

# DISEÑO DE ANTENA REFLECTARRAY PARA SMALLSATS

## Ingeniería y Arquitectura

Imaz Lueje, Borja<sup>1</sup>, Rodríguez Prado, Daniel<sup>2</sup>  
Rodríguez Pino, Marcos<sup>3</sup>

Universidad de Oviedo, España

<sup>1</sup>e-mail: bimaz@uniovi.es, <sup>2</sup>e-mail: drprado@uniovi.es,

<sup>3</sup>e-mail: mpino@uniovi.es

**Resumen.** En el siguiente proyecto de investigación se busca realizar el diseño de una antena reflectarray integrable en un pequeño satélite (SmallSat) que forme parte de una mega constelación. Utilizando el algoritmo *Intersection Approach* generalizado, se diseña una antena que genera un flujo constante de potencia sobre una determinada área de la superficie terrestre. Se obtiene una buena relación de compromiso entre las prestaciones de la antena y sus características de compactibilidad, ligereza y bajo coste, si bien se propone una variante del diseño que permitiría mejorar sus prestaciones en el ancho de banda marcado como objetivo.

**Palabras Clave.** *SmallSat*; antena reflectarray; Síntesis Solo Fase (POS); mega constelación de satélites; *Intersection Approach* generalizado.

**Summary.** The next research project seeks to design a reflectarray antenna that can be integrated into a small satellite (SmallSat) that is part of a mega constellation. Using the generalized Intersection Approach algorithm, an antenna is designed that generates a constant flow of power over a certain area of the earth's surface. A good compromise relationship is obtained between the performance of the antenna and its characteristics of compactness, lightness and low cost, although a variant of the design is proposed that would improve its performance in the target bandwidth.

**Keywords.** SmallSat; reflectarray antenna; Single Phase Synthesis (POS); mega constellation of satellites; Generalized Intersection Approach;

## INTRODUCCIÓN

Uno de los principales impulsores del desarrollo tecnológico en las telecomunicaciones es el sector espacial, el cual se encuentra involucrado en multitud de servicios de telecomunicación como en la multidifusión satélite, redes de telefonía móvil, radar o sistemas de posicionamiento (GPS, GLONASS, etc.).

En este contexto, uno de los proyectos más ambiciosos en las comunicaciones espaciales es el desarrollo y despliegue de las mega constelaciones de satélites. Consisten en infraestructuras formadas por cientos o

miles de satélites que se desplazan en orbitas bajas de la Tierra ofreciendo cobertura global, con una comunicación con los dispositivos en Tierra de banda ancha y baja latencia. Empresas importantes en el ámbito de las telecomunicaciones como son SpaceX, Virgin o Airbus, se encuentran desarrollando estos sistemas (del Portillo, G. Cameron, & F. Crawley, 2019, pp. 123 - 125).

En los servicios de comunicaciones espaciales el punto más crítico en términos técnicos y económicos son los satélites, donde se buscará minimizar sus costes y aumentar la escalabilidad del sistema. Los satélites pequeños o también denominados *SmallSats*, disponen de dimensiones físicas y peso reducidos, un consumo reducido, y bajos costes en fabricación y despliegue, lo que los hace idóneos para una mega constelación de satélites. Dentro de este conjunto de satélites, los más distinguidos son los denominados *CubeSats*, desplegados en varias misiones espaciales para proyectos educativos, de observación terrestre, o exploración espacial como las misiones ASTERIA (Jet Propulsion Laboratory, 2017) o RainCube (Jet Propulsion Laboratory, 2018).

A nivel de subsistema, las comunicaciones satélites utilizan antenas como los reflectores parabólicos o *arrays* ya que permiten concentrar la mayor parte de la energía en una determinada área de cobertura, si bien disponen de estructuras pesadas y con altas pérdidas. Actualmente, existe varias soluciones de antena con mejor compromiso entre prestaciones e integración con el satélite, desde las más simples como son los parches o dipolos, hasta algunas más complejas como las *Large Spaceborne Antennas* (LSDAs) (Duan, 2020).

Entre ellas caben mencionar las antenas reflectarray (Huang & Encinar, 2008). Son estructuras que consisten en un reflector formado por elementos radiantes que permiten enfocar la energía procedente de un alimentador en una determinada dirección del espacio. Gracias a su bajo perfil, bajas pérdidas, mejor integración con el satélite y versatilidad, estas estructuras son una excelente alternativa a las antenas convencionales. Como principales inconvenientes, los *reflectarrays* disponen de un reducido ancho de banda (Pozar, 2003) y requieren de procesos complejos para su diseño, en los que normalmente se emplean técnicas basadas en algoritmos de optimización. Actualmente, existen misiones espaciales que emplean este tipo de antenas como la Mars One Cube (MarCO) (Hodges, Chahat, Hoppe, & Vacchione, 2017, pp. 39 - 49) o ISARA (Hodges, *et al.*, 2015, pp. 2141 - 2142).

## **OBJETIVOS**

El objetivo del proyecto es el diseño de una antena reflectarray ligera, compacta y de bajo coste que pueda ser integrada sobre un satélite que forme parte de una mega constelación. La antena debe generar un haz conformado de tipo isoflux que ilumina una determinada área de la superficie terrestre con un flujo de potencia constante.

Para tal fin, en primer lugar, se marcarán los requisitos técnicos que debe satisfacer la antena. Seguidamente, se realiza el diseño de la antena donde se caracterizan los elementos que la forman y su posición en la estructura. Para satisfacer los requisitos marcados, se emplea el algoritmo *Intersection Approach* generalizado (glA) en dos etapas: primero, sobre una Síntesis solo Fase (POS) que permita satisfacer las prestaciones a la frecuencia de diseño, y después utilizarlo para una optimización en banda partiendo del diseño anterior. Por último, se evaluarán las prestaciones de la antena.

## **DISEÑO DEL REFLECTARRAY**

### ***Requisitos***

En referencia con las características típicas de una mega constelación (del Portillo, G. Cameron, & F. Crawley, 2019, pp. 123 -125) , la antena reflectarray estará montada sobre un satélite que se desplaza en una órbita

baja terrestre (LEO) a 1200 km de la superficie, desde donde debe iluminar un área de cobertura circular de 400 km de radio (Figura 1(a)).

Con respecto al tipo de diagrama isoflux mostrado en la Figura 1 (b), este se define por su margen angular, rizado en la zona de iluminación y nivel de lóbulos secundarios (SLL). A partir de la altura del satélite y radio de cobertura, se calcula un margen angular de  $36.5^\circ$ . Se escoge un rizado y SLL de 2 dB y 15 dB respectivamente.

Como banda de operación se escoge el rango de frecuencias entre 16 y 18 GHz, utilizada comúnmente en antenas de comunicaciones satélite. Se toma como frecuencia de diseño 17 GHz. La antena debe trabajar en doble polarización lineal.

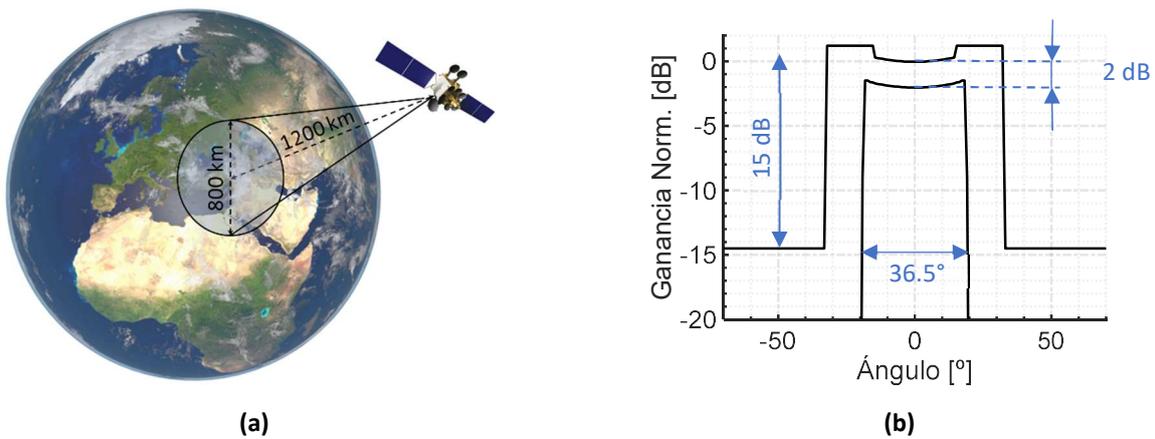


Figura 1. Requisitos de la antena: (a) Requisitos de la zona de cobertura; (b) Requisitos del diagrama de radiación.

### Geometría Reflectarray

En la Figura 2 se muestra un boceto de la estructura reflectarray propuesta, integrada en un *SmallSat* ejemplo. El panel reflectarray está compuesto por 668 celdas, distribuidas en una malla elíptica de 30 x 28 elementos distanciados entre sí 6.62 mm. En los extremos del reflector se deja un anillo de dieléctrico de 6.62 mm para facilitar la sujeción a la estructura común.

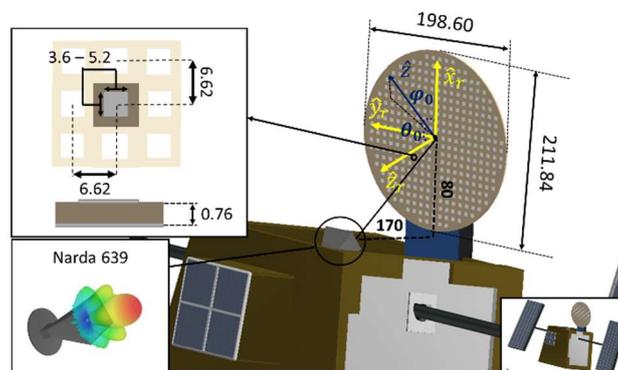


Figura 2. Boceto del reflectarray montado sobre un *SmallSat*. Geometría, alimentador y características de la celda. Todas las dimensiones en mm. Se considera  $\hat{x}_r, \hat{y}_r, \hat{z}_r$  los ejes de reflector y  $\hat{z}$  la dirección de apuntamiento también definida por los ángulos  $(\theta_0, \varphi_0)$ .

Cada celda consiste en una estructura impresa formada por un parche rectangular metálico dispuesto sobre un sustrato dieléctrico y un plano de masa. Se escoge como sustrato el Rogers 3003 ( $\epsilon_r = 3.0$ ;  $\tan \delta = 0.001$ )

con un espesor de 0.762 mm. Esta topología permite generar una relación entre el desfase introducido sobre la onda incidente y tamaño del parche como se observa en la Figura 3. Se trabajará con tamaños de parche entre 3.6 y 5.2 mm ya que en este rango la relación con el desfase introducido es pseudolineal. El máximo desfase que es capaz de generar el parche en esta zona es de 260°.

Como alimentador se ha escogido la bocina Narda 639, una antena de tipo bocina que genera un haz directivo sobre la superficie reflectora en el rango de frecuencias bajo estudio. Esta antena se posiciona en las coordenadas  $(-80, 0, 170)$  mm respecto del centro del reflector. Para minimizar las pérdidas por bloqueo con la bocina, se escoge una dirección de apuntamiento definida por  $(\theta_0, \varphi_0) = (22, 0)^\circ$ . La estructura reflectarray tiene un volumen aproximado de  $8.8 \cdot 10^{-3} m^3$ , lo cual permite su perfecta integración en un *SmallSat* genérico, cuyo volumen es aproximadamente de  $1 m^3$ .

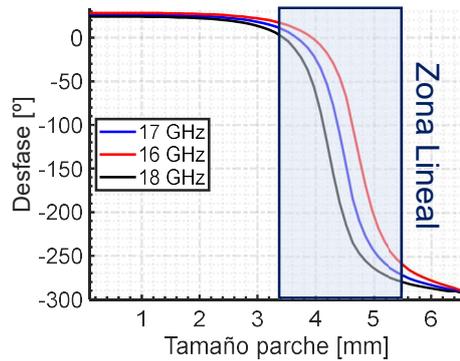


Figura 3. Relación entre el tamaño de cada parche y el desfase introducido sobre la onda incidente. El cuadro azul indica el rango de tamaños de parche y desfases con el que se trabajará.

### Síntesis de conformado de haz

Para conseguir que el campo radiado por la antena siga un patrón isoflux, es necesario emplear técnicas de optimización de conformado de haz. En este caso se ha utilizado el gIA (R. Prado, Arrebola, R. Pino, & Las-Heras, 2017, pp. 1 - 11), un algoritmo iterativo que considera dos conjuntos (véase Figura 4): un conjunto de campos que pueden ser generados por la geometría de la antena  $\mathcal{R}$ , y el conjunto de campos que cumplen con los requisitos marcados  $\mathcal{M}$ . Sobre estos campos efectúa dos operaciones:

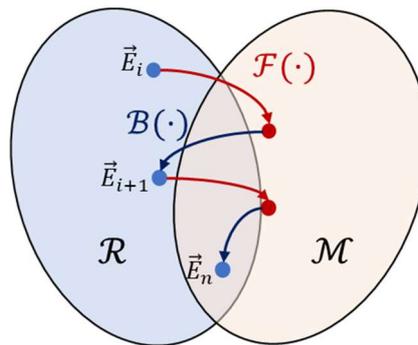


Figura 4. Representación esquemática del algoritmo *Intersection Approach* generalizado (gIA).

$$\vec{E}_{i+1} = \mathcal{B}[\mathcal{F}(\vec{E}_i)] \quad (1)$$

En cada iteración  $i$ , el algoritmo proyecta un campo radiado  $\vec{E}_i \in \mathcal{R}$  sobre el conjunto  $\mathcal{M}$ , utilizando el operador *forward projector*  $\mathcal{F}$ . El campo resultante, es de nuevo proyectado sobre el conjunto de campos  $\mathcal{R}$ , utilizando el *backward projector*  $\mathcal{B}$ . El proceso iterativo finalizará cuando se encuentre un campo radiado  $E_n$

que pertenezca a ambos conjuntos o en su defecto, que la distancia de este campo al conjunto M sea mínima.

El algoritmo gIA se aplica primero en una POS a la frecuencia de diseño (17 GHz), donde se considera a cada celda como un desfaseador ideal, es decir, la celda introduce una fase en la onda incidente sin modificar su amplitud. Matemáticamente esto es:

$$\rho_{xx} = \exp(j\phi_{xx}); \quad \rho_{yy} = \exp(j\phi_{yy}); \quad (2)$$

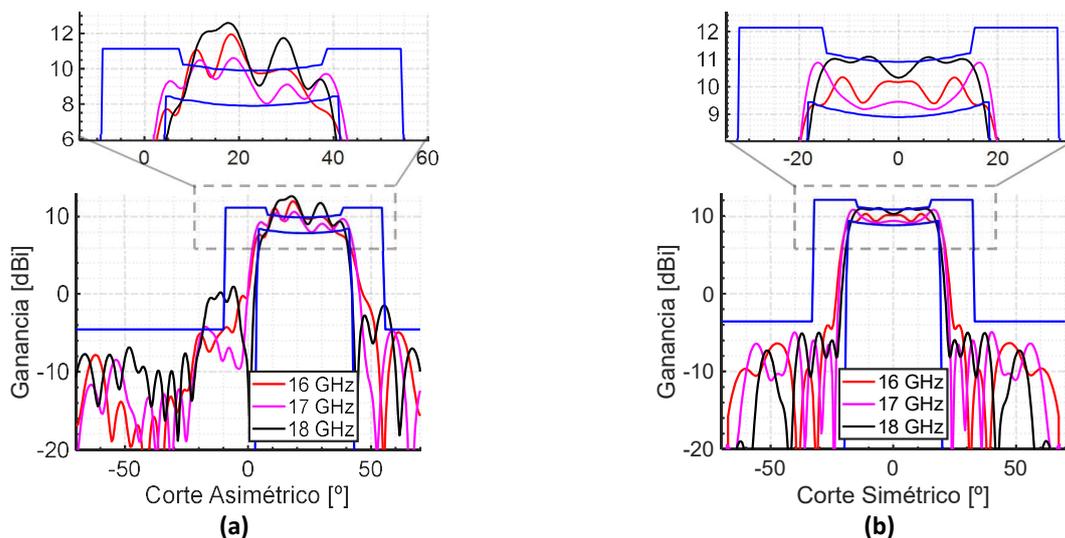
Donde  $\rho_{xx}, \rho_{yy}$  son los coeficientes de reflexión de las polarizaciones X e Y, y  $\phi_{xx}, \phi_{yy}$  las fases de los coeficientes de reflexión.  $\phi_{xx}, \phi_{yy}$  serán optimizadas independientemente para cada polarización, considerando un desfase máximo de  $260^\circ$ . Tras esta etapa y utilizando el Método de los Momentos basado en Periodicidad Local (MoM-LP) (Wan & Encinar, 1995, pp. 1233 - 1242) se obtiene una máscara de parches que cumpla con los requisitos a la frecuencia de diseño.

A continuación, se aplica una segunda optimización sobre los tamaños de cada parche en el rango de frecuencias de trabajo, utilizando el gIA junto con MoM-LP. El objetivo de esta etapa es mejorar las prestaciones de la antena en banda.

## RESULTADOS

En la primera etapa de optimización, las fases que introduce cada elemento son calculadas analíticamente, de tal forma que generen un diagrama de radiación tipo haz pincel en la dirección de apuntamiento. Tras la síntesis POS, se consigue obtener una distribución de fases que genera un diagrama de tipo isoflux que cumple con los requisitos. Las fases calculadas tras el diseño POS son traducidas a tamaños de parche utilizando las curvas de la Figura 3.

Aplicando MoM-LP se obtiene el diagrama de radiación mostrado en la Figura 5. Se observa como a 17 GHz las prestaciones de la antena cumplen en gran medida los requisitos marcados, si bien a las frecuencias extremo aparece una fuerte degradación, tanto en el nivel SLL como el rizado. El alto rizado en la frecuencia central se debe a la restricción de fases considerada. Los resultados para la polarización Y son similares.



**Figura 5. Diagrama de radiación tras la simulación MoM-LP en banda. Polarización X: (a) Corte Asimétrico; (b) Corte Simétrico.**

Partiendo de este diseño, se realiza la segunda etapa de optimización donde se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 6. Nótese como se consigue una notoria mejora en las prestaciones de la antena en banda, aunque no se llega a cumplir con los requisitos marcados. Esto es debido al uso de una estructura de

celda simple que aporta pocos grados de libertad y restringe el desfase máximo.

Con el fin de mejorar este comportamiento, se ha realizado un diseño reflectarray idéntico, utilizando como celda una estructura de dos capas de parches apilados que permite generar desfases por encima de los  $360^\circ$ . En la Figura 7 se muestra el diagrama de radiación de ambos diseños a las frecuencias extremo de la banda. Se observa una significativa mejora que acerca al diagrama a cumplir con los requisitos de la aplicación.

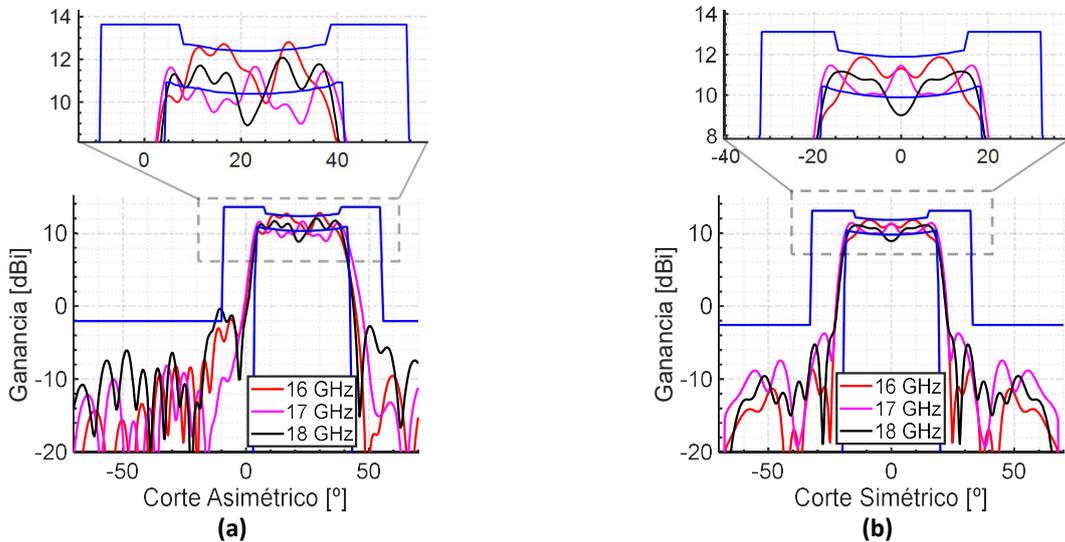


Figura 6. Diagrama de radiación tras la segunda etapa de optimización. Polarización X: (a) Corte Asimétrico; (b) Corte Simétrico.

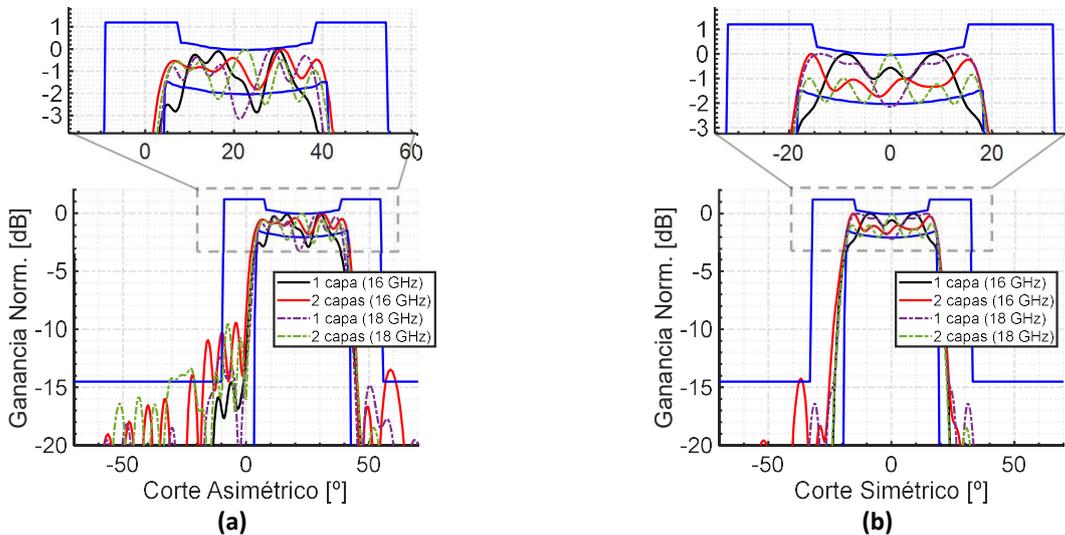


Figura 7. Diagramas de radiación a las frecuencias extremo utilizando una o dos capas como tipo de celda. Polarización X: (a) Corte Simétrico; (b) Corte Asimétrico.

## CONCLUSIONES

Se ha diseñado una antena reflectarray ligera, compacta y de bajo coste, que puede ser integrada en un satélite que forme parte de una mega constelación. Esta antena concentra la energía en una determinada área de la superficie terrestre siguiendo un patrón de tipo isoflux en ambas polarizaciones entre 16 y 18 GHz.

Las prestaciones de la antena se ven degradadas a las frecuencias extremo de la banda, un efecto que puede ser mitigado utilizando estructuras de celda más complejas y con mayores grados de libertad o actuando sobre la geometría de la estructura, como por ejemplo con estructuras multi panel.

En vista de los resultados, este trabajo demuestra las capacidades de este tipo de antenas para ofrecer soluciones compactas y de bajo perfil en una aplicación de mega constelaciones con una buena relación entre prestaciones y características de la antena.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Del Portillo, I., G. Cameron, B., & F. Crawley, E. (2019). A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation system to provide global broadband. *Acta Astronautica*, pp. 123-125.
- Duan, B. (2020). Large Spaceborne Deployable Antennas (LSDAs) - A Comprehensive Summary. *Chinese Journal of Electronics*, vol. 29, no. 1.
- Hodges, R., Chahat, N., Hoppe, D., & Vacchione, J. (2017). A deployable high-gain antenna bound for Mars: Developing a new folded-panel reflectarray for the first CubeSat mission to Mars. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, vol. 59, pp. 39 - 49.
- Hodges, R., Radway, M., Toorian, A., Hoppe, D., Shah, B., & Kalman, A. (2015). ISARA - Integrated solar array and reflectarray CubeSat deployable Ka-band antenna. *Proceedings IEEE International Symposium Antenna & Propagation 2015*, pp. 2141 - 2142.
- Huang, J., & Encinar, J. (2008). *Reflectarray Antennas*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- Jet Propulsion Laboratory. (2017). *Arcsecond Space Telescope Enabling Research in Astrophysics (ASTERIA)*. Recuperado el 4 de Septiembre de 2020, de <https://www.jpl.nasa.gov/cubesat/missions/asteria.php>
- Jet Propulsion Laboratory. (2018). *Radar in CubeSat (RainCube)*. Recuperado el 4 de Septiembre de 2020, de <https://www.jpl.nasa.gov/cubesat/missions/raincube.php>
- Pozar, D. (2003). Bandwidth of reflectarrays. *Electronic Letters*, vol. 39, 1490-1491.
- R. Prado, D., Arrebola, M., R. Pino, M., & Las-Heras, F. (2017). Improved reflectarray phase-only synthesis using the generalized intersection approach with dielectric frame and first principle of equivalence. *International Journal Antennas & Propagation*, vol. 2017, pp. 1 - 11.
- Wan, C., & Encinar, J. (1995). Efficient computation of generalized scattering matrix for analyzing multilayered periodic structures. *IEEE Transactions Antennas & Propagation*, vol. 43, pp. 1233 - 1242.

#### RECONOCIMIENTO

Este trabajo ha sido apoyado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades bajo el proyecto TEC2017-86619-R(ARTEINE); Por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad bajo el proyecto TEC2016-75103-C2-1-R(MYRADA); por el Gobierno del Principado de Asturias/FEDER bajo el proyecto GRUPIN-IDI/2018/000191; y por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades bajo la beca FPU18/02575.