



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.

MÁSTER UNIVERSITARIO INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

ÁREA DE TEORÍA DE LA SEÑAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER N° 201815

Diseño de antena en banda UHF para CubeSat

**D. Núñez Lobete, Catalina
TUTOR: D. M^a Elena de Cos Gómez**

FECHA: Julio 2018



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. EL ESTANDAR CUBESAT	6
3. ESTADO DEL ARTE DE LAS ANTENAS CUBESAT.....	10
3.1. ANTENAS DESPLEGABLES	10
3.1.1. MONOPOLOS/DIPOLOS	10
3.1.2. HELICES.....	11
3.1.3. PARABÓLICAS	12
3.2. ANTENAS FIJAS	14
3.2.1. PLANARES	14
4. DISEÑO DE LA ANTENA.....	17
4.1. DEFINICIÓN DE REQUISITOS.....	17
4.1.1. Materiales	17
4.1.2. Control térmico.....	17
4.1.3. Tamaño y peso.....	18
4.1.4. Frecuencia.....	18
4.2. SELECCIÓN DE MATERIALES.....	19
4.2.1. TMM.....	19
4.2.2. Rogers 3000.....	20
4.2.3. Rogers RT/Duroid 5880	20
4.2.4. Rogers 4003C	21
4.2.5. Comparativa y análisis de materiales	21
4.3. ALIMENTACIÓN.....	22
4.3.1. Alimentación por microstrip.....	22
4.3.2. Alimentación directa con sonda coaxial.....	23
4.4. DISEÑO.....	23
4.4.1. DISEÑO 1: Antena de parche estándar con sustrato RO3003	24
4.4.2. DISEÑO 2: Antena de parche estándar con sustrato RO3010	31
4.4.3. DISEÑO 3: Antena PIFA con sustrato RT/Duroid 5880	35
4.4.4. DISEÑO 4: Antena PIFA con sustrato RO4003C.....	42
4.4.5. DISEÑO 5: Antena PIFA con sustrato RO3006	47



4.5. COMPARATIVA DE DISEÑOS	53
5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	56
6. REFERENCIAS	57

Anexos

- 1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES**
- 2. PARÁMETROS DE LA ANTENA**
- 3. EL SOFTWARE ANSYS HFSS**
- 4. DATA SHEET DEL SUSTRATO TMM**
- 5. DATA SHEET DE SUSTRATOS ROGERS 3000**
- 6. DATA SHEET DEL SUSTRATO RT/DUROID® 5870/ 5880**
- 7. DATA SHEET DE SUSTRATOS ROGERS 4000**
- 8. DATA SHEET DE LA ANTENA DESPLEGABLE ISIS**



1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día todo gira alrededor de las comunicaciones y la posibilidad de adquirir nuevo conocimiento. La mayor parte de la tecnología está destinada a facilitar la comunicación entre personas y dispositivos.

La información es un recurso demandado, donde la accesibilidad a ella se hace cada vez más amplia. Debido ello, los satélites de comunicaciones adquieren una gran importancia, ya que permiten la comunicación entre diferentes puntos situados a grandes distancias. En el diseño de la constelación de satélites se presta especial atención a la selección del número de estos y a sus órbitas, para que siempre estén visibles en cantidad suficiente desde cualquier lugar del mundo y así asegurar la disponibilidad de señal y la precisión.

Es así como la tecnología satelital ha entrado en una nueva etapa, donde los pequeños satélites están en auge y donde las ideas de innovación futuras están basadas en la posibilidad de lograr todo lo que ya se ha logrado gracias a los grandes satélites con apenas una pequeña fracción de estos.

CubeSat es un estándar de diseño de nanosatélites, que hace posible el desarrollo de misiones espaciales de bajo coste debido a la producción en volumen, y a la flexibilidad a través del intercambio rápido de módulos de carga útil. Esto hace que las misiones de CubeSat sean de menor coste y se desarrollen más rápidamente que las misiones satelitales convencionales.

Uno de los elementos más críticos de los satélites CubeSat son las antenas de comunicaciones. Estas son las encargadas enviar la información captada por otros elementos del Cubesat hacia la estación terrena y para enviar datos desde la estación terrestre al Cubesat.

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño y medición de un prototipo de antena para CubeSat en la banda UHF/VHF.

Algunos de los factores a tener en cuenta en el diseño de una antena son: la gama de frecuencias en las que se puede usar, el ancho de banda, el patrón o diagrama de radiación ganancia máxima, impedancia de entrada, tamaño físico, coste, etc...

Las tareas desarrolladas en el proyecto son: La familiarización con el estándar CubeSat y los requisitos del satélite. El estudio del estado del arte en antenas para CubeSat, diseños comerciales y publicaciones científicas al respecto. La definición de los requisitos de diseño de la antena para la banda de frecuencia de operación considerando opciones de despliegue y conectores. La selección de sustratos dieléctricos para el diseño que satisfagan los requisitos de espacio, así como la caracterización electromagnética en la banda de operación si es un material novedoso para uso en antenas. Diseño de la antena mediante software de simulación en 3D. Medidas de adaptación de la antena con VNA (Vector Network Analyzer).



Medidas de propiedades de radiación: diagrama, ganancia, directividad, eficiencia de radiación, relación axial, FTBR (Front to Back Ratio). Análisis de resultados y comparativa.



2. EL ESTANDAR CUBESAT

CubeSat es un estándar de diseño de nanosatélites, cuya estructura es escalable en cubos de 10 cm de arista y masa inferior a 1,33 kg.

Fue concebido en 1999 por las universidades Politécnica de California y Stanford de diseño de nanosatélites con el fin de ofrecer la oportunidad a estudiantes universitarios de participar activamente en el desarrollo de estos satélites.

Esta estandarización ha hecho posible el desarrollo de misiones espaciales de bajo coste debido a la producción en volumen, y a la flexibilidad a través del intercambio rápido de módulos de carga útil. Esto hace que las misiones de CubeSat sean de menor coste y se desarrollen más rápidamente que las misiones satelitales convencionales. Son, por lo tanto, una forma efectiva de enviar una carga útil a órbita. La mayoría de los satélites llevan uno o dos instrumentos científicos de medida como su carga útil primaria.

Los satélites CubeSat son construidos con dimensiones estándar (llamadas unidades U) de 10 cm x 10 cm x 10 cm. Pueden tener un tamaño de 1U, 2U, 3U o 6U, y por lo general pesan menos de 1,33 kg por U. En la figura 1 se observa uno de estos satélites de tamaño 1U.

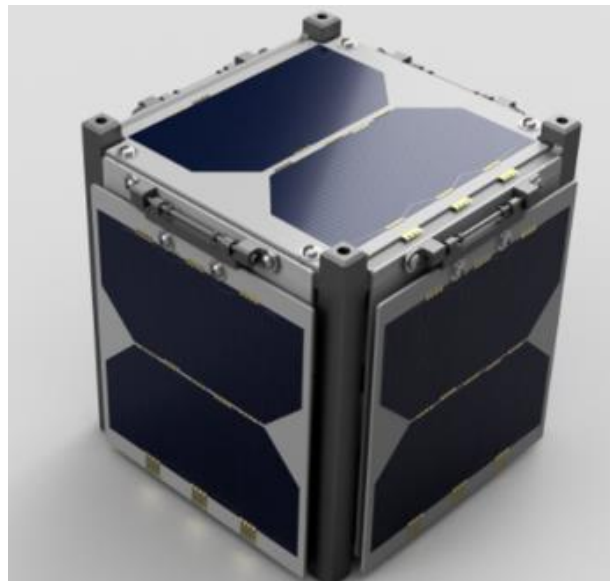


Figura 1. Módulo de tamaño 1U de un sistema CubeSat

Las especificaciones CubeSat buscan cumplir varios objetivos específicos: La simplificación de su estructura permite el diseño y manufacturación de un satélite funcional a bajo coste. La encapsulación del lanzador y la interfaz de la carga útil reducen problemas burocráticos y prohibiciones, comunes entre el lanzador y desarrollador. La unificación de cargas útiles y lanzaderas permite un rápido intercambio de cargas útiles y una fácil integración.



El interior de los satélites está dividido en bandejas que contienen diferentes circuitos, entre ellos, la CPU, encargada de controlar a los demás componentes, y controlada desde la tierra para observar su funcionamiento, y realizar las modificaciones que sean necesarias.

El satélite CubeSat contiene, entre otros componentes: antenas, reguladores de carga, fuentes de alimentación, baterías, CPU, radiomodem, transmisor y receptor, giroscopio y paneles solares.

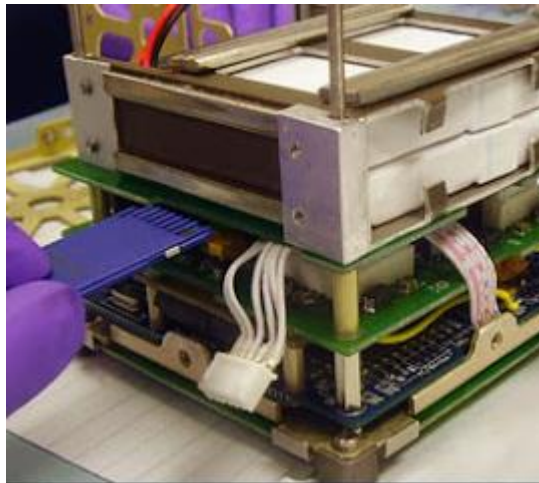


Figura 2 Interior del módulo de un sistema CubeSat

Los CubeSat de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) se lanzan gracias al P-POD (Poly Picosatellite Orbital Deployer). Es el sistema de liberación de los satélites, desarrollado para expulsarlos a su órbita desde el vehículo de lanzamiento de una manera segura.

Los CubeSats se colocan dentro del P-POD y se aseguran con una puerta que contiene un mecanismo de resorte en las bisagras que le permite abrirse a partir de una señal eléctrica.

A continuación, se puede observar el P-POD de diferentes tamaños.

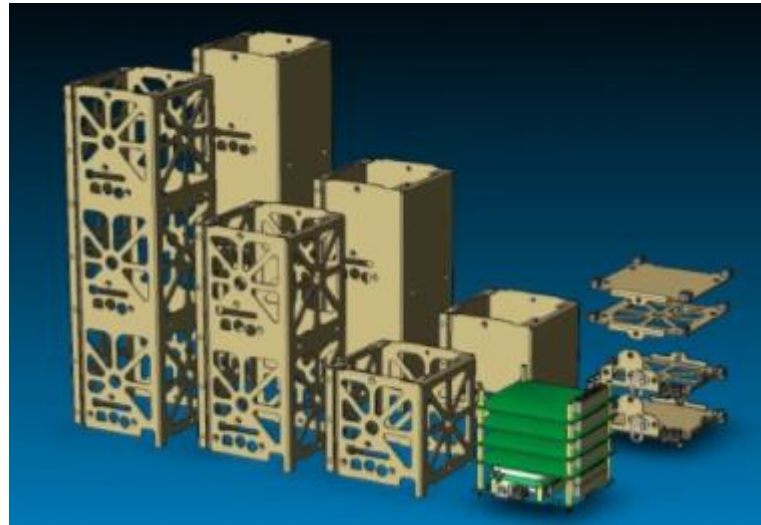


Figura 3. Estructuras CubeSat de 1U, 2U y 3U.

Una de las grandes ventajas de los CubeSats, es que su desarrollo se basa en tecnologías COTS (Comercial Of The Shelf), sin que estas hayan sido previamente cualificadas para su uso en vuelo. Esta estrategia otorga una mayor flexibilidad en los diseños, además de reducir costes y tiempos de desarrollo, a cambio de reducir la esperanza de vida. Esta, muchas veces no es requerida ya que su uso habitual se da en órbitas LEO (Low Earth Orbit).

Los satélites se lanzan a órbitas LEO, porque así se precisa de menos energía para situarlos y, además, necesitan transmisores menos potentes para la transferencia de datos, lo que conlleva un considerable ahorro económico.

La motivación principal del estándar fue conseguir que los satélites fueran aceptados como dispositivos confiables, ya que antes de la aparición del estándar CubeSat, el lanzamiento de cargas útiles secundarias era un problema porque no se quería arriesgar la misión al introducir dispositivos adicionales que añadieran complejidad a la misión. Ahora, se pueden lanzar los CubeSats de manera regular prácticamente desde cualquier lanzador espacial a un precio accesible.

El estándar CubeSat está respaldado por cientos de organizaciones que aspiran a tener acceso rápido y económico al espacio. Logrando que tanto instituciones académicas como la industria privada y las entidades gubernamentales puedan realizar con facilidad y rapidez una gran cantidad de misiones que, en el pasado eran inimaginables, como el despliegue de constelaciones con cientos de satélites trabajando en coordinación.

Existen varias iniciativas tanto privadas como públicas, para el lanzamiento de CubeSat. Un ejemplo de estas iniciativas es la CSLI (Iniciativa de Lanzamiento de CubeSat de la NASA). Esta brinda la oportunidad de que pequeñas cargas satelitales puedan volar sobre cohetes planificados ya en otras misiones. De modo que estos CubeSat se lanzan como cargas útiles en misiones planificadas previamente.



Las aplicaciones para esta tecnología están muy diversificadas. Se clasifican, principalmente, en banco de pruebas para cualificación de tecnología en el espacio, enseñanza y formación y, por último, misiones científicas. Gracias a la participación de diferentes instituciones sus aplicaciones crecen diariamente.



3. ESTADO DEL ARTE DE LAS ANTENAS CUBESAT

Después del análisis realizado en el apartado anterior del modelo de referencia CubeSat, y los conceptos importantes del mismo, en este apartado se realiza un estudio acerca del estado del arte de las antenas que actualmente se utilizan en estos satélites.

Los diferentes tipos de antenas se han dividido en dos principales grupos: Antenas desplegadas y antenas fijas.

Para el primer grupo de antenas, las antenas desplegadas, la mayor dificultad de diseño consiste en el sistema mecánico de despliegue. Una vez el satélite está en órbita, la antena ha de desplegarse completa y correctamente, teniendo en cuenta las condiciones de trabajo, puesto que un fallo en el sistema de despliegue haría que la antena no funcionara.

La mayor ventaja en el diseño de este tipo de antenas es la reducción en la restricción de tamaño. Esta ya no es tan estricta como en el caso de las antenas fijas, debido precisamente a que las antenas se despliegan, y ya no es necesario un tamaño tan reducido de antena como en el caso de las antenas fijas.

La mayor dificultad en el diseño de las antenas fijas es la restricción de tamaño, ya que los satélites CubeSat se caracterizan por sus dimensiones reducidas, y la antena ha de ajustarse a las mismas. La antena se situará en las caras del CubeSat, cada una de dimensiones 10 cm x 10 cm.

3.1. ANTENAS DESPLEGABLES

Debido a los estrictos requisitos de espacio en estos satélites, a menudo se requieren estructuras desplegadas para componentes grandes. En la actualidad existen multitud de mecanismos de despliegue de antenas, a cada cual más elaborado. A continuación, se enumeran y explican brevemente algunas de ellas.

3.1.1. MONOPOLOS/DIPOLOS

Una de las configuraciones de antenas para satélites más utilizadas en el estándar CubeSat es el array de monopolos o dipolos. Esta configuración consiste en grupos pares de dipolos conectados a la salida de un divisor.

Dependiendo de la colocación de las antenas, se tienen diferentes diagramas de radiación, por lo que las aplicaciones de estas antenas son muy variadas.



La figura 4, muestra una configuración en la que cada par de dipolos trabaja en una banda, UHF/ VHF, consiguiendo un mayor ancho de banda que si únicamente se trabaja con un par de antenas, debido a la suma de los anchos de banda de los pares involucrados. En el anexo 8 se adjuntan la hoja de características de la presente antena.

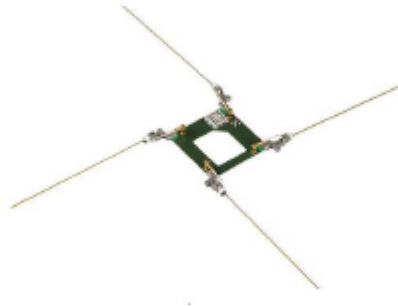


Figura 4. Array de monopolos con orientación de 90° entre sí.

Otro ejemplo de configuración de dipolos es el que se muestra en la figura 5. En, esta configuración las antenas están orientadas en la misma dirección. De modo que se obtiene un diagrama de radiación omnidireccional sin puntos ciegos.

En este caso el rango de frecuencias está en 400 – 500 MHz.



Figura 6. Array de monopolos orientados en una misma dirección.

3.1.2. HELICES

Las antenas helicoidales utilizadas en los satélites Cubesat cuentan con un método de despliegue eléctrico debido a su tamaño. Se suelen desarrollar para operar desde los 400 MHz hasta los 3 GHz.

La estructura se compacta axialmente con el fin de reducir sus dimensiones. Se utiliza un compuesto helicoidal que soporta el bobinado en el sentido opuesto de los conductores, tal y como muestra la figura 7.



Figura 7. Antenas helicoidales desplegadas y enrolladas de izquierda a derecha.

En la figura 8, se puede observar otro mecanismo de despliegue para este tipo de antenas. En este caso las antenas están soportadas en resortes de cintas de fibra de vidrio.

Este material es útil para una variedad de despliegues a escala de Cubesat.



Figura 8. Antenas helicoidales desplegadas y enrolladas en resortes de cintas de fibra de vidrio.

Los propósitos son muy diversos, desde una cobertura semiesférica cercana, a anchos de haz muy estrechos.

Pueden configurarse de modo que la polarización sea circular a izquierdas o derechas, por lo que presenta ventajas significativas sobre las antenas con polarización lineal.

Su principal ventaja es el tamaño reducido, las antenas pueden diseñarse para residir en menos de la mitad de una estructura de cubos de 1U.

3.1.3. PARABÓLICAS

Las antenas parabólicas desplegadas se caracterizan por ser ligeras y ultracompactas. Un ejemplo de este tipo de antenas son las diseñadas para la misión RainCube (radar en Cubesat). Es una misión de demostración tecnológica de radar de precipitación en banda Ka en una plataforma de bajo coste y respuesta rápida, llevada a cabo por la NASA.



RainCube desarrolló una carga útil de radar de 35,75Gb para operar dentro del factor de forma CubeSat de 6U.

Esta misión validará una nueva arquitectura para radares de banda Ka y una antena de banda Ka desplegable ligera y ultracompacta en un entorno espacial para elevar el nivel de preparación tecnológico del radar y la antena de 4 a 7 años de vida del programa.

RainCube también demostrará la viabilidad de una carga de radar en una plataforma CubeSat.

Se validan dos tecnologías clave en el entorno espacial: un radar miniaturizado de perfil de precipitaciones en banda Ka que ocupa un volumen de 2,5U y una antena parabólica desplegable en banda Ka de 0,5m que se almacena en un volumen de 1,5U.

Los instrumentos de radar a menudo se consideran inadecuados para plataformas de satélite pequeñas debido a su tamaño, peso y potencia tradicionalmente grandes. La arquitectura RainCube reduce el número de componentes, el consumo de energía y la masa en más de un orden de magnitud con respecto a los radares espaciales existentes.

La antena que se utiliza es una antena parabólica desplegable en banda Ka, con un factor de reflectividad de 20 dB con un rango de resolución de 250m.

El tamaño de la huella (resolución horizontal) está determinada por el tamaño de la antena. Para una altitud orbital de unos 400 km, la antena RainCube produce aproximadamente una huella de 8,5 km. Electrónica

A continuación, se observa el conjunto del dispositivo, formado por la electrónica del radar y la antena replegada, con una ocupación aproximada de 4,5U de volumen de 6U de la nave espacial.



Figura 9. Antena parabólica replegada



La figura 10 representa el sistema de vuelo RainCube con paneles solares y la antena de radar desplegada.

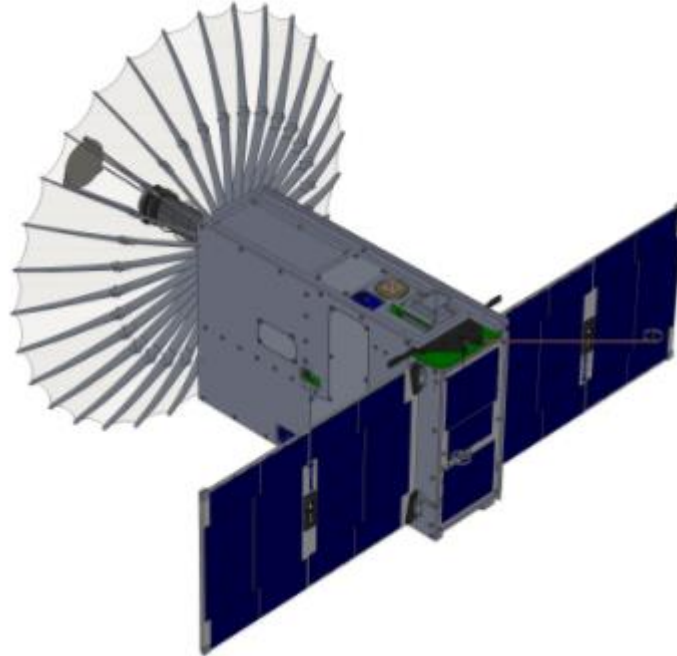


Figura 10. Antena parabólica desplegada.

3.2. ANTENAS FIJAS

La mayor dificultad en el diseño de las antenas fijas es la restricción de tamaño, ya que los satélites CubeSat se caracterizan por sus dimensiones reducidas, y la antena ha de ajustarse a las mismas. A continuación, se enumeran diferentes antenas fijas que se utilizan para este tipo de satélites.

3.2.1. PLANARES

Hay infinidad de prototipos de antenas planares para satélites pequeños como son los CubeSat. Un ejemplo de diseño de una antena planar es la antena de tipo parche con polarización circular basada en dos anillos que actúan uno como elemento excitador y otro como parásito, tal y como se muestra en la figura 11.

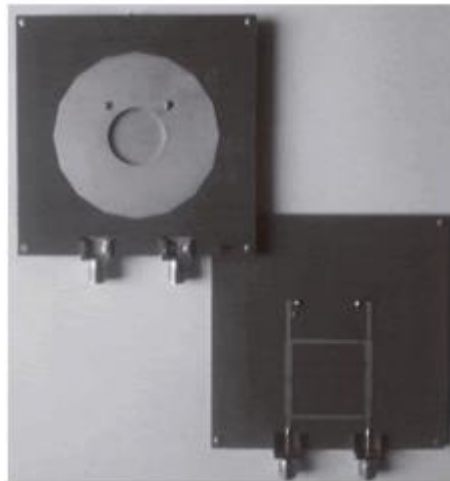


Figura 11. Fotografía de las vistas frontal y posterior de la antena de anillo circular donde se observa la antena y el híbrido.

Otro tipo de antena de parche es el que se basa en la tecnología microstrip. Su uso tiene un gran auge para aplicaciones en las que el tamaño reducido es importante, como es el caso. Algunas de las ventajas de este tipo de antenas son su reducido tamaño y su simplicidad de fabricación. Las principales desventajas son su baja potencia de radiación y eficacia, así como un reducido ancho de banda.

A continuación, se presenta el diseño de una agrupación de antenas tipo parche para aplicaciones satelitales, compuesta por 4 elementos. Consta de geometría rectangular alimentada por un híbrido de 90° , lo que permite que la antena presente polarización circular. Funciona en la banda de 2,3 - 2,4 GHz.

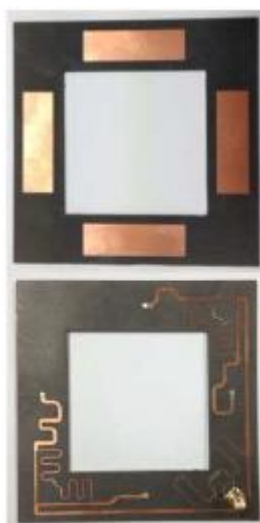


Figura 12. Array formado por 4 elementos de antena de parche.



A pesar de las limitaciones de espacio, el diseño propuesto logra una ganancia máxima de 6,1 dB a la frecuencia central de 2,35 GHz. La relación axial es de 0,93dB a la misma frecuencia, hecho que se atribuye al uso de un acoplador híbrido de 90° que alimenta la antena en dos puntos, el cual permite de igual manera el cambio en el sentido de giro de RHCP a LHCP y viceversa.

Así mismo, los resultados de las medidas del ancho de banda de impedancia son del 33,4% para una magnitud del coeficiente de reflexión de S11 menos a 10 dB, en el rango de 1,9 GHz a 2,65 GHz.

Como conclusión y en vista de las antenas se ha diseñado hasta el momento, en este trabajo fin de master se ha optado por el diseño de una antena de parche, con el fin trabajar en el diseño y reducción de las dimensiones de la antena, en lugar de trabajar en el diseño mecánico de despliegue de la antena, puesto que las antenas fijas tienen como principal dificultad, la reducción de las dimensiones en función de la frecuencia, mientras que las antenas desplegables tienen como principal dificultad el sistema de despliegue del mismo.



4. DISEÑO DE LA ANTENA

4.1. DEFINICIÓN DE REQUISITOS

En este apartado se mencionan las principales especificaciones y requerimientos, físicos, eléctricos, operacionales, regulatorios y administrativos, que un proyecto CubeSat debe de cumplir para poder ser puesto en órbita bajo la normativa del estándar CubeSat.

Una parte imprescindible del sistema de comunicaciones CubeSat, es la antena de telemetría, la cual típicamente funciona en las bandas de VHF/UHF. La antena que se va a diseñar tiene como propósito la comunicación del sistema de telemetría y comando de los CubeSat. Este es muy similar estructuralmente al de los satélites comerciales pero la capacidad de procesamiento demandada es mucho menor.

A continuación, se enumeran y describen los principales requisitos de diseño de la antena.

4.1.1. Materiales

Los materiales en el espacio a diferencia de los terrestres deben ser, muy ligeros pero resistentes para que puedan viajar en el lanzador con poco peso, pero soportar vibraciones, cambios de temperatura y radiaciones solares y del espacio exterior.

Las antenas espaciales tienen cada vez a diseños más precisos, ligeros, potentes, cubriendo exactamente lo que se desea, y captando desde tierra o desde el espacio, la información deseada.

Un análisis más detallado sobre los diferentes materiales a utilizar se realiza en los siguientes apartados.

4.1.2. Control térmico

La superficie del satélite recibe tanto radiación solar como radiación infrarroja de manera directa. También se dan ocasiones en las que el satélite se encuentra en zonas de eclipse (zonas donde el satélite no está expuesto a la luz solar) lo cual provoca que existan choques térmicos en todos sus elementos.

Así, el satélite debe de soportar temperaturas extremas, desde altas temperaturas en torno a los 150°C (provocadas por el flujo solar), hasta bajas temperaturas de -100°C (en presencia de sombra).

Sin embargo, para que el satélite y sus diferentes funcionen adecuadamente, se debe de mantener al satélite dentro de unos rangos de temperatura distintos a los rangos a los que el entorno espacial lo somete.



Dependiendo de los componentes o elementos de los que se trate, las temperaturas de operación van a variar como se indica a continuación:

- Componentes electrónicos -10 a 60°C
- Celdas solares -100 a 100°C
- Combustible 7 a 35°C
- Sensores -20 a 45°C

El subsistema de control térmico es aquel que utiliza diversos métodos y materiales aislantes y conductores térmicos para poder mantener los rangos de temperatura adecuados de cada elemento, componente o dispositivo del satélite.

Para cumplir con este objetivo es importante la adecuada selección de los materiales de las antenas y de la estructura, así como los aislamientos e intercambiadores térmicos. Se pueden utilizar recubrimientos de baja conductividad y baja expansión térmica.

Otro modo de mantener los rangos de temperatura en algunos satélites es el propio giro sobre su propio eje lo cual mantiene una temperatura uniforme en el satélite haciendo que el control de temperatura sea relativamente sencillo.

4.1.3. Tamaño y peso

El subsistema de comunicaciones presenta varias dificultades y limitadores debido al tamaño del satélite.

Estos CubeSat son cubos con una medida estándar de 10x10x10 cm con un peso menor a 1,33kg, esto es lo que se considera una unidad U.

Hay CubeSat de dos, tres, seis y doce unidades. Son satélites que gracias a la estandarización su diseño, desarrollo y lanzamiento tiene un coste mucho menor a comparación de uno tradicional.

El peso debe de ser reducido pues este está directamente ligado al coste del lanzamiento y una pequeña variación en el peso del satélite representa un gran aumento en el precio de lanzamiento.

4.1.4. Frecuencia

La antena ha de trabajar en la banda de UHF, concretamente en las frecuencias que utiliza el subsistema de telemetría de CubeSat.

El subsistema de telemetría y comando es un sistema que transmite datos y recibe comandos de control del satélite mediante el subsistema de comunicaciones y que procesa y analiza la información que recibe tanto de las estaciones de tierra como de los diversos sensores de temperatura, voltajes, corrientes, aceleración y orientación que lo componen. Tiene como objetivo la monitorización de las condiciones de a bordo, con lo cual garantiza



el buen funcionamiento de todos los subsistemas del satélite y en caso de requerirlo, la realización de alguna tarea de corrección en específico.

Con este subsistema se puede manipular el estado del satélite modificando alguno o varios de sus parámetros como el valor la ganancia de los amplificadores, el estado de los interruptores, la conmutación del transpondedor, la orientación del satélite, la extensión de los paneles solares en los sistemas triaxiales, el movimiento de las antenas, el estado de los motores de propulsión, etc.

Se comunica constantemente con las estaciones en tierra mediante señales cifradas y codificadas que contienen toda la información de sus sensores y los comandos a accionar por el satélite.

Además, sirve para calcular la distancia entre la estación terrena y el satélite por medio del retraso de una señal que viaja al satélite y regresa a la estación terrena.

4.2. SELECCIÓN DE MATERIALES

El material que más influencia tiene en el diseño de la antena es el sustrato sobre el que se va a diseñar.

Este sustrato tiene que presentar una constante dieléctrica lo suficientemente alta que ayude a la reducción de las dimensiones de la antena, con unas pérdidas bajas para obtener unos parámetros de radiación aceptables. Además, ha de presentar unas características adecuadas para el entorno en el que la antena va a estar operativa, en este caso, el espacio.

Se ha realizado una investigación previa sobre los diferentes modelos de la marca Rogers, y las propiedades de los mismos tal y como se muestra en los siguientes apartados.

4.2.1. TMM.

Los laminados TMM están disponibles en una amplia gama de constantes dieléctricas que van de 3 a 13.

Debido a su estabilidad eléctrica y mecánica, los laminados de alta frecuencia de TMM son ideales para aplicaciones de stripline y microstrip de alta confiabilidad.

Los laminados TMM ofrecen ventajas clave de fabricación ya que están disponibles revestidos de cobre en formatos grandes.

A continuación, se enumeran algunos de los beneficios de estos sustratos:

- Amplia gama de constantes dieléctricas
- Coeficiente térmico excepcionalmente bajo de la constante dieléctrica.
- Resistente a los productos químicos de proceso. Sin daños al material durante los procesos de fabricación y ensamblaje



- No se requieren técnicas de producción especializadas.

4.2.2. Rogers 3000

Estos laminados ofrecen una estabilidad excelente de la constante dieléctrica sobre la temperatura, incluida la eliminación del cambio de paso en la constante dieléctrica, que se produce cerca de la temperatura ambiente con materiales de vidrio de PTFE (politetrafluoroetileno, comercialmente conocido como teflón).

Además, RO3006 y RO3010 exhiben un factor de baja disipación, estos son de 0.0020 a 10 GHz para laminados RO3006 y de 0.0022 a 10 GHz para laminados RO3010.

Algunas aplicaciones típicas son:

- Amplificadores de potencia
- Acopladores de RF
- Aplicaciones aeroespaciales y de defensa sensibles a los costos

Laminados RO3003

- Laminados de PTFE / cerámica con propiedades eléctricas excepcionales y estabilidad mecánica
- Constante dieléctrica 3.00 (+/- 0.04); factor de disipación 0.0013@010GHz

Laminados RO3006 y RO3010

- Laminados de constante dieléctrica más alta para tamaño de circuito reducido
- Constante dieléctrica de 6.15 +/- 0.15 para laminados RO3006 y 10.2 +/- 0.30 para laminados RO3010

4.2.3. Rogers RT/Duroid 5880

Los laminados de alta frecuencia RT / duroid® 5880 son compuestos de PTFE reforzados con microfibras de vidrio. Las microfibras orientadas al azar dan como resultado una uniformidad de constante dieléctrica excepcional.

Los laminados RT / duroid 5880 se cortan, cizallan y mecanizan fácilmente para darle forma y son resistentes a todos los solventes y reactivos normalmente utilizados en el grabado de circuitos impresos o en los bordes y orificios de recubrimiento.

Tienen la menor pérdida eléctrica de cualquier material de PTFE reforzado, poca absorción de humedad, son isotrópicos y tienen propiedades eléctricas uniformes sobre la frecuencia.

Algunas de sus características son:



- Bajo factor de disipación.
- Baja absorción de humedad.
- Propiedades eléctricas uniformes en una amplia gama de frecuencias.
- Constante dieléctrica de 2.2 ± 0.02 para laminados RO5880.

4.2.4. Rogers 4003C

Los laminados RO4003C son hidrocarburos cerámicos laminados. Proporcionan un control estricto sobre la constante dieléctrica y bajas pérdidas al tiempo que utiliza el mismo método de procesamiento que el vidrio estándar, pero a un coste mucho menor que el de los laminados de microondas convencionales.

A diferencia de los materiales de microondas basados en PTFE, no se requieren tratamientos especiales de orificios pasantes o procedimientos de manipulación.

Algunas de sus características más importantes son:

- Excelente rendimiento de alta frecuencia debido a la baja tolerancia dieléctrica y bajas pérdidas.
- Propiedades eléctricas estables en frecuencia.
- Constante dieléctrica de 3.38 ± 0.05 para laminados RO4003C.

4.2.5. Comparativa y análisis de materiales

Los sustratos TMM, tienen un precio en comparación con los sustratos RO3006, por lo que este tipo de sustratos han sido descartado.

Debido a que el sustrato RO3010 presenta una constante dieléctrica alta, inicialmente se ha escogido como candidato para el diseño de la antena, aunque después más adelante en el diseño 2 se justifica porque se descarta.

Sin embargo, debido precisamente a su alta permitividad, este sustrato no es válido para el presente diseño puesto que después de realizar el estudio del diseño 2 de la antena, el cual se menciona en apartados posteriores, se concluye que los parámetros de radiación no son aceptables, por lo que se deshecha como material a utilizar y se estudian nuevas propuestas.

El siguiente material que se estudia es el sustrato RT / duroid® 5880, gracias al cual, se consigue reducir lo suficiente las dimensiones de la antena como para compactarla en el reducido espacio del CubeSat, con unas características de radiación aceptables para el presente diseño.

Aunque el objetivo del presente proyecto se alcanza con el material RT / duroid® 5880, se propone una reducción todavía mayor de las dimensiones de la antena gracias a la utilización de los sustratos RO4003C y RO3006. Estos sustratos poseen diferentes permitividades que permiten una reducción del tamaño de la antena con respecto a RT / duroid® 5880.

4.3. ALIMENTACIÓN

Un aspecto muy importante cuando se diseña una antena consiste en el esquema de alimentación [9][10]. Sin una estructura eficiente de alimentación, la antena no funciona correctamente, sin importar la precisión llevada a cabo para diseñar el elemento radiante.

Existen muchos métodos para alimentar una antena, se pueden condensar en tres categorías principales: alimentación directa, alimentación por proximidad y alimentación por apertura. Para el presente proyecto, se ha escogido el método de alimentación directa.

Como su nombre lo indica, este método de alimentación requiere de un contacto directo entre la estructura de alimentación y la antena radiante. Los dos principales métodos de alimentación de esta categoría son: alimentación por microstrip y alimentación por conector coaxial.

4.3.1. Alimentación por microstrip

Consiste en la alimentación del elemento radiador mediante la conexión directa de una línea microstrip, la cual está diseñada para tener la impedancia característica deseada.

Este método es el más sencillo de implementar, sin embargo, el que peor características presenta en relación con el ancho de banda y acoplamiento.

Existen dos formas principales de alimentar una antena por medio de microstrip: conectando la línea microstrip directamente en un borde de la antena, o por medio de inserciones en la antena (insert-feeding).

En el caso de la conexión directa al borde de la antena, la variación en la posición de la línea de microstrip en relación con el parche genera un mayor 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.

A continuación, se muestran gráficamente ambos métodos.

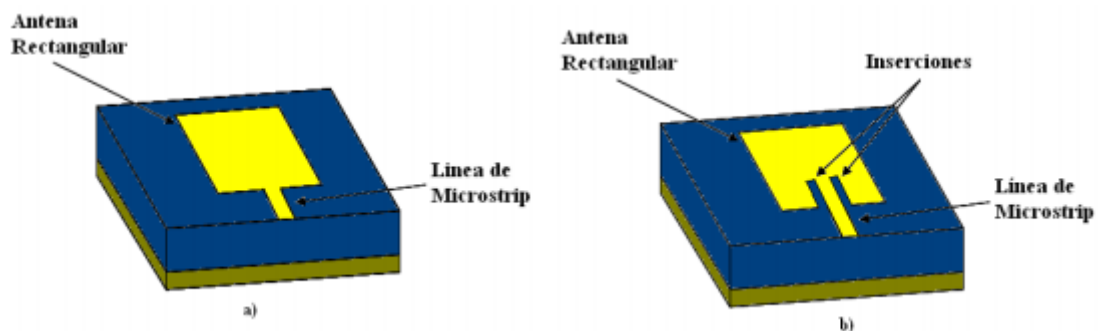


Figura 13. Alimentaciones por microstrip: a) Conexión directa de la línea de microstrip la antena y b) conexión de línea de microstrip con inserciones.



4.3.2. Alimentación directa con sonda coaxial

Este método consiste en hacer que el pin del cable coaxial alimente directamente al elemento radiador, mientras que la parte negativa de éste se conecta a la tierra de la antena de microstrip.

La impedancia depende de la posición de la sonda en relación con el elemento radiador de tal forma que, colocándola en la posición adecuada, genera un mejor acoplamiento.

Es uno de los métodos más comunes de alimentación de antenas microstrip. Sin embargo, presenta un alto grado de complejidad puesto que el pin conductor del cable coaxial debe perforar el sustrato y estar soldado a la antena para su correcto funcionamiento. En la figura 14 se muestra este método de alimentación.

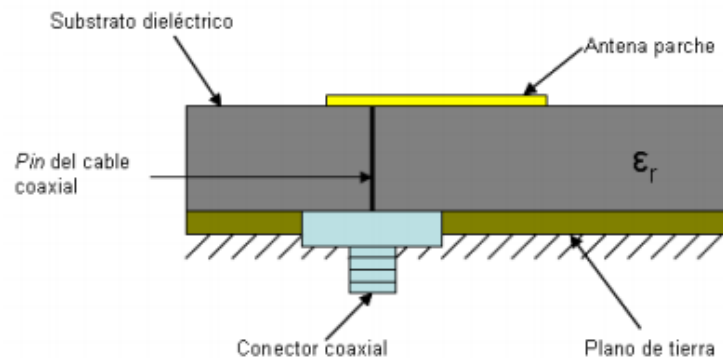


Figura 14. Alimentación por sonda de cable coaxial

4.4. DISEÑO

A continuación, se presentan diferentes versiones de la antena a diseñar.

- **Diseño 1.** Se plantea como punto de partida una antena de parche estándar con un sustrato RO3003 para hacer un estudio base del tamaño necesario, utilizando un material con permitividad y factor de disipación bajos y por consiguiente, coste reducido.
- **Diseño 2.** Consiste en una antena de parche estándar utilizando el sustrato RO3010. Gracias a su alta permitividad el tamaño de la antena se ve reducido considerablemente, aunque los parámetros de radiación se ven notablemente afectados negativamente para esta aplicación, por lo que el diseño no es válido.
- **Diseño 3.** Consiste en una antena PIFA (Planar Inverted F Antenna) utilizando el sustrato Rogers RT/Duroid 5880. En la sección 4.4.3 se explica el funcionamiento de este tipo de antena. Este nuevo diseño permite reducir las dimensiones de la antena, sin empeorar tanto como en el diseño anterior los parámetros de radiación, con lo que estos son válidos a diferencia del diseño 2. En este diseño se logra el objetivo de compactar la antena en dimensiones aptas para CubeSat, 3U



(100x300mm). Además, la antena se alimenta mediante coaxial, lo cual permite reducir las interferencias por alimentación con respecto a alimentar por línea microstrip.

- **Diseño 4.** Consiste en una antena PIFA utilizando el sustrato RO4003C. Este material presenta una permitividad mayor que el material utilizado en el diseño 3, con lo que se reducen las dimensiones de la antena, a costa de empeorar los parámetros de la misma.
- **Diseño 5.** Al igual que en el diseño anterior. La siguiente versión es una antena PIFA, en este caso, utilizando el sustrato RO3006. Este material presenta una permitividad aún mayor que el diseño anterior, con lo que se reducen aún más las dimensiones de la antena. En este caso la antena podrá mantenerse usando sólo 2U del CubeSat como máximo. Su permitividad intermedia entre RO4003 y RO3010, permite obtener unos parámetros de funcionamiento aceptables a la par que se ahorra espacio, con un coste no demasiado elevado.

4.4.1. DISEÑO 1: Antena de parche estándar con sustrato RO3003

Las antenas de parche son antenas que proceden de la tecnología microstrip. Es importante hacer hincapié en estos términos puesto que pueden dar lugar a confusión. Una antena microstrip posee una alimentación mediante una línea microstrip. Sin embargo, una antena de parche es aquella cuya geometría procede una línea microstrip y que se compone de al menos: plano de masa inferior, sustrato por encima de dicho plano de masa y un elemento radiante que se sitúa justo encima de dicho sustrato.

La figura 15 muestra un esbozo del diseño de la antena de parche estándar con las dimensiones que se han de calcular en función de los diferentes parámetros de la antena.

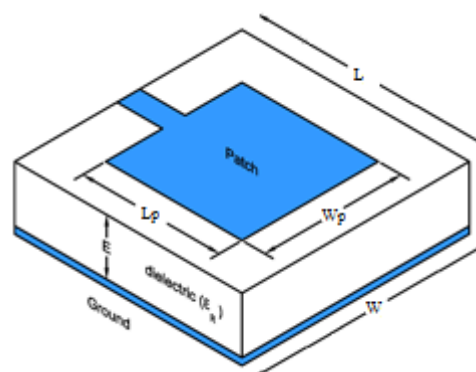


Figura 15. Estructura de una antena microstrip

Se utiliza el sustrato RO3003, que cuenta con las siguientes características:

$$\begin{aligned}\epsilon_r &= 3 \\ h &= 1,524\text{mm} \\ \tan\delta &= 0,001\end{aligned}$$

A continuación, se observa la geometría parametrizada de la antena.

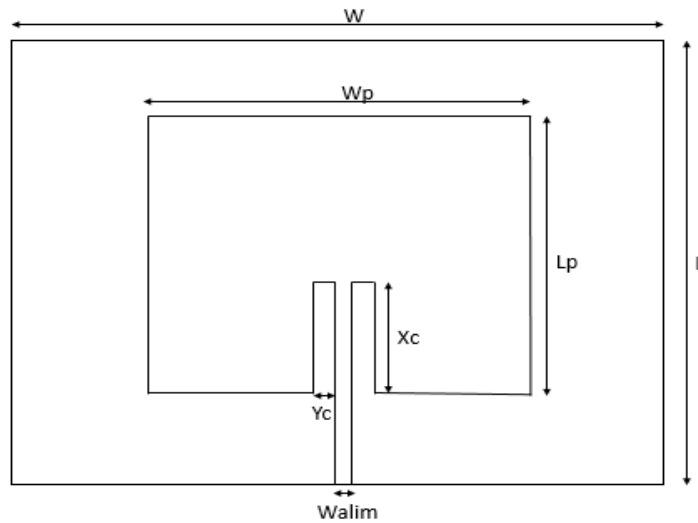


Figura 16. Geometría parametrizada de la antena

Para la estimación de las dimensiones se han utilizado las siguientes expresiones:

$$Wp = \frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r}\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r + 1}{2}\left[1 + \frac{12h}{Wp}\right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{ref} + 0.3)\left(\frac{Wp}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{ref} - 0.258)\left(\frac{Wp}{h} + 0.8\right)} \quad (3)$$

$$Lp = \frac{1}{2f_r\sqrt{\epsilon_{ref}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (4)$$

Realizando los cálculos se obtuvieron originalmente las siguientes dimensiones:

$$Wp = 242mm$$

$$Lp = 197,9mm$$

Pero el presente modelo no genera un diseño óptimo en relación con las dimensiones, ya que con este diseño no se tiene en cuenta el método de alimentación. Por ello ha sido necesario ajustar estas dimensiones en función de los resultados de simulación que se han ido obteniendo, variando muy ligeramente el ancho de la línea y más significativamente la altura de la inserción [10].

Para este primer diseño de la antena, se ha escogido alimentación mediante línea microstrip con inserciones tal y como se muestra en la figura 17.

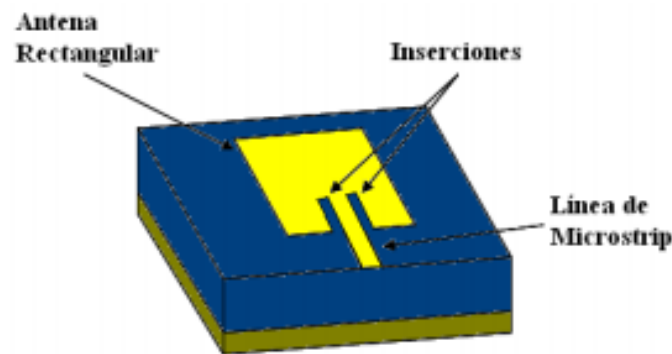


Figura 17. Conexión de línea de microstrip con inserciones

Puesto que la línea presenta una impedancia de entrada de 50Ω , ya que se ha diseñado para ello, es necesario buscar el punto donde la antena presenta esa misma impedancia de entrada, modificando así las inserciones, de modo que se consiga la adaptación de la antena.

Esta impedancia de entrada se consigue con una anchura de línea w_{alim} de 1.1mm, una anchura de inserción y_c de 4.2 mm y una longitud de inserción x_c de 72 mm.

Estos datos se han obtenido tras varias simulaciones en las que se ha variado tanto la anchura y altura de la línea como la de inserción.

La adaptación de la antena implica que, en el ancho de banda de resonancia, la amplitud del parámetro S_{11} decaiga notablemente por debajo de los -10dB.

Una de las ventajas de la excitación mediante línea microstrip es su simplicidad, dado que el circuito de alimentación del parche y el propio parche se construyen en el mismo proceso.



Sus inconvenientes son consecuencia justamente de residir el circuito de alimentación de la antena en el mismo plano y sustrato que la antena. Al residir la alimentación en el mismo plano que el parche, ésta puede influir en el diagrama de radiación de la antena, por tanto, es necesario llegar a un compromiso en la elección del tipo y espesor del sustrato.

Esto es debido a que las características que debe tener el sustrato para realizar la función de guiado (línea de transmisión) son diferentes de las necesarias para la realización de la función de radiación (antena). De hecho, las características son opuestas: para hacer una buena línea microstrip el sustrato debe ser de permitividad alta y de espesor pequeño a fin de concentrar los campos, mientras que en una antena se pretende justamente el efecto contrario, y, por tanto, se requieren sustratos con permitividad baja y espesores mayores. Además, el ancho de banda en frecuencia de las antenas microstrip con sustratos de permitividad bajas y espesores altos es mayor.

A partir de las dimensiones calculadas teóricamente, y tras varias simulaciones que han permitido variar las mismas, ajustándolas a los requerimientos del diseño, se tienen las siguientes dimensiones de la antena.

$$W_p = 182,8 \text{ mm}$$

$$L_p = 141 \text{ mm}$$

$$W_{lim} = 1,1 \text{ mm}$$

$$Y_c = 4,2 \text{ mm}$$

$$X_c = 72 \text{ mm}$$

Las dimensiones del plano de masa se han estimado de modo que fueran lo suficientemente grandes como para que no influyan negativamente en los parámetros de la eficiencia de la antena.

Si el plano de masa no es lo suficientemente grande en términos de longitudes de onda, la eficiencia de la antena disminuye como consecuencia de la potencia radiada en la región correspondiente al semiplano inferior.

Por lo tanto, las dimensiones del plano de masa mínimas estimadas son las siguientes:

$$W = 500 \text{ mm}$$

$$L = 300 \text{ mm}$$



Las principales ventajas de este tipo de antenas son su estructura plana, son fáciles de fabricar y presentan un bajo peso y coste.

Algunas desventajas son su elevado tamaño, y que son antenas de banda estrecha.

4.4.1.1. Influencia de los parámetros de diseño de la antena

El presente diseño de la antena se ha realizado calculando inicialmente las dimensiones teóricas de la misma. Sin embargo, éstas sufren ligeras variaciones atendiendo a diferentes efectos, tales como el tipo de alimentación, la impedancia de entrada, diferentes variaciones a causa de la fabricación de la misma, etc.

A continuación, se ha realizado un breve estudio de la influencia de las dimensiones de la antena en el diseño de la misma:

- **Dimensiones del sustrato (W y L):** Determinan la cantidad de potencia que se radia en el semiplano XY inferior. Cuanto mayores son las dimensiones del plano de masa, menor es la cantidad de potencia se radia en el semiplano XY inferior.
- **Dimensiones del parche (Wp y Lp):** Influyen principalmente en el ancho de banda de la antena, desplazando la banda en la que resuena. A medida que se aumenta la anchura del parche (Wp), la banda en la que resuena la antena disminuye. También influyen en la adaptación de la antena.
- **Espesor del sustrato (h):** A medida que el espesor del sustrato disminuye, el ancho de banda disminuye. Para bajar la frecuencia se aumenta el espesor (manteniendo el resto de valores). No se puede generalizar con otros parámetros de la antena, ya que, dependiendo de la permitividad del sustrato, la eficiencia de la antena puede variar de diferente manera.
- **Anchura y longitud de inserción:** Influyen en la adaptación de la antena [10], se han de escoger las dimensiones adecuadas para que la antena esté adaptada en la banda de trabajo, lo que se traduce en que la amplitud del parámetro S11 ha de ser notablemente menor que -10 dB en esta banda. Las ecuaciones que controlan estas variaciones pueden consultarse en Balanis, Antenna Theory [10].

4.4.1.2. Funcionamiento de la antena: Adaptación y parámetros de radiación

Adaptación

Las antenas basadas en tecnología microstrip presentan buenas características en adaptación en bandas no muy anchas y diagramas de radiación estables en frecuencia.

En la figura 18 se puede observar la amplitud del parámetro S11.

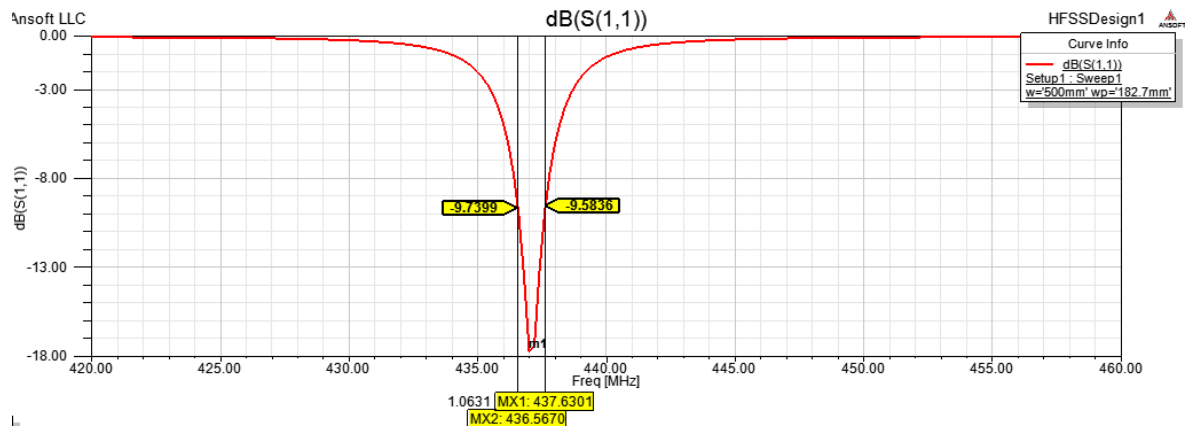


Figura 18. Amplitud de S11(f) del diseño 1

El ancho de banda de la antena de parche es de 1,07 MHz. La frecuencia de resonancia de la antena es de 437 MHz.

Parámetros de radiación

A continuación, se representa el diagrama de radiación de la antena en 3D.

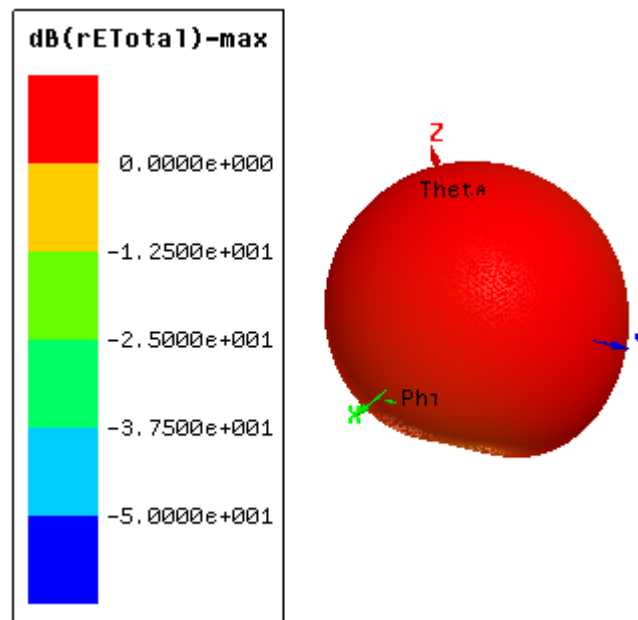


Figura 19. Diagrama de radiación de la antena del diseño 1 en 3D



En las siguientes figuras se tienen los cortes principales del diagrama de radiación en $\phi=0^\circ$ y 90° . Donde la traza azul representa la componente copolar del campo eléctrico y la componente morada la componente contrapolar.

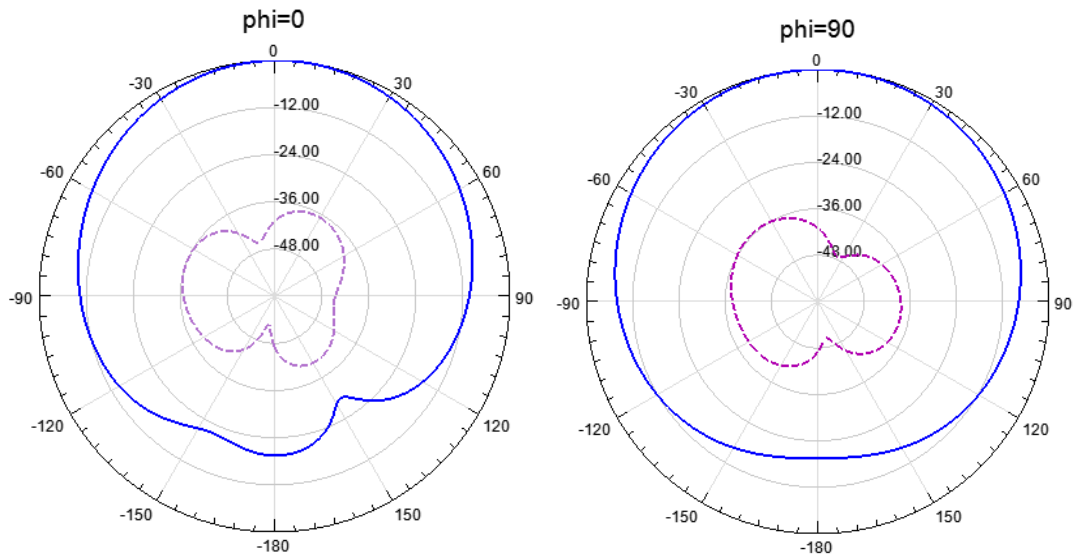


Figura 20. Cortes principales del diagrama de radiación del diseño 2 en $\phi=0^\circ$ y 90°

Tanto para el corte de $\phi=0^\circ$ como para $\phi=90^\circ$, la componente contrapolar es muy pequeña, del orden de -30 dB, la cual se puede considerar despreciable.

Si se analizan las componentes polares, se puede observar cómo para ambos cortes, la antena radia principalmente hacia $\theta=0^\circ$.

A continuación, se listan los parámetros de radiación de la antena obtenidos para el presente diseño de la misma.

	Diseño 1
Tipo de antena	Microstrip
Sustrato	RO3003
BW (MHz)	1.07
Ganancia (dB)	3.98
Directividad (dB)	6.72
Eficiencia (%)	53

Figura 21. Parámetros de radiación de la antena del diseño 1

La ganancia de la antena es de 3.98 dB, la cual es aceptable porque hay que tener en cuenta que las antenas desplegadas tipo monopolo/dipolo que se han usado hasta ahora en misiones CubeSat tienen una ganancia mínima de 0dB. La directividad es de 6.72 dB. La



antena presenta una eficiencia del 53%. No es excesivamente alta, pero válida para el presente diseño.

Como conclusión para el presente diseño, a pesar de que los parámetros de radiación son aceptables, esta antena no es válida, debido a las dimensiones de la misma, ya que estas exceden los límites del estándar CubeSat.

4.4.2. DISEÑO 2: Antena de parche estándar con sustrato RO3010

El presente diseño presenta la misma que el diseño anterior, modificando el sustrato sobre el que se presenta, RO3010 en lugar de RO3003.

El sustrato RO3010 cuenta con las siguientes características:

$$\epsilon_r = 10,2$$

$$h = 1,27mm$$

$$\tan\delta = 0,0022$$

Al igual que para el diseño 1 de la antena, a partir de las dimensiones calculadas, y tras varias simulaciones que han permitido variar las mismas, ajustándolas a los requerimientos del diseño, se obtienen las siguientes dimensiones de la antena.

$$Wp = 98 mm$$

$$Lp = 80 mm$$

$$Walim = 1,058 mm$$

$$Yc = 3 mm$$

$$Xc = 38,871 mm$$

$$W = 150 mm$$

$$L = 100 mm$$



En vista de los resultados obtenidos, las dimensiones de la antena cumplen con los requisitos de tamaño del diseño, pues estas no superan los 100mm x 200mm, con lo que caben en 2U del CubeSat.

Las principales ventajas del presente diseño con respecto al anterior, es la considerable reducción de las dimensiones, debido a la utilización del sustrato RO3010.

Algunas desventajas son la aparición de ondas de superficie, debido a que el sustrato presenta una alta permitividad, con lo que la eficiencia de radiación se ve considerablemente reducida. En este caso este diseño tampoco es válido, como se ve a continuación, a consecuencia de los malos parámetros de radiación.

4.4.2.1. Influencia de los parámetros de diseño de la antena

Puesto que el presente diseño difiere del anterior en la elección del sustrato, pero presenta la misma geometría (difiere únicamente en los valores de las dimensiones de la antena parametrizada), no se repite el análisis de la influencia de los parámetros.

4.4.2.2. Funcionamiento de la antena: Adaptación y parámetros de radiación

Adaptación

Como se puede observar en la siguiente figura, el ancho de banda de la antena de parche es 1.24 MHz.

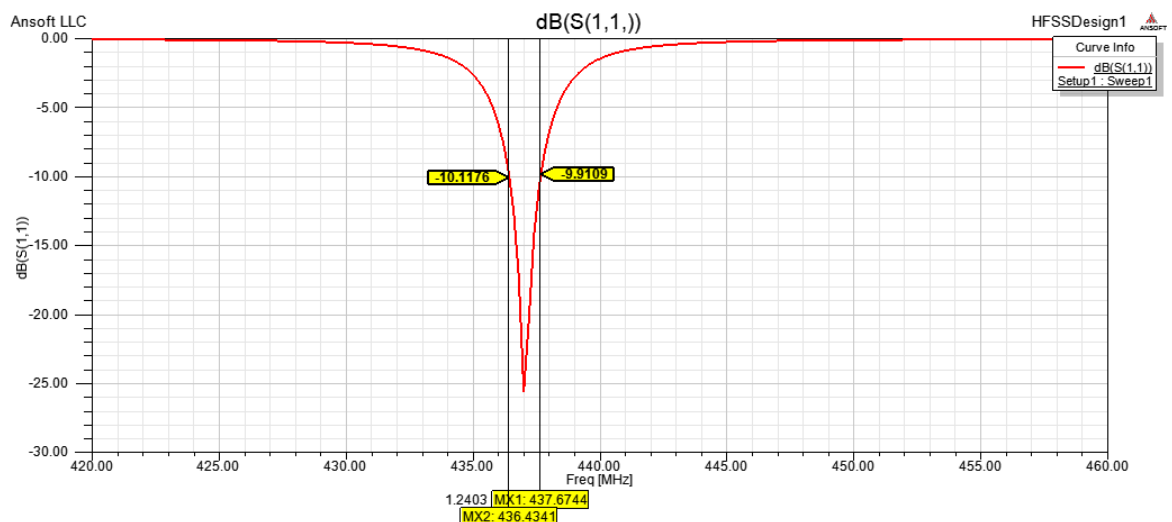


Figura 22. Amplitud de S11(f) del diseño 2



Estas antenas se caracterizan por ser de banda estrecha, entorno al 2-3%. En este caso es especialmente pequeño, puesto que es una antena que trabaja en frecuencias no muy altas con un sustrato de espesor muy alto.

Parámetros de radiación

En la figura 23 se tiene el diagrama de radiación de la antena en 3D. Se puede apreciar un diagrama prácticamente omnidireccional.

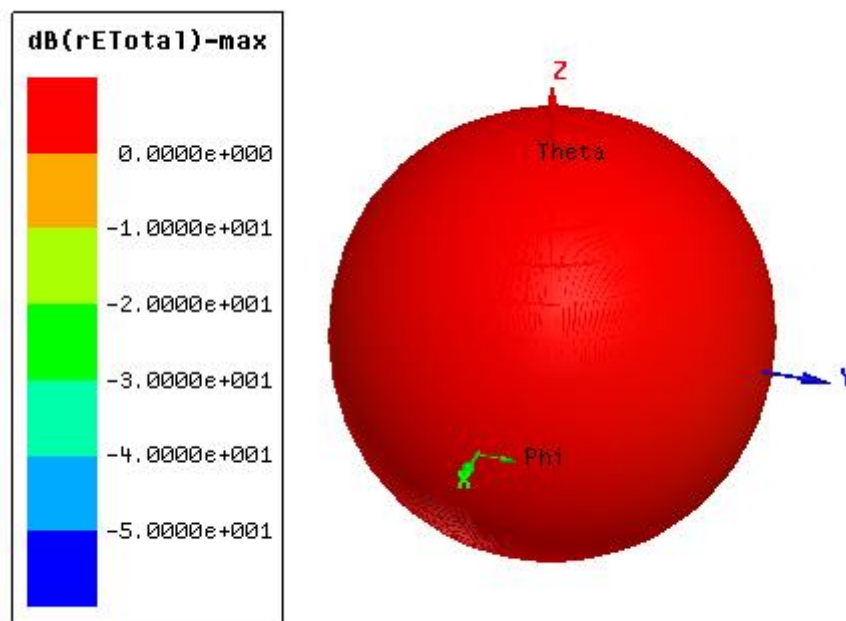


Figura 23. Diagrama de radiación de la antena del diseño 2 en 3D

Diagrama de radiación

A continuación, se muestran los cortes principales del diagrama de radiación en $\phi=0^\circ$ y 90° . Donde la traza roja representa la componente copolar del campo eléctrico y la componente morada la componente contrapolar.

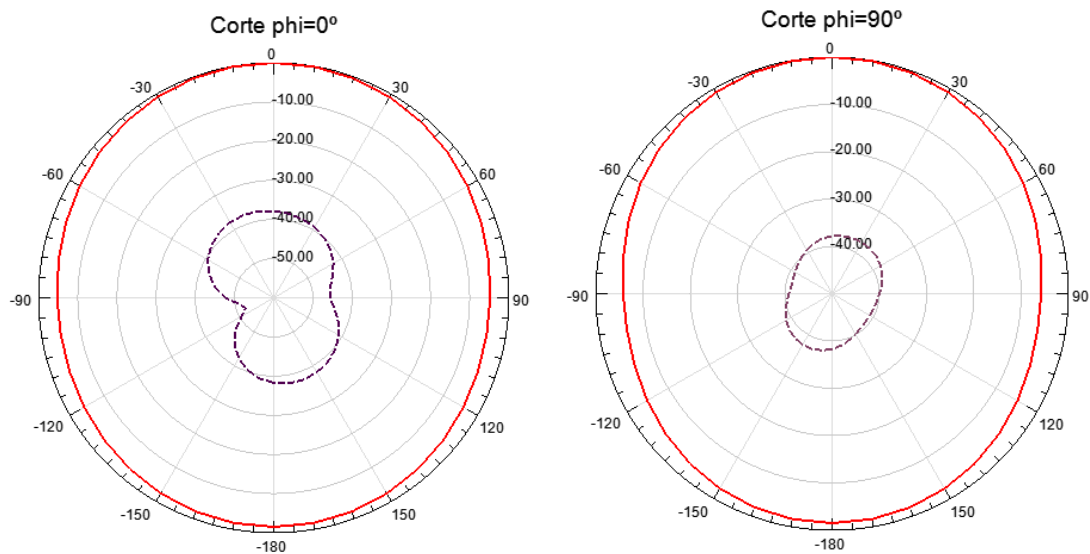


Figura 24. Cortes principales del diagrama de radiación del diseño 2 en $\phi=0^\circ$ y 90°

Tanto para el corte de $\phi=0^\circ$ como $\phi=90^\circ$, ambas componentes contrapolares son muy pequeñas, del orden de -40 dB, las cual se puedes considerar despreciable.

Si se analizan las componentes polares, ambas son altamente omnidireccionales, radiando principalmente hacia $\theta=0^\circ$.

A continuación, se listan los parámetros de radiación de la antena obtenidos para el presente diseño de la misma.

	Diseño 2
Tipo de antena	Microstrip
Sustrato	RO3010
BW (MHz)	1.24
Ganancia (dB)	-4.84
Directividad (dB)	2.27
Eficiencia (%)	14.43

Figura 25. Parámetros de radiación de la antena del diseño 2

En este caso la ganancia sale negativa, en concreto, su valor es de -4.84 dB. Es un valor bastante malo, aunque sigue siendo aceptable, puesto que hoy en día muchas antenas comerciales sacrifican el parámetro de ganancia a costa de reducir el tamaño y de otras prestaciones.

La directividad de la antena es de 2.27 dB.

La eficiencia es de un 14.43%. Este valor es extremadamente bajo, y por lo tanto no es válido. Causado entre otros, por la aparición de ondas de superficie.



El principal inconveniente que presenta la citada antena es una baja ganancia y eficiencia, debido principalmente a la alta permitividad del material y al reducir el tamaño del plano de masa.

Como se comentó anteriormente, es debido a que las características que debe tener el sustrato para realizar la función de guiado (línea de transmisión) son diferentes de las necesarias para la realizar la función de radiación (antena). De hecho, las características son opuestas: para hacer una buena línea microstrip el sustrato debe ser de permitividad alta y de espesor pequeño a fin de concentrar los campos, mientras que en una antena se pretende justamente el efecto contrario, y, por tanto, se requieren sustratos con permitividad baja y espesores mayores.

Como conclusión para el presente diseño, esta antena no es válida. Al contrario que en el diseño 1, la antena cumple las restricciones de tamaño (en este caso 100mm x 200mm), con lo que entraría en 2U del CubeSat, sin embargo, los parámetros de radiación (en concreto, la eficiencia del 14%) no son válidos y por lo tanto se han de considerar nuevas alternativas de diseño.

4.4.3. DISEÑO 3: Antena PIFA con sustrato RT/Duroid 5880

En el presente diseño de la antena se opta por otro tipo de antena a diseñar con un nuevo sustrato, puesto que, con un parche estándar, como en los dos casos anteriores, las dimensiones no cumplen los requisitos de diseño y es necesario optar por otras alternativas.

El tercer diseño realizado consiste en una antena tipo PIFA, muy utilizada para unidades móviles en frecuencias considerablemente más elevadas que las que se requieren en este trabajo. Son una variante de las antes de parche, cuyas dimensiones se reducen hasta la mitad de una antena tipo parche cuadrado.

La antena PIFA se puede considerar como un caso particular de la antena MSA (Short-circuited Microstrip Antena). Esta consiste en una antena impresa rectangular, como en los diseños anteriores, la cual se cortocircuita conectando el elemento radiante y el plano de masa tal y como se muestra en la figura 26.

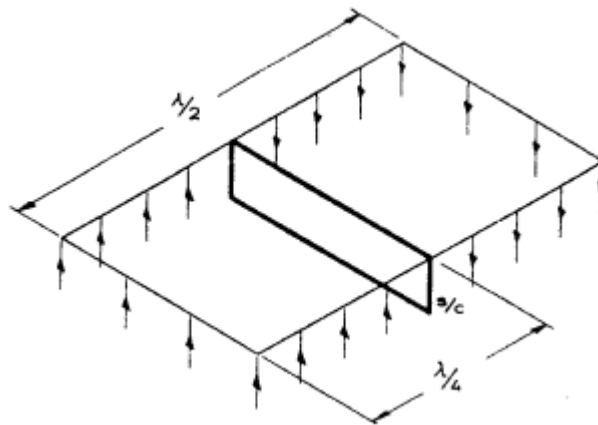


Figura 26. Antena microstrip cortocircuitada

En este caso, el tamaño del parche se reduce a la mitad situando un plano de “cortocircuito” entre el elemento radiante y el plano de masa. El reducido tamaño del plano de masa es clave en el comportamiento de la antena, consiguiéndose así la reducción de las dimensiones de la antena. Con ello, se reduce la longitud del parche de $\lambda/2$ a $\lambda/4$ sin que las características de funcionamiento de vean significativamente afectadas.

En este enfoque, un borde del parche, o algún punto intermedio, se conecta a tierra con láminas o agujeros metalizados que unen el parche con el plano de masa. Esto funciona con el mismo principio que una F invertida; visto de lado, se puede ver la forma de F, es solo que el elemento de la antena es muy ancho en el plano horizontal, tal y como se muestra en las siguientes figuras.

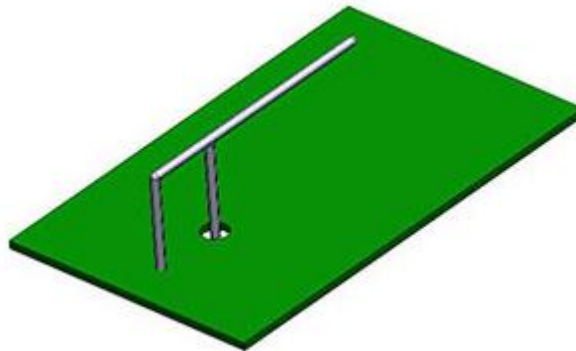


Figura 27. Estructura de la antena IFA

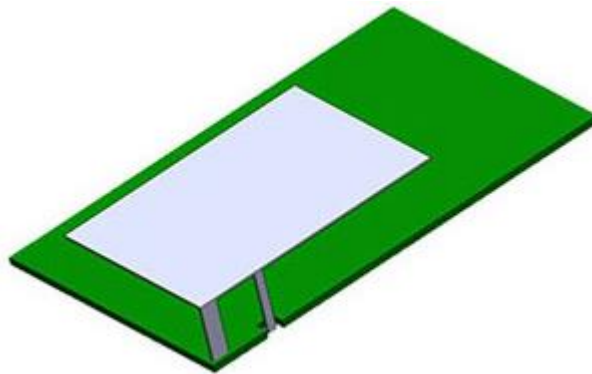


Figura 28. Estructura de la antena PIFA

La principal ventaja sobre la antena de parche presentada en el anterior diseño es que la antena es más corta y más compacta, siendo una antena idónea para miniaturizaciones [15].

La alimentación se realiza mediante sonda coaxial como se muestra en la figura 14.

El conductor interior del coaxial atraviesa el substrato y se suelda al parche mientras el conductor exterior se suelda al plano de masa inferior.

En este caso el circuito de alimentación se muestra aislado del parche microstrip debido al plano metálico de masa. De este modo, no existen radiaciones espúreas debido a la alimentación. Otra ventaja es que es una configuración fácil de analizar de forma teórica.

Sin embargo, su fabricación es algo más compleja [9] que por microstrip, ya que implica varios procesos como agujerear, y además es menos fiable en prototipos montados a mano debido a las soldaduras. Esto es debido a que la antena PIFA implica más procesos para hacer las conexiones a masa.

A continuación, se puede observar la antena PIFA del diseño 3 parametrizada.

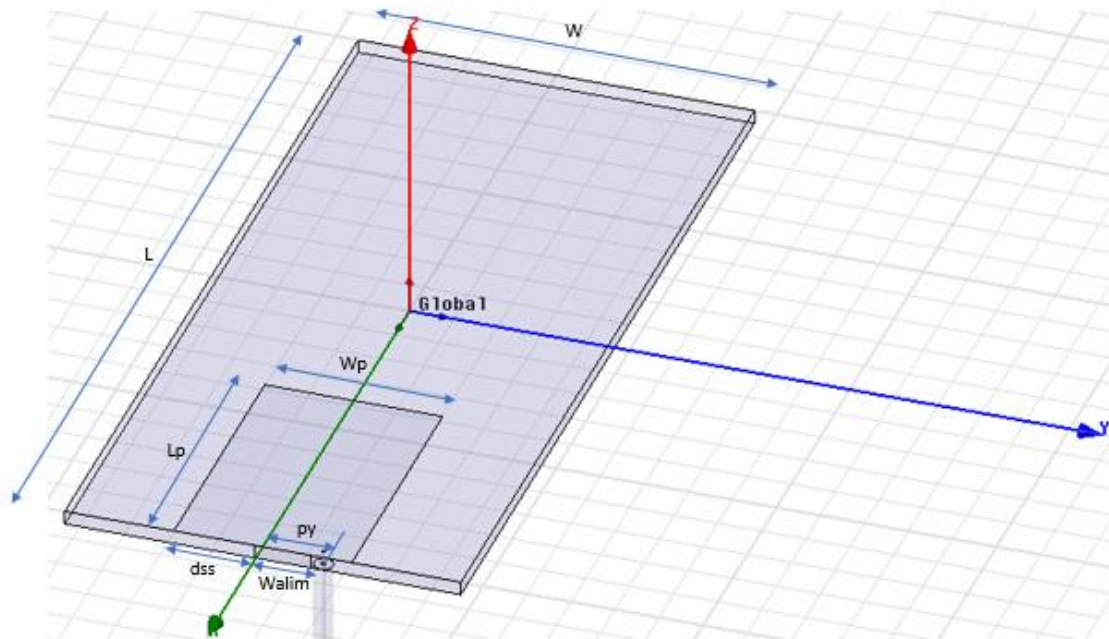


Figura 30. Antena PIFA del diseño 3

Se utiliza el sustrato Rogers RT/Duroid 5880, puesto que, tras analizar los resultados del apartado anterior, el sustrato RO3010 conseguía reducir considerablemente las dimensiones de la antena, a costa de empeorar notablemente los parámetros de radiación de la misma, con lo que no era válido para los requerimientos de operación. El sustrato Rogers RT/Duroid 5880 utilizado tiene las siguientes características:

$$\epsilon_r = 2,2$$

$$h = 3mm$$

$$\tan\delta = 0,0004$$

Las dimensiones de la antena se calculan atendiendo a la siguiente ecuación:

$$L_p + W_p + H - Walim = \frac{c}{4f_0\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

A continuación, se muestran las dimensiones obtenidas para el presente diseño de la antena:



$$W_p = 98 \text{ mm}$$

$$L_p = 40.45 \text{ mm}$$

$$d_{ss} = 18.2 \text{ mm}$$

$$W_{lim} = 11.5 \text{ mm}$$

$$p_y = 12.5 \text{ mm}$$

$$W = 300 \text{ mm}$$

$$L = 100 \text{ mm}$$

La PIFA se puede imprimir en la misma placa de circuito impreso que el resto de los circuitos. Sin embargo, comúnmente se imprimen en su propia placa, o en un dieléctrico fijado a la placa principal.

Una de las ventajas de utilizar esta estructura con respecto a la antena microstrip es la reducción de tamaño de antena.

Una de las mayores desventajas con respecto a los diseños anteriores de parche simple alimentado por microstrip, es el proceso de fabricación que conlleva, ya que implica más procesos.

4.4.3.1. Influencia de los parámetros de diseño de la antena

Tanto el tamaño del “cortocircuito” como la relación de aspecto entre los lados del parche, así como la distancia del “cortocircuito” al borde, y la distancia del “cortocircuito” al coaxial son importantes para determinar las características de funcionamiento de la antena: frecuencia de resonancia, ancho de banda, distribución de corriente en las superficies metálicas (parche y plano de masa) y campos radiados.

El ancho de banda de una PIFA depende principalmente de tres factores: la altura del parche sobre el plano de masa, relación de aspecto W/L , y tamaño del cortocircuito, además de las características del sustrato.

Del mismo modo, para una relación de aspecto fija, el ancho de banda aumenta con la altura y con el tamaño del cortocircuito

En este caso, la adaptación de la antena ha presentado una mayor complejidad en comparación con el diseño anterior de parche simple, puesto que una pequeña modificación de las dimensiones de la antena (relación de aspecto entre los lados del parche, el tamaño del “cortocircuito”, distancia del “cortocircuito” al borde o distancia del “cortocircuito” al coaxial) causa una gran variación tanto en el ancho de la misma como en su adaptación.



4.4.3.2. Funcionamiento de la antena: Adaptación y parámetros de radiación

A continuación, se observan los parámetros de radiación del presente diseño de antena para una frecuencia fija de 436MHz.

Adaptación

La amplitud de $S_{11}(f)$ se observa en la figura 31 de tal manera que el ancho de banda de adaptación es de 2,14 MHz y la frecuencia central de 436 MHz.

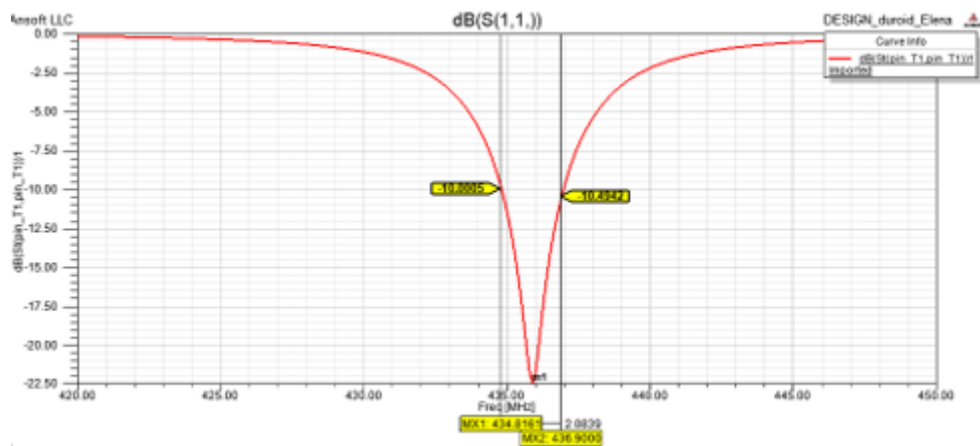


Figura 31. Amplitud de $S_{11}(f)$ del diseño 3

Parámetros de radiación

Al igual que sucedía para el diseño de parche simple, las antenas PIFA también basadas en tecnología microstrip presentan buenas características en adaptación en bandas no muy anchas y diagramas de radiación estables en frecuencia.

En la figura 32 se representa el diagrama de radiación de la antena en 3D.

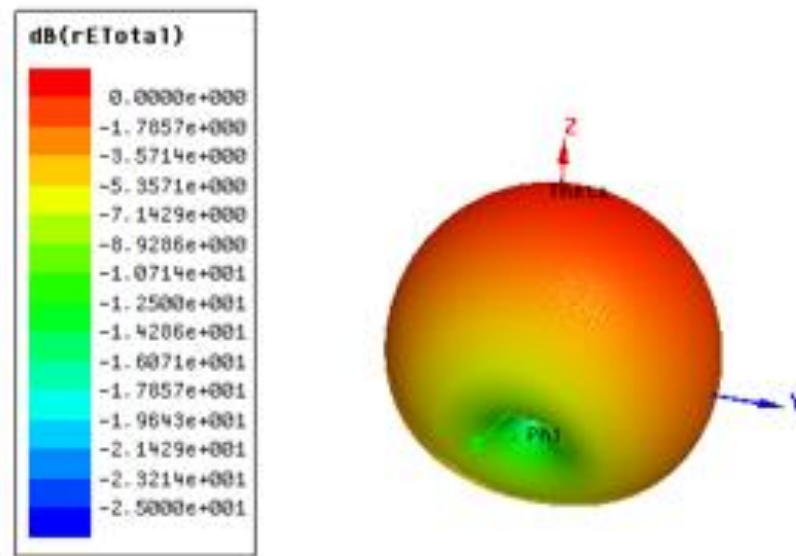


Figura 32. Diagrama de radiación de la antena del diseño 3 en 3D

Como se mencionó anteriormente, a partir del análisis de los cortes del campo, la antena radia en la dirección z principalmente, aunque también radia, aunque en menor nivel, en la dirección y.

A continuación, se pueden observar los cortes principales del diagrama de radiación en $\phi=0^\circ$ y 90° . Donde la traza azul representa la componente copolar del campo eléctrico y la componente morada la componente contrapolar.

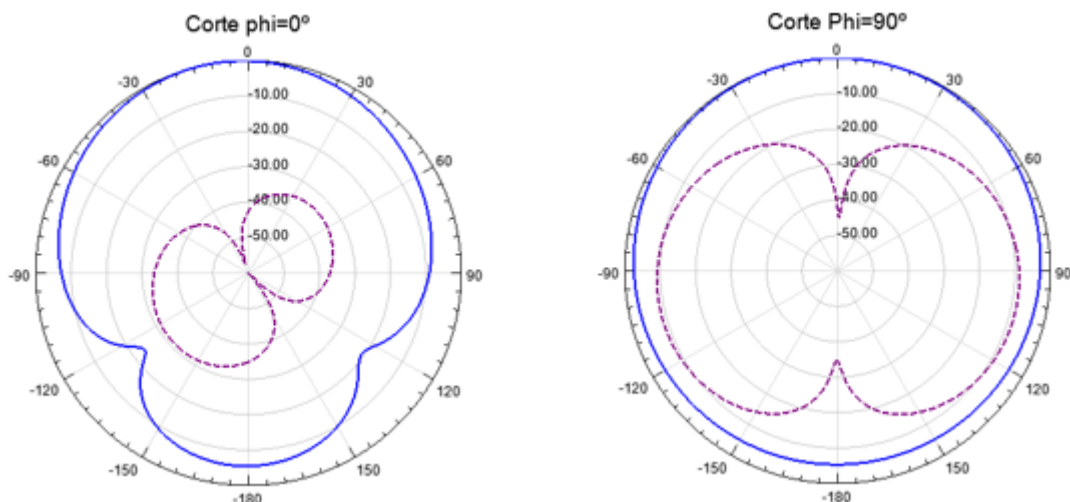


Figura 33. Cortes principales del diagrama de radiación del diseño 3 en $\phi=0^\circ$ y 90°



Para el corte de $\phi=0^\circ$, la componente contrapolar es muy pequeña, del orden de -30 dB, la cual se puede considerar despreciable. Sin embargo, para el corte de $\phi=90^\circ$ la componente contrapolar es algo más grande, del orden de -10 dB.

Si se analizan las componentes polares, se puede observar como para el corte de $\phi=0^\circ$ la antena radia principalmente hacia $\theta=0^\circ$, mientras que para el corte de $\phi=90^\circ$ la antena presenta un diagrama algo más omnidireccional con respecto al otro corte, aunque se puede apreciar que el diagrama sigue apuntando a $\theta=0^\circ$. Los cortes son muy similares a los cortes del diseño 2.

A continuación, se listan los parámetros de radiación de la antena obtenidos para el presente diseño de la misma.

	Diseño 3
Tipo de antena	PIFA
Sustrato	RT/Duroid 5880
BW (MHz)	2.14
Ganancia (dB)	3.04
Directividad (dB)	2.53
Eficiencia (%)	88.92

Figura 34. Parámetros de radiación de la antena del diseño 3

La ganancia es de 3.04 dB, la cual no es muy alta, pero es aceptable para una antena de estas características puesto que en el anexo 8 se adjunta un ejemplo de una antena comercial CubeSat con una ganancia inferior de 3.04 dB, y ésta es válida.

La directividad del presente diseño es de 2.53 dB.

La eficiencia de la antena es de 88.92%, esta es válida para el presente diseño.

Como conclusión para el presente diseño, esta antena cumple los requisitos del estándar CubeSat, puesto que cabe en uno de los cubículos del CubeSat ya que las dimensiones del parche son menores de 100mm cada una, y con lo referente al plano de masa, este se puede compactar en tres cubículos del CubeSat (100mm x 300mm).

Además, presenta unos buenos parámetros de radiación, de modo que la antena funcionaria correctamente en la banda de telemetría que es estipuló.

4.4.4. DISEÑO 4: Antena PIFA con sustrato RO4003C

El presente diseño presenta la misma geometría que el diseño anterior, modificando únicamente el sustrato sobre el que se presenta, RO4003C en lugar de Rogers RT/Duroid



5880, y, por lo tanto, las dimensiones de la antena para que esta resuene en la banda de trabajo y cumpla con las especificaciones de tamaño del diseño.

Se utiliza el sustrato RO4003c, que cuenta con los siguientes datos:

$$\epsilon_r = 3.38$$

$$h = 3.048\text{mm}$$

$$\tan\delta = 0,0027$$

Al igual que para el diseño 3 de la antena, a partir de las dimensiones calculadas, y tras varias simulaciones que han permitido variar las mismas, ajustándolas a los requerimientos del diseño, se obtienen las siguientes dimensiones de la antena.

$$W_p = 75\text{ mm}$$

$$L_p = 40.45\text{ mm}$$

$$dss = 18.2\text{ mm}$$

$$Walim = 13\text{ mm}$$

$$py = 12.95\text{ mm}$$

$$W = 260\text{ mm}$$

$$L = 96\text{ mm}$$

La principal ventaja sobre la antena presentada en el anterior diseño es que la antena es más corta y más compacta, debido a que el material del sustrato RO4003C presenta una mayor permitividad.

4.4.4.1. Influencia de los parámetros de diseño de la antena

Puesto que el presente diseño difiere del anterior en la elección del sustrato, pero presenta la misma geometría (difiere únicamente en los valores de las dimensiones de la antena parametrizada), no se repite el análisis de la influencia de los parámetros.



4.4.4.2. Funcionamiento de la antena: Adaptación y parámetros de radiación

A continuación, se observan los parámetros de radiación del presente diseño de antena para una frecuencia fija de 436MHz.

Adaptación

Se representa la amplitud de $S_{11}(f)$ de tal manera que se observa un ancho de banda de 2,03 MHz, muy similar al del apartado anterior en el que se usaba una permitividad ligeramente más baja, por lo tanto, este resultado es lógico. La frecuencia central es de 435.5 MHz.

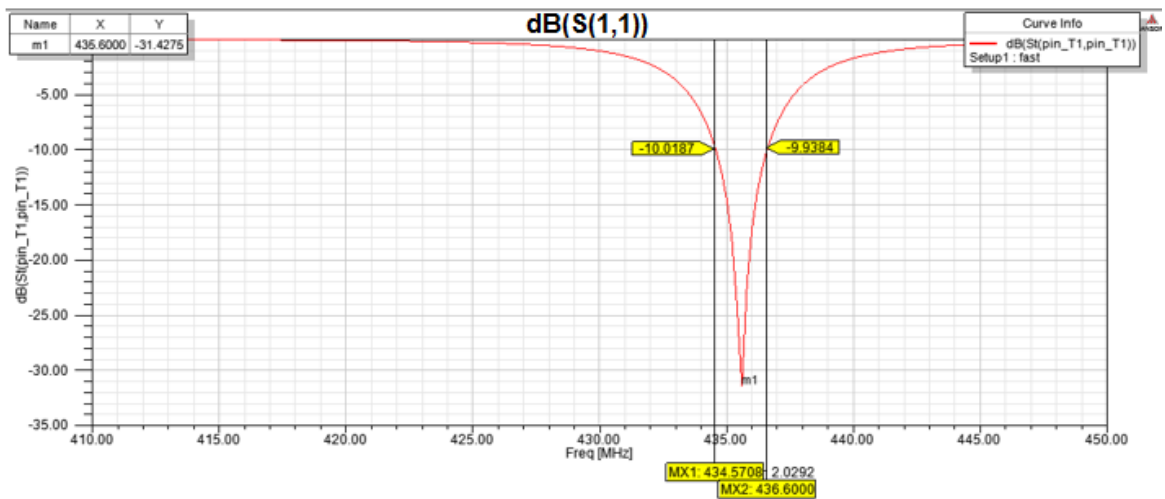


Figura 35. Amplitud de $S_{11}(f)$ del diseño 4

Parámetros de radiación

En la figura 36 se representa el diagrama de radiación de la antena en 3D.

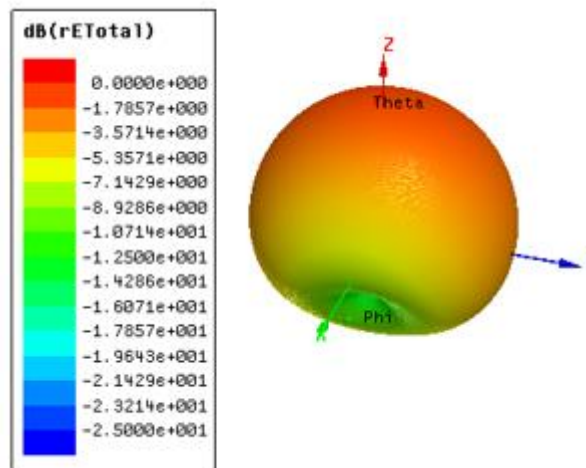


Figura 36. Diagrama de radiación de la antena del diseño 4 en 3D

La antena radia en la dirección z principalmente, aunque también radia, en menor nivel, en la dirección y.

A continuación, se representan los cortes principales del diagrama de radiación en $\phi=0^\circ$ y 90° . Donde la traza azul representa la componente copolar del campo eléctrico y la componente morada la componente contrapolar.

En los cortes se aprecia claramente la concordancia entre éstos y el diagrama de radiación 3D, ya que la máxima radiación se corresponde con $\theta=0^\circ$, que es el eje z.

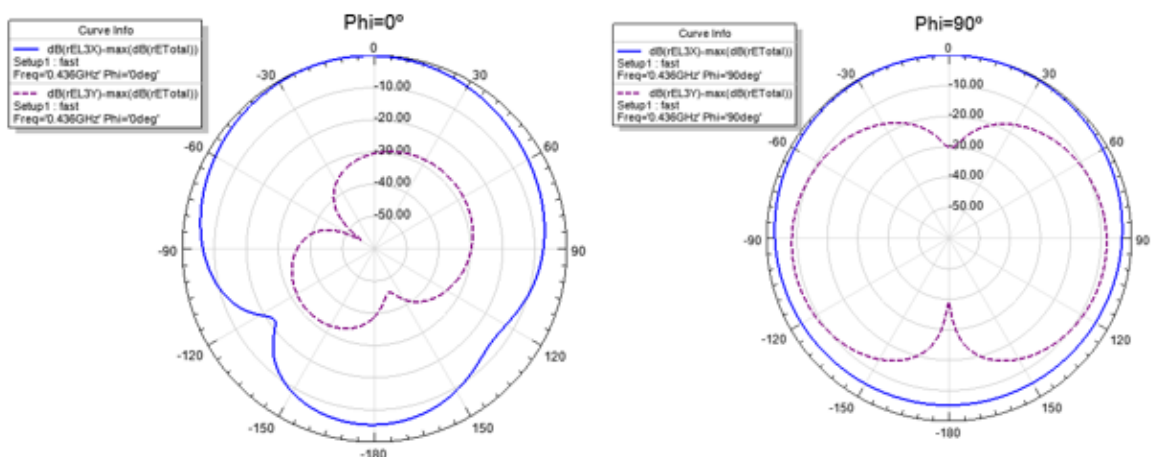


Figura 37. Cortes principales del diagrama de radiación del diseño 4 en $\phi=0^\circ$ y 90°

Para el corte de $\phi=0^\circ$, igual que en el diseño anterior, la componente contrapolar es muy pequeña, del orden de -30 dB, la cual se puede considerar despreciable. Sin embargo, para el corte de $\phi=90^\circ$ la componente contrapolar es algo más grande, del orden de -10 dB.



Si se analizan las componentes polares, se puede observar como para el corte de $\phi=0^\circ$ la antena radia principalmente hacia $\theta=0^\circ$, mientras que para el corte de $\phi=90^\circ$ la antena presenta un diagrama algo más omnidireccional con respecto al otro corte, aunque se puede apreciar que el diagrama sigue apuntando a $\theta=0^\circ$. Los cortes son muy similares a los cortes del diseño 3.

A continuación, se listan los parámetros de radiación de la antena obtenidos para el presente diseño de la misma.

	Diseño 4
Tipo de antena	PIFA
Sustrato	RO4003C
BW (MHz)	2.03
Ganancia (dB)	0.6
Directividad (dB)	2.55
Eficiencia (%)	63.83

Figura 38. Parámetros de radiación de la antena del diseño 4

La ganancia es de 0.6dB, la cual se ve reducida considerablemente con respecto al diseño anterior, que presentaba una ganancia de 3.04 dB, y aun así por encima de la antena de referencia adjuntada en el anexo 8.

La directividad del presente diseño es de 2.55 dB, muy similar a la directividad obtenida en el diseño anterior.

La eficiencia de la antena es de 63.83%, la cual se ha visto reducida con respecto al diseño anterior, que presentaba una eficiencia de 88.92%. Esta no es muy alta, pero sigue siendo válida para el presente diseño.

Como conclusión para el presente diseño, la antena es válida, puesto que cabe en uno de los cubículos del CubeSat, ya que las dimensiones del parche son menores de 100mm cada una, y con lo referente al plano de masa, este se puede compactar en tres cubículos del CubeSat (100mm x 300mm) y puesto que las propiedades de radiación son mejores comparables a los de las antenas desplegadas utilizadas hasta ahora (anexo 8).

Con respecto al diseño anterior, las dimensiones de la antena se han visto reducidas a costa de empeorar algunos parámetros de radiación, como son la eficiencia y la ganancia (63,83% en lugar de 88-92%, y 0.6 dB en lugar de 3,04 dB). Llegando así a la conclusión de que hay que llegar a un compromiso entre miniaturización y parámetros de radiación.



4.4.5. DISEÑO 5: Antena PIFA con sustrato RO3006

El presente diseño presenta la misma geometría que el diseño de PIFA anterior, modificando únicamente el sustrato utilizado, RO3006 en lugar de RO4003C, y, por lo tanto, las dimensiones de la antena.

Se utiliza el sustrato RO3006, que cuenta con los siguientes datos:

$$\epsilon_r = 6.15$$

$$h = 3.18 \text{ mm}$$

$$\tan\delta = 0,002$$

Al igual que para el diseño 4 de la antena, a partir de las dimensiones calculadas, y tras varias simulaciones que han permitido variar las mismas, ajustándolas a los requerimientos del diseño, se obtienen las siguientes dimensiones de la antena.

$$W_p = 62 \text{ mm}$$

$$L_p = 32.45 \text{ mm}$$

$$d_{ss} = 14.2 \text{ mm}$$

$$W_{lim} = 13.2 \text{ mm}$$

$$p_y = 12.95 \text{ mm}$$

$$W = 200 \text{ mm}$$

$$L = 75 \text{ mm}$$

La principal ventaja sobre la antena PIFA presentada en el anterior diseño es que esta es más corta y más compacta (62cm y 32.45cm en lugar de 75cm y 40.45cm para el tamaño de parche y 260cm y 96cm en lugar de 200cm y 75cm para el tamaño del plano de masa) debido a que el material del sustrato RO3006 presenta una mayor permitividad.



4.4.5.1. Influencia de los parámetros de diseño de la antena

Puesto que el presente diseño difiere del anterior en la elección del sustrato, pero presenta la misma geometría (difiere únicamente en los valores de las dimensiones de la antena parametrizada), no se repite el análisis de la influencia de los parámetros puesto que las conclusiones son las mismas.

4.4.5.2. Funcionamiento de la antena: Adaptación y parámetros de radiación

A continuación, se observan los parámetros de radiación del presente diseño de antena para una frecuencia fija de 435.8MHz.

Adaptación

Se representa la amplitud de $S_{11}(f)$ de tal manera que se observa un ancho de banda de 1,56 MHz, inferior al del apartado anterior.

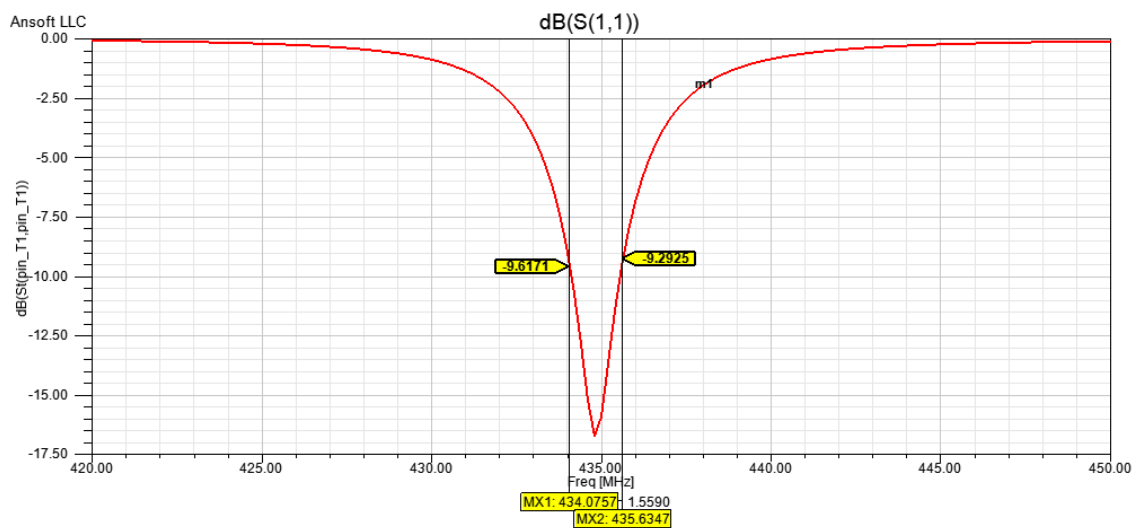


Figura 39. Amplitud de $S_{11}(f)$ del diseño 5

Parámetros de radiación

En la figura 40 se representa el diagrama de radiación de la antena en 3D.

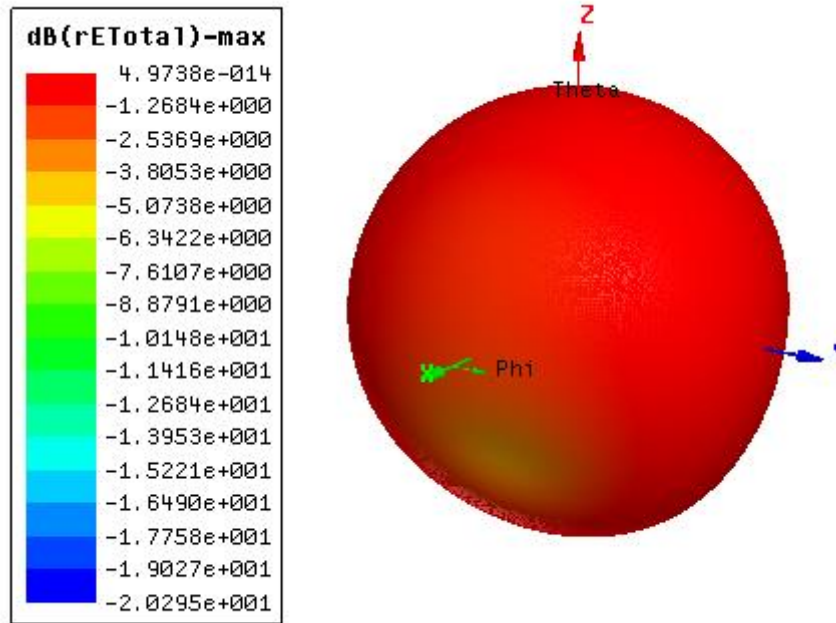


Figura 40. Diagrama de radiación de la antena del diseño 5 en 3D

La antena radia en la dirección z principalmente, aunque también radia, en menor nivel, en la dirección y.

A continuación, se representan los cortes principales del diagrama de radiación en $\phi=0^\circ$ y 90° . Donde la traza roja representa la componente copolar del campo eléctrico y la componente morada la componente contrapolar.

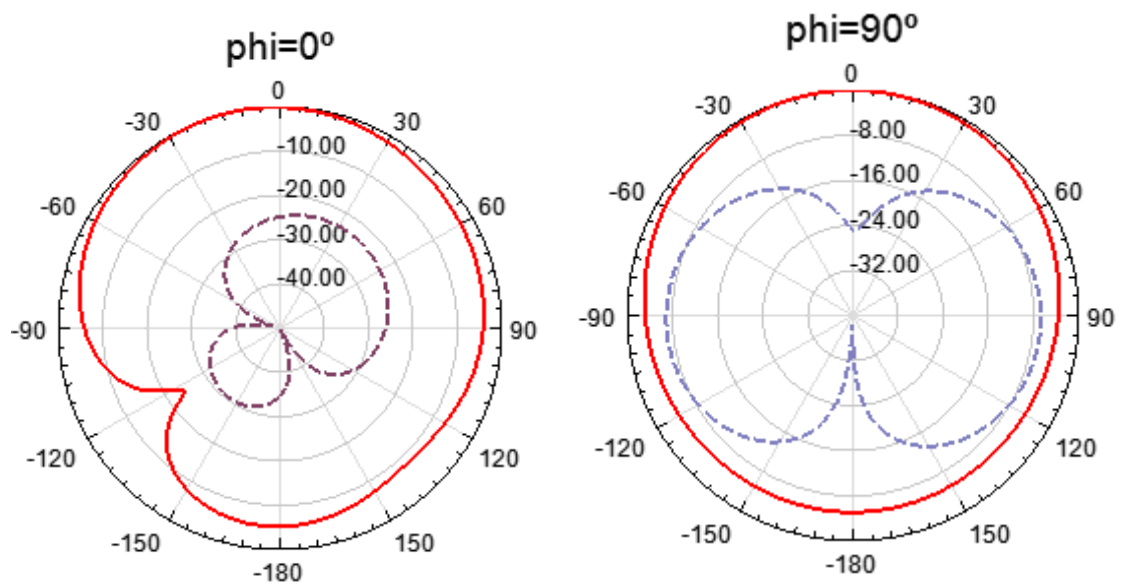


Figura 41. Cortes principales del diagrama de radiación del diseño 5 en $\phi=0^\circ$ y 90°



Para el corte de $\phi=0^\circ$, igual que en el diseño anterior, la componente contrapolar es muy pequeña, del orden de -25 dB, la cual se puede considerar despreciable. Sin embargo, para el corte de $\phi=90^\circ$ la componente contrapolar es algo más grande, del orden de -10 dB.

Si se analizan las componentes polares, se puede observar como para el corte de $\phi=0^\circ$ la antena radia principalmente hacia $\theta=0^\circ$, mientras que para el corte de $\phi=90^\circ$ la antena presenta un diagrama más omnidireccional con respecto al otro corte, aunque se puede apreciar que el diagrama sigue apuntando a $\theta=0^\circ$.

A continuación, se listan los parámetros de radiación de la antena obtenidos para el presente diseño de la misma.

	Diseño 5
Tipo de antena	PIFA
Sustrato	RO3006
BW (MHz)	1.56
Ganancia (dB)	-1.62
Directividad (dB)	1.44
Eficiencia (%)	50

Figura 42. Parámetros de radiación de la antena del diseño 5

La ganancia es de -1.62 dB, la cual se ve reducida considerablemente con respecto al diseño anterior (0,6 dB), en este caso llegando a ser negativa.

La directividad del presente diseño es de 1.44 dB.

La eficiencia de la antena es de 50%, la cual se ha visto reducida con respecto al diseño anterior (63,83%). Esta no es muy alta, pero sigue siendo válida para el presente diseño.

Como conclusión para el presente diseño, la antena es válida ya que las propiedades de radiación similares en comparación a los de las antenas desplegadas comerciales utilizadas hasta ahora [anexo 8] y puesto que cabe en uno de los cubículos del CubeSat [11]. Las dimensiones del parche son menores de 100mm cada una, y con lo referente al plano de masa, este se puede compactar en dos cubículos del CubeSat (75mm x 200mm), es decir, para el presente diseño de antena es necesario 2U de módulos e CubeSat en lugar de los 3U del diseño anterior.

4.4.5.3. Análisis de las corrientes

A continuación, se puede observar en las siguientes figuras las corrientes en la antena del diseño para para diferentes fases.

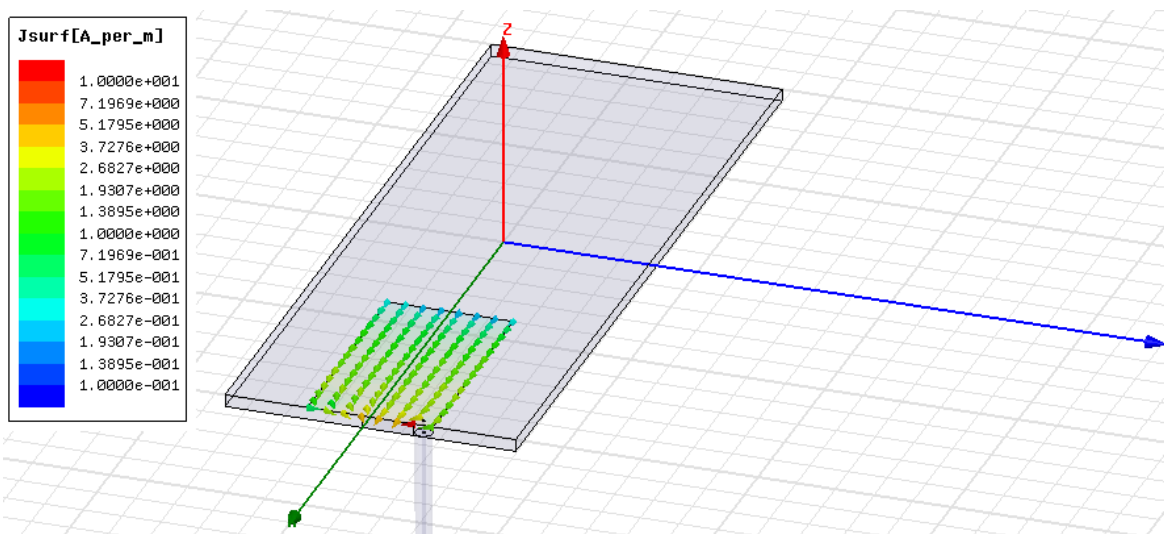


Figura 43. Distribución de la corriente en la antena del diseño 5 para una fase de 0°

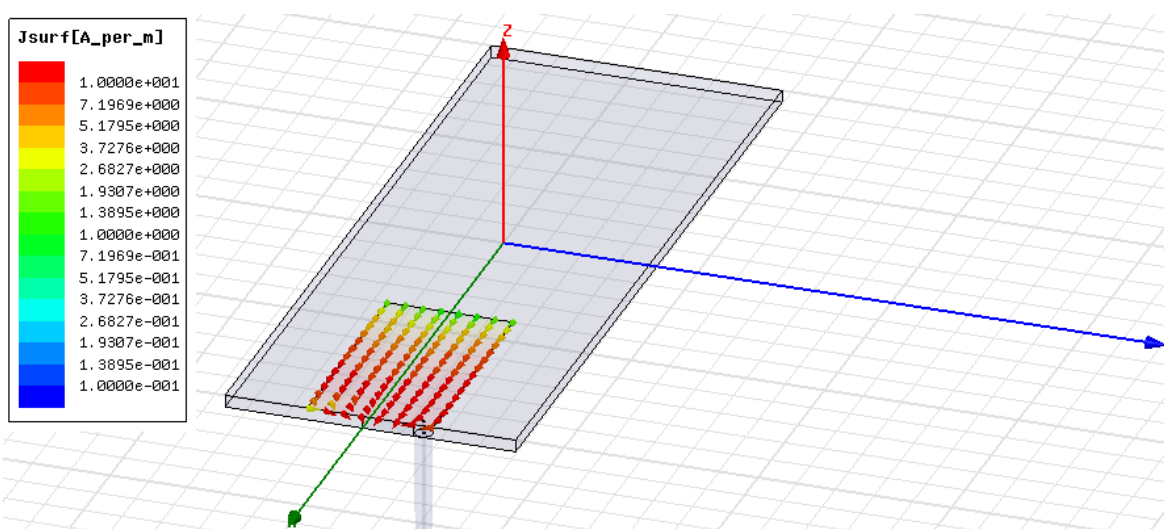


Figura 44. Distribución de la corriente en la antena del diseño 5 para una fase de 40°

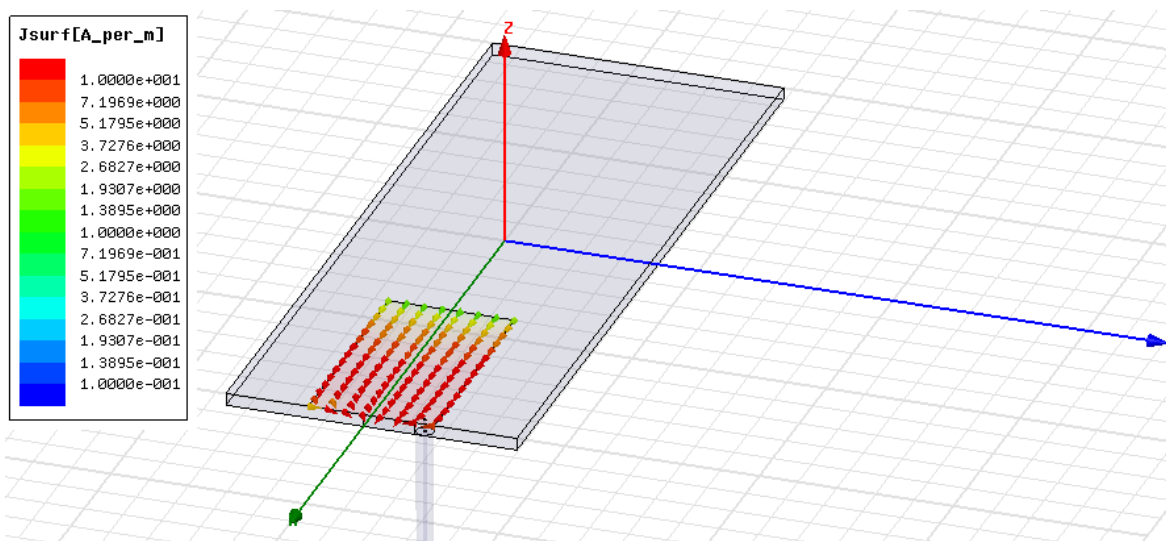


Figura 45. Distribución de la corriente en la antena del diseño 5 para una fase de 80°

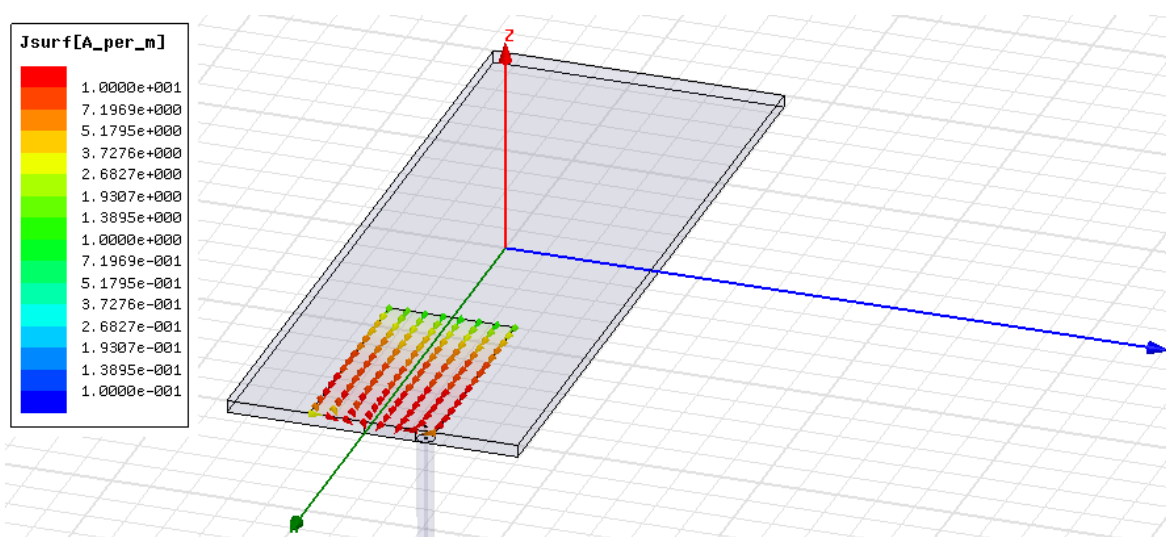


Figura 46. Distribución de la corriente en la antena del diseño 5 para una fase de 120°

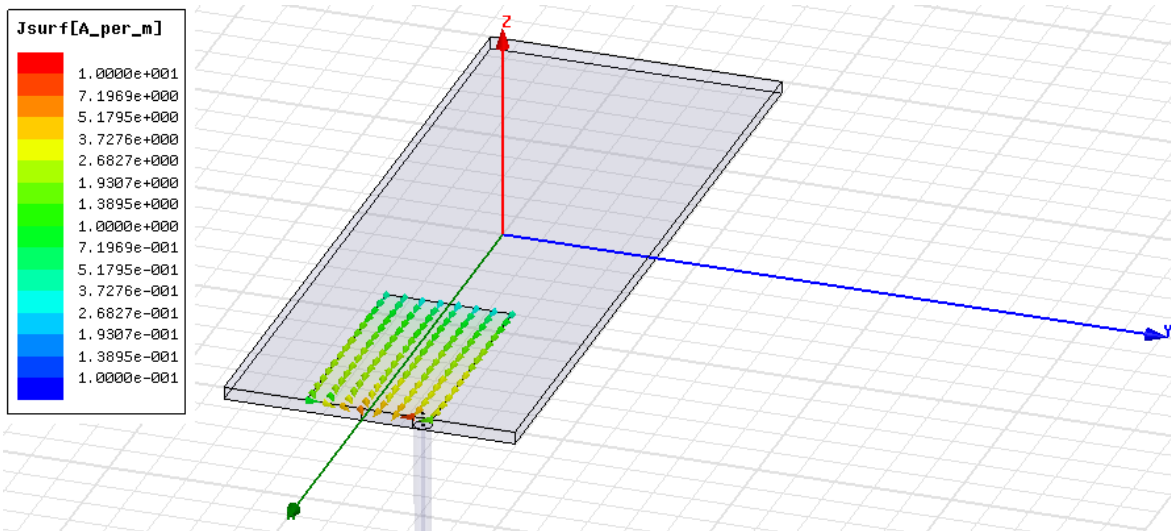


Figura 47. Distribución de la corriente en la antena del diseño 5 para una fase de 160°

Una antena, al ser un elemento de un circuito, tiene una distribución de corrientes sobre ella misma, la cual está relacionada con la distribución del campo electromagnético [10]. Esta distribución depende de la longitud que tenga la antena y del punto de alimentación de la misma.

El estudio de la distribución de corrientes en cualquier tipo de antena es crucial para conocer el modo en que esta radia y va a funcionar. Sin embargo, en el presente proyecto este estudio no ha sido necesario puesto que el tipo de antena era conocida [9][10], tanto para el diseño de antena microstrip como PIFA.

En las figuras 43, 44, 45, 46 y 47 se observa una representación gráfica de la distribución de corrientes en antena del diseño 5. Como se puede apreciar, la onda procedente de la alimentación por coaxial, una vez que esta llega al final de la línea, es reflejada al no poder continuar su camino, volviendo hacia la alimentación.

4.5. COMPARATIVA DE DISEÑOS

En la figura 48 se realiza una comparativa de los diferentes diseños realizados y sus características más importantes:



	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Diseño 4	Diseño 5
Tipo de antena	Microstrip	Microstrip	PIFA	PIFA	PIFA
Sustrato	RO3003	RO3010	RT/Duroid 5880	RO4003C	RO3006
Permitividad	3	10.2	2.2	3.38	6.15
Espesor	1.524	1.27	3	3.048	3.18
Wp (mm)	182.8	98	98	75	62
Lp (mm)	141	80	40.45	40.45	32.45
W (mm)	500	150	300	260	200
L (mm)	300	100	100	96	75
BW (MHz)	1.07	1.24	2.14	2.03	1.56
Ganancia (dB)	3.98	-4.84	3.04	0.6	-1.62
Directividad (dB)	6.72	2.27	2.53	2.55	1.44
Eficiencia (%)	53	14.43	88.92	63.83	50

Figura 48. Parámetros de las antenas en función del diseño de las mismas

Para los diseños de antena microstrip 1 y 2, la excitación mediante línea microstrip tiene como ventaja su simplicidad, dado que el circuito de alimentación del parche y el propio parche se construyen en el mismo proceso. Sus inconvenientes son consecuencia justamente de residir el circuito de alimentación de la antena en el mismo plano y sustrato que la antena. Al residir la alimentación en el mismo plano que el parche, ésta puede influir en el diagrama de radiación de la antena, por tanto, es necesario llegar a un compromiso en la elección del tipo y espesor del sustrato.

Ello es debido a que las características que debe tener el sustrato para realizar la función de guiado (línea de transmisión) son diferentes de las necesarias para la realización de la función de radiación (antena). De hecho, las características son opuestas: para hacer una buena línea microstrip el sustrato debe ser de permitividad alta y de espesor pequeño a fin de concentrar los campos, mientras que en una antena se pretende justamente el efecto contrario, y, por tanto, se requieren sustratos con permitividad baja y espesores mayores. Además, el ancho de banda en frecuencia de las antenas microstrip con sustratos de permitividad bajas y espesores altos es mayor.

Mediante la utilización de la antena PIFA, se ha visto como el tamaño del parche reduce considerablemente situando un plano de cortocircuito entre el elemento radiante y el plano de masa (75mm x 200mm en lugar de 300mm x 500mm). Con ello, se reduce la longitud del parche de $\lambda/2$ a $\lambda/4$ sin que las características de funcionamiento de vean significativamente afectadas.

Con respecto a la influencia del tamaño del plano de masa, si este no es lo suficientemente grande en términos de longitudes de onda, la eficiencia de la antena disminuye como consecuencia de la potencia radiada en la región correspondiente al



semiplano inferior, con lo que se pierde eficiencia de radiación (14,43% frente a 50% del diseño 2 y diseño 5).

La utilización de diferentes sustratos influye enormemente en las características de la antena: tamaño, banda de resonancia, ancho de banda, ganancia, directividad, eficiencia, diagrama... La permitividad influye en las dimensiones de la antena, tanto para la antena microstrip como la antena PIFA, las dimensiones de las mismas se reducen a medida que se aumenta la permitividad del material utilizado (como se puede observar en el diseño 3, 4 y 5). Sin embargo, si se tiene una permitividad muy elevada, las características de radiación se ven afectadas negativamente.

Los diseños 3, 4 y 5 tienen similar espesor de sustrato (entorno a 3mm). Al tener un espesor similar y aumentar la permitividad de 2,2 a 3,38 y a su vez a 6,15 va disminuyendo el ancho de banda de 2,14 a 2,03 y 1,56 MHz, a la vez que va disminuyendo la ganancia y la directividad (en menor medida) y se va perdiendo eficiencia reduciéndose de 88,92% a 63,83% y finalmente a 50%. A cambio, todos los diseños PIFA caben en el lateral del CubeSat, disminuyendo el tamaño ocupado al aumentar la permitividad.

Los diferentes sustratos utilizados tienen diferentes costes, de modo que el sustrato del diseño 5 tiene un precio mayor que el del diseño 4, y este a su vez que el del diseño 3. Como se reduce el tamaño del material a utilizar, habría que hacer un cálculo más exhaustivo para poder afirmar que el diseño 5 es realmente más caro, o bien se compensa.



5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En el presente proyecto se han realizado varios diseños de antenas, en concreto, dos diseños de antenas microstrip y tres diseños de antenas PIFA. Estos diseños se han realizado con diferentes métodos de alimentación: excitación mediante línea microstrip y alimentación por coaxial. Además, se han realizado varios diseños con diferentes sustratos, lo que modifica considerablemente las características de la antena. Finalmente se han comparado todos los diseños realizados, y las características que estos presentan.

De los diseños realizados en el presente proyecto, tres de ellos son válidos ya que cumplen con las características requeridas de los satélites CubeSat. No hay una solución única o mejor, si no diferentes soluciones con diferentes características.

Es necesario, por lo tanto, llegar a un compromiso entre miniaturización y buenas características de radiación.

Las ventajas de las antenas que se han diseñado en el presente proyecto son varias y se enuncian a continuación.

Por un lado, estas antenas son fijas, lo cual mejora notablemente la fiabilidad con respecto a las antenas desplegadas, ya que cualquier fallo en el despliegue de las mismas provoca un fallo en su funcionamiento.

Los diseños que se han presentado tienen un espesor máximo de 3.18mm, por lo que su reducido volumen permite mayor aprovechamiento del espacio en el módulo CubeSat. Por ejemplo, los paneles solares que se despliegan en el espacio pueden situarse sobre el plano de masa del CubeSat, y así realizar un excelente aprovechamiento del espacio-

Estas antenas conllevan también un ahorro considerable de energía, ya que son antenas pasivas que no requieren de alimentación o sistema electrónico o mecánico de despliegue.

Uno de los beneficios de estas antenas en comparación con una antena operativa en bandas mayores es que se requiere de menor energía en el balance de enlace. Por ejemplo, para el caso de la banda S, son 14 los dB extras de margen que se obtienen en el balance de enlace[9][10].

Como posible ampliación, se plantea la realización de una antena de similares características que tenga polarización circular. Lo cual es muy interesante, ya que gracias a esta polarización se reducen considerablemente las interferencias multicamino [10].



6. REFERENCIAS

1. R. Sandau, "Status and trends of small satellite missions for earth observation," *Acta Astronautica*, vol. 66, no. 1–2, pp. 1–12, 2010.
2. CubeSat Design Specification (CDS), Rev. 12, The CubeSat Program, CALPOLY SLO; available at <http://www.CubeSat.Org>.
3. C. A. Suárez-Fajardo, D. R. Méndez-Marín, A. Pineda-Rodríguez & G. A. Puerto-Leguizamón "Patch antenna with reconfigurable sense of rotation for CubeSat satellite applications," 2016, vol.83, n.199, pp.157-164.
4. M. Swartwout, "The first one hundred CubeSats: A statistical look," *J. Small Satell.*, vol. 2, pp. 213–233, 2014.
5. Arnieri, E., "A High Gain Antenna for Small Satellite Missions," In *Proc. Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2004, pp. 1587-1590.
6. Rogers Corporation, Chandler, AZ, USA, "Low outgassing characteristics of Rogers laminates approved for spacecraft applications," 2002 [Online]. Available: <http://www.rogerscorp.com/documents/752/acm/Low-Outgassing-Characteristics.pdf>.
7. CubeSat UHF Antenna Datasheet [Online]. Available: <https://www.endurosat.com/products/cubesat-uhf-antenna>.
8. IEEE standard test procedure for antennas, ANSI/IEEE Std 149-1979, Dec. 1979.
9. D. M. Pozar, "Microstrip Antenna Aperture-Coupled to a Microstripline," *Electronics Letters*, 21, 2, January 1985, pp. 49-50.
10. C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. Hoboken, NJ, USA: Wiley-Interscience, 2005.
11. J. C. Ortega, *Study and simulation of CubeSats communication systems for ISARA mission*, Universidad Politécnica de Cataluña, 2016.
12. K. Hettak, G. Delisle, M. Boulmalf, "A novel integrated antenna for millimeter-wave personal communications systems", *IEEE Trans. Antennas Propagate*, vol. 46, no. 11, pp. 1757-1758, 1998.
13. G. Kumar, K. P. Ray, *Broadband Microstrip Antennas First Edition*, USA:Artech House, 2003.



14. P. L. Sullivan and D. H. Schaubert, "Analysis of an Aperture Coupled Microstrip Antenna," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-34, 8, August 1986, pp. 977-984.
15. A. Osman, A. L. Arteaga, A. Zozaya, "Análisis de las técnicas aplicadas a la antena plana en forma de F invertida para adaptar y/o mejorar su operación en los teléfonos celulares de última generación," 2012.
16. Alamoudi, Ahmed and Langley, Richard, "Design of Inverted F Antenna for Low Earth Orbit (LEO) Satellite Application," In Proc. EuCAP, 2009, pp. 1896-1899
17. M.-C. Huynh & W. Stutzman, "Ground plane effects on planar inverted-F antenna (PIFA) performance," 2003.
18. O. Louhichi, D. Bechevet, and S. Tedjini, "Methodology for UHF PIFA design in harsh environment, " in 2011 IEEE international Symposium on Antennas and Propagation (APSURSi), 2011, pp. 1201-1204.