

# Entre el cielo



El Observatorio de Yebes cuenta con un centro puntero de desarrollo tecnológico



# y la Tierra

El Observatorio de Yebes es una de las seis Infraestructuras Científico-Técnicas Singulares (ICTS) españolas de astronomía, la única que pertenece al Ministerio de Fomento y también la única en Castilla-La Mancha. Adscrito al Instituto Geográfico Nacional (IGN), es un observatorio de renombre internacional que aloja un centro puntero de desarrollos tecnológicos en el campo de la radioastronomía, dos radiotelescopios de primer nivel mundial, intensa actividad en geodesia espacial y geofísica y mucho futuro por delante.





► Imagen del interferómetro del Plateau de Bure del Instituto de Radioastronomía Milimétrica, IRAM.

**Yebes es un** pueblo de la provincia de Guadalajara situado en la Alcarria, una meseta surcada por valles donde crece vegetación típica del clima mediterráneo seco. A principios de los años 70, a una altitud de 1.000 metros, en el lugar más alto de un término municipal que por aquel entonces no albergaba más de 100 habitantes, lejos de poluciones lumínicas y radio y ocupando una parcela de 25 hectáreas, se estableció el Observatorio.

Cuarenta y cinco años después, el nombre de Yebes ha pasado a ser habitual y familiar en los foros y congresos internacionales de radioastronomía y geodesia espacial, gracias especialmente a los desarrollos tecnológicos que se realizan en su Observatorio, a sus dos radiotelescopios en activo de 40 metros y de 13,2 metros de diámetro y a sus actividades de divulgación, estas últimas en colaboración con el Ayuntamiento de una localidad que



45 años después ha pasado a tener más de 3.000 habitantes, convirtiéndose en una de las ciudades con más futuro de la provincia de Guadalajara.

### Los primeros pasos

En 1974, el Instituto Geográfico Nacional abrió una nueva línea de investigación en astronomía

para dinamizar la actividad del Observatorio Astronómico Nacional, situado en el centro de Madrid al lado del parque del Retiro, y apostó por la creación de un Observatorio en el municipio de Yebes, equipado con tres instrumentos de observación astronómica: un astrógrafo doble para la observación de asteroides, una torre solar y un radiotelescopio de 14 m de diámetro. Este último instrumento es el más singular y relevante de todos los anteriores porque en torno a él se formó el primer grupo de radioastronomía español. La observación astronómica a longitudes de onda radio, descubierta por el ingeniero Karl Jansky tan solo 40 años antes, permite obtener información valiosa sobre el Universo que no puede conseguirse mediante observaciones en el óptico. Desde sus inicios hasta hoy, la radioastronomía ha contribuido a esclarecer procesos físicos como la formación de estrellas o fenómenos como la detección de agujeros negros.

Dado que en España no existía ni tradición ni experiencia previa, los astrónomos que se incorporaron al Observatorio se desplazaron a los principales centros de radioastronomía extranjeros, localizados en Francia, Alemania, Estados Unidos y Suecia, para formarse en las técnicas de observación, la operación de los radiotelescopios, la explotación científica de las observaciones radioastronómicas y la construcción de receptores de microondas. Este periodo de formación que comenzó a principios de los años 80 se extendió hasta mediados de la década de los 90.

Paralelamente a la puesta en marcha del Observatorio de Yebes, el Instituto Geográfico Nacional se convirtió en los años 80 en el socio español del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM), un instituto actualmente hispano-franco-alemán que opera un radiotelescopio milimétrico en el Pico del Veleta, Granada, y un interferómetro hoy formado por diez antenas en los Alpes franceses. IRAM era y es una referencia tecnológica internacional en observaciones radioastronómicas de ondas milimétricas y submilimétricas.

Desde los primeros momentos, y a imagen del IRAM, resultó evidente que era necesario dotar al Observatorio de Yebes de astrónomos e ingenieros siguiendo los mismos criterios que los principales observatorios radioastronómicos del mundo. Por otra parte, la variedad de instrumentación que es necesaria manejar en un radiotelescopio exigió la especialización de los miembros del Observatorio. La incorporación de personal se hizo a través del



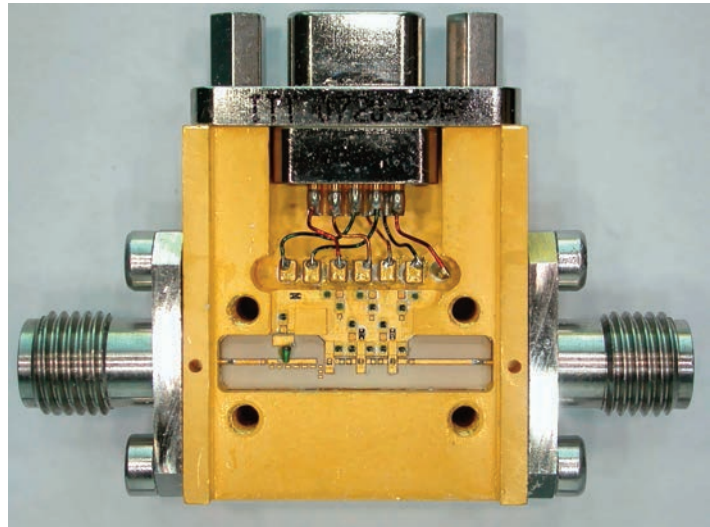
acceso al Cuerpo de Astrónomos, de becarios con cargo a proyectos de investigación y de la contratación de personal laboral con cualificaciones técnicas. De este modo, el Observatorio quedó configurado desde el comienzo con una doble faceta: científica e instrumental.

La primera observación manual con el radiotelescopio de 14 m se realizó sobre la Luna en 1979 con un receptor a longitudes de onda radio, prestado por colegas franceses. En 1988, y tras años de trabajo, se instaló en el radiotelescopio de 14 m el primer receptor enfriado a temperatura criogénica (-250 °C) que fue diseñado y fabricado íntegramente en el Observatorio con el apoyo de la Escuela de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid.

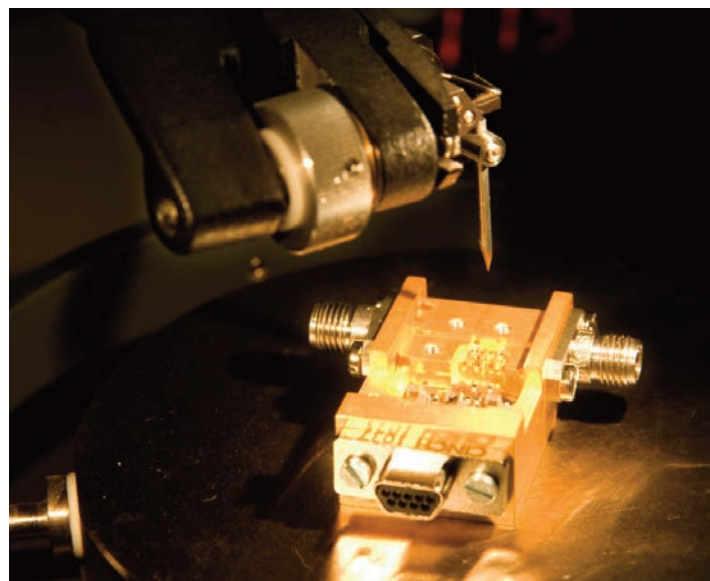
Las señales que se pretende detectar, provenientes de objetos celestes muy lejanos como galaxias, estrellas o cuásares son miles de billones de veces más débiles que las que pueda generar un teléfono móvil. Para poder detectarlas se construyen radiotelescopios constituidos por grandes superficies parabólicas que concentran, en un punto donde se sitúa el receptor, toda la energía captada en la precisa dirección del Universo a la que apuntan. En los receptores la señal encuentra primero al alimentador, la verdadera antena que recibe la señal, y tras ser captada por este es conducida al amplificador de bajo ruido. Este último, diseñado para generar el mínimo ruido interno, amplifica miles de veces la débil señal recibida, fijando así nuestro límite de sensibilidad. Tanto el alimentador como el amplificador generan su propia señal interna, el ruido, que enmascara la señal a recibir. Al tratarse de un «ruido» de origen térmico, reducir la temperatura de funcionamiento de estos dispositivos aumenta de manera extraordinaria la sensibilidad del receptor, esto es la mínima señal detectable.

## Los amplificadores criogénicos de muy bajo ruido

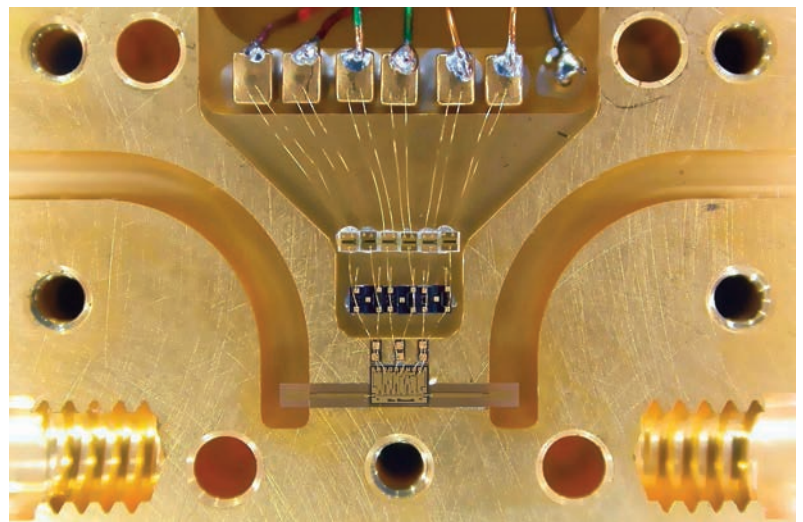
Sin duda, uno de los elementos clave de los receptores de un radiotelescopio son los amplificadores criogénicos de muy bajo ruido. El Observatorio de Yebes se especializó muy pronto en su diseño y fabricación. Esta actividad de alta tecnología que comenzó hace más de 30 años se mantiene activa a un altísimo nivel competitivo en la actualidad. El amplificador exige un diseño singular para que la pieza clave, el transistor HEMT, se rodee de las condiciones idóneas para



► Amplificador criogénico.

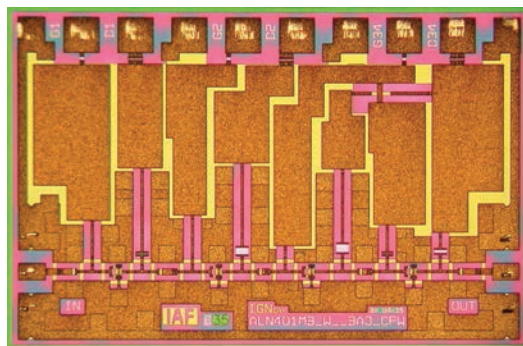


► Montaje de un amplificador.

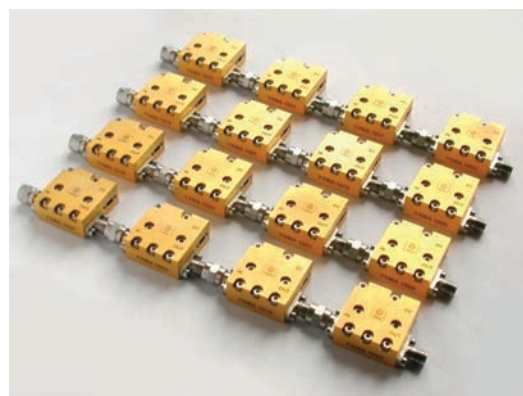


► Detalle del amplificador criogénico

► Circuito MMIC y amplificador.



► Amplificadores criogénicos fabricados en el Observatorio de Yebes



ofrecer el mínimo ruido posible. Un circuito de microondas, la línea microstrip diseñada al efecto, componentes electrónicos chip y una caja metálica con fresados de precisión micrométrica recubierta de una fina capa de oro de unas pocas micras de grosor se encargan de ofrecer el entorno adecuado. Y para culminar, unos finos hilos de oro también de unas pocas micras de diámetro (el tamaño de un cabello humano) realizan las conexiones necesarias con el transistor. Y todo a unos doscientos cincuenta grados bajo cero, para que no se escape ninguna señal, por lejana que provenga.

La constitución de esta tecnología «made in Yebes» ha conllevado necesariamente una inversión considerable en personal e instrumentación durante estos 40 años. Hoy en día, sus laboratorios y talleres ocupan una superficie de más de 1.000 metros cuadrados y se encuentran equipados con moderna tecnología, comenzando por fresadoras de control numérico, diferentes procesos de soldadura como las máquinas de «bonding», que «cosen» con hilo de oro el transistor, un laboratorio de química para dorar los circuitos y controlar los grosores de las capas de oro y terminando por los analizadores de redes que miden su funcionamiento. Todo lo necesario para la construcción de un dispositivo que, dada la destreza alcanzada por nuestros técnicos, necesita aproximadamente una semana para pasar

del diseño a la realidad y en el que participa un equipo de varios técnicos especializados.

Los amplificadores producidos en el Observatorio de Yebes, que suman el millar, se han instalado en numerosos receptores de radiotelescopios distribuidos por todo el mundo, como son, por ejemplo, los de IRAM, los receptores de la misión espacial HERSCHEL de la Agencia Espacial Europea y los receptores de varias bandas de frecuencia del Atacama Large Millimeter Array (ALMA), el interferómetro milimétrico más sensible del mundo en este momento. Las prestaciones de estos dispositivos son tan altas que se han empleado también en comunicaciones con sondas espaciales muy lejanas (del espacio profundo), así como en el reciente campo de la computación cuántica. Asimismo, la tecnología de su fabricación ha sido también transferida a empresas tecnológicas españolas. Al menos 500 de estos amplificadores han sido fabricados por empresas españolas. Un último paso al frente hacia el estado del arte ha sido el diseño de amplificadores monolíticos MMIC con excelentes resultados. Los amplificadores diseñados y construidos en Yebes forman ya parte de la evolución científico-técnica en radioastronomía, habiendo sido decisivos en descubrimientos tan trascendentes y mediáticos como la imagen más nítida del entorno del agujero negro de la Vía Láctea: Sgr A\*.

## El radiotelescopio de 40 metros, un nuevo impulso para el desarrollo de nuestros receptores criogénicos

A finales de los años 90 y ante el envejecimiento del radiotelescopio de 14 m y sus posibilidades limitadas, se comenzó a estudiar la posibilidad de dotar al Observatorio de un gran radiotelescopio moderno, que además permitiera el estudio del medio interestelar con gran sensibilidad. Tras años de intensos trabajos tecnológicos y de gestión, en el año 2005 se inauguró un radiotelescopio de 40 m de diámetro, actualmente el instrumento más importante del Observatorio de Yebes y el que confiere la naturaleza de ICTS al Observatorio desde el año 2012. El radiotelescopio de 40 m vio su primera luz en 2007 observando, otra vez, la Luna, y se incorporó inmediatamente a la red Europea de VLBI (EVN), siendo uno de los principales elementos de esta red por su alta sensibilidad y fiabilidad. Desde hace más de 10 años este radiotelescopio es también parte de la red geodésica del Servicio Internacional de VLBI (IVS), que determina los parámetros de la orientación de la Tierra en el espacio.





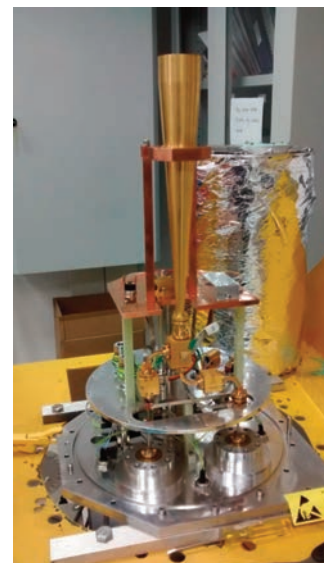
Estas redes internacionales de radiotelescopios, EVN e IVS, utilizan la denominada técnica «Interferometría de Muy Larga Base» o VLBI, acrónimo del término en inglés «Very Long Baseline Interferometry». Es una técnica de observación en la que varios radiotelescopios repartidos por todo el mundo observan simultáneamente una misma fuente astronómica. Las señales captadas por los distintos radiotelescopios se envían a un centro que las procesa y genera una imagen con una nitidez y resolución sin precedentes, millones de veces mayor que la de la imagen captada por cada telescopio por separado. La técnica de VLBI permite además determinar con una precisión altísima la distancia entre parejas de radiotelescopios, y por lo tanto también la posición de estos en la Tierra, ofreciendo información geodésica de alta calidad y pudiendo determinar los parámetros de la orientación de la Tierra en el espacio.

El uso del radiotelescopio está abierto a astrónomos de todo el mundo a través de un acceso abierto y competitivo con un comité de evaluación de propuestas. Para su puesta en marcha fue imprescindible desarrollar un sistema de control y monitorización tanto del radiotelescopio como de los instrumentos instalados en él. Asimismo, la astronomía siempre ha sido puntera en el desarrollo de programación, en la utilización de sistemas operativos alternativos y en la transferencia a gran velocidad de grandes volúmenes de datos, tanto de los instrumentos a los discos duros como entre distintos centros empleando Internet. En este sentido, el Observatorio de Yeves fue pionero en Redirís, la Red Científica Española, siendo uno de sus miembros fundadores y una de las primeras

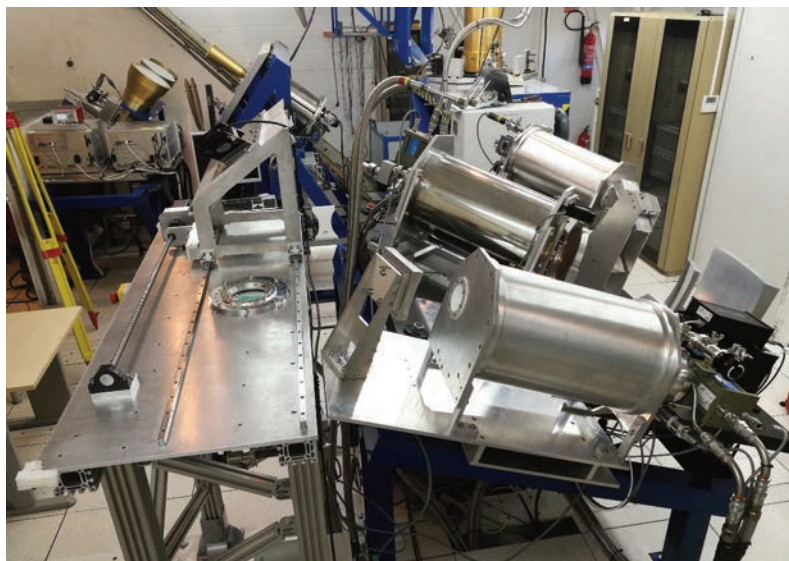
instituciones que tuvo correo electrónico en España y acceso a Internet en su forma más primitiva. También fue pionero en la utilización de Linux, un sistema operativo libre recién creado que permitía el intercambio y distribución del *software* sin trabas legales. Entre las observaciones más recientes que se han realizado con el radiotelescopio de 40 m de Yeves se cuenta con la detección de la contrapartida electromagnética de las ondas gravitacionales producidas por la fusión de dos estrellas de neutrones y detectadas en agosto de 2017 o la imagen del agujero negro mencionada con anterioridad.

La puesta en marcha del radiotelescopio de 40 m marcó el comienzo de una nueva etapa de desarrollos tecnológicos en el Observatorio de Yeves. Para explotar todas las capacidades del nuevo radiotelescopio fue necesario construir nuevos receptores criogénicos de bajo ruido. Un receptor radioastronómico es un cilindro de acero donde, con la ayuda de un alto vacío y un pistón que bombea continuamente gas helio de gran pureza, se consiguen las temperaturas criogénicas necesarias. Dentro del receptor encontraremos las antenas alimentadoras, cuando sus dimensiones lo permitan, y los amplificadores de bajo ruido. Una larga lista de equipos electrónicos los acompañan, filtros, coaxiales, guías de onda, mezcladores, osciladores locales, constituyendo lo que conocemos como un receptor de radioastronomía.

Su fabricación es un trabajo muy específico en el que participan ingenieros, técnicos electrónicos y mecánicos, todos ellos altamente especializados. Una actividad que se inicia en la mesa de trabajo de los ingenieros con los diseños del alimentador, el criostato, los amplificadores y los convertidores. Posteriormente pasa a los laboratorios y talleres donde técnicos con una alta cualificación llevan a cabo su construcción, y después son probados durante semanas en los laboratorios de medida para finalmente ser instalados en los radiotelescopios. Un proceso que dura meses, donde se ven involucrados decenas de trabajadores y que requiere una vez más un gran despliegue de recursos tanto de personal como de inversión económica. En la actualidad se han construido hasta 20 receptores criogénicos de bajo ruido para otros institutos y observatorios del mundo que lo han solicitado. Los receptores desarrollados cubren todo el espectro electromagnético para el que el radiotelescopio de



▶ Imagen del interior de un receptor criogénico de un radiotelescopio

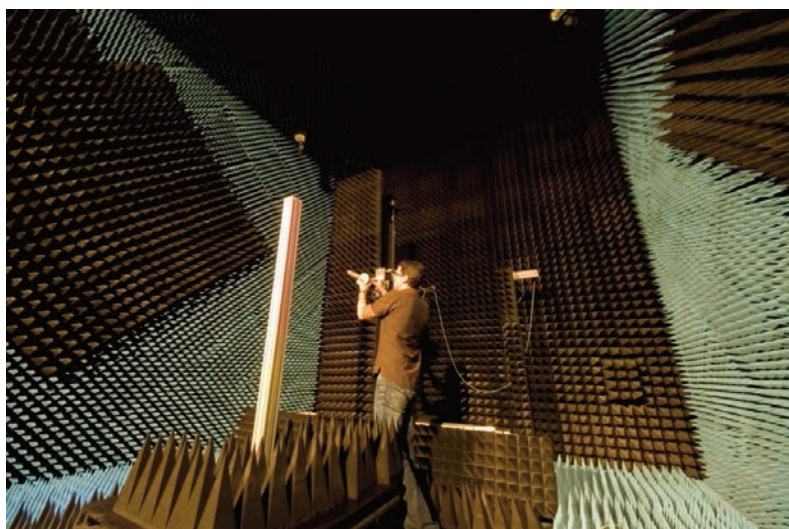


► Cabina de receptores del radiotelescopio de 40 metros

40 metros tiene capacidad de recibir señal, desde 2 GHz a 118 GHz. Esto lo ha convertido en uno de los radiotelescopios más completos del mundo y en especial de las redes de VLBI. La experiencia ganada desde la construcción del primer receptor ha permitido situar al Observatorio de manera singular entre los pocos centros (no más de cinco) con tal capacidad en todo el mundo.

Un laboratorio que hace aún más singular al Observatorio de Yebes es la cámara anecoica para la caracterización de antenas alimentadoras. Estas son las responsables de captar de forma eficiente la señal recibida por la parábola y para ello es determinante conocer de forma precisa las direcciones de recepción de la señal. De esta característica depende de forma crítica el funcionamiento del radiotelescopio y la capacidad de captar la señal más débil posible. La cámara anecoica del Obser-

► Foto de la cámara anecoica del Observatorio de Yebes.



vatorio de Yebes es un laboratorio de grandes dimensiones que permite la medida de antenas y reflectores hasta 140 GHz, lo que la convierte en única en España.

## RAEGE y la Geodesia Espacial, el impulso definitivo

En 2012, para potenciar el área de observaciones de radioastronomía con fines geodésicos, el IGN y el Gobierno Regional de Azores firmaron un convenio para la creación de una Red Atlántica de Estaciones Geodinámicas y Espaciales (RAEGE), formada por cuatro radiotelescopios de 13,2 m de diámetro, situados en lugares estratégicos de España y Portugal: en el municipio de Yebes (en la placa tectónica euroasiática), en las islas de Gran Canaria y Santa María en Azores (en la placa africana) y la isla de Flores en Azores (en la placa tectónica americana). Esta red permitirá determinar con gran precisión el movimiento relativo de las tres placas tectónicas donde se asentarán los radiotelescopios. En 2013 se inauguró el primero de los elementos de la red RAEGE, el radiotelescopio de 13,2 m en el Observatorio de Yebes. En 2014 se construyó el radiotelescopio en la isla de Santa María y para los próximos años está previsto el comienzo de la construcción de los radiotelescopios en las islas de Gran Canaria y Flores.

Estos radiotelescopios, además de realizar estudios regionales, se integrarán en el proyecto global VGOS (VLBI Geodetic Observing System), el siguiente gran proyecto de la IVS, cuyo objetivo es establecer un sistema de referencia sobre la superficie terrestre con precisiones inferiores a 1 mm. Este sistema será utilizado para determinar la orientación relativa de la Tierra en el espacio con la máxima precisión posible y para proporcionar una referencia en tierra a los satélites que orbitan en torno a nuestro planeta.

RAEGE además ha significado un impulso a las posibilidades de negocio de la empresa española en el mundo. Aunque diseñados por una empresa alemana, los radiotelescopios de RAEGE han sido fabricados por una empresa asturiana. A los cuatro radiotelescopios de la red hay que sumar otros tres idénticos que también han sido fabricados por la misma empresa, dos en Noruega y uno en Japón. La ampliación de la red VGOS a más países puede suponer, pues, un gran volumen de negocio para los intereses de las empresas españolas del sector.





El impulso del proyecto RAEGE ha servido para seguir aumentando las capacidades tecnológicas del Observatorio de Yebes. Dado que el proyecto VGOS precisa para su implementación que los radiotelescopios que forman su red estén equipados con nuevos receptores denominados de banda ancha que trabajan entre 2 y 14 GHz. En 2013 comenzó el diseño del primer receptor de banda ancha en los laboratorios de Yebes. Tan solo existía en el mundo otro similar en el Observatorio de Haystack en Estados Unidos. Su construcción finalizó a principios de 2016 y se instaló unos meses después en el radiotelescopio de 13,2 m del Observatorio, reemplazando el anterior receptor denominado tribanda, también fabricado en Yebes al igual que dos idénticos que ahora funcionan en Noruega y Japón, porque recibía señal a tres bandas de frecuencias diferentes (S a 2 GHz, X a 8 GHz y Ka a 32 GHz). Su instalación fue un éxito y permitió que la antena de 13,2 m de Yebes entrara a formar parte del selecto grupo de 5 telescopios en todo el mundo a la vanguardia del proyecto VGOS (en la actualidad, este grupo se ha ampliado a 7: en Estados Unidos, Suecia, Alemania y España). Posteriormente, se han fabricado receptores para el radiotelescopio de

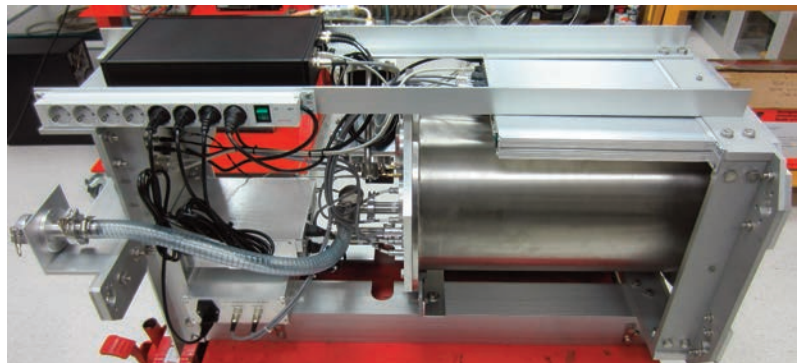
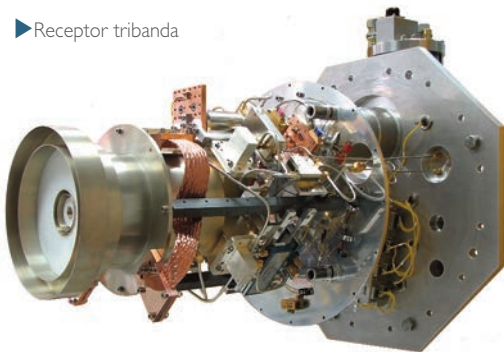
RAEGE en la isla de Santa María en Azores y un radiotelescopio VGOS de Ishioka en Japón. Como resultado de estos desarrollos, se fabricaron también dos receptores más para un radiotelescopio VLBI de geodesia instalado en la Antártida, estación Ohiggins, y gestionada por el instituto alemán BKG, la Agencia Federal Alemana de Cartografía y Geodesia.

Además, el Observatorio de Yebes ha recibido el encargo de fabricar tres receptores en banda ancha para los radiotelescopios VGOS de Noruega y Finlandia. Dos de ellos están ya finalizados y se entregarán en breve. Estos trabajos se enmarcan dentro de dos convenios de colaboración firmados por el IGN con la Autoridad Cartográfica Noruega, NMA, y el Instituto Finlandés de Investigación Geoespacial, FGI, respectivamente. Por otra parte, se esperan dos encargos más para fabricar sendos receptores para observatorios de Italia y Sudáfrica. Además se han fabricado sistemas de calibración de fase para los telescopios del BKG en Wetzell (Alemania) y en La Plata (Argentina). A la vista de los excelentes resultados obtenidos por el receptor de banda ancha de Yebes y de los equipos auxiliares y subsistemas que este utiliza, el Observatorio de

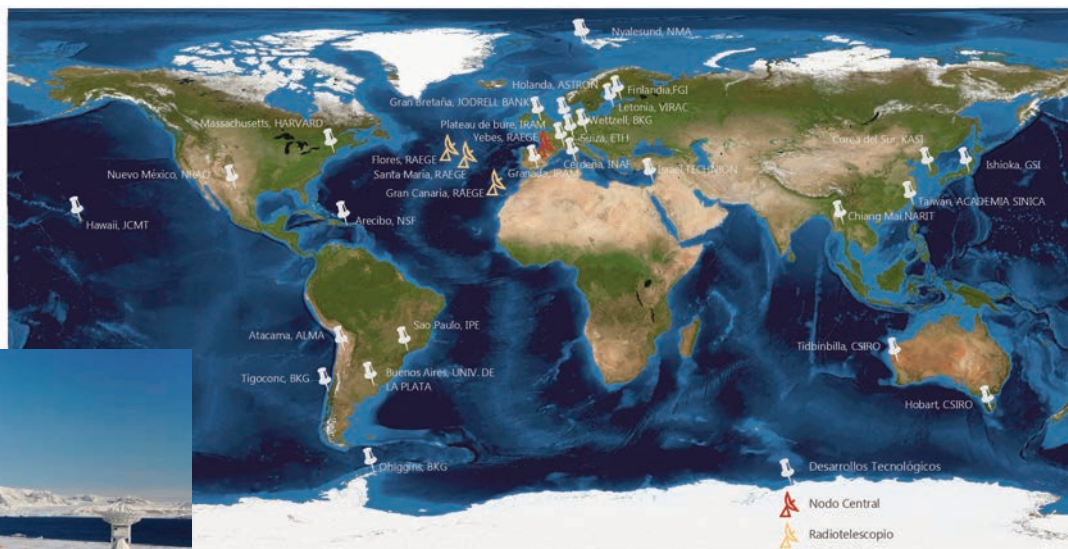
► Radiotelescopio de 13,2 m del Observatorio de Yebes. Al fondo se observa el radiotelescopio de 40 m.

► Receptor de banda ancha de un radiotelescopio.

► Receptor tribanda



► Mapa de desarrollos tecnológicos de Yebes y su distribución mundial. En el mapa se muestra la posición de los 4 radiotelescopios de RAEGE



► Ingenieros del Observatorio de Yebes en el Observatorio de Ny Alesund, en Noruega, que cuenta con dos radiotelescopios de 13,2 m y dos receptores desarrollados en Yebes.

Yebes ha sido calificado como Centro de Desarrollos Tecnológicos para el IVS. Un privilegio del que solo forman parte siete institutos como el MIT, la NASA y los respectivos en Rusia, Canadá, Japón y Suecia. La presencia de la tecnología «made in Yebes» en el mundo de la geodesia espacial y por lo tanto en la radioastronomía es ya incontestable.

## El futuro

Las actividades de observación radioastronómica, geodésica y geofísica junto a la singular capacidad de desarrollar tecnología aplicada propia le han valido al Observatorio de Yebes su calificación como ICTS. Ello permite al Observatorio de Yebes el acceso a recursos económicos y de *software* gestionados por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Entre dichas ayudas se encuentran los fondos FEDER, financiados por la Unión Europea, que han permitido mantener y actualizar sus recursos tecnológicos y humanos, recibiendo cofinanciaciones del orden de 15 millones de euros.

Actualmente, se ha concedido al Observatorio de Yebes el proyecto FEDER YDALGO (Infraestructuras de Desarrollo y Actividades de Laboratorio y Geodesia espacial para el Observatorio de Yebes) por valor de 9,5 millones de euros para su ejecución entre 2018-2022. El proyecto YDALGO contempla dos objetivos: la construcción y equipamiento adicional de un edificio de laboratorios y

talleres para el desarrollo de tecnología de microondas junto a la instrumentación y máquinas necesarias, y la construcción, instalación y puesta en marcha de un nuevo sistema de geodesia espacial, un telescopio óptico de láser pulsado para la observación de satélites con retroreflectores, que permitirá integrar al Observatorio de Yebes en otra red internacional. Todo ello constituye un nuevo paso para continuar hacia la mejora y excelencia del Observatorio de Yebes como centro de desarrollo de tecnología y de estudios astronómicos y geodésicos.

Hoy, 45 años después de sus inicios, el Observatorio de Yebes se ha convertido en un centro internacional de renombre en Radioastronomía, siendo referencia para otros institutos, que emplean nuestra tecnología o inician sus actividades, como es el caso de NARIT (el Instituto de Astronomía de Tailandia) que hoy construye un radiotelescopio de 40 metros idéntico al de Yebes. Ello ha sido posible gracias a una decidida apuesta del Ministerio de Fomento, a través del IGN, para dotar al centro de personal altamente cualificado e instrumental especializado. En los próximos años se abordarán nuevos retos tecnológicos en Radioastronomía y Geodesia Espacial en colaboración con instituciones europeas y del resto del mundo. Una inversión tecnológica que debe seguir dando nuevos frutos para ayudar a situar a España en un lugar relevante en el panorama internacional y beneficiar a la industria nacional y a la sociedad en general.

Texto: José Antonio López Fernández (Subdirector General de Astronomía) y Pablo de Vicente Abad (Director del Centro de Desarrollos Tecnológicos del Observatorio de Yebes). IGN