

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN



RESUMEN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA:

**ARRAY IMPRESO DE DOS HACES PARA RECEPCIÓN  
DE SATÉLITES**

INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

REALIZADO POR:

Roberto Torres Sánchez

DIRIGIDO POR:

Pablo Otero Roth

FECHA DE PRESENTACIÓN:

30 de Marzo de 2006

CALIFICACIÓN:

Matrícula de Honor

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b>	<b>I</b>
<b>1. Descripción del Proyecto Fin de Carrera</b>	<b>1</b>
1.1. Origen . . . . .	1
1.2. Objetivo . . . . .	4
1.3. Desarrollo . . . . .	4
1.4. Conclusiones . . . . .	6
<b>2. Originalidad</b>	<b>7</b>
<b>3. Resultados</b>	<b>11</b>
<b>4. Aplicabilidad (3 páginas)</b>	<b>15</b>
<b>A. Publicaciones relacionadas con el Proyecto de Fin de Carrera</b>	<b>17</b>
A.1. Congresos . . . . .	17
A.2. Revistas . . . . .	17
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS</b>	<b>19</b>

# APARTADO 1: Descripción del Proyecto Fin de Carrera

## 1.1. ORIGEN

Actualmente, la mayoría de los usuarios que acceden a los servicios multimedia de la radiodifusión directa por satélite (DBS) emplean antenas con reflector parabólico para la captación, con lo que imágenes como la de la *Figura 1.1* se han hecho habituales en nuestro entorno.



**Figura 1.1. Antena parabólica en el tejado de un edificio.**

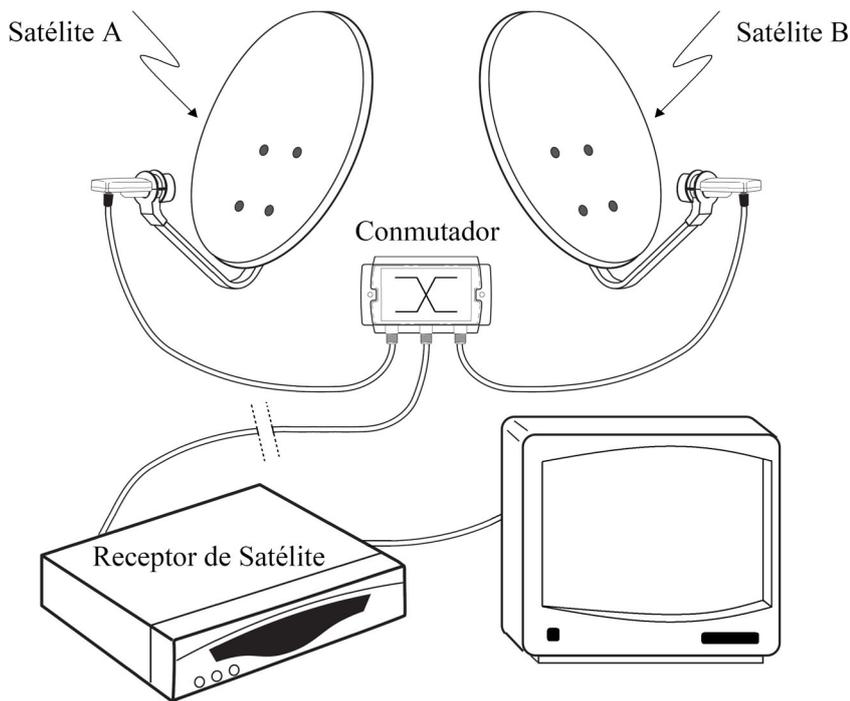
Aunque la elevada potencia de emisión de los transmisores embarcados en los satélites permite el empleo de reflectores cada vez menores, las características de ganancia y directividad requeridas para captar la señal del servicio DBS aún sobrepasan con creces lo que antenas sencillas como el dipolo o la antena de parche pueden ofrecer, por lo que sería preciso agruparlas en arrays.

De hecho, las antenas impresas, que resultan muy apropiadas para la implementación de arrays planares, empiezan a ganar terreno a las parabólicas tanto en el ámbito doméstico como en el profesional, gracias, en buena medida, a que son más compactas, robustas, más fáciles de desplegar y de integrar en su entorno [1, 2, 3, 4], véase la *Figura 1.2*. Cabe, además, la posibilidad de aplicar a su fabricación técnicas de producción masiva propias de la tecnología de circuitos impresos.



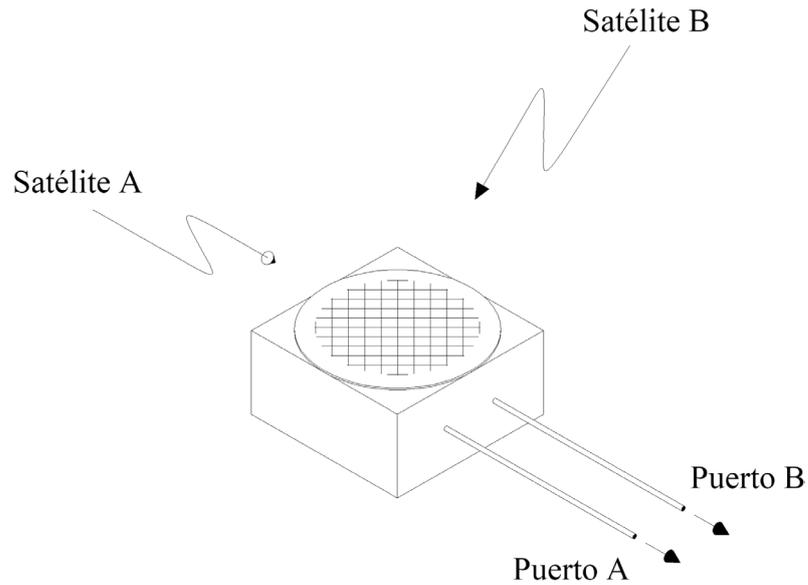
**Figura 1.2.** Dos antenas comerciales para la captación de televisión vía satélite.

El siguiente paso en el desarrollo de antenas planares para el servicio DBS puede ser su incorporación a sistemas de recepción multisatélite, que, como el que se ilustra en la *Figura 1.3*, están cada vez más extendidos.



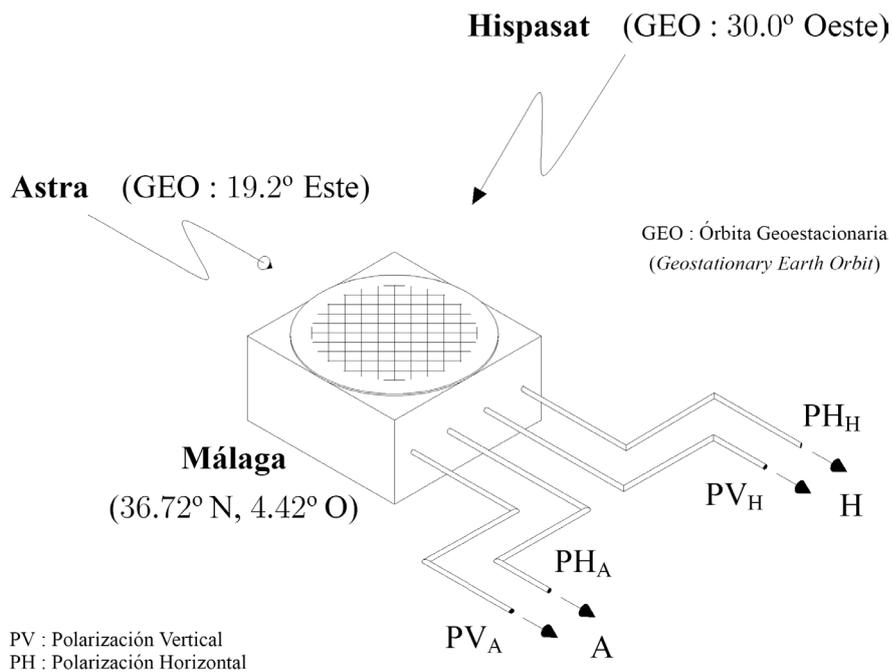
**Figura 1.3.** Posible escenario de un sistema doméstico de recepción multisatélite (basado en un ejemplo de aplicación de [5]).

De acuerdo con este planteamiento, en el Proyecto de Fin de Carrera se explora la posibilidad de sustituir las dos antenas parabólicas de la *Figura 1.3* por una antena planar como la que se muestra en la *Figura 1.4*.



**Figura 1.4.** La antena planar para el sistema de recepción multisatélite.

En concreto, se asume que la antena se ubica en la provincia de Málaga y que con ella se pretende captar la señal de los satélites Astra e Hispasat, a través de los cuales se distribuye buena parte de la televisión vía satélite que se consume en España. Además, por tener dichas señales polarización lineal dual, asociados a cada satélite habrá dos puertos, uno para cada polarización, como se representa en la *Figura 1.5*.



**Figura 1.5.** La antena planar multisatélite propuesta.

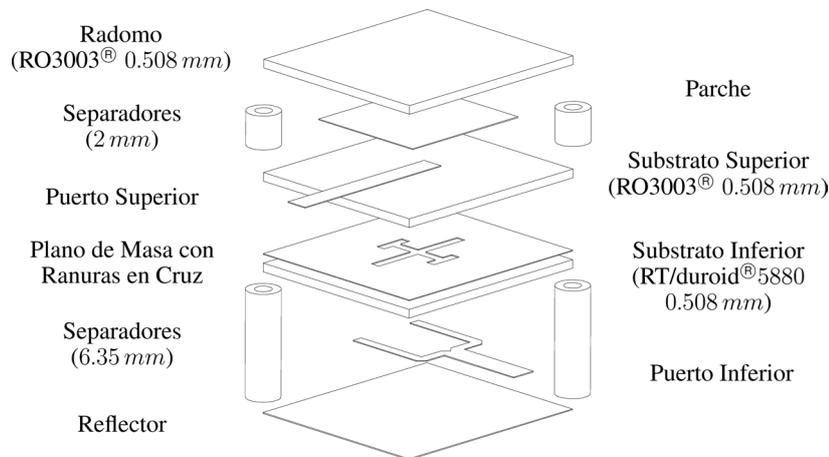
## 1.2. OBJETIVO

El objetivo que se pretende alcanzar con la realización del Proyecto Fin de Carrera no es otro que el de adquirir experiencia en el desarrollo de arrays de antenas en tecnología microstrip.

Para alcanzar dicho objetivo se emprende un proceso en el que se intenta cubrir las fases de especificación, diseño, fabricación y evaluación de un prototipo del array microstrip.

## 1.3. DESARROLLO

El proceso de desarrollo de la antena propuesta se basa en la **teoría de arrays** y comienza con el diseño del elemento radiante (*i*), que es un parche impreso acoplado por ranura (*Aperture Coupled Microstrip Patch Antenna* ó **ACMPA**) con polarización lineal dual. Como se puede apreciar en la *Figura 1.6*, los puertos de acceso al elemento radiante son dos líneas microstrip que descansan sobre caras opuestas del plano de masa del parche, al que se acoplan a través de sendas ranuras en cruz [6, 7].

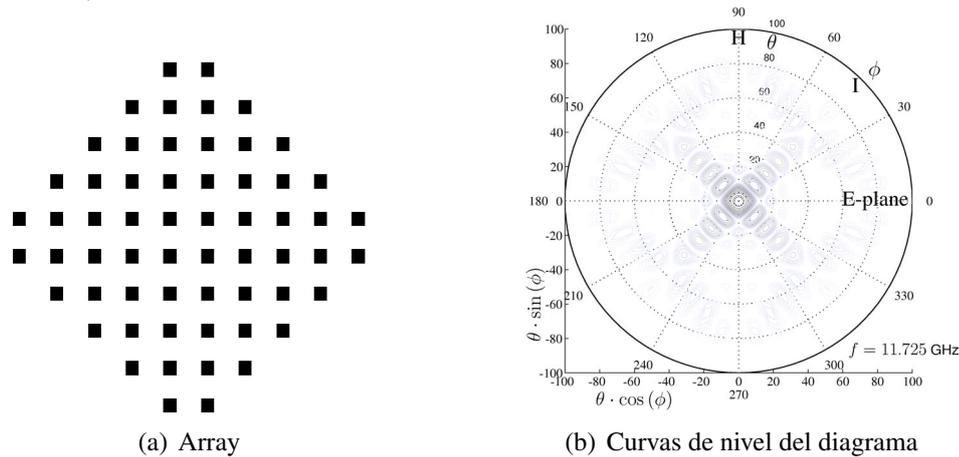


**Figura 1.6. El elemento radiante tipo ACMPA con polarización lineal dual.**

El diseño del elemento se realiza con la ayuda de un programa de análisis electromagnético basado en el método de los momentos (Ansoft Ensemble), según el cual, los buenos niveles de *discriminación de la polarización cruzada* ( $XPD > 40$  dB entre 10.7 GHz y 12.75 GHz), de *acoplamiento entre puertos* ( $|S_{ij}| < -46$  dB) y de *adaptación de impedancias* ( $|S_{ii}| < -14.3$  dB) de la ACMPA propuesta son compatibles con lo requerido para la recepción DBS en Europa.

A continuación se sintetiza el array (*ii*), cuyo diagrama de radiación habrá de ser apto, en términos de *ganancia* ( $G \geq 30$  dB), *ancho de haz* ( $HPBW \leq 3.5^\circ$ ) y nivel de *rechazo a interferencias* ( $IR \geq 20$  dB) [2], para captar la señal de un satélite del servicio DBS.

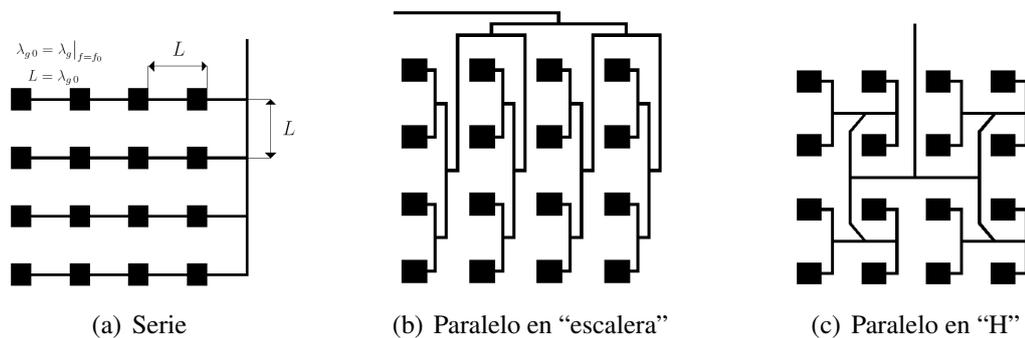
En concreto, para optimizar la relación entre anchura de haz y tamaño de la abertura, que influye tanto en el precio de la antena como en su facilidad de instalación, se escoge una **iluminación uniforme** para los elementos del array. Y para alejar los pronunciados lóbulos laterales propios de dicha iluminación de las visuales hacia los satélites potencialmente interferentes, que comparten órbita geostacionaria con el de interés, se emplea una **estructura rómbica** como la de la *Figura 1.7*, en cuyos planos principales, que contienen las citadas visuales, el *nivel de lóbulo lateral* ( $SLL_{E,H} = -IR_{E,H} \approx -26 \text{ dB}$ ) es lo suficientemente reducido.



**Figura 1.7. El array rómbico y su diagrama de radiación.**

Se estima que para la recepción del servicio DBS, el array rómbico habría de constar, al menos, de **420 elementos radiantes** como el propuesto, ocupando un área de unos  $43 \times 43 \text{ cm}^2$ .

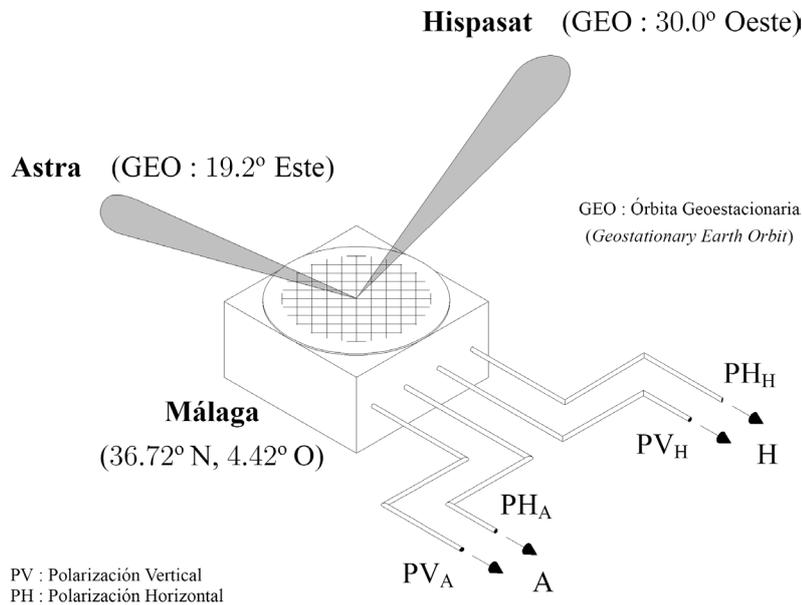
El diseño del array se completa con el de las redes de alimentación (*iii*), que serán dos, una para cada polarización, de **tipo paralelo**, como corresponde a redes de banda ancha, y con una estructura en **“H”** (véase la *Figura 1.8*), de forma que todas sus ramas se encuentren homogéneamente distribuidas en el plano y se minimicen los acoplamientos entre éstas.



**Figura 1.8. Posibles redes de alimentación para los elementos del array.**

Como se puede apreciar en la *Figura 1.6*, la estructura de capas del elemento radiante, en la que entre Puerto Superior y Parche sólo media una capa de dieléctrico, hace a la Red de Alimentación Superior susceptible de emitir radiación espúrea. Para minimizar los efectos de dicha radiación sobre la XPD y el aislamiento entre puertos del array, se procura que dicha red sea **simétrica**.

Por último (*iv*), se plantean las modificaciones que, de acuerdo con la **teoría de antenas multihaz**, cabría realizar sobre el array propuesto para recibir con éste, de forma *simultánea e independiente*, las emisiones de los dos satélites, tal como se ilustra en la *Figura 1.9*.



**Figura 1.9.** La antena planar para el sistema de recepción multisatélite.

## 1.4. CONCLUSIONES

Con la realización del Proyecto Fin de Carrera se completa un recorrido por algunas de las etapas más representativas del proceso de desarrollo de arrays de antenas en tecnología microstrip, habiéndose adquirido en la materia la experiencia que se pretendía desde la concepción del presente trabajo académico.

En la medida que lo han permitido los recursos disponibles y poniendo un especial énfasis en el estudio de la documentación correspondiente, se ha intentado dar la máxima amplitud y profundidad a dicho recorrido, en el cual se han abordado cuestiones como:

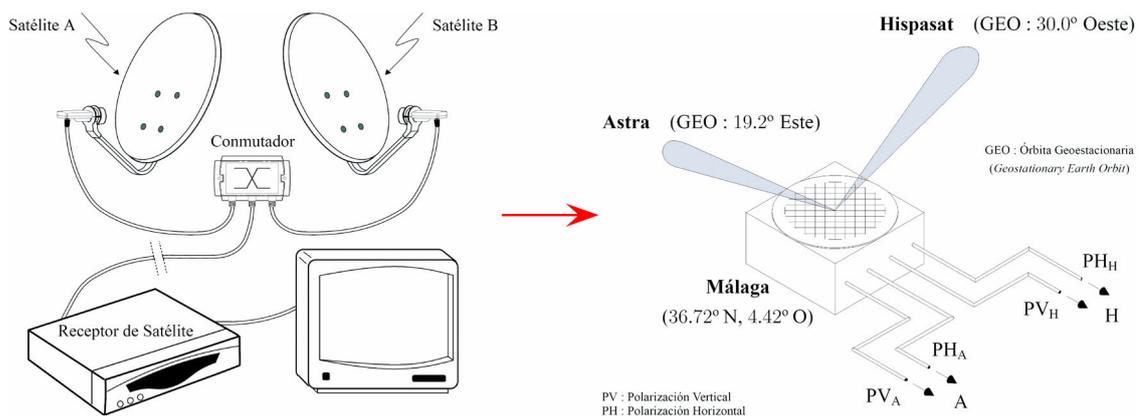
- los principios de funcionamiento de antenas basadas en el parche microstrip,
- los criterios básicos de diseño para este tipo de antenas,
- la teoría de arrays,
- el modelado teórico, la fabricación y la verificación experimental de un array de antenas en tecnología microstrip y
- la teoría de antenas multihaz.

# APARTADO 2: Originalidad

Hasta donde se tiene noticia, durante el planteamiento y realización del Proyecto Fin de Carrera se llevan a cabo una serie de aportaciones cuya originalidad puede considerarse elevada, si no plena, en muchos casos, parcial en otros y sutil en el resto; siendo estas últimas aportaciones deudoras reconocidas de trabajos originales cuyos resultados son, en cierta medida, retomados con un nuevo enfoque o aplicados a situaciones diferentes de aquéllas para las que se propusieron inicialmente.

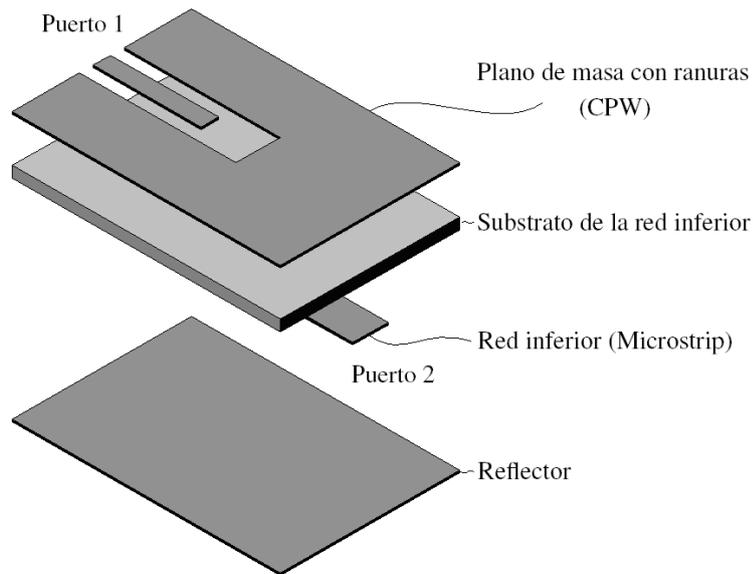
Dentro del primer grupo de aportaciones, con las que se pone de manifiesto la originalidad del Proyecto Fin de Carrera, cabe destacar:

- la idea en sí de implementar un sistema doméstico de recepción multisatélite basado en una antena de naturaleza planar, como se ilustra en la *Figura 2.1*



**Figura 2.1. La antena planar para el sistema de recepción multisatélite.**

- la arquitectura de las redes de alimentación del array, que se puede apreciar en la *Figura 3.2* y en la que se atiende tanto al *ancho de banda* requerido como a ciertas características de *simetría*, las cuales acabarán jugando igualmente un papel destacado en el funcionamiento de la antena, y
- el diseño y caracterización de transiciones de guía de ondas coplanar (CPW) a línea microstrip para facilitar la inserción de la antena con polarización lineal dual en un banco de medida como el que se muestra en la *Figura 3.3(a)*, que está basado en el *Universal Test Fixture* de Wiltron. Con dichas transiciones, cuya estructura de capas se reproduce en la *Figura 2.2*, se logra, de una forma sencilla, barata y repetitiva, que el hemisferio radiante de la antena prototipo quede orientado hacia arriba y no hacia la base del banco de medida.



**Figura 2.2. Estructura de capas de la transición CPW-Microstrip.**

Forman parte del segundo grupo de aportaciones:

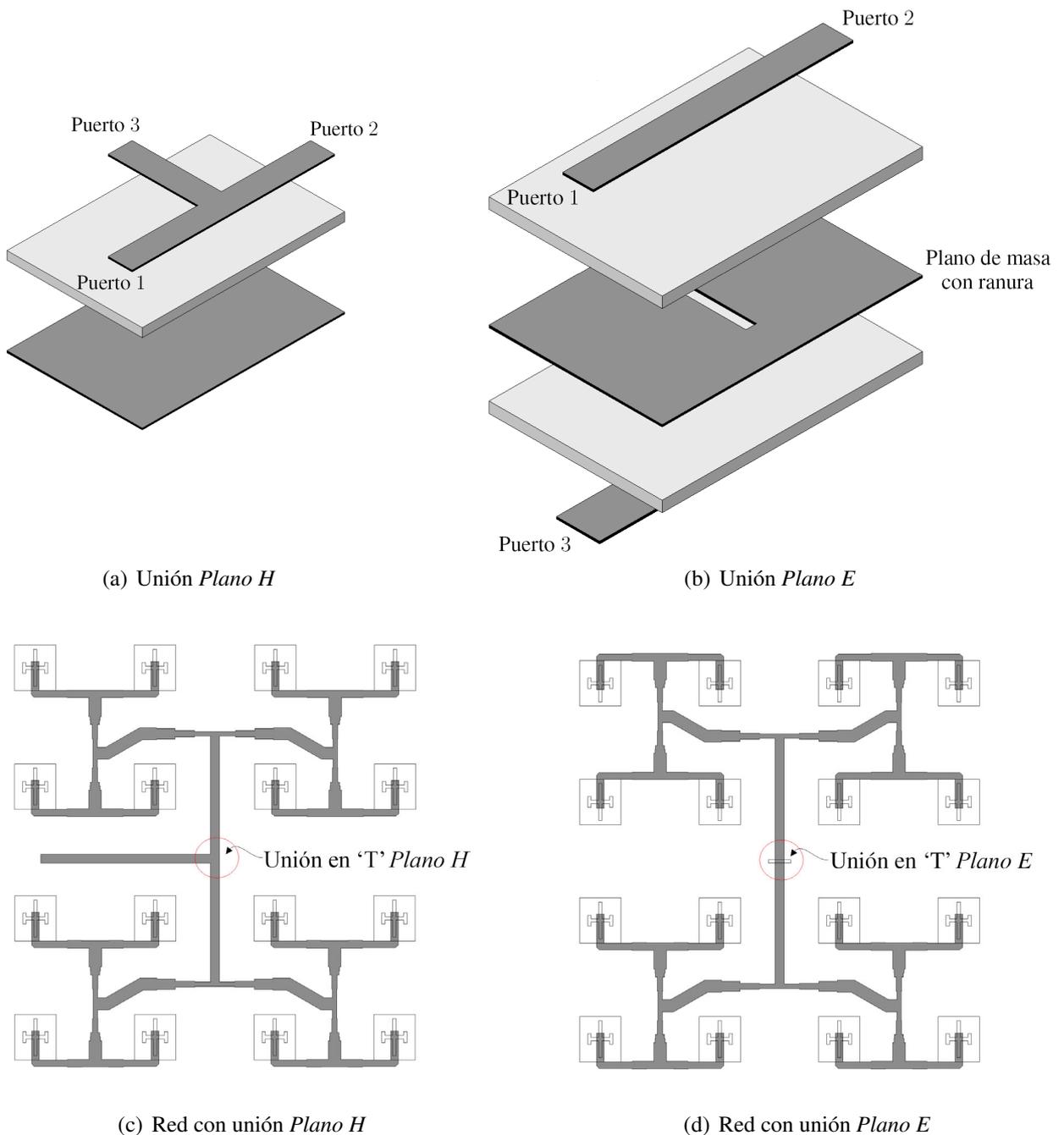
- el estudio, aplicado al array con polarización lineal dual propuesto, de la relación que existe entre la simetría física de las redes de alimentación, la pureza de polarización y el aislamiento entre puertos, así como
- la combinación, dentro de una misma red de alimentación en tecnología microstrip, de divisores de potencia reactivos basados en uniones en ‘T’ tanto del tipo *Plano H* (coplanares, en las Figuras 2.3(a) y 2.3(c)), como *Plano E* (multicapa, en las Figuras 2.3(b) y 2.3(d))<sup>1</sup> para mejorar la simetría de la Red de Alimentación Superior del array.

Las aportaciones que pertenecen a la tercera categoría, cuyas fuentes originales, como en el caso de las del grupo anterior, aparecen con las debidas referencias en la memoria del Proyecto, son las siguientes:

- la estructura multicapa y los planos de metalización correspondientes al elemento radiante microstrip con polarización lineal dual, que se muestran en la Figura 1.6,
- el estudio paramétrico y la metodología de diseño propuestos para el elemento radiante,
- la estimación de la eficiencia de radiación del elemento radiante teniendo en cuenta el reparto de potencia entre diferentes modos parásitos (ondas de superficie y modos de placas paralelas) y

<sup>1</sup>En la práctica, para esta unión multicapa se emplea una abertura mejorada del tipo *dogbone*, que se puede apreciar en la parte central del plano de masa de la Figura 3.2(c).

- el estudio de la relación que guardan ciertas prestaciones de la antena multihaz (*acoplamientos entre haces y entre puertos, eficiencia de radiación, apuntamiento de los haces y alineamiento de la polarización*) con las limitaciones impuestas por la tecnología de fabricación seleccionada (*tecnología planar, basada en antenas de parche y sin soldaduras ni componentes discretos, como resistencias o amplificadores*).



**Figura 2.3. Uniones en T y simetría de la Red de Alimentación Superior.**

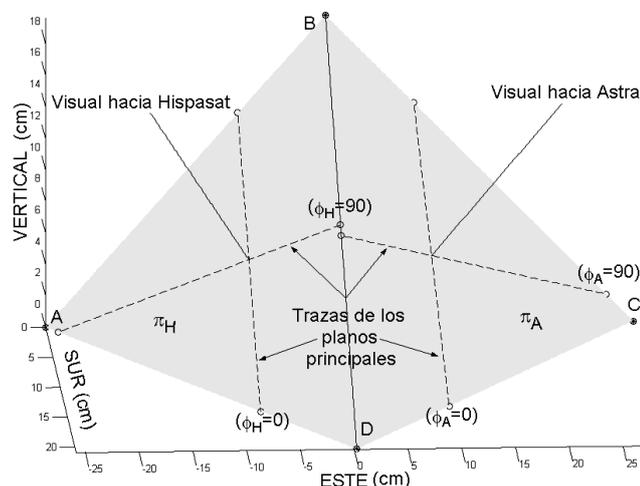


## APARTADO 3: Resultados

Del estudio que en el Proyecto Fin de Carrera se realiza acerca de la viabilidad de implementar la antena multisatélite propuesta como una **antena multihaz, pasiva y sin pérdidas** (por descartarse el empleo de componentes discretos), se desprende que dos de las limitaciones funcionales más importantes de dicha antena habrían de ser, dependiendo de la filosofía de diseño de la matriz conformadora de los haces (*Phase Steered* frente a *Time Delay Steered* [8]), el **desapuntamiento** de los haces y/o el **acoplamiento** entre éstos, pudiendo traducirse este último en un deterioro significativo del aislamiento entre los puertos ‘Astra’ e ‘Hispasat’ de la antena.

En particular, para la antena multisatélite de la *Figura 1.9*, se estima que el aislamiento entre puertos podría quedar por debajo de los 20 dB requeridos ( $IR_{DBS}$ ) y el desapuntamiento de los haces, dejar la visual hacia cada satélite fuera del ancho de haz a potencia mitad especificado para DBS, por lo que se decide recurrir a la técnica de **Desacoplo por División de la Abertura** (*Split Aperture Decoupling* [9]) para implementar una antena con dos aberturas planares disjuntas.

Dichas aberturas podrían ser coplanares o bien descansar sobre una **estructura poliédrica** con dos de sus caras convenientemente orientadas hacia los satélites de interés, tal como se ilustra en la *Figura 3.1*. Esta última configuración, en la que ambas aberturas podrían estar constituidas por arrays idénticos y que además permite el ajuste independiente de ciertos parámetros de apuntamiento, es, finalmente, la que se considera más apropiada para la antena multihaz propuesta.



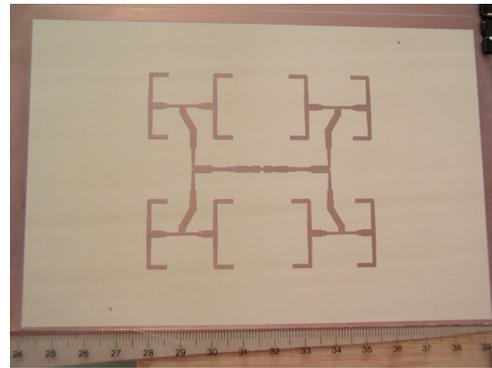
**Figura 3.1.** Tetraedro sobre el que descansarían las aberturas de la antena multihaz propuesta.

Para demostrar la viabilidad del diseño se construye un prototipo del array de un haz y, ante la imposibilidad de procesar, con los medios disponibles, láminas dieléctricas de las dimensiones precisas, se opta por implementar un array de menor tamaño, en concreto uno cuadrado de 16 elementos, cuyas prestaciones, además de ser directamente comparables con las de otros arrays similares descritos en la literatura técnica [7, 10, 11], pueden ser extrapoladas para evaluar la posibilidad de alcanzar, ya con los medios necesarios, la *ganancia* y el *ancho de haz* requeridos.

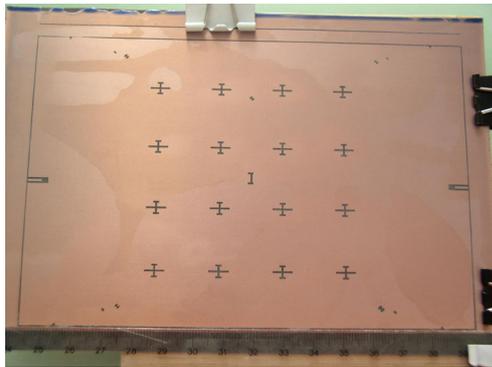
En los talleres de la ETSIT-UMA se realiza el grabado, mediante el proceso fotolitográfico, de los planos de metalización del prototipo, visibles en la *Figura 3.2*, y se completa el ensamblaje de éste para proceder a su verificación experimental con el Analizador de Redes HP-8510™ del laboratorio de microondas del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones (*Figura 3.3*).



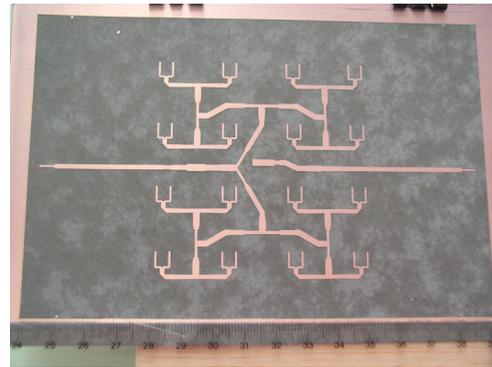
(a) Parches (en el envés del radomo)



(b) Red Superior

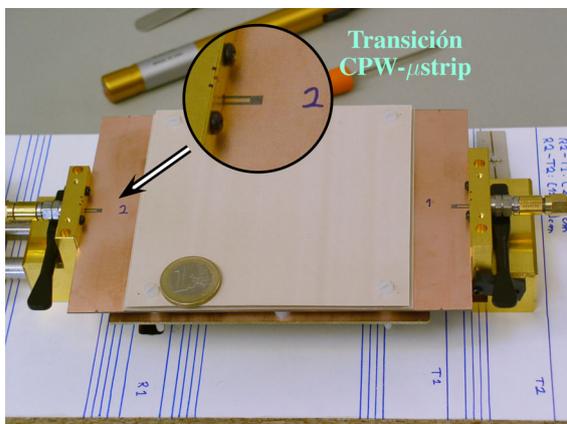


(c) Ranuras y Puertos CPW



(d) Red Inferior y Transiciones CPW- $\mu$ strip

**Figura 3.2. Metalizaciones del prototipo.**



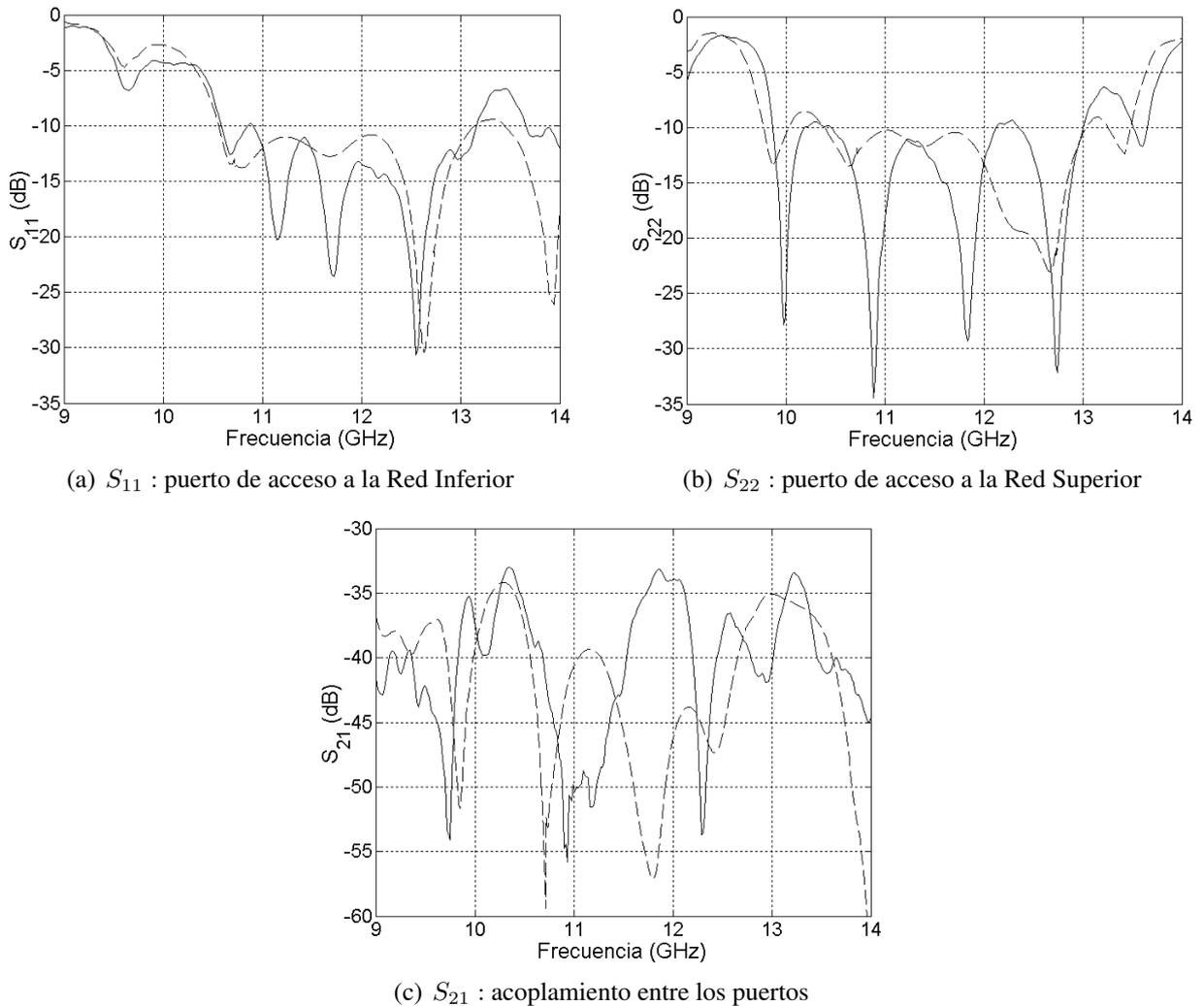
(a) El prototipo en el banco de medida



(b) En el analizador de redes

**Figura 3.3. Verificación experimental del prototipo.**

Los resultados de simulación y medida para los Parámetros S de la antena se muestran en la *Figura 3.4*, donde se puede apreciar que la correspondencia entre el funcionamiento actual del prototipo y el predicho en su modelado teórico, realizado con Ansoft Ensemble, es satisfactoria y, además, suficiente para validar dicho modelado. También queda constancia de las buenas prestaciones de la antena, tanto en términos de *adaptación de impedancias* ( $|S_{ii}| < -10$  dB entre 10.6 GHz y 13 GHz) como de *aislamiento entre puertos* ( $|S_{ij}| < -30$  dB entre 9 GHz y 14 GHz).



**Figura 3.4.** Coeficientes de reflexión en los puertos del array  $4 \times 4$ . Simulación (- -) y medida (—).

Los buenos niveles de aislamiento entre puertos están relacionados con la simetría de la antena, y, concretamente, con la de su Red de Alimentación Superior (véase la *Figura 3.2(b)*). Lo mismo ocurre con la XPD, que, según resultados de simulación, se mantiene por encima de 23 dB en todo el ancho de haz a potencia mitad del array  $4 \times 4$  y supera los 30 dB en el centro del haz.

La *ganancia* del prototipo, que también se estima con Ansoft Ensemble, se mantiene entorno a los 20 dB en toda la banda DBS (entre 10.7 GHz y 12.75 GHz). Este buen nivel de ganancia para el array  $4 \times 4$  se consigue gracias a las pocas pérdidas en sus redes de alimentación.



## APARTADO 4: Aplicabilidad (3 páginas)

Durante los últimos años se ha mejorado sensiblemente el equilibrio entre las características mecánicas, ya de por sí muy atractivas, de las antenas microstrip y su funcionamiento eléctrico, que cada vez satisface requisitos más exigentes, lo que las convierte en una alternativa cada vez más asequible y competitiva para multitud de aplicaciones.

Entre las características mecánicas de las antenas microstrip destacan lo reducido de su peso y de su perfil, así como su capacidad de adaptarse a diversas superficies, lo que las hace especialmente indicadas para misiones aéreas y espaciales. Dentro de este ámbito se encuentran aplicaciones tanto de comunicaciones (tierra ↔ aire ↔ espacio), como de navegación (radar, sistemas de aterrizaje, altimetría), seguimiento, medida (radiometría, meteorología, radioastronomía), formación de imágenes aéreas de alta resolución (radar de apertura sintética ó SAR), etc [12, 1, 13].

Además de hacerlas muy apropiadas para la implementación de arrays lineales y planares, la naturaleza estratificada de las antenas microstrip simplifica considerablemente su fabricación, en la que se pueden aprovechar muchos procesos estándares propios de una tecnología tan madura como es la de circuitos impresos. Esto facilita, desde el punto de vista del diseñador, la construcción y verificación experimental de prototipos, con lo que se propicia una innovación y mejora continuadas, y, desde el punto de vista del empresario, la aplicación de técnicas de producción masiva y la consiguiente obtención de un producto con un precio competitivo y compatible con numerosas aplicaciones de consumo.

De hecho, el reducido tamaño de estas antenas, lo compacto y robusto de su estructura y lo discreto de su instalación están despertando el interés en las mismas por parte la industria automovilística para implementar sensores de proximidad, así como de presión en los neumáticos, sistemas para el pago automático de peajes y tasas de aparcamiento, de telefonía, de recepción de radio y televisión, etc. Y es de esperar que suceda lo mismo en sectores como el de la domótica (redes inalámbricas en el hogar, sistemas de detección de intrusos) o el de las Infraestructuras Comunes de Telecomunicación (recepción de televisión vía satélite, redes inalámbricas urbanas).

Para el sector de las ICTs, la antena propuesta en el Proyecto de Fin de Carrera tiene el valor añadido de que, sin renunciar a las virtudes de la tecnología planar, permitiría la recepción simultánea de las señales de televisión emitidas por los satélites Astra e Hispasat, lo que puede suponer un nuevo paso hacia la consecución de infraestructuras de comunicaciones más compactas, con un menor impacto estético y una mayor resistencia frente a agentes climatológicos o ambientales adversos (viento, nieve, humedad, impactos, aves, etc).

Por último, cabe destacar que, ante la creciente saturación del espectro radioeléctrico y el auge de las comunicaciones móviles, cada vez se está prestando más atención a soluciones que, como la propuesta, hacen uso de técnicas de diversidad (diversidad angular, en polarización, etc) para lograr, bien un mayor aprovechamiento de las bandas de frecuencias asignadas, bien un cierto grado de redundancia que permita hacer frente a interferencias y desvanecimientos.

# ANEXO A: Publicaciones relacionadas con el Proyecto de Fin de Carrera

## A.1. CONGRESOS

Una comunicación basada en la antena que se propone en el Proyecto de Fin de Carrera fue aceptada y presentada en el *XXI Simposio Nacional de la URSI*, que se celebró en septiembre del año 2006 en Oviedo. El título de la comunicación es **“Array impreso de polarización lineal dual para recepción de satélites”** y se encuentra disponible en las actas del congreso (2ª Sesión de Antenas), entre las páginas 961 y 965 [14].

## A.2. REVISTAS

Recientemente se ha recibido la notificación de que el artículo titulado **“Symmetry, XPD, and Port Isolation in an ACMPA Array with Dual Linear Polarization,”** será publicado en un próximo número de la revista *Microwave and Optical Technology Letters*. Dicho artículo está basado en el estudio que se hace en el PFC acerca de la relación entre la simetría de la red de alimentación del array, el aislamiento entre puertos y la pureza de polarización del mismo [15].



# BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] J. Huang, “Microstrip antennas for commercial applications,” in *Microstrip Antennas. The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays*, D. M. Pozar and D. H. Schaubert, Eds. New York: IEEE Press., 1995, pp. 371–379.
- [2] L. Bekraoui, “Broadband planar antenna with low side lobes levels capabilities and high cross-polarisation rejection for DBS reception,” in *IEEE MTT-S International, Microwave Symposium Digest*, Phoenix, AZ, May 2001, pp. 1391–1394.
- [3] (2006, Feb.) Ascor antennas catalog. [Online]. Available: <http://www.ascor.eltech.ru/catalog.htm>
- [4] A. Zaghoul, R. Gupta, E. Kohls, L. Sun, and R. Allnutt, “Low cost flat antennas for commercial and military SATCOM terminals,” in *MILCOM 2001 - IEEE Military Communications Conference*, no. 1, Oct. 2001, pp. 795–799.
- [5] “Conmutador DiSEqC/Soft. de Televés para MATV/SMATV (Ref. 7268),” Televés S.A. [Online]. Available: <http://www.televes.com/hojastecnicas/103146.pdf>
- [6] J.-F. Zürcher, “The SSFIP: A global concept for high performance broadband planar antennas,” *Electron. Lett.*, vol. 24, no. 23, pp. 1433–1435, Nov. 1988.
- [7] M. Yamazaki, E. T. Rahardjo, and M. Haneishi, “Construction of a slot-coupled planar antenna for dual polarization,” *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 22, pp. 1814–1815, Oct. 1994.
- [8] R. J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*. London: Artech House, 1994.
- [9] W. D. White, “Pattern limitations in multiple-beam antennas,” *IRE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-62, pp. 430–435, July 1962.
- [10] F. Croq, A. Papiernik, and P. Brachat, “Wideband aperture-coupled microstrip subarray,” in *Proc. IEEE*, 1990, pp. 1128–1131.
- [11] P. Brachat and J. M. Baracco, “Dual-polarization slot-coupled printed antennas fed by stripline,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 43, no. 7, pp. 738–742, July 1995.
- [12] R. J. Mailloux, J. F. McIlvanna, and N. P. Kernweis, “Microstrip array technology,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-29, no. 1, pp. 25–37, Jan. 1981.
- [13] D. M. Pozar, “Microstrip antennas,” in *Proc. IEEE*, vol. 80, no. 1, Jan. 1992, pp. 79–91.

- [14] R. Torres-Sánchez, F. P. Casares-Miranda, E. Márquez-Segura, and P. Otero, "Array impreso de polarización lineal dual para recepción de satélites," in *XXI Simposio Nacional de la URSI*, Oviedo, España, Sept. 2006, pp. 961–965. [Online]. Available: [http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos\\_oviedo\\_2006/articulos/sesionANT-II-14small.pdf](http://w3.iec.csic.es/ursi/articulos_oviedo_2006/articulos/sesionANT-II-14small.pdf)
- [15] ———, "Symmetry, XPD, and port isolation in an ACMPA array with dual linear polarization," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2007, pendiente de ser publicado.