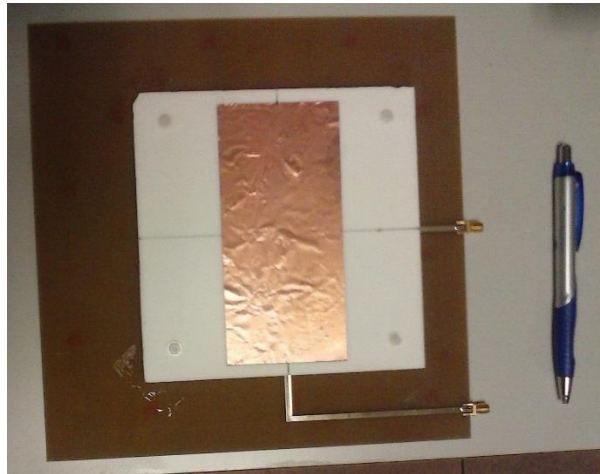


Figura 48. Prototipo físico completo de la antena

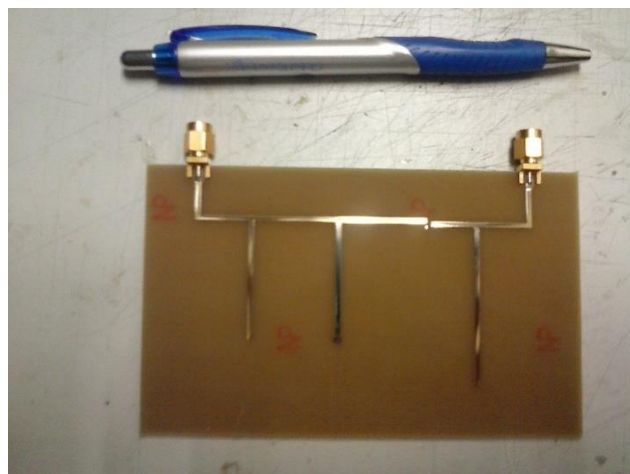


Figura 49. Prototipo físico del circuito doblador



Figura 50. Montaje final de antena y circuito

A partir de estos prototipos realizaremos diversas medidas experimentales, en primer lugar circuitales de la antena y del circuito por separado y en segundo lugar funcionales del conjunto completo antena/circuito en un caso real de transmisión/recepción en cámara anecoica.

2.3.1 Medidas circuitales

2.3.1.1 Antena

En primer lugar ponemos bajo estudio el prototipo de la antena para ver su comportamiento como cuadripolo y sus correspondientes parámetros S, obteniendo la siguiente gráfica para una potencia de la señal de entrada de -5 dBm:

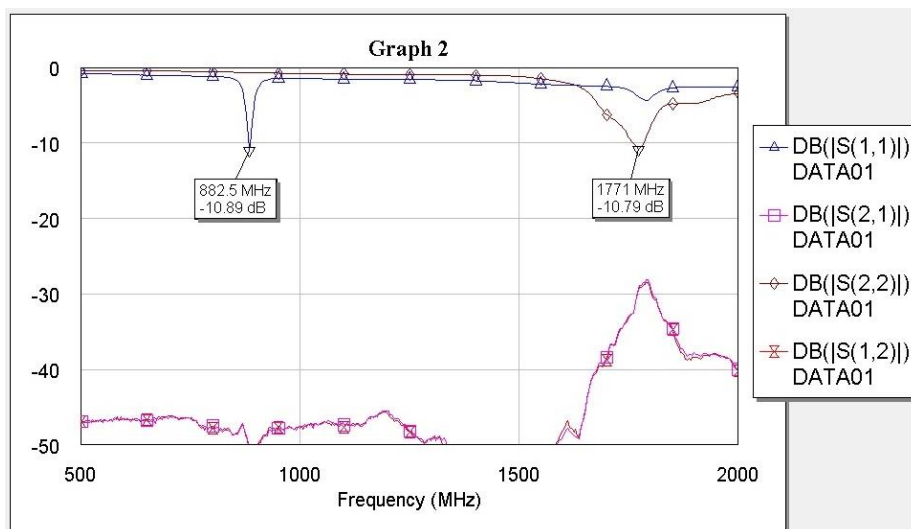


Figura 51. Parámetros S del prototipo de la antena

Comparando con la gráfica del diseño obtenido en el software de simulación CST vemos que son prácticamente iguales, con la salvedad de un desplazamiento en frecuencia de 1,9% desviación perfectamente asumible y achacable a defectos en la fabricación del prototipo.

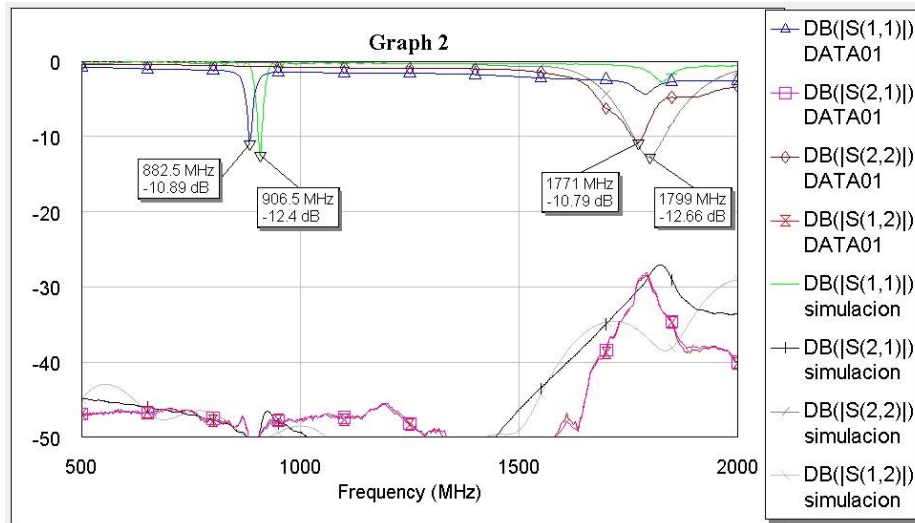


Figura 52. Comparativa de respuesta simulada vs. real del comportamiento circuital de la antena

2.3.1.2 Circuito

A continuación caracterizamos el comportamiento del circuito doblador obteniendo un primer grupo de gráficas de los parámetros S variando entre 5 dBm y -15 dBm en pasos de 5 dBm la potencia de entrada al circuito suministrada.

En las siguientes gráficas se muestra por error el parámetro S_{22} pese a no haberse medido experimentalmente.

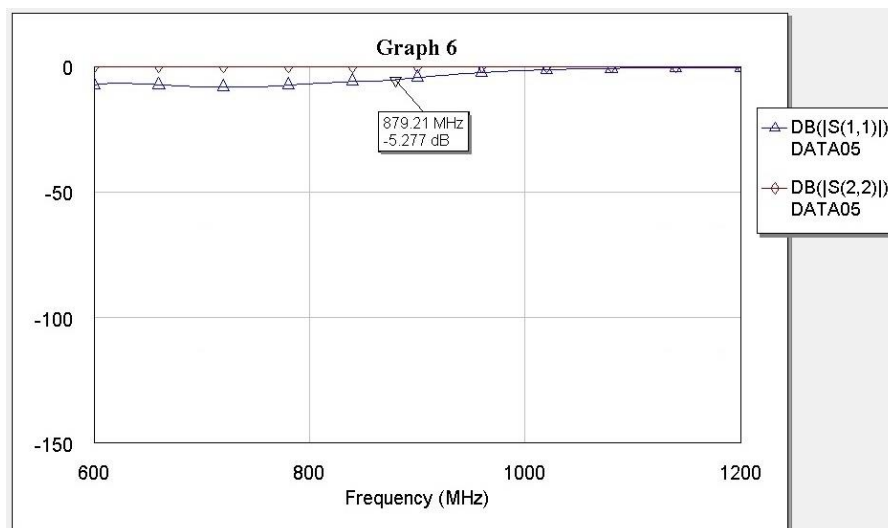


Figura 53. Respuesta del circuito con $P_{IN}=5$ dBm

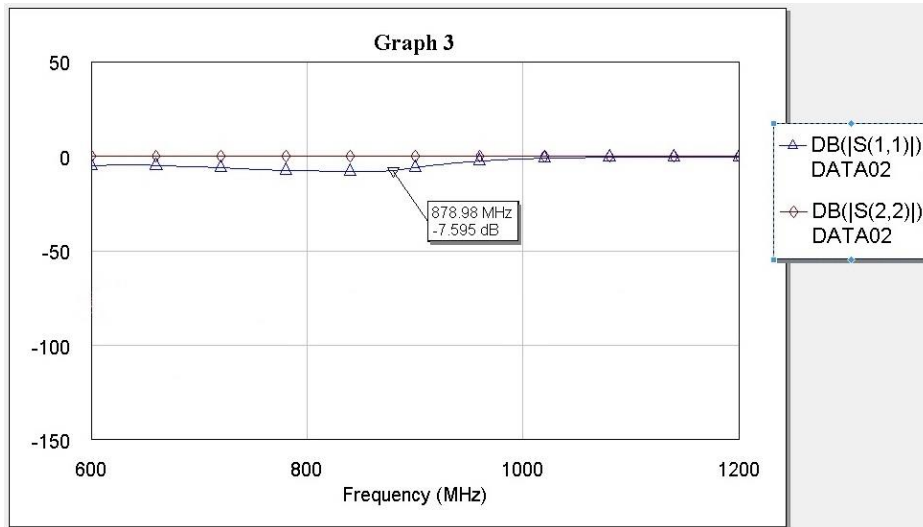


Figura 54. Respuesta del circuito con $P_{IN}=0$ dBm

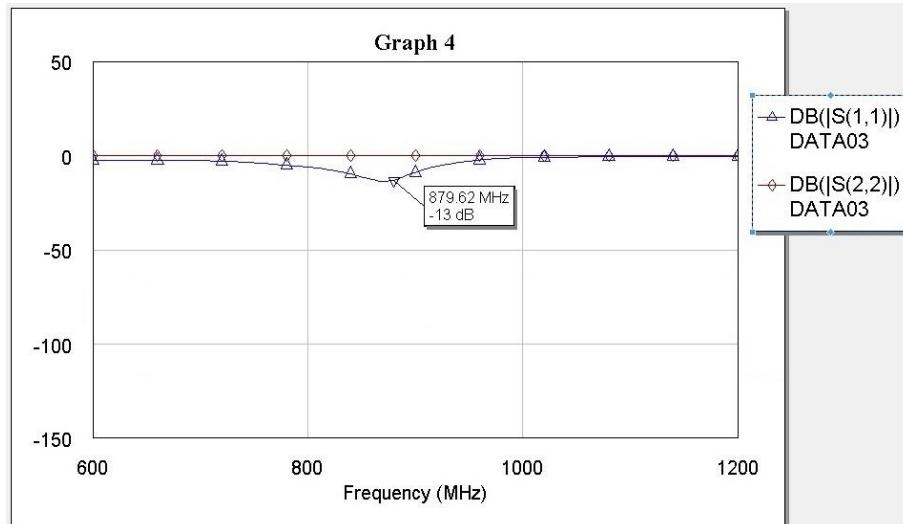


Figura 55. Respuesta del circuito con $P_{IN}=-5$ dBm

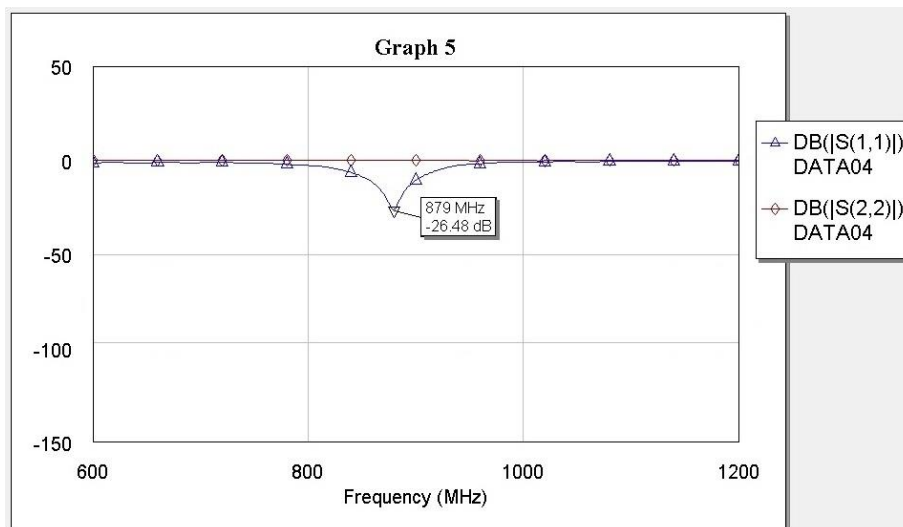


Figura 56. Respuesta del circuito con $P_{IN}= -10$ dBm

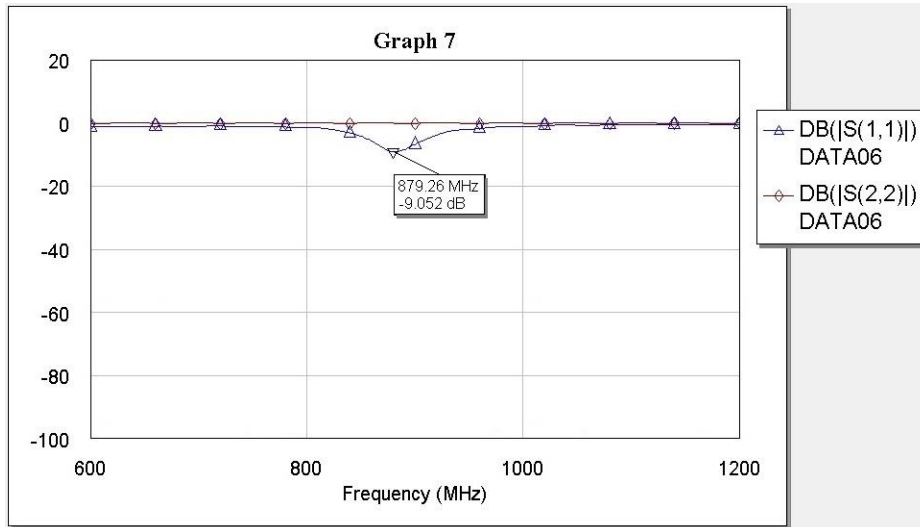


Figura 57. Respuesta del circuito con $P_{IN} = -15$ dBm

Como cabía esperar, recordando que el circuito lo optimizamos para una potencia de entrada de -11 dBm, la mejor respuesta del coeficiente de reflexión S_{11} la obtenemos para una potencia de entrada -10 dBm (siempre teniendo en cuenta el desplazamiento de $1,9\%$ en frecuencia).

Como segunda medida realizamos un barrido de potencia de entrada para cuantificar las pérdidas de conversión y el aislamiento del circuito doblador a la frecuencia real (885 MHz). Adicionalmente hacemos el mismo barrido a la frecuencia teórica (900 MHz) para evaluar la desviación teórica vs real.

Pérdidas de conversión S_{21}			
885 MHz		900 MHz	
Pin (dBm)	Pout (dBm)	Pin (dBm)	Pout (dBm)
-15	-36	-15	-38
-10	-29	-10	-31
-5	-23	-5	-24
0	-17	0	-18
5	-13	5	-14
10	-10	10	-11

Tabla 3. Pérdidas de conversión de circuito a 885 MHz vs 900 MHz

Aislamiento S_{12}			
885 MHz		900 MHz	
Pin (dBm)	Pout (dBm)	Pin (dBm)	Pout (dBm)
-15	-42	-15	-47
-10	-38	-10	-43
-5	-33	-5	-39
0	-30	0	-35
5	-26	5	-31
10	-22	10	-27

Tabla 4. Aislamiento de circuito a 885MHz vs 900 MHz

Comparando con los resultados de la simulación obtenidos vemos que las pérdidas de conversión y el aislamiento son muy similares con las reales.

2.3.2 Medidas funcionales

La segunda parte de las medidas en laboratorio que realizamos son en cámara anecoica, en concreto una emulación del uso para el que están pensados los prototipos de este proyecto.

Como dispositivo del equipo de rescate pondremos la antena diseñada conectada según la figura 60, el puerto de 0,9 GHz (IN) al Agilent NS181A MXG Analog Signal Generator y en el puerto de 1,8 GHz (OUT) al HP 8594E Spectrum Analyzer según la siguiente figura. Por este segundo puerto recibiremos la señal transmitida por el tag.

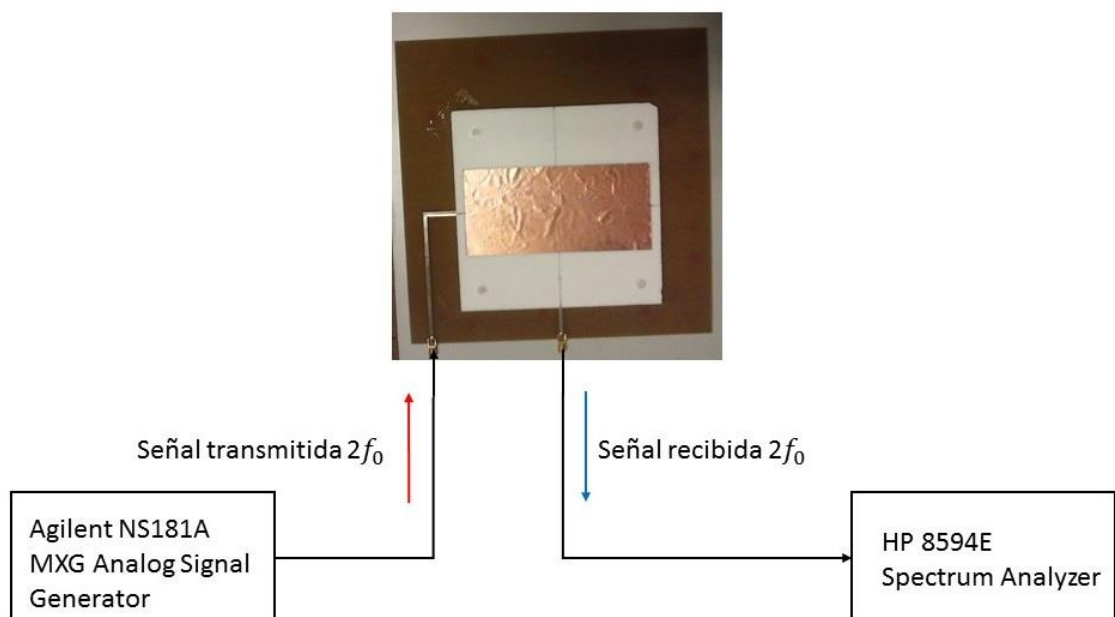


Figura 58. Diagrama de bloques para la prueba de laboratorio de la antena

Como tag utilizaremos el conjunto de circuito + antena prototipo montados como se muestra en la Fig. 49.

Previamente caracterizamos el cableado del montaje viendo que introduce unas pérdidas de 3 dB.

A continuación enfrentamos la antena del rescatador (idéntica a la del tag) y el conjunto circuito + antena de la figura 49 con una distancia entre ambas de 2m. Las antenas de ambas partes las colocamos paralelas entre si. Inyectamos, según la figura anterior, con el Agilent NS181 una potencia de entrada de 10 dBm, medimos niveles de señal a 0°, 45° y -45° para diferencia de polarización 0, 45° y 90°, con los que podemos aproximar los siguientes diagramas de radiación.

Es importante tener en cuenta que los siguientes diagramas de radiación son aproximados, siendo los valores reflejados los medidos reales. Lo hacemos así porque con los instrumentos de medida utilizados no nos es posible obtener diagramas de radiación mas exactos.

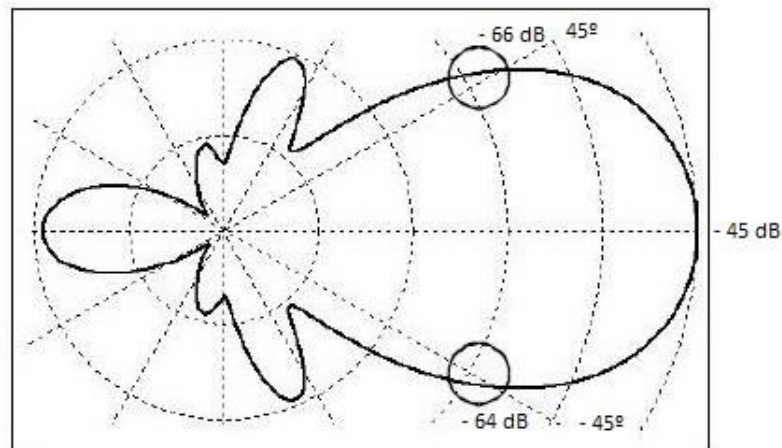


Figura 59. Diagrama esquematizado de radiación con misma polarización de T_x y R_x

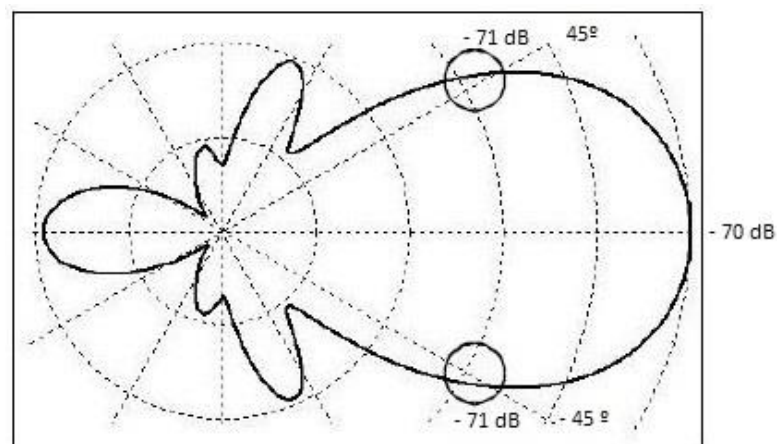


Figura 60. Diagrama esquematizado de radiación con polarización perpendicular de T_x y R_x

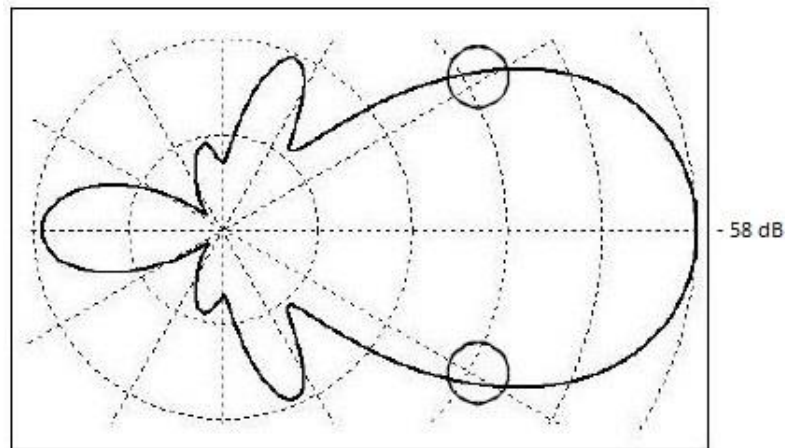


Figura 61. Diagrama esquematizado de radiación con diferencia de polarización 45° de Tx y Rx

Como se puede ver la antena diseñada es altamente sensible a la diferencia de polarización debido a tratarse de polarización lineal, por lo que en futuras líneas de investigación podría ser estudiado el uso de otros tipos de polarización para que no sea necesario rotar la antena del equipo del rescatador.

Por último realizamos un balance de potencias P_{IN} vs P_{OUT} (según muestra la siguiente figura) en el que evaluaremos la potencia recibida a $2f_0$ por el equipo del rescatador en función de la potencia emitida por él mismo a f_0 con una distancia entre la antena y el tag de 2,5m. Estas P_{IN} y P_{OUT} tomadas en la antena del equipo del rescatador según se indica en la siguiente figura.

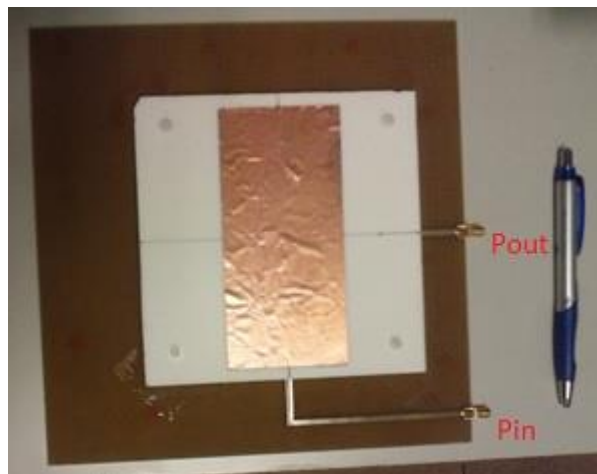


Figura 62. Medida de potencias real PIN vs POUT

El balance de potencias obtenido se muestra en la siguiente figura.

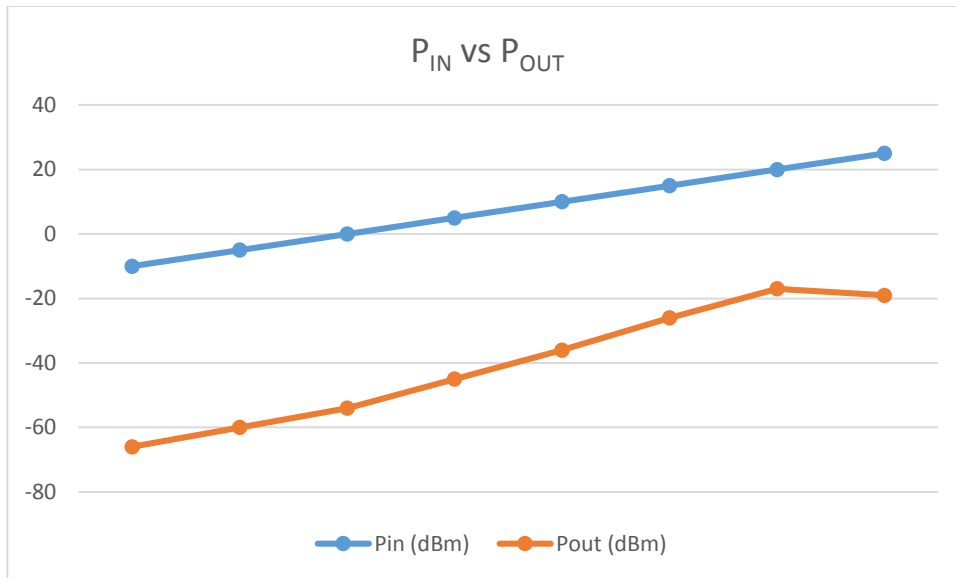


Figura 63. Balance de potencias real P_{IN} vs P_{OUT}

Se puede observar que para tener un nivel de señal recibido relativamente bueno a 2m de distancia entre rescatador y tag, debemos transmitir con 20dBm. Es una potencia ligeramente elevada pero factible para el dispositivo del rescatador que podría llegar a transmitir 30dBm. Teniendo en cuenta esto y que las pérdidas introducidas por una capa de nieve de 2m, según los estudios de la Universidad de Zaragoza [3], son unos 6 dB, podemos predecir un correcto funcionamiento de nuestro dispositivo en pruebas reales fuera de laboratorio hasta una profundidad de 5m.

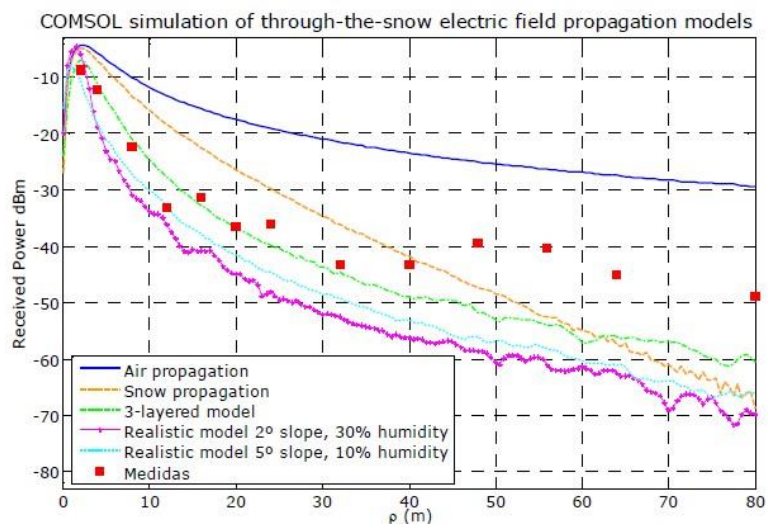


Figura 64. Pérdidas introducidas por la capa de nieve

Por último realizamos con la antena del rescatador un barrido en su azimut suponiendo ambas antenas en planos paralelos entre si (caso mejor) y perpendiculares al plano del azimut y ambas polarizaciones alineadas. Los

resultados de esta prueba, es decir la señal detectada por el equipo del rescatador en función del ángulo de apuntamiento o azimuth con respecto a la antenna del tag son los mostrados en la siguiente figura.

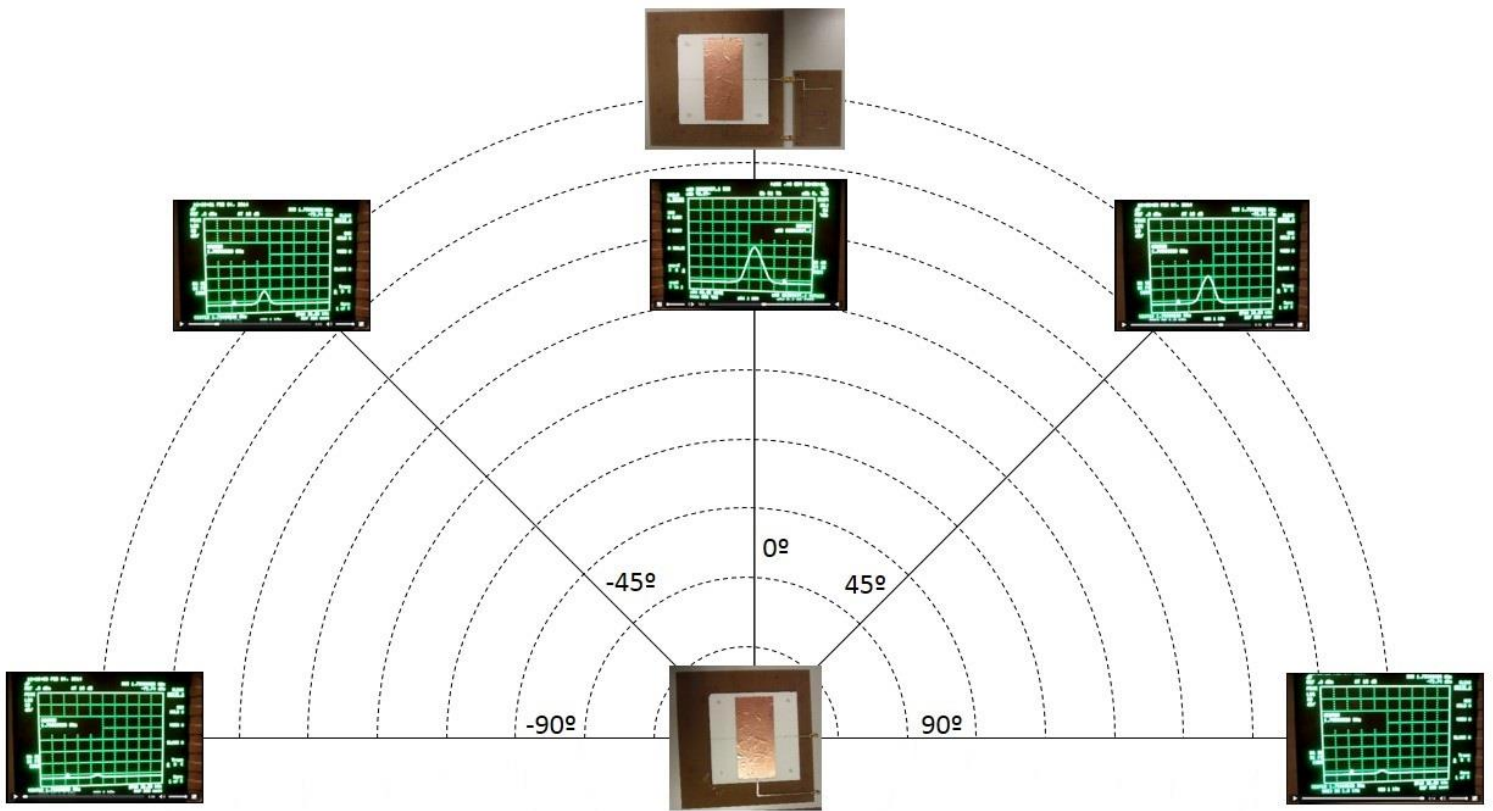


Figura 65. Barrido de antena de rescatador en su azimuth

Simplemente aclarar que las pruebas realizadas han sido limitadas por un armónico a 1,8GHz introducido por el propio equipo generador de señal utilizado en el laboratorio, lo que provoca que a partir de cierto punto no se puede bajar la potencia entregada a la antena del rescatador porque la señal recibida por la misma después de pasar por todo el sistema se confunde que este armónico del equipo generador y hace imposible la medida de dicha señal recibida.

Capítulo 3

Conclusiones

En el presente PFC se ha planteado el diseño de un sistema de detección de víctimas de avalanchas basado en una antena de tipo parche con alimentación mediante líneas μ strip acopladas que portará el equipo rescatador que busca a las víctimas y un respondedor pasivo, que portará la víctima, que contiene una antena de parche diseñada para recibir a f_0 y emitir a $2f_0$ y un circuito que dobla la señal f_0 recibida para entregar una señal $2f_0$ a la antena para su transmisión de vuelta al equipo del rescatador. Para lograr este objetivo se partió de una topología típica de un radar armónico y se realizó el ciclo completo de diseño, construcción, medida y prueba obteniendo unos resultados, expuestos anteriormente en esta memoria, altamente prometedores de cara a futuros estudios que continúen esta línea de investigación que hemos abierto.

Mediante diversas simulaciones realizadas en el dominio del tiempo con el programa de análisis electromagnético de onda completa CST Microwave Studio [16], se llevó a cabo la optimización de la antena de parche anteriormente descrita obteniendo una buena respuesta tanto del elemento radiante como de los elementos de alimentación de la misma. En cuanto al diseño del circuito del tag se utilizó el programa de análisis de circuitos AWR Microwave Office obteniendo igualmente una óptima respuesta. A partir de estas simulaciones se construyó un prototipo que funcionó satisfactoriamente.

Por tanto, como primera conclusión podemos afirmar haber conseguido un procedimiento completo de diseño/construcción/medición para este tipo de sistemas de detección de víctimas de avalanchas y, lo que es más importante, que demuestran un correcto comportamiento a distancias muy superiores a la media de las profundidades a las que se encuentran los accidentados en este tipo de siniestros según lo expuesto en el apartado 1.2.

Otra conclusión realmente importante es el hecho de haber ideado, diseñado y caracterizado una antena de parche capaz de emitir a f_0 y recibir a $2f_0$ de manera simultánea sin necesidad de establecer ciclos alternativos de emisión y recepción siendo la antena un componente crítico del sistema global.

Como líneas de futuro estudio podríamos destacar la reducción del tamaño global del sistema y en concreto de la antena. También podríamos reducir el tamaño del sistema trabajando con distintos tipos de sustratos ya que en el presente PFC hemos trabajado con sustratos de baja permitividad que, pese a demostrar un buen comportamiento hacen que el tamaño global no sea todo lo compacto que se pueda desear.

En la línea de utilizar diferentes sustratos podría plantearse también utilizar sustratos textiles para que el tag fuera 100% integrado en la ropa que lleve puesta la víctima. Esto significaría un paso más al método comercial actual consistente en encapsular el tag dentro de un pequeño contenedor plástico y coser éste a la ropa de montaña.

En concreto en la red circuital del tag se puede trabajar en optimizar el diseño del doblador, lo que redundaría en una notable reducción del tamaño del tag. Incluso podría estudiarse la posibilidad de usar un doblador activo incorporando una pequeña batería al diseño.

Por otro lado, sería otra buena línea de trabajo el aumentar la directividad de la antena, mediante quizá un array de antenas en el equipo del rescatador con dirección de radiación broadside de tal modo que alcanzaríamos mayores profundidades en la nieve o incluso permitiría montar el equipo rescatador en un helicóptero permitiendo también un aumento de la potencia transmitida por dicho equipo, para agilizar el barrido y búsqueda de la zona del siniestro. Así mismo se podría estudiar la posibilidad de que la antena del tag también estuviese formado por un array, caso en el que habría que prestar especial atención a los elementos activos que estarían repartidos por la indumentaria de la víctima, ya que es crítica la posición de los mismos para conseguir combinaciones en fase de las señales retransmitidas.

Por último, sería bueno trabajar en reducir la alta sensibilidad de la antena a las diferencias de polarización buscando una solución con polarización circular con lo que no dependeríamos de la rotación de ambas antenas ya que, pese a que tenemos control sobre la orientación de la antena del rescatador, no tenemos ningún tipo de control ni es posible tenerlo sobre la antena de la víctima.

Bibliografía

- [1] ETSI EN 300 718-1 V1.2.1 (2001-05); “Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Avalanche Beacons; Transmitter-receiver systems”
- [2] Luis Inclán-Sánchez, José-Luis Vázquez-Roy, and Eva Rajo-Iglesias; “Proximity Coupled Microstrip Patch Antenna With Reduced Harmonic Radiation”; IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. 57, no. 1, January 2009
- [3] V. Bataller, N. Ayuso, A. Muñoz, D. Tardioli, J.A. Cuchí, F. Lera, and J.L. Villarroel; “Modeling of Through-the-Snow Electric Field Propagation for Rescue Systems”; COMSOL Conference Stuttgart, 2011
- [4] N. Ayuso, A. Muñoz, V. Bataller, J. A. Cuchí, F. Lera, and J. L. Villarroel; “Characterization of the Snow Cover Wireless Channel”; Progress in electromagnetics research symposium, Marrakesh, Morocco, Mar. 2011
- [5] François Sivardière; “Transceiver Tests: laboratory measurements”; Snow and Avalanches review of ANENA, no. 95, September 2001
- [6] Falk, M., M. Brugger, and L. Adler-Kastner, Avalanche survival chances," Nature, Vol. 368, No. 1, 21, 1994
- [7] David McClung, and Peter Schaerer: “The avalanche handbook”, (The mountaineers books, 2006)
- [8] *Skimo racing and adventurous touring* Disponible [Internet]:
<<http://www.skintrack.com/>>
- [9] *Arva, Snow safety equipment* Disponible [Internet]: <<http://www.arva-equipment.com/>>
- [10] *Colorado Avalanche Information Center* Disponible [Internet]:
<<http://avalanche.state.co.us/accidents/statistics-and-reporting/>>
- [11] *American Avalanche Association* Disponible [Internet]:
<<http://www.americanavalancheassociation.org/>>

- [12] *European Avalanche Warning Services* Disponible [Internet]:
<<http://www.avalanches.org/>>
- [13] *Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research* Disponible [Internet]:
<<http://www.wsl.ch/>>
- [14] *Sunrockice Mountain & Ski Guides New Zealand* Disponible [Internet]:
<<http://www.sunrockice.com/>>
- [15] *Associació per al coneixement de la neu i les allaus* Disponible [Internet]:
<<http://www.acna.cat/>>
- [16] *Computer Simulation Technology* Disponible [Internet]: <<http://www.cst.com/>>
- [17] *Applied Wave Research* Disponible [Internet]: <<http://www.awrcorp.com/>>
- [18] *Agilent Technologies* Disponible [Internet]: <<http://www.agilent.es/>>