



PROYECTO ARIAM: DESARROLLO DE UN RADIOTELESCOPIO Y DE UN TALLER DE RADIOASTRONOMÍA E INGENIERÍA DE ALTA FRECUENCIA COMO HERRAMIENTA PARA EL FOMENTO DE LA CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA EN LA UPCT

GÓMEZ TORNERO, José Luis; Cañete Rebenaque, David; Quesada Pereira, Fernando; Álvarez Melcón, Alejandro. Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

RESUMEN

En esta comunicación pretendemos dar a conocer una iniciativa de fomento de la cultura científica y tecnológica dentro del área de Radioastronomía e Ingeniería de Telecomunicaciones, que se ha denominado **proyecto ARIAM** (*Aula-taller de Radioastronomía e Ingeniería de Antenas y circuitos de Microondas*).

Esta iniciativa tiene como punto de inicio el desarrollo de un **Radiotelescopio de microondas** por parte de los **alumnos de último cursos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación (ETSIT)** de la **Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)**. El Radiotelescopio consta, básicamente, de una antena parabólica de unos 3 metros de diámetro, de un receptor de microondas de elevada sensibilidad y ganancia, y de un sistema de adquisición de datos y control del apuntamiento de la antena. Se trata de un proyecto de ingeniería complejo y de un reto tecnológico, que involucra el desarrollo de varios subproyectos de **naturaleza multidisciplinar**. Están implicadas áreas temáticas como la ingeniería de antenas, la ingeniería de circuitos de microondas, la instrumentación electrónica, la ingeniería mecánica, técnicas de adquisición y procesado digital de la señal, la ingeniería de control y de motores, la astrofísica... etc. La novedad y el interés docente estriban en que todos estos subproyectos están siendo **dirigidos por profesores de la UPCT**, y son **desarrollados íntegramente por alumnos** de esta misma Universidad, utilizando los **conocimientos y los laboratorios** disponibles en las instalaciones de la UPCT.

Es la **primera vez en España** que un sistema tan complejo y tecnológicamente avanzado como un Radiotelescopio está siendo **desarrollado íntegramente** con recursos humanos y tecnológicos de una **Universidad Pública**. Un objetivo fundamental de esta iniciativa es el de trasladar a la sociedad murciana en general, y a los más jóvenes en particular, un mensaje claro y vital en estos momentos: **nuestros actuales y futuros estudiantes universitarios tienen a su disposición los medios para adquirir los conocimientos y habilidades necesarias que permiten abordar proyectos tan interesantes** como los que se describirán en la ponencia. En esta misma ponencia se resumirá el trabajo realizado hasta la fecha durante los cuatro años que lleva en marcha esta actividad. Se mostrarán los resultados obtenidos, tanto a nivel técnico como a nivel humano, haciendo hincapié en la respuesta que han dado los alumnos a esta propuesta y las habilidades que ellos mismos están desarrollando gracias a

este proyecto. Cabe destacar el **trabajo en equipo**, el **carácter multidisciplinar** del mismo, el desarrollo de **habilidades prácticas** y **competencias profesionales** como el manejo de maquinaria de fabricación de circuitos y estructuras, o de instrumentación de testeo y ajuste de circuitos... etc.

El Radiotelescopio será usado para **difundir** entre alumnos, profesores y público en general la **tecnología** que hace posible la concepción y puesta en marcha del mismo, así como la disciplina de la **Radioastronomía**, tan interesante como desconocida. Con este objetivo de difusión, todos los sistemas que están siendo desarrollados tienen una **finalidad claramente divulgativa**, buscando siempre la claridad de los conceptos que se pretenden transmitir. Asimismo, en la ponencia se describirán las **posibilidades de ampliación y mejora** del Radiotelescopio, de manera que se entienda por qué este proyecto está pensado para ser más que un mero instrumento de observación, parte de **un aula-taller de aprendizaje y difusión de la tecnología de antenas y circuitos de alta frecuencia**.

Por supuesto, este Radiotelescopio además de para divulgación será usado para **tareas científicas de observación del Universo**, y en concreto para detectar las señales de microondas originadas por el hidrógeno atómico presente en las nebulosas que pueblan nuestra Galaxia. Además de ser un instrumento para astrofísicos y radioastrónomos profesionales, el Radiotelescopio estará a disposición de las **asociaciones astronómicas amateurs regionales**, como la Agrupación Astronómica de la Región de Murcia (AARM) o la Asociación Astronómica de Cartagena (AAC). Además, el Radiotelescopio formará parte del proyecto internacional SETI (*Search of Extraterrestrial Intelligence*), cuya misión es buscar posibles señales de radio extraterrestres que tengan un origen artificial.

En la ponencia se mostrarán las bondades de este proyecto ARIAM para fomentar el interés por las carreras de Ciencia e Ingeniería en nuestra Región. Además, este proyecto cuenta con el apoyo de varias universidades del territorio nacional y del Instituto Astrofísico de Canarias, adquiriendo un carácter interterritorial. El desarrollo del Radiotelescopio de ARIAM ha sido financiado por la **Fundación regional Séneca** durante los años 2006, 2007 y 2008.

1. Descripción del proyecto ARIAM

1.1. Objetivos

La **Radioastronomía** es una de las áreas de conocimiento más fascinantes de la Astronomía, y su vez de las más desconocidas por la sociedad, e incluso por las asociaciones astronómicas amateurs [1-3]. Quizás este desconocimiento es debido a la relativa juventud de esta disciplina científica, que se inició en los años 30. Además hay que sumar que la Radioastronomía se basa en la detección de **ondas radioeléctricas** provenientes del espacio exterior, para lo cual ha sido necesario desarrollar la **tecnología** adecuada, basada en **antenas y receptores de microondas de elevada ganancia y sensibilidad**. A nivel técnico, probablemente sea este último hecho de tener que trabajar con **electrónica de microondas** lo que provoca un mayor rechazo o miedo por parte de las asociaciones de aficionados a la Astronomía, a la hora de desarrollar radiotelescopios amateurs [4, 5]. La existencia de Radiotelescopios amateurs es prácticamente nula en nuestro país, más aún si comparamos su número con el de telescopios ópticos, cuya tecnología (basada en lentes, espejos y cámaras ópticas) sí que está al alcance de cualquier aficionado. Por otro lado, también podemos

mencionar como motivo de este desconocimiento de la Radioastronomía un hecho intrínseco a la naturaleza humana, y es que el ser humano no es capaz de detectar o “ver” las ondas radioeléctricas, a diferencia de la luz visible a la cual sí que son sensibles nuestros ojos. Por todos estos motivos, **la Radioastronomía queda aún hoy muy lejos del público en general, e incluso las asociaciones astronómicas amateurs** se muestran muy reticentes a introducirse en este fascinante mundo. Sin embargo, la Radioastronomía supone una **nueva ventana al Universo**, más allá del pequeño porcentaje del espectro electromagnético correspondiente a la luz visible. La Radioastronomía ha revelado objetos y fenómenos invisibles en otras bandas del espectro y ha complementado de modo fundamental la información que recibimos de la luz visible. A nivel tecnológico, esta disciplina se ha convertido en una **gran generadora de tecnología avanzada**, como lo demuestra la cantidad y calidad de instrumentación radioastronómica ahora en fase de diseño y construcción. Por otro lado, también hay que decir que España cuenta con una buena comunidad de radioastrónomos, y se hace una importante labor de Radioastronomía a nivel profesional, como muestra la recientemente terminada antena de 40m en Yebes [6], o la participación en el proyecto ALMA (que es un array de antenas para estudiar señales en el rango de frecuencias milimétricas y submilimétricas [7]).

En este contexto, *el proyecto que proponemos consiste en desarrollar un taller que rompa las barreras del desconocimiento y de las dificultades tecnológicas de la Radioastronomía, haciéndola más accesible a la sociedad en general, y en particular a los jóvenes estudiantes. Pretendemos que este taller sirva como herramienta para fomentar el interés por la Ciencia y la Tecnología, ya que se trata de una iniciativa multidisciplinar e interactiva.*

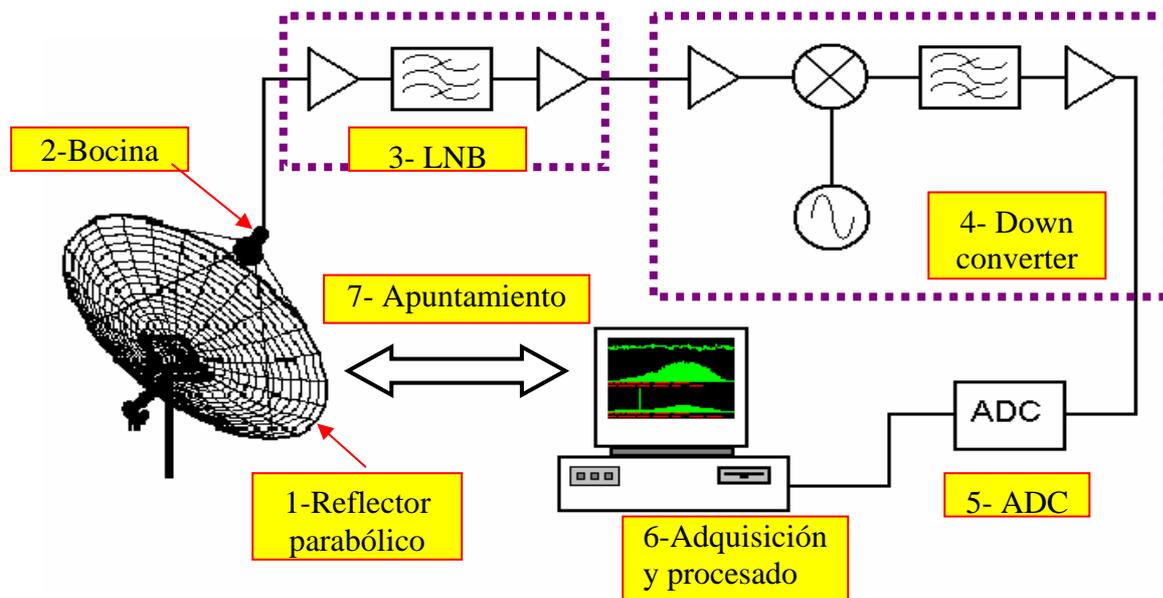


Figura 1: Diagrama de bloques del Radiotelescopio.

Elemento clave del taller será un **pequeño Radiotelescopio** desarrollado por profesores y alumnos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación (ETSIT) de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), en colaboración con la Facultad de Físicas de la Universidad de Valencia (UV), la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), y con el Instituto de Física perteneciente a la Universidad de Cantabria (UC) y al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). El esquema del Radiotelescopio básico se muestra en la Fig.1; sus partes básicas se describen a continuación:

- 1- El **reflector parabólico** es una superficie metálica de forma parabólica, cuya misión es la de agrupar las ondas de radio que llegan a su superficie en su foco. De esta manera se consigue una alta ganancia. Además se consigue una alta directividad, es decir, una alta capacidad de resolución o discriminación espacial, pues el reflector sólo agrupará en su foco aquellas ondas que lleguen paralelas al eje de la parábola [8-10].
- 2- Las ondas de radio se reflejan en la antena parabólica, focalizándose en la **bocina**. La bocina es un tipo de antena comúnmente usada en la banda de microondas [8-10], y que además de estar ubicada en el foco del reflector parabólico debe adaptarse a la geometría del mismo, para así maximizar la eficiencia del conjunto reflector-bocina, que es lo que forma realmente la antena parabólica en su conjunto.
- 3- Estas señales recibidas por la antena parabólica pasan al bloque electrónico denominado **LNB** (“Low Noise Block”). La función de este bloque es amplificar y filtrar la señal recibida por la bocina. Para ello dispone de **amplificadores de bajo ruido** que se encargan de amplificar las señales recibidas presentando un factor de ruido muy bajo, y **filtros paso-banda** centrados a 1420 MHz que dejarán pasar sólo el rango de frecuencias que nos interesa, eliminando interferencias y además bajando el nivel de ruido [11-14].
- 4- A continuación la señal pasa al **convertor a frecuencia intermedia o “down-converter”**, donde se realizan las funciones de acondicionamiento para poder procesar la señal. Primero se vuelve a amplificar en un **amplificador de bajo ruido** similar al anterior, si bien ahora no serán necesarias las mismas restricciones de ruido. A continuación la señal pasa al **mezclador** donde se mezcla con la señal procedente del **oscilador local** para pasarla a una frecuencia menor, denominada frecuencia intermedia [11-13]. Por último, la señal pasa por un **filtro pasa-banda** centrado a la nueva frecuencia intermedia y se **amplifica**, para alcanzar los niveles de amplitud necesarios para poder ser digitalizada [14].
- 5- Finalmente la señal de frecuencia intermedia pasa por un bloque **ADC (Analog to Digital Converter)**, que convierte la señal analógica recibida a formato digital para poder ser procesada por un ordenador [4, 14].
- 6- El ordenador, además de procesar la señal recibida (filtrándola a nivel “software” y obteniendo la información de la señal recibida), se encargará de controlar los **motores de apuntamiento de la antena, tanto en elevación como en azimut** [4, 5].

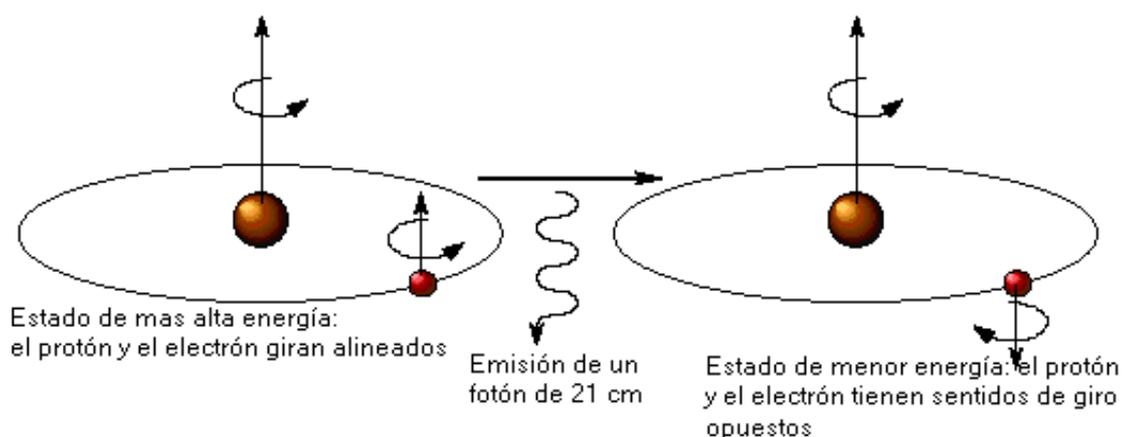


Figura 2: Emisión electromagnética del átomo de hidrógeno a 1420.40575 MHz.

Todos los circuitos o subsistemas que forman este sistema deben estar **sintonizados a la frecuencia de 1.42GHz**, que es a la que emite el **hidrógeno atómico** existente en el Universo. En la Fig.2 se muestra esquemáticamente el proceso físico que hace posible la **radiación electromagnética del hidrógeno atómico neutro** (no ionizado). En su estado de reposo, el protón y el electrón giran en direcciones opuestas. Si el átomo de hidrógeno gana un poco de energía, ya sea por colisión con otro átomo o electrón, el sentido de giro del protón y electrón se alinea, dejando al átomo en un estado ligeramente excitado. El átomo tenderá a abandonar este estado excitado de mayor energía y volverá al reposo, emitiendo un fotón en una **longitud de onda de 21cm** (correspondiente a una frecuencia de 1420.40575MHz [1-3]). Este proyecto de investigación y desarrollo se centra en el diseño y desarrollo de un Radiotelescopio para detectar la **línea de emisión del hidrógeno neutro de nuestra Galaxia**, e incluso de otras fuentes extragalácticas. Si bien el fenómeno descrito (y que da lugar a la emisión de ondas de radio de 21cm de longitud de onda) es aleatorio, hay que decir que la mayor parte de la materia existente en el Universo parece estar formada por hidrógeno y helio (que forman grandes nubes o nebulosas, a partir de las cuales se forman los planetas y las estrellas), por lo cual esta emisión es muy abundante y relativamente sencilla de detectar [1].

Este **Radiotelescopio básico** supondrá un punto de inicio para **desarrollar y divulgar la tecnología de Antenas y Circuitos de Microondas** que hacen posible detectar las señales radioeléctricas procedentes del Universo. Decimos que es un punto de inicio porque a partir del Radiotelescopio básico inicial se podrán realizar en el futuro multitud de **ampliaciones y mejoras** (como añadir **receptores criogenizados** para aumentar la sensibilidad y detectar objetos más lejanos o más débiles, desarrollar nuevas antenas con mejores prestaciones, usar **técnicas de interferometría**, trabajar en diferentes bandas de frecuencia para detectar diferentes tipos de objetos y fenómenos astronómicos...etc), que permitirán **seguir avanzando en el conocimiento y la divulgación de la Radioastronomía y la tecnología** que lleva asociada.

El **Radiotelescopio** estará ubicado en la Universidad Politécnica de Cartagena, y llevará asociada un **aula de Radioastronomía**, para que estudiantes, profesores, aficionados y público en general puedan usar las instalaciones y adentrarse en el mundo de la Radioastronomía y la Tecnología asociada. En esta aula se podrán proyectar presentaciones y realizar charlas de divulgación y de enseñanza sobre Radioastronomía y tecnología de Antenas y Circuitos de Microondas, y se dispondrá de una biblioteca sobre estos temas. Además, se instalarán **circuitos entrenadores de microondas** en los que los visitantes podrán observar cómo se tratan las señales de microondas desde que llegan a la antena hasta que son procesadas por un ordenador, de forma que al final de todo el proceso podremos ver lo que nuestros ojos en principio no son capaces de detectar. Por último, se desarrollará un **aula virtual**, compuesta por una **página web** en donde los internautas podrán acceder a información, presentaciones y aplicaciones informáticas para entender cómo funciona un Radiotelescopio, y en particular el Radiotelescopio desarrollado en nuestros laboratorios. En concreto, una de las aplicaciones telemática deberá permitir el **control remoto** del Radiotelescopio.

1.2. Objetivos

Podemos resumir en los siguientes puntos los **objetivos** de esta acción:

- 1- Poner en marcha un **Radiotelescopio** formado por una antena parabólica, un receptor de microondas y los equipos de procesado y control (ver Fig.1). El Radiotelescopio será instalado en la UPCT.
- 2- Desarrollar un **entrenador de microondas** que permita que los visitantes puedan entender cómo se realiza el procesado de la señal de microondas desde que llega del espacio hasta que el ordenador la visualiza. Hay que recordar que los equipos del Radiotelescopio son desarrollados por un **equipo de alumnos y profesores de la UPCT**, de forma que estamos en condiciones de **adecuar los equipos para favorecer la divulgación** sobre la tecnología de Antenas y Circuitos de Microondas. Consideramos que este es un punto clave y distintivo de esta iniciativa para hacerla especialmente atractiva a la hora de acercarla a las necesidades de nuestra Región.
- 3- Acondicionar un **taller/aula de Radioastronomía** donde poder recibir visitas. Preparar **presentaciones y charlas**, tanto para poder ser impartidas en el aula del Radiotelescopio como para realizar las visitas a centros educativos o científicos.
- 4- Preparar un **taller virtual**, consistente en una **página web** que contenga bases de datos con información sobre la Radioastronomía y el Radiotelescopio de la UPCT, así como **aplicaciones informáticas multimedia e interactivas** para divulgar esta disciplina tan desconocida para la sociedad.
- 5- Como parte fundamental del taller virtual de Radioastronomía, uno de los objetivos consiste en desarrollar una **aplicación de control remoto del Radiotelescopio**, con una **cámara web** para poder ver en tiempo real el estado de la antena, de forma que se puedan hacer observaciones y manejar el Radiotelescopio sin necesidad de estar en el aula/taller. También se contempla hacer que esta aplicación sea **accesible desde Internet**, para poder así permitir que los usuarios puedan desde su casa trabajar con el Radiotelescopio, y difundir mucho más el taller de Radioastronomía.
- 7- Realizar un **mantenimiento y ampliación constante**, tanto del Radiotelescopio (antena, receptores, sistemas de control), como del aula en general y de la página web y sus contenidos en particular. Pensamos que este **carácter dinámico y ampliable del Radiotelescopio** supone otro punto clave y distintivo de este proyecto de divulgación, ya que el taller de Radioastronomía debe ser un **laboratorio vivo**, que crezca atendiendo a las inquietudes y propuestas de investigadores, técnicos y visitantes en general.



Figura 3: El papel de la Universidad.

1.3. Aspectos positivos de esta acción

Estos objetivos se adecuan a los objetivos generales de las **Acciones para el Fomento de la Cultura Científica y Tecnológica 2008**. Particularmente, el proyecto propuesto en esta memoria encaja dentro de las **actividades preparatorias de la conmemoración en el 2009 del Año Internacional de la Astronomía**. Para el 2009 debemos tener el taller preparado con el Radiotelescopio básico, de forma que se puedan iniciar las visitas al mismo, y continuar con la mejora y ampliación del Radiotelescopio, sus instalaciones y los contenidos de la página web asociada. En los siguientes puntos se resalta la adecuación de este proyecto a los objetivos del FECYT (Federación Española de Ciencia y Tecnología, [15]) para el Fomento de la Cultura Científica y Tecnológica, indicando los principales aspectos positivos:

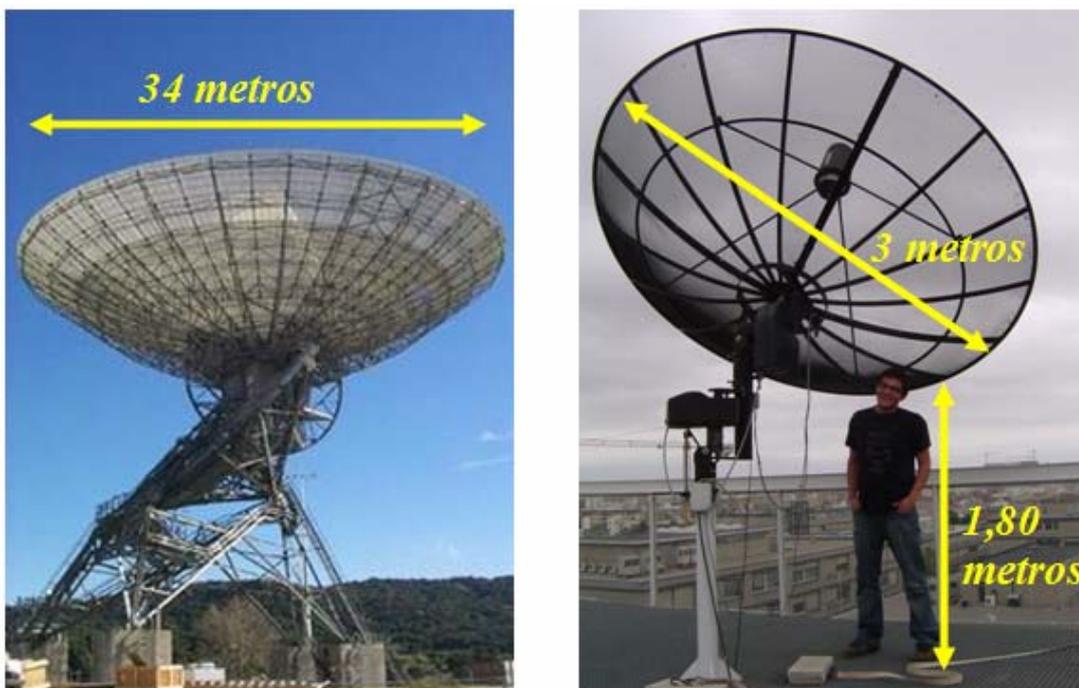
- a) Este proyecto ayuda a **augmentar la cultura científica de la sociedad**, más aún en un tema tan desconocido y aparentemente difícil como la **Radioastronomía**. Creemos que es un gran paso en este sentido ayudar a que la sociedad entienda que hay mucha más información que nos llega del Universo que la que podemos ver, y que contamos con la tecnología para captar las ondas de radio que emite nuestra Galaxia y otros objetos celestes más distantes.
- b) En este último sentido también consideramos que se **mejora enormemente el diálogo ciencia-tecnología-sociedad**. Como se ha comentado, con esta iniciativa se acerca a la sociedad una disciplina como la Ingeniería de Antenas y Circuitos de Microondas y una de sus aplicaciones: la Radioastronomía. Al estar el Radiotelescopio desarrollado, mantenido y mejorado por **alumnos y profesores de nuestra Universidad pública**, se hace aún más cercano este diálogo. Como reflejamos en la Fig.3, consideramos que, además de la inminente **labor docente e investigadora de la Universidad**, esta es responsable también del deber de la divulgación
- c) Al ser un **proyecto abierto**, y con enormes **posibilidades de desarrollo y mejora**, los ciudadanos aficionados a la Astronomía podrán, a través de este taller, participar de una manera activa, **promoviendo así el debate científico y tecnológico**.
- d) Esta iniciativa también supone una mejora de los **formatos de comunicación**, permitiendo trasladar de una **manera novedosa, práctica e interactiva**, los avances científicos-tecnológicos que permiten que exista la Radioastronomía.
- e) También el Radiotelescopio presenta una excelente oportunidad para **dar a conocer algunos de los proyectos de investigación** de los investigadores participantes, tanto en el área de **Antenas y Circuitos de Microondas** (por parte de los investigadores de la UPCT y de la UPV) como en el área de **Astrofísica** (por parte de los investigadores de la Universidad de Valencia y de la Universidad de Cantabria).
- f) Esperamos que esta iniciativa tan interesante y llamativa **augmente la vocación de nuestros jóvenes** hacia la Astronomía, la Radioastronomía, y la Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones.
- g) Desde un punto de vista **internacional**, y dentro de **Espacio Europeo de Educación Superior** (EEES), esta iniciativa representa una buena oportunidad para mostrar cómo se puede innovar en las tareas de educación superior y de divulgación, formando a nuestros alumnos no sólo en los conocimientos, sino también en el desarrollo de **habilidades prácticas** y con una clara **orientación profesional y multidisciplinar**. Hay que tener en cuenta que el presente proyecto involucra simultáneamente conocimientos de muchas disciplinas como Astronomía, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Mecánica, Ingeniería de Antenas y Microondas, Procesado de Señal,

Ingeniería Telemática e Informática, Física...y todas ellas **aplicadas de una manera muy práctica** para el desarrollo, puesta en marcha, utilización y mantenimiento de un **sistema tan complejo e interesante** como es un Radiotelescopio.

- h) Este proyecto divulgativo se realiza con la colaboración de la Universidad de Valencia, la Universidad Politécnica de Valencia, y la Universidad de Cantabria-Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), con lo cual también intentamos promover el **intercambio interterritorial** de ideas y conocimientos.

1.4. Novedad y relevancia del proyecto ARIAM

La **novedad y relevancia** de los objetivos aquí presentados radica fundamentalmente en el siguiente aspecto: es la **primera iniciativa no profesional de desarrollo de un Radiotelescopio dedicado a la docencia y a la divulgación en nuestro país** (según la información manejada y conocida por los solicitantes). En el extranjero, hemos encontrado iniciativas parecidas en el Massachussets Institute of Technology [16], y en la Universidad de Cardiff [17]. También existen unos par de ejemplos de centros españoles que han instalado un Radiotelescopio: la Facultad de Físicas de la Universidad de Valencia [18] y el Instituto de Física de la Universidad de Cantabria [19]. Todos estos proyectos [16-19] sobre radioastronomía en las Universidades se han basado en Radiotelescopios comerciales comprados a compañías estadounidenses [20-21], y han sido instalados en Facultades de Físicas, donde son usados con fines docentes, investigadores y también para la divulgación. Por otro lado también hay que referenciar el proyecto PARTNeR (Proyecto Académico con el Radio Telescopio de NASA en Robledo, [22]), si bien de nuevo este proyecto dista mucho del aquí presentado al utilizar un Radiotelescopio profesional que pertenecía a la NASA para la divulgación de la Radioastronomía.



a) Antena de PARTNeR

b) Antena del Radiotelescopio de la UPCT

Figura 4: Un proyecto concebido a la escala de nuestros alumnos.

Sin embargo el proyecto aquí presentado va más allá: en esta ocasión **el Radiotelescopio está siendo desarrollado por alumnos y profesores de Ingeniería de Telecomunicación de la UPCT**, y su puesta en marcha, mantenimiento, divulgación y mejora, también es a cargo de este equipo humano. Esta novedad marca una diferencia clave, pues trasladamos a la sociedad un mensaje tan novedoso como importante: **la tecnología y las técnicas para desarrollar un Radiotelescopio están al alcance de nuestra sociedad, y en particular al alcance de nuestras Universidades y nuestros profesores y alumnos**. Se intenta así iniciar la superación de la brecha de conocimiento y tecnología que separa la Radioastronomía del público en general.

Más aún, al estar siendo desarrollado por **estudiantes de Ingeniería** de nuestras universidades públicas, el mensaje tiene otra lectura de no menos importancia en estos momentos: **nuestros titulados** son capaces de realizar proyectos con **tecnología tan avanzada y fines tan interesantes** como el aquí presentado. Como se ha comentado, como el Radiotelescopio está siendo desarrollado por alumnos, docentes e investigadores de nuestras Universidades Públicas, puede ser **mantenido, mejorado y ampliado** por la propia Universidad Politécnica de Cartagena, **atendiendo las inquietudes, necesidades y propuestas de la sociedad y de las asociaciones astronómicas regionales** (así como investigadores y técnicos expertos).

Tal y como se resalta de forma simpática en la Fig.4, el Radiotelescopio del proyecto ARIAM debe ser **hecho por nuestros alumnos a la escala de nuestras posibilidades** (que son muchas!), manejable, modificable, intentando romper las grandes distancias que comúnmente los separan. Así consideramos que se consigue **acercar de una manera novedosa la tecnología y los conocimientos de la Radioastronomía a la sociedad**. Esta iniciativa es por tanto **totalmente novedosa**, ya que se crea un **laboratorio de Radioastronomía vivo**, cuya puesta en marcha, desarrollo y crecimiento dependerá del interés y la dedicación que se ponga en este taller. Estamos convencidos que con los medios necesarios la iniciativa propuesta será un éxito. Muestra de ello es también el enorme entusiasmo y apoyo que nos han transmitido la Universidad de Valencia y la Universidad de Cantabria, cuyos grupos de Radioastronomía van a colaborar de manera activa en este proyecto. Además, las asociaciones regionales de astronomía amateur (Agrupación Astronómica de la Región de Murcia –AARM- [24] y Asociación Astronómica de Cartagena –ASAC- [25]), también han mostrado su elevado interés y apoyo a este proyecto. En el siguiente apartado se resumen las tareas realizadas por los alumnos de la Escuela Técnica Superior de Telecomunicación (ETSIT) de la UPCT, en el seno del proyecto ARIAM, resaltando las características innovadoras de su trabajo a la hora de fomentar el interés por la Ciencia de la Radioastronomía y la Tecnología de Antenas y Circuitos de Microondas.

2. Trabajo realizado por los alumnos de la ETSIT de la UPCT para ARIAM

2.1. Introducción

El trabajo realizado durante los cuatro últimos años se ha centrado en el **diseño, fabricación, medida y ajuste de los diferentes circuitos electrónicos** capaces de recibir las débiles señales de microondas de 1420.4MHz que nos llegan del hidrógeno atómico de nuestra Galaxia (puntos 1 y 2 de los objetivos descritos en el apartado 1.2 de esta memoria). Cada subsistema se encarga de realizar un determinado **procesado electrónico** sobre la señal de microondas (procesado “hardware”, como amplificación, filtrado, conversión en frecuencia, etc.). El sistema receptor (o “front-end”) de microondas consta de los siguientes subsistemas:

- a) Antena parabólica de 3 metros de diámetro y relación focal $f/D=0.3$.
- b) Bocina receptora en el foco de la parábola, sintonizada a la frecuencia de interés (1.42GHz).
- c) Amplificadores de microondas de muy bajo ruido, sintonizados a 1.42GHz.
- d) Filtros de microondas para sintonizar las bandas de frecuencia de interés y rechazar aquellas interferencias que puedan saturar los amplificadores y enmascarar la señal deseada, así como para disminuir el nivel de ruido.
- e) Oscilador de microondas en la banda de 1200-1400MHz.
- f) Mezclador de microondas para bajar la señal de microondas a frecuencia intermedia.

2.2. Metodología

La metodología seguida para diseñar los diferentes circuitos electrónicos (circuitos de microondas, circuitos de adquisición de datos y circuitos de control de apuntamiento) es la siguiente:

- 1- **Diseño teórico** de los esquemas eléctricos propuestos para realizar cada función.
- 2- **Simulación por ordenador** para comprobar su correcto funcionamiento y proceder al diseño asistido por ordenador (CAD).
- 3- **Diseño físico** de los circuitos (“layout”) y **fabricación** usando tecnología de guía de onda y tecnología impresa.
- 4- **Medida** de las prestaciones eléctricas usando analizadores de redes, analizador de ruido y analizador de espectros.
- 5- **Reajuste y/o rediseño** de los circuitos hasta conseguir los objetivos buscados en su respuesta eléctrica (ganancia, sensibilidad, ancho de banda, factor de ruido, etc.).
- 6- **Propuesta de mejoras** en los subsistemas diseñados, así como de líneas futuras de investigación y desarrollo, para así mejorar las prestaciones del Radiotelescopio en su conjunto.

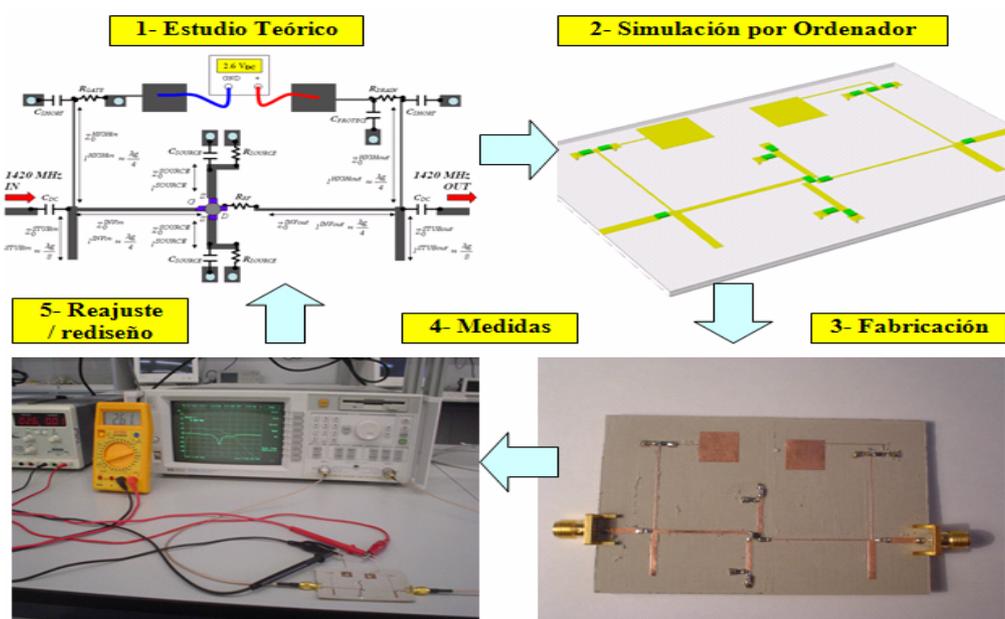


Figura 5: Metodología de trabajo.

Para la fase de ensamblado y puesta en marcha del Radiotelescopio total se está siguiendo la siguiente metodología:

- 1- **Ensamblado** de los diferentes subsistemas electrónicos y pruebas de funcionamiento usando una señal piloto artificial de 1420MHz.
- 2- **Montaje y pruebas** del sistema de apuntamiento.
- 3- **Pruebas** de recepción de una **señal real** de una fuente de microondas de referencia cercana y conocida.
- 4- **Recepción y procesado** de señales procedentes de diferentes fuentes de microondas de nuestra Galaxia.

Como se comentó, llegados al punto de funcionamiento del Radiotelescopio básico, se detectarán los diferentes **aspectos susceptibles de mejora**. Particularmente, se identificará la necesidad de mejora de la resolución y sensibilidad del Radiotelescopio para ampliar el número de fuentes que el Radiotelescopio es capaz de detectar y estudiar. También se analizarán posibles **proyectos futuros de expansión** del Radiotelescopio, como la posibilidad de **interferometría** y detección de otras frecuencias de interés por su aplicación científica.

Conviene destacar varios aspectos referentes a la metodología empleada, para así poder constatar el **valor metodológico** docente que esta iniciativa posee, a la hora de *despertar el interés por la ciencia y la tecnología entre los alumnos y profesores de la UPCT que estamos involucrados en este proyecto:*

- a) El **estudio teórico** de los circuitos de microondas que realizamos al inicio de cada PFC parte de un repaso y un ahondamiento en los conocimientos y habilidades que los estudiantes hemos desarrollado en varias asignaturas de la carrera. Entre estas asignaturas del plan de estudios de Ingeniería de Telecomunicación de la UPCT resaltamos: “Fundamentos Físicos de la Ingeniería”, “Ampliación de Física”, “Sistemas y Circuitos”, “Electrónica Analógica” (de 1^{er} curso), “Electrónica Digital”, “Análisis y Diseño de Circuitos”, “Campos Electromagnéticos”, (de 2^o curso), “Sistemas y Servicios de Telecomunicación” (3^{er} curso), “Electrónica de Comunicaciones”, “Transmisión y Propagación”, “Transmisión por Soporte Físico”, “Subsistemas de Radiofrecuencia” (4^o curso), y las asignaturas optativas de último curso siguientes: “Sistemas de Exploración Electromagnética”, “Comunicaciones Espaciales” y “Sistemas de Radionavegación”. En especial, los alumnos usarán el libro y los ejercicios de ejemplo de la **asignatura de Ingeniería de Microondas de la ETSIT de la UPCT** [26], así como otras **referencias bibliográficas básicas** [10-14]
- b) El **diseño asistido por ordenador** se realiza con programas comerciales usados en la **industria de electrónica de alta frecuencia**:
 - a. Para análisis electromagnético se utiliza HFSS (High-Frequency Structure Simulator) de Ansoft [27], y Momentum-ADS (Advanced Design Systems) de Agilent [28].
 - b. Para el análisis circuital se utiliza Microwave Office (MWO) 2002, de Applied Wave Research Inc. [29], y PSPICE v9.1 de Orcad [30].
 - c. Para el análisis a nivel de sistema, se está usando el software Visual System Simulator (VSS), también de Applied Wave Research Inc. [31].

- c) La **fabricación, medida y reajuste** de los subsistemas y sistemas electrónicos se realiza en los propios **laboratorios docentes y de investigación de la ETSIT de la UPCT**. Para ello se han utilizado los siguientes recursos técnicos:
- a. Analizador de Redes Agilent E-5062A
 - b. Analizador de Espectros Agilent N9302A.
 - c. Sonda de Alta Impedancia Agilent 85024^a.
 - d. Máquina de fresado de circuitos impresos LPKF Protomat C60.
 - e. Placas de sustrato para microondas de tipo *Duroid 6006T*, así como diferentes componentes de microondas (transistores, amplificadores, diodos, resistencias, bobinas, condensadores...).
 - f. Guías de onda fabricadas por el servicio del SAIT (Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica) de la UPCT.
- d) El **ensamblado de los subsistemas** y la **puesta en marcha** del sistema receptor del Radiotelescopio también se está realizando en las propias instalaciones de la UPCT. En concreto, la antena parabólica se está instalando en la **azotea del nuevo edificio de I+D+i de la UPCT** [32].

Dentro de las tareas propuestas, los **alumnos** se encargan de realizar un **estudio teórico previo** de los circuitos que se pretenden diseñar, para así comprender los **fundamentos** teóricos básicos que describen las partes, el funcionamiento y los **pasos de diseño** de cada subsistema. Este estudio está dirigido por los **tutores (profesores** de la UPCT y de otras universidades), que recomendarán en cada caso la bibliografía oportuna sobre circuitos de microondas [11,12,13,14,26] y antenas ([8,9,10]). De la misma manera, los tutores guiarán a los alumnos en las primeras fases del **diseño asistido por ordenador** de los circuitos, mostrándoles como utilizar los diferentes paquetes de simulación electromagnética y/o circuital ([27-31]). Una vez diseñado por ordenador el circuito, se procederá a la **fabricación, medidas y ajuste del mismo**. De nuevo serán los alumnos los que realicen esta tarea, siendo esta vez asistidos no sólo por los tutores de este proyecto, sino también por el **personal de los laboratorios del SAIT** (Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica) de la UPCT [33].

2.3. Resultados

Hasta la fecha, y durante los últimos cuatro años, se han diseñado, fabricado y medido los subsistemas de microondas en tecnología impresa y guía de onda enumerados en el apartado 2.1, para poner así en marcha el receptor o front-end del Radiotelescopio. En los siguientes puntos se detallan los resultados obtenidos en cada subsistema, para así comprender el trabajo realizado y la metodología seguida por los alumnos:

- 1-Se ha diseñado, fabricado y medido la **antena** que debe servir como alimentador de la antena parabólica. La misión del alimentador es la de adaptarse al reflector parabólico para recibir las señales que la parábola concentra en su foco de la manera más eficiente. Se estableció un reflector de 5m de diámetro y relación focal $f/D=0.3$. Se propuso un diseño barato y sencillo, basado en el uso de una guía de onda circular de acero excitada por una sonda coaxial de tipo monopolo, y de un anillo externo de sintonía para mejorar la eficiencia del conjunto bocina-parabólica [10]. Mediante diseño electromagnético con HFSS [27] se sintonizó la respuesta de la antena en guía de onda circular a la frecuencia

de 1420MHz, consiguiendo una adaptación por debajo de -15dB y una eficiencia del 76% (el anillo exterior mejora en un 8% la eficiencia de la guía de onda solitaria). Los resultados de las medidas han coincidido muy bien con los de las simulaciones electromagnéticas. Como punto de mejora cabe destacar que la antena diseñada tiene polarización lineal, y sería interesante expandir el diseño para polarización circular o polarización circular [10]. Para ello habría que diseñar una alimentación doble, compuesta de dos sondas coaxiales dispuestas perpendicularmente, o bien usar una hélice. La Fig.6 muestra algunos de los resultados obtenidos en el diseño de la antena.

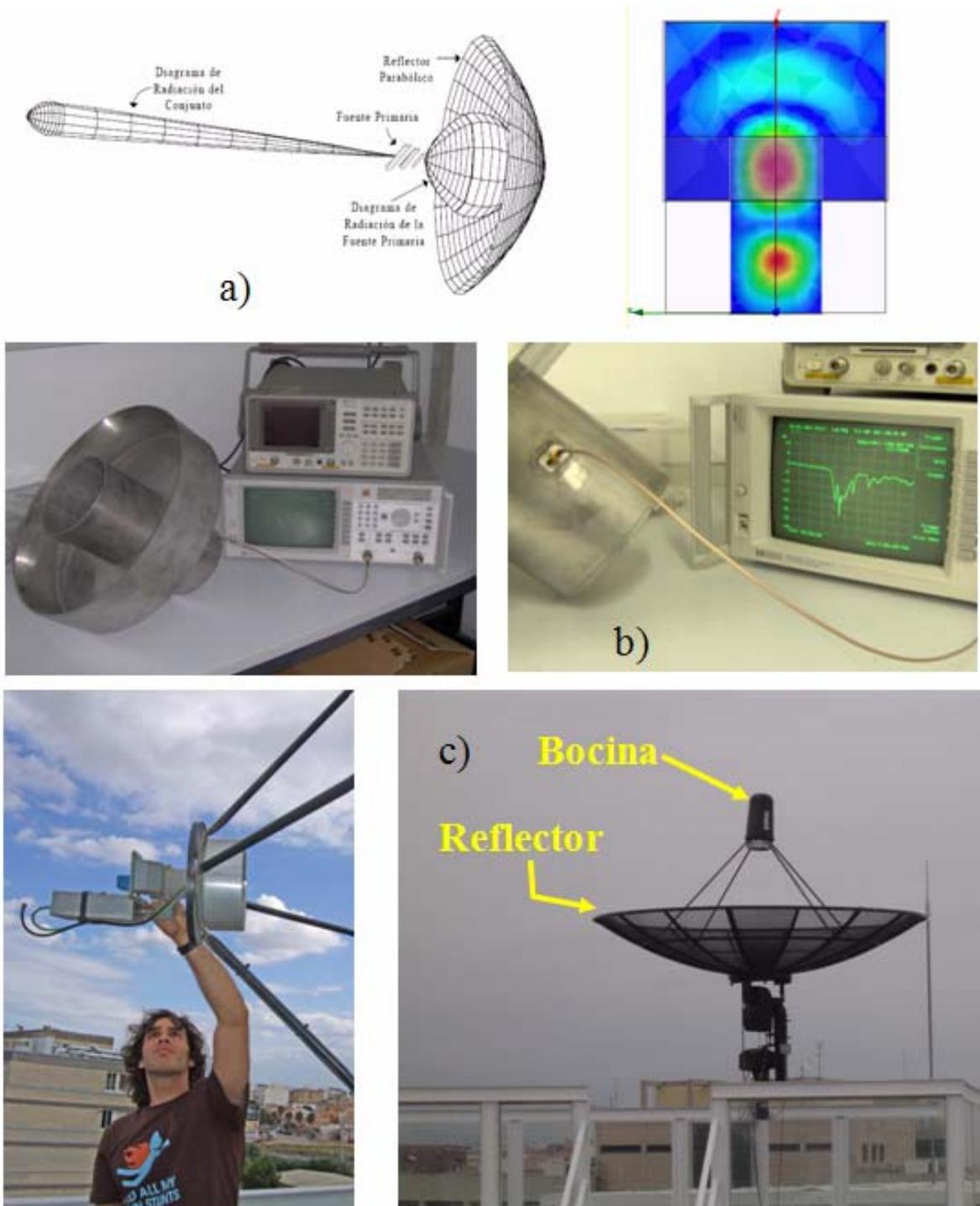


Figura 6: Diseño de la antena del Radiotelescopio: a) Simulaciones por ordenador b) Fabricación y medidas c) Ensamblado y puesta en marcha

- 2- Se diseñó una primera versión del **circuito amplificador de bajo ruido** (LNA, Low Noise Amplifier [11, 13, 26]), en tecnología impresa, y sintonizado a la frecuencia de 1420MHz. Se pretendía conseguir una ganancia de 12dB y un factor de ruido por debajo de 0.8dB. Aunque se logró diseñar un primer prototipo sintonizado a 1420MHz, concluimos que era necesaria una mejor caracterización del transistor de bajo ruido, ya que las simulaciones por ordenador no coincidían con las medidas del circuito fabricado (que superaba los 2dB de figura de ruido y presentaba elevadas desadaptaciones, en torno a -5dB, provocando una baja ganancia de 8dB). Posteriormente continuaron las investigaciones para conseguir un **mejor diseño**. Así, en una segunda versión del LNA se mejoró la caracterización del transistor utilizado, consiguiendo figuras de ruido de 1.2dB, mejorar la adaptación de entrada y salida (por debajo de -15dB), y por tanto aumentar la ganancia del amplificador (por encima de +10dB). Asimismo se ha logrado disminuir el tamaño del circuito fabricado, aunque es necesario mejorar el diseño para disminuir aún más el ruido y poder detectar las débiles señales extraterrestres. La Fig.5 muestra algunos de los resultados obtenidos en el diseño de los amplificadores de bajo ruido.
- 3- Se han diseñado **filtros de microondas** en tecnología impresa para filtrado de gran selectividad y mínimo ruido [11, 13, 26], centrados en la banda de 1420MHz. Estos filtros se basan en líneas acopladas en topología “hairpin”, y han sido diseñados usando análisis circuital con MWO (Microwave Office, [29]). Para el ajuste fino se ha utilizado simulación electromagnética con ADS-Momentum [28]. Estos filtros han sido fabricados, consiguiendo una excelente similitud entre simulaciones y medidas. La Fig.7 muestra algunos de los resultados obtenidos en el diseño de los filtros de microondas.

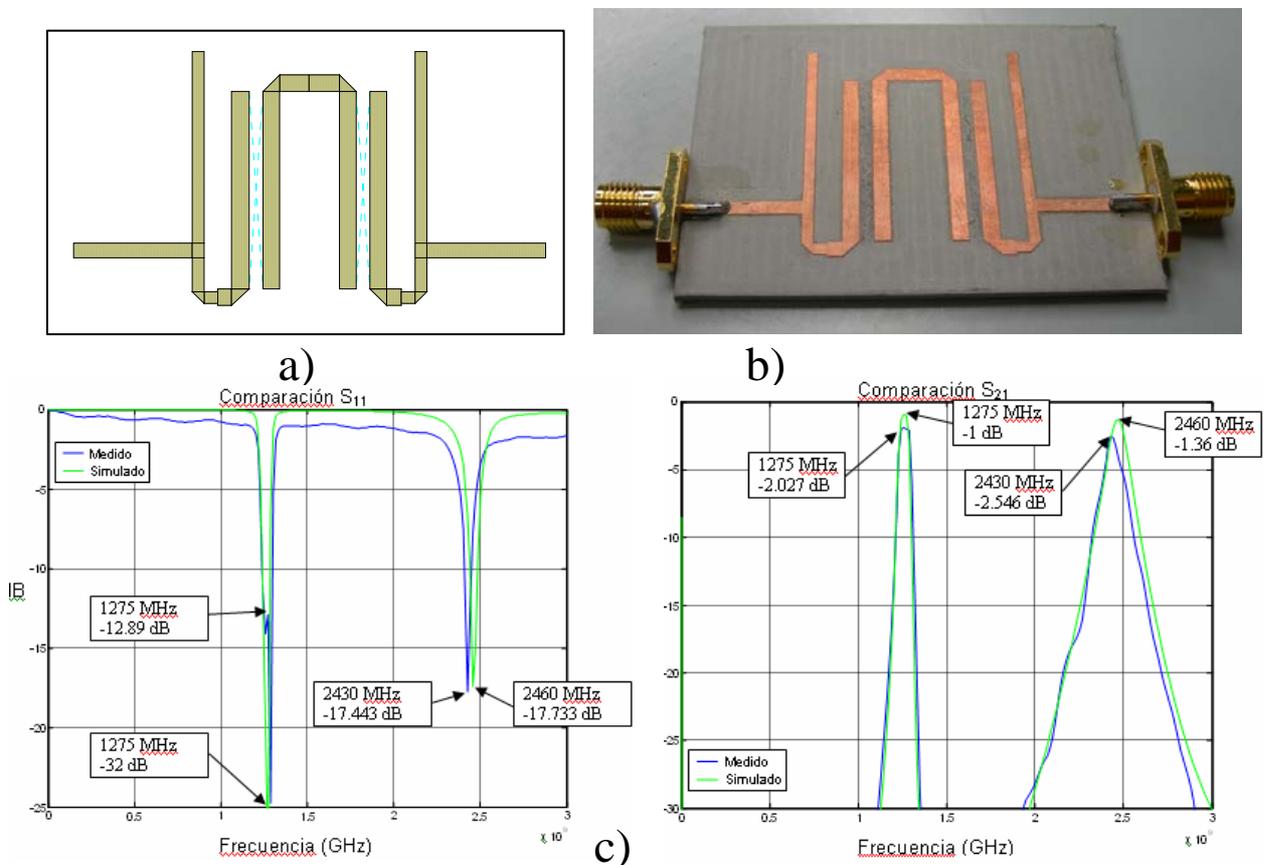


Figura 7: Diseño de los filtros del Radiotelescopio: a) Modelo para simulación por ordenador b) Fabricación c) Comparación entre simulación y medidas reales

- 4- Se diseñó, fabricó y midió el **oscilador local**, cuyas especificaciones requerían que fuera capaz de generar una señal de 1296MHz y +10dBm de potencia. El circuito propuesto se basa en un oscilador seguidor de emisor de Butler, con un cristal de cuarzo sintonizado para generar una señal de 108.008MHz [13, 26]. Esta señal pasa por un generador de armónicos (rectificador de media onda), de forma que el 12 armónico se corresponde con la frecuencia de microondas deseada. Tras varias etapas de amplificación y filtrado, se deben eliminar los armónicos no deseados y dejar una señal lo más pura posible a la frecuencia de 1296MHz y con una potencia de +10dBm. El diseño físico (“layout”) y la fabricación se hicieron en tecnología impresa, obteniendo unos excelentes resultados, incluso mejores que los obtenidos con osciladores comerciales homólogos. La Fig.8 muestra algunos de los resultados obtenidos en el diseño del oscilador de microondas.

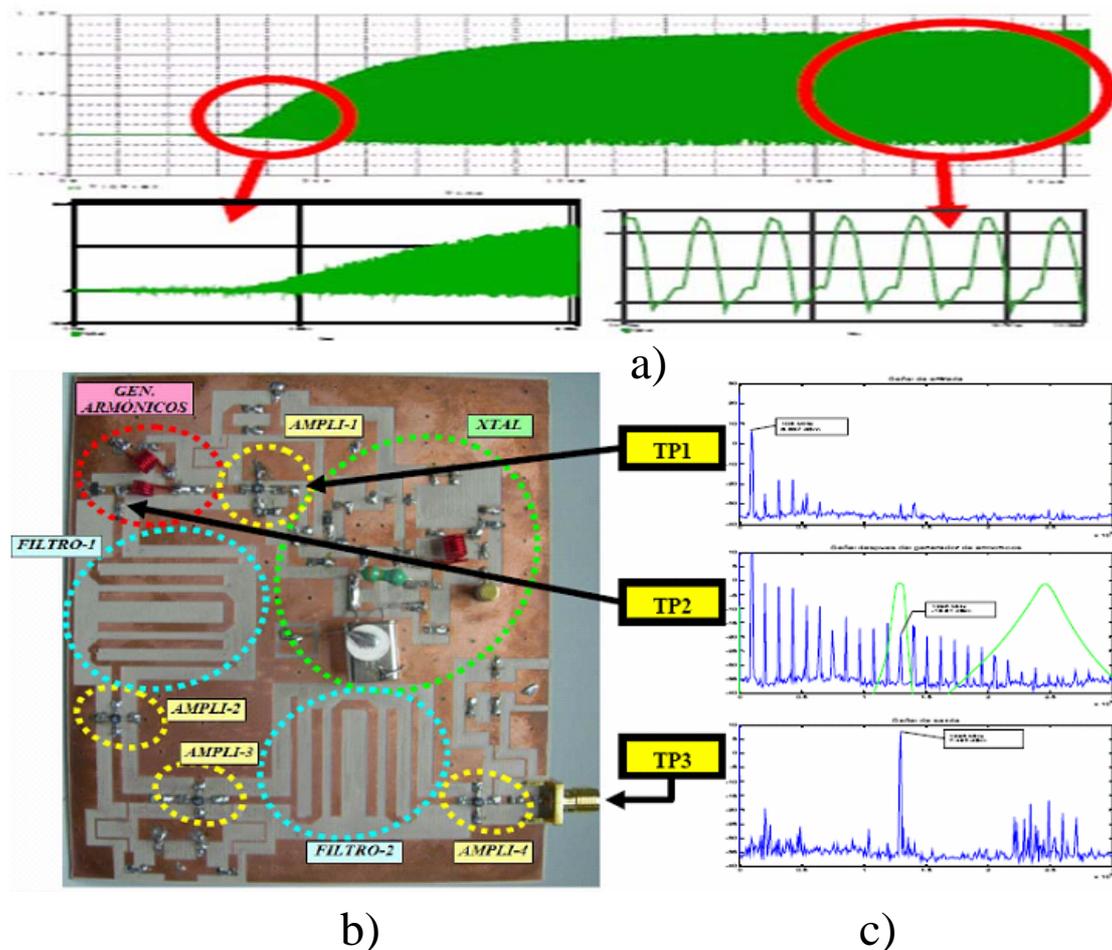


Figura 8: Diseño del oscilador local: a) Simulaciones b) Fabricación c) Medidas

- 5- Se ha diseñado una primera versión del **mezclador de microondas**, cuya misión es la de mezclar la señal de 1420MHz proveniente de la antena con una señal de 1276MHz originada por un oscilador local, con el fin de bajar la señal recibida a la frecuencia intermedia de 134MHz. Se propuso un mezclador pasivo en tecnología impresa (utilizando diodos Schottky de montaje superficial) en topología de mezclador balanceado (usando un híbrido de 90°, “branch-line”, [13, 26]). Asimismo, se diseñaron filtros de microondas encargados de eliminar los armónicos no deseados del mezclador. Así, se diseñó un filtro paso bajo con salto de impedancias, diseñado con una respuesta de tipo Butterworth y una frecuencia de corte de 800MHz, y un filtro paso banda con componentes discretos centrado en la frecuencia intermedia, con respuesta de tipo

Butterworth, y ancho de banda a -3dB desde 50MHz a 250MHz. Esta vez, las medidas coincidieron muy bien con el diseño por ordenador, obteniéndose unas pérdidas de conversión de -11dB, un aislamiento OL->RF de -29dB, un aislamiento RF>OL de -7.5dB, y adaptaciones en el puerto RF de -2dB y en el puerto OL de -14.5dB. Asimismo se establecieron las potencias óptimas para el correcto funcionamiento en -10dBm para la señal de RF y +10dBm para la señal de OL, consiguiendo un espectro muy limpio de la señal de IF (potencia -20dBm y con todos los armónicos por debajo del ruido, es decir, por debajo de -45dBm). La Fig.9 muestra algunos de los resultados obtenidos en el diseño del mezclador.

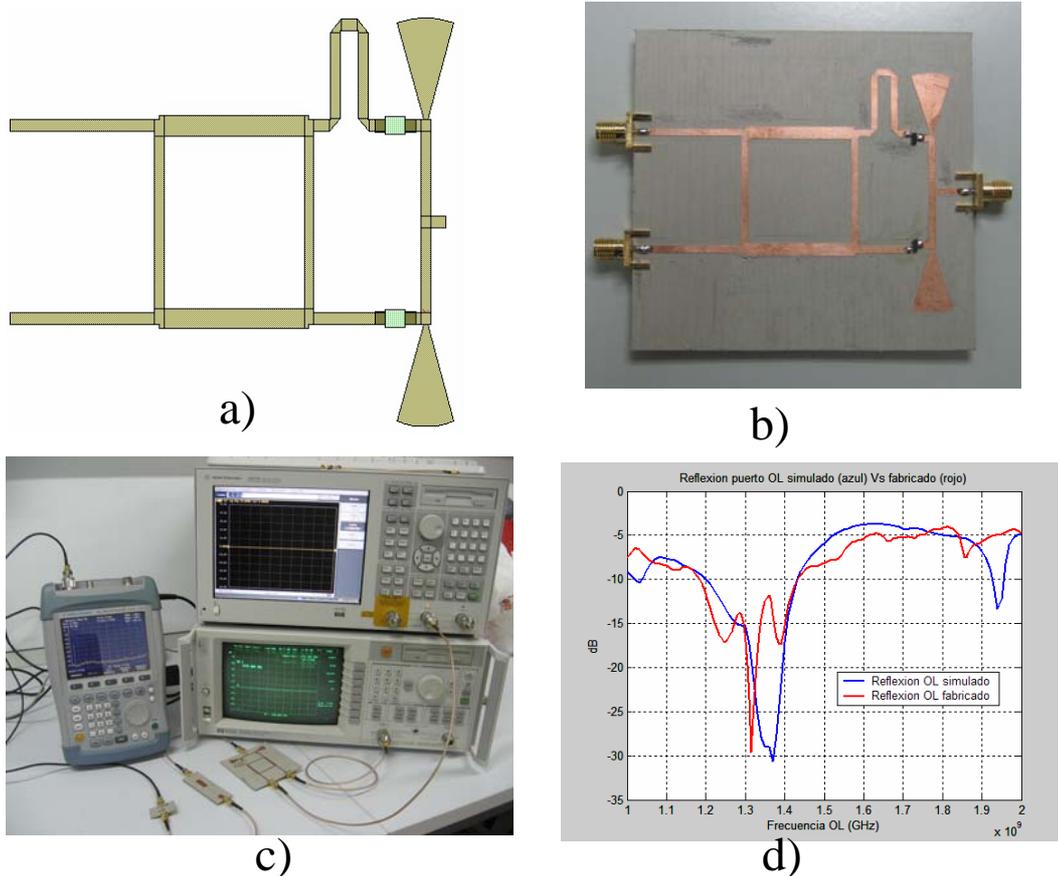


Figura 9: Diseño del mezclador del Radiotelescopio: a) Modelo simulaciones b) Fabricación c) Medidas en laboratorio d) Comparación entre simulación y medidas reales

Aunque el diseño fue muy satisfactorio, era necesario mejorar la fuerte desadaptación del puerto de RF del mezclador (-2dB son demasiadas pérdidas por reflexión), así como considerar reducir el tamaño del circuito fabricado, por lo que se procedió a la investigación para mejora esta primera versión del mezclador. La segunda versión del consiguió superar todos estos inconvenientes del primer mezclador.

- 5- Con los resultados obtenidos para cada uno de los circuitos o subsistemas básicos que conforman el **sistema receptor**, se procedió al análisis del sistema total usando Visual System Simulator (VSS, [31]). Esta fase está aún en proceso de desarrollo, y su objetivo fundamental es establecer la topología final del receptor, determinando el número y la posición de las etapas de amplificación, filtrado y mezclado, partiendo de los bloques funcionales (subsistemas) que hemos obtenido [14]. La Fig.10 muestra los primeros resultados obtenidos en el diseño del sistema completo.

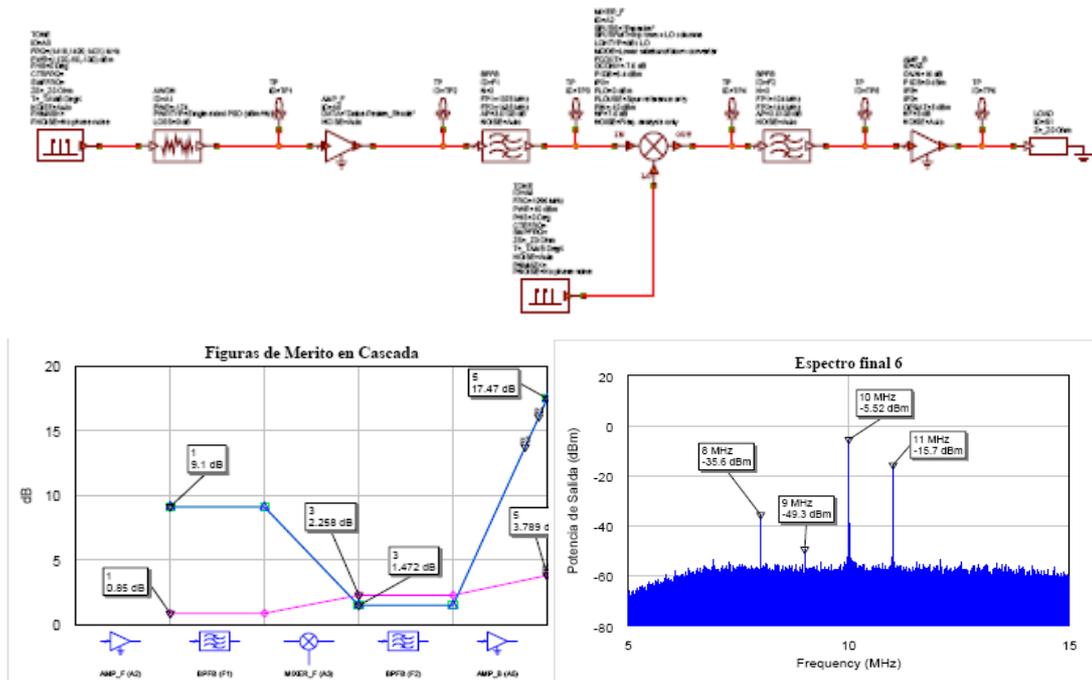


Figura 10: Diseño del sistema receptor de microondas del Radiotelescopio.

Además de los **resultados técnicos** que acabamos de resumir, habría que mencionar como otros resultados no menos importantes el desarrollo de habilidades cruciales para el futuro de los alumnos, tales como el **trabajo en equipo**, la **multidisciplinariedad**, el manejo de **herramientas de diseño asistido por ordenador**, la **fabricación, medida y ajuste** de circuitos, el manejo de **instrumentación electrónica avanzada**, o la capacidad de contrastar entre **simulaciones y medidas**. Todas estas habilidades van encaminadas hacia una formación más **íntegra** y con un mayor nivel de **competencias profesionales**. Parte de los resultados obtenidos hasta la fecha en esta iniciativa, también han sido publicados en [34] y [35], resaltando como fin último el fomento del interés y de la vocación por la Ciencia y la Tecnología entre nuestros alumnos y la Sociedad.

3. Líneas Futuras

Proponemos las siguientes líneas futuras para seguir trabajando, encaminados a finalizar la investigación y el desarrollo del Radiotelescopio que se desea poner en marcha.

- 1- Realizar un estudio detallado o a **nivel de sistema** usando la herramienta Visual System Simulator [31], para así diseñar el sistema **receptor total**, una vez que conocemos los circuitos o subsistemas que disponemos.
- 2- **Ensamblar** todos los subsistemas y medir las prestaciones del **sistema receptor de microondas completo** ("front-end"), de manera que sea capaz de recibir y bajar a frecuencia intermedia señales de muy baja potencia alrededor de la frecuencia de 1420.4 MHz. Este sistema debe tener el ancho de banda, la ganancia y la sensibilidad necesaria para poder obtener una señal a su salida que pueda ser digitalizada y procesada por un ordenador.

- 3- Desarrollar un **sistema de adquisición y procesado por ordenador** (procesado “software”), que permita obtener información de la señal recibida. Aplicando algoritmos adecuados se puede eliminar ruido y extraer diferentes datos sobre la fuente emisora, como su velocidad relativa, su intensidad y la dispersión sufrida por la señal en su camino a la Tierra.
- 4- Desarrollar un **sistema de control de la posición de la antena** (apuntamiento). Este sistema es el encargado de actuar sobre los motores de giro de la antena en elevación y azimut. Este objetivo se debería combinar con el desarrollo de un software encargado de enfocar la antena a un punto concreto de nuestra bóveda celeste, y seguir el movimiento aparente de este punto debido a la rotación de nuestro planeta. De esta forma se aseguraría una recepción estable de la señal de una determinada fuente de microondas que se pretenda estudiar.
- 5- El Radiotelescopio, una vez puesto en marcha, formará parte del proyecto ARIAM (Aula-taller de Radioastronomía e Ingeniería de Antenas y circuitos de Microondas), cuyo objetivo fundamental es dar a conocer entre la sociedad murciana la disciplina de la Radioastronomía y la tecnología de circuito de Alta Frecuencia que la hace posible. Para ello, el Radiotelescopio estará acompañado de un **aula-taller de divulgación**, así como de un **portal web con contenidos y aplicaciones** relacionados con el Radiotelescopio (incluido el **control remoto** vía web del Radiotelescopio).
- 6- También se debe mencionar la posibilidad de que este Radiotelescopio colabore en el **proyecto SETI** (Search of ExtraTerrestrial Intelligence, [36]), de índole internacional y coordinado desde los Estados Unidos de América, y que pretende realizar una búsqueda “pasiva” de inteligencia extraterrestre. Decimos que es una búsqueda pasiva ya que se trata de “escuchar” las ondas electromagnéticas procedentes del Universo, con la idea de que alguna civilización extraterrestre (más avanzada tecnológicamente que la nuestra) esté transmitiendo señales radioeléctricas que puedan alcanzar nuestro planeta y ser recibidas por nuestros receptores de radio. Dentro de las diferentes iniciativas del proyecto SETI (como por ejemplo el proyecto SETI@home), se encuentra una para el desarrollo de pequeños receptores de microondas en la banda 1420MHz, correspondiente a la línea de emisión del hidrógeno atómico. Según el SETI, esta “emisora” tendría muchas posibilidades de ser elegida por una civilización extraterrestre a la hora de intentar ponerse en contacto con otras civilizaciones como la nuestra. Esto es debido al significado que el hidrógeno tiene en la vida, como elemento de las moléculas de agua (H₂O), en las que se basa la vida tal y como la concebimos nosotros. Creemos que este Radiotelescopio también puede ser usado para dar a conocer las iniciativas tan interesantes del SETI, que también pueden servir para atraer al público en general, y a nuestros alumnos en particular, a las disciplinas de la **Astronomía, la Tecnología de Telecomunicaciones y la Biología**.

4. Agradecimientos

El desarrollo de este Radiotelescopio no habría sido posible sin la financiación ofrecida durante los años 2006, 2007 y 2008 por la **Fundación Regional Séneca** [37]. De igual o mayor valor es la ilusión mostrada por todos los **alumnos de la ETSIT de la UPCT** que han colaborado o están colaborando en el proyecto ARIAM, los cuales nombramos por orden cronológico: Ricardo Alarcón Llamas (LNAs v1.0, curso 2005-2006), Pedro Enrique Ros Avilés (mixer v1.0, curso 2005-2006), Anna Kamasheva (LNA v2.0, curso 2006-2007), Gonzalo Peñafiel Beltrán (LNA v3.0, curso 2006-2007), Mónica Moragón Serano (oscilador,

curso 2006-2007), Adrián Juan Heredia (bocina, curso 2006-2007), Francisco J. Sandoval Piqueras (mixer v2.0, curso 2006-2007), Javier Molero Madrid (sistema, curso 2007-2008), Jesús Mora Rodríguez (sistema, curso 2007-2008) y Marta Rodríguez García Rodríguez (sistema, curso 2007-2008). Asimismo, la dedicación de los **profesores** Fernando Quesada Pereira, Alejandro Álvarez Melcón, Jose María Molina García-Pardo, David Cañete Rebenaque y José Luis Gómez Tornero, de la ETSIT de la UPCT, ha sido vital para conseguir llegar hasta el punto en el que está el proyecto ARIAM.

5. Referencias

- [1] J. Kraus, *Radio Astronomy*, 1966 Edition., Mc-Graw Hill and Cygnus Quasar Books P.O. Box 85, Powell, Ohio
- [2] Bernard F. Burke, Francis Graham-Smith, *An Introduction to Radio Astronomy*, 1994.
- [3] D. Fisher, *Basics of Radio Astronomy*, Jet Propulsion Laboratory, 1997, Document No. JPL D-13835.
- [4] Jeffrey M. Lichtman, *Amateur Radio Astronomy, Systems, Procedures and Projects*, 1993.
- [5] Heiserman, *Radio Astronomy for the Amateur*, ISBN 0-8306-5714-2. TAB Books Co., 13311 Monterey Lane, Blue Ridge Summit Pa., 1993.
- [6] Web del Centro Astronómico de Yebes (CAY):
http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERAL_ES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Astronomia/instalaciones/cay/
- [7] Web del proyecto ALMA (Atacana Large Millimeter/submillimeter array):
<http://www.alma.cl/>
- [8] Kraus, *Antennas*, 1988. Cygnus Quasar Books P.O. Box 85, Powell, Ohio.
- [9] R.C. Johnson, *Antenna Engineering Handbook*, 3rd Ed., Ed. New York, McGraw-Hill, 1993.
- [10] Contantine A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [11] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd Ed., John Wiley and Sons, 1998.
- [12] Robert E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, 2nd Ed., IEEE Press, 2001.
- [13] Inder Bahl, *Microwave Solid State Design*, 2nd Ed. John Wiley and Sons, 2003.
- [14] David M. Pozar, *Microwave and RF wireless systems*, John Wiley & Sons 2000.
- [15] Web del FECYT: <http://www.fecyt.es>
- [16] Web del Haystack Observatory del MIT:
<http://www.haystack.mit.edu/edu/undergrad/srt/index.html>
- [17] Web del observatorio Radioastronómico de la Universidad de Cardiff:
<http://www.astro.cf.ac.uk/observatory/obsradio.html> ç
- [18] Página web del Radiotelescopio de la Facultad de Físicas de la Universidad de Valencia: <http://www.uv.es/radioastronomia/indexb.htm>

- [19] Página web del Radiotelescopio del Instituto de Física de la Universidad de Cantabria: http://www.ifca.unican.es/~gserrano/SRT/SRT_UNICAN.html
- [20] CASSICORP web page: <http://www.cassicorp.com/index.html>
- [21] Down East Microwave Inc. (DEMI) web page: <http://www.downeastmicrowave.com/>
- [22] Página web del proyecto PARTnER: <http://laeff.inta.es/partner/>
- [24] Web de la Agrupación Astronómica de la Región de Murcia: <http://www.observamurcia.com/>
- [25] Web de la Asociación Astronómica de Cartagena: http://usuarios.lycos.es/astronomia_cartagena/
- [26] José Luis Gómez Tornero, *Transmisión por Soporte Físico; Ejercicios resueltos de circuitos pasivos y activos de microondas*, MORPI, S.L., 2006 (ISBN: 84-95781-70-0).
- [27] Web de Agilent High-Frequency Structure Simulator (HFSS V.9.0), 2000: www.Ansoft.com
- [28] Web de Agilent Advance Design System ADS 2002, Momentum: <http://eesof.tm.agilent.com/products/ads2002.html>
- [29] Web de Applied Wave Research, Microwave Office (MWO), AWR 2002: http://web.appwave.com/Products/Microwave_Office/Overview.php
- [30] Web de Orcad PSPICE v9.1: <http://www.cadence.com/products/orcad/index.aspx>
- [31] Web de Applied Wave Research, Visual System Simulator (VSS): http://web.appwave.com/Products/Visual_System_Simulator/
- [32] Web del edificio de I+D+i de la UPCT: <http://www.upct.es/idi.htm>
- [33] Web del SAIT de la UPCT: <http://www.upct.es/~sait/>
- [34] J.L. Gómez-Tornero et al., "Oscilador de microondas por generación de armónicos para facilitar el aprendizaje de circuitos de alta frecuencia", XXII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2007, 19-21 Septiembre 2007, La Laguna, Tenerife.
- [35] J.L. Gómez-Tornero et al., Capítulo 13 de *TICAI2007: TICs para el Aprendizaje de la Ingeniería*, "Oscilador de microondas por generación de armónicos para facilitar el aprendizaje de circuitos de alta frecuencia", ©IEEE, Sociedad de Educación: Capítulos Español, Portugués y Colombiano, Martín Llamas Nistal, Carlos Vaz de Carvalho, y Carlos Rueda Artunduaga, editores, ISBN 978-84-8158-380-9, pp.87-94, 2008.
- [36] Web del proyecto SETI: <http://seti1.setileague.org/>
- [37] Proyecto financiado por la Fundación Séneca 02972/PI/05, "Desarrollo de un radiotelescopio para divulgación de Radioastronomía y exploración de nuestra Galaxia", Coordinador: José Luis Gómez Tornero, Universidad Politécnica de Cartagena (2006-2008).