



SAOCOM: SATÉLITE ARGENTINO. EL PROYECTO ANTENA RADAR DE APERTURA SINTÉTICA EN LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA

Alberto Martín Ghiselli, Andrea Lorenzo, Nicolás Belinco, Horacio Quiroz, Silvio Terlisky, Alfredo Hazarabedian, Elena Forlerer, Hernán Garonis, Horacio Dhers, Gustavo Di Pasquale, Mauricio Sacchi, César Belinco*

Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Centro Atómico Constituyentes, Av. General Paz 1499, San Martín, Provincia de Buenos Aires, Argentina

*Autor de correspondencia: ghiselli@cnea.gov.ar

Palabras clave

Satélites
Estructuras
espaciales
Materiales
compuestos
Mecanismos de
despliegue

Keywords

Satellites
Space structures
Composite
materials
Deployment
mechanisms

Resumen A partir de un contrato de cooperación firmado entre la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), la primera asumió la responsabilidad de proveer la estructura, los mecanismos de despliegue y los módulos radiantes de la antena del Instrumento Radar de Apertura Sintética (SAR) para los satélites del Proyecto SAOCOM. Este trabajo presenta una descripción de la Antena SAR diseñada por CNEA para el Proyecto SAOCOM y de los procesos desarrollados en CNEA para la fabricación, integración y ensayo de sus componentes.

Abstract SAOCOM: Argentine Satellite. The Synthetic Aperture Radar Project at the Atomic Energy National Commission. Under a cooperation contract between the Atomic Energy National Commission (CNEA) and the Spatial Activities National Commission (CONAE), the first institution takes the responsibility to supply the structure, deployment mechanisms and radiant modules of the SAOCOM Project satellite's antennas for the Synthetic Aperture Radar Instrument (SAR). The paper presents a description of the SAR Antenna designed by CNEA for the SAOCOM Project and the processes developed at CNEA to carry out the manufacture, integration and test of the components.

1. Introducción

El Proyecto SAOCOM de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), comprende la puesta en órbita de dos satélites destinados a la observación de la Tierra cuyos principales objetivos son la medición de la humedad del suelo y aplicaciones en emergencias, tales como detección de derrames de hidrocarburos en el mar y seguimiento de la cobertura de agua durante inundaciones.

La realización de estas mediciones se realiza a partir de imágenes obtenidas por un Radar de Apertura Sintética (SAR) que es un instrumento activo que trabaja en el rango de las microondas y que puede proveer información en forma independiente de las condiciones meteorológicas y de la hora del día.

Los dos satélites de la constelación SAOCOM (SAOCOM 1A y 1B) se encuentran en una órbita polar heliosincrónica a 620 km de altura, tienen cobertura global con períodos de revisita de aproximadamente 8 días para la constelación y cuentan con un instrumento SAR que opera en banda L polarimétrica de 1,275 GHz, que permite obtener imágenes de distintos lugares de la Tierra con una resolución espacial de entre 10 y 100 metros según el modo de adquisición y distintos ángulos de observación.

Como parte de los convenios de cooperación entre instituciones del Estado Nacional y a partir del contrato firmado en el marco de la Ley N° 23.877 de Innovación Tecnológica, entre la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la CONAE, la primera asumió la responsabilidad de proveer la estructura, los mecanismos de despliegue y los módulos radiantes de la antena del Instrumento SAR para los satélites del Proyecto SAOCOM. Esta responsabilidad comprende desde la ingeniería conceptual de la antena hasta la integración de la misma al satélite y la posterior asistencia a CONAE durante las campañas de ensayo y lanzamiento, pasando por las etapas de ingeniería básica y de detalle, el desarrollo y calificación de los métodos de fabricación empleando nuevos materiales, e incluyendo el desarrollo de los equipos y herramental necesario para las tareas de integración y ensayo.

2. Requerimientos

Los satélites del Proyecto SAOCOM son satélites de gran tamaño, con una masa de prácticamente 3000 kg y dimensiones de más de 4 metros de altura y más de 2,5 metros de diámetro en configuración de lanzamiento y la antena del instrumento SAR debe cumplir estrictos requerimientos mecánicos a fin de asegurar el adecuado funcionamiento del instrumento.

En los años en que se ha llevado a cabo la fase de desarrollo de este proyecto, CNEA conjuntamente con CONAE, consolidaron los principales requerimientos que debe cumplir el diseño mecánico de la Antena SAR, los que se pueden resumir en los siguientes párrafos:

- La Antena SAR debe presentar una configuración estructural que incluya un panel central fijo a la Plataforma de Servicio del satélite y dos conjuntos simétricos de tres paneles plegados. El conjunto en configuración plegada debe poder incluirse en un cilindro de un diámetro máximo de 3 metros.
- La Antena SAR debe sobrevivir al menos 5 años después del lanzamiento, en el medioambiente de la órbita terrestre, cumpliendo con la funcionalidad especificada.
- La masa total de la Antena SAR no debe superar los 1460 kg, incluyendo la totalidad de su estructura, los componentes electrónicos y los mecanismos de despliegue instalados en la misma.
- La primera frecuencia natural de vibración de la antena desplegada debe ser mayor a 2 Hz.
- La primera frecuencia natural de vibración de la antena plegada en dirección axial (la del lanzamiento) debe ser mayor a 44 Hz, mientras que en las direcciones laterales debe superar los 22 Hz.
- La superficie radiante de la antena desplegada será de aproximadamente 35 m² con casi 3,5 m de altura y 10 m de longitud.
- La estructura de la antena y sus componentes deben diseñarse para soportar, sin degradación de sus funciones y características, las cargas cuasiestáticas producidas por las aceleraciones que se producen durante el lanzamiento de aproximadamente 6 g en la dirección de lanzamiento y 2 g en dirección lateral en forma simultánea.
- Cada panel de la antena contiene 20 Módulos Radiantes que son los componentes encargados de emitir y recibir las señales de radiofrecuencia del instrumento. El tamaño de estos módulos es de aproximadamente 167 mm de ancho y 1400 mm de longitud.
- Las deformaciones de la antena en el espacio deben ser tales que, la planitud de la misma respecto de una superficie de referencia completamente plana y entre dos puntos cualesquiera de la antena, debe presentar un valor máximo de 0,024 m.

3. Diseño de la antena

Para cumplir con los requerimientos establecidos, se diseñó una estructura desplegable formada por 7 paneles, con el panel central fijo a la estructura del satélite y con dos conjuntos desplegables tres paneles en ambos lados del mismo y plegados en forma espiral, por lo que las dimensiones de los distintos paneles son diferentes a fin de permitir esta estrategia de plegado. Si se considera una estrategia de despliegue simultáneo de los conjuntos de paneles, la misma sería como se presenta en la Fig. 1.

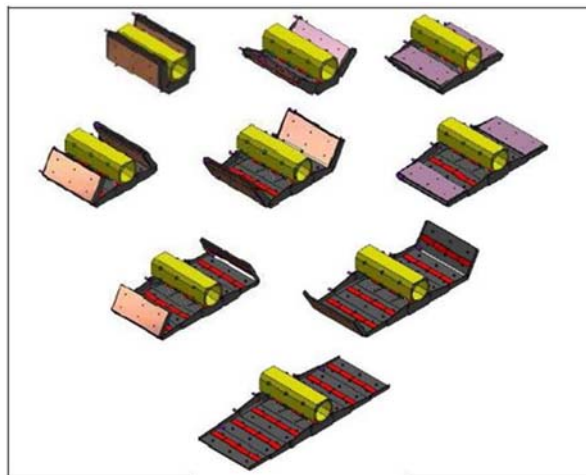


Fig. 1. Secuencia de despliegue de la Antena SAR.

El subsistema del Instrumento denominado Antena SAR está formado por 5 componentes principales:

- Los Módulos Radiantes que, en un total de 140, se encuentran montados sobre los paneles estructurales de la antena y cuya fabricación y diseño mecánico realizó CNEA (CONAE realizó el diseño de este componente para que cumpla con las características electromagnéticas requeridas).
- La estructura de la antena formada por los 7 paneles y la estructura que la vincula a la Plataforma de Servicio del satélite y los mecanismos de despliegue que la mantienen en configuración plegada durante el lanzamiento y permiten el despliegue de los paneles en órbita, todos componentes bajo responsabilidad de CNEA.
- La electrónica distribuida en los paneles del instrumento SAR y la electrónica que controla el despliegue de los paneles, cuyo desarrollo y fabricación realizó CONAE.
- El conjunto de cableado de radiofrecuencia, potencia y datos, distribuido en los paneles que realizó CONAE.
- El componente de control térmico, diseñado por CONAE y formado por blindajes térmicos, pinturas, termopares, radiadores y calefactores.

Las principales dimensiones de la antena plegada son de aproximadamente 4250 mm en el eje axial y de aproximadamente 2400 y 2055 mm en los ejes transversales. Cada conjunto de paneles plegados tiene un espesor máximo de más de 600 mm medidos sobre las vigas que forman los laterales de los paneles. La Fig. 2A y B presentan, respectivamente, las vistas superior y frontal de la antena en esta configuración.

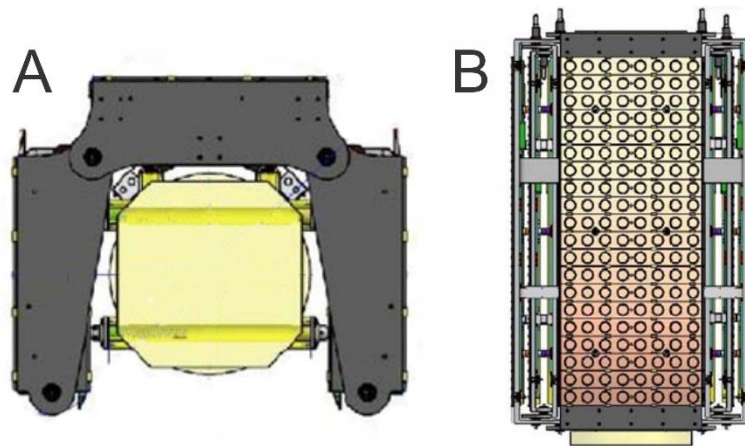


Fig. 2. A: Vista superior de la Antena SAR plegada. B: Vista frontal de la Antena SAR plegada.

En configuración desplegada las principales dimensiones de la antena son de casi 10 m de largo y 4 m de altura, mientras que la distancia desde el plano de la superficie radiante al plano de vinculación con la Plataforma de Servicio del satélite es de aproximadamente 600 mm. La Fig. 3 muestra el satélite en configuración de vuelo con la Antena SAR y los paneles solares desplegados, debiéndose señalar que la integración de las celdas fotovoltaicas en estos últimos también fue realizada por la CNEA.

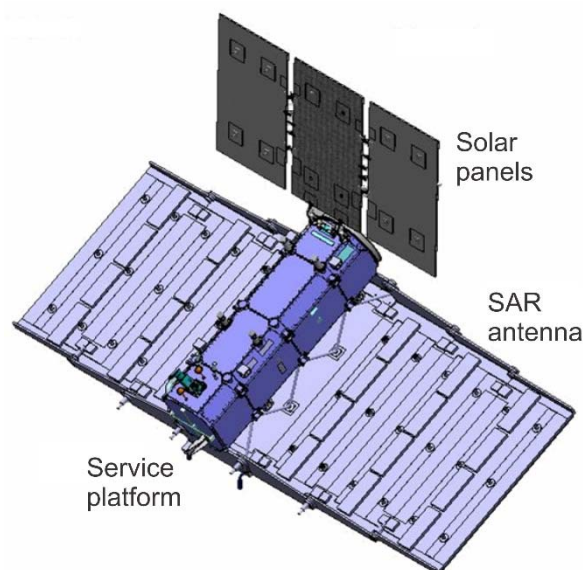


Fig. 3. Satélite SAOCOM en configuración de vuelo.

El diseño adoptado para la estructura de la antena minimiza el volumen ocupado por los paneles plegados, reduce la masa de los componentes estructurales y aumenta la confiabilidad del despliegue reduciendo al mínimo los posibles puntos de falla. Por otra parte, este diseño permite alcanzar los valores de rigidez necesarios sin el empleo de estructuras secundarias como las empleadas en numerosas estructuras espaciales de este tipo y también alcanza y mantiene en el tiempo los valores de planitud requeridos por la superficie radiante de la antena para que el instrumento opere con las características adecuadas.

3.1. Estructura

Los paneles estructurales de la antena están formados por los denominados Paneles Base, que soportan parte de los mecanismos, los Módulos Radiantes y todo el conjunto de electrónica se instala en la antena; y las Vigas Laterales, ubicadas en ambos extremos de los primeros y que tienen como función darle al conjunto desplegado la rigidez requerida y también dar soporte a parte de los mecanismos de despliegue.

Ambos elementos estructurales se fabrican como paneles de estructura sándwich con un núcleo de panal de abeja de aluminio y pieles realizadas con un laminado cuasi-isotrópico de cianatoéster y fibra de carbono unidireccional de alto módulo (CFRP). Estos elementos se pegan empleando refuerzos de CFRP para formar una única estructura de alta rigidez como se muestra en los esquemas de la Fig. 4A y B. Cabe señalar que los paneles están diseñados en función de alcanzar la rigidez requerida para obtener los valores de frecuencia natural de vibración y planitud de la antena desplegada, por lo que resultan márgenes de seguridad muy elevados frente a las cargas que soportan. El diseño y procesos de fabricación de estos paneles siguen los lineamientos de la normativa de la Agencia Espacial Europea (ESA).

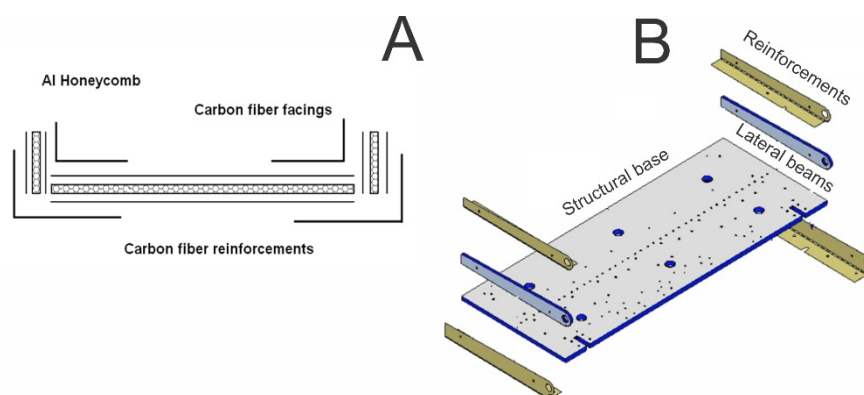


Fig. 4. A: Fabricación de los paneles estructurales, paneles sándwich y refuerzos de fibra de carbono; B: Fabricación de los paneles estructurales, partes componentes.

Los paneles luego son mecanizados, empleando una fresadora CNC, para poder instalar insertos metálicos mediante adhesivos, que permiten la fijación de cajas de electrónica, mecanismos y otros componentes sobre los mismos. Para cumplir estas funciones se diseñaron y fabricaron insertos metálicos de distintas características y tamaños, desde pequeños insertos de aleación de aluminio de 32 mm de altura y 8 mm de diámetro para el montaje de los Módulos Radiantes, hasta insertos de 280 mm de diámetro y 70 mm de altura realizados en aleación de titanio para la integración de los mecanismos de Retención-Liberación de los paneles de la antena o insertos de INVAR 36® destinados a permitir el montaje de los mecanismos de bisagra entre paneles, todos con recubrimientos superficiales adecuados a las distintas funciones que debían tener en cada caso.

Por otra parte, la Estructura de Interfaz que vincula el panel central con la Plataforma de Servicio del satélite, está formada por un reticulado de tubos laminados de CFRP de 0,8 mm de espesor con extremos rotulados fabricados en aleación de aluminio y pegados a los tubos, que impiden la transmisión de esfuerzos de flexión originados en cambios de temperatura entre ambos componentes principales del satélite. Como estos tubos trabajan solamente a la tracción o compresión, se eligió en este caso una configuración de laminado anisótropo de las fibras de carbono que maximiza la resistencia en la dirección del eje del tubo. La vinculación de los tubos a las estructuras principales se realiza empleando herrajes fabricados en aleación de Titanio. Un esquema general de esta estructura se presenta en la Fig. 5.

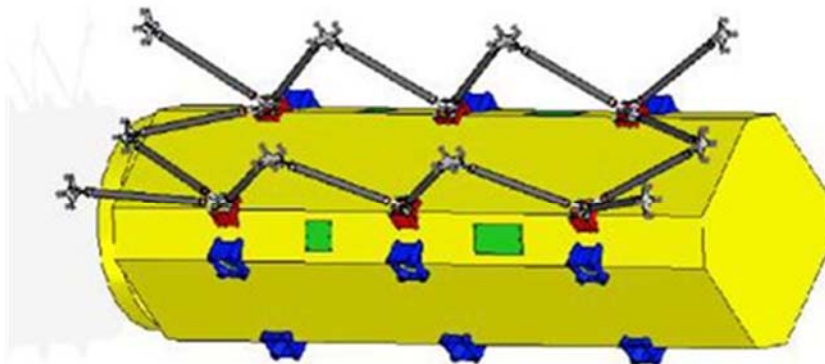


Fig. 5. Esquema de la estructura de interfaz.

3.2. Mecanismos de despliegue

En la configuración de lanzamiento, cada conjunto de paneles plegados se encuentra unido a 6 puntos de la estructura primaria de la Plataforma de Servicio mediante los denominados Mecanismos de Retención-Liberación. Esos puntos de vinculación y de transferencia de cargas entre ambas estructuras se muestran también en la Fig. 5.

Los Mecanismos de Retención-Liberación cumplen la función de mantener la posición de los paneles plegados, evitar golpes entre los mismos y transferir las cargas a la estructura de la Plataforma de Servicio durante el lanzamiento. Luego, con el satélite en órbita, el accionamiento de estos mecanismos permite liberar los paneles para ejecutar la maniobra de despliegue.

Estos mecanismos, cuyo esquema se presenta en la Fig. 6, están formados por un conjunto de piezas tubulares ubicadas en cada panel y sobre la Plataforma de Servicio, con secciones de unión de tipo copa y cono que transmiten las cargas y momentos flectores. La unión de las piezas se mantiene y permite la transmisión de cargas, mediante una barra precargada que se ubica en el interior de la sección tubular. En el extremo externo de la barra se ubica un dispositivo que soporta la precarga de la barra y cuando es accionado la libera, permitiendo la retracción de la misma mediante un juego de resortes y asegura así la posibilidad de desplegar los paneles.

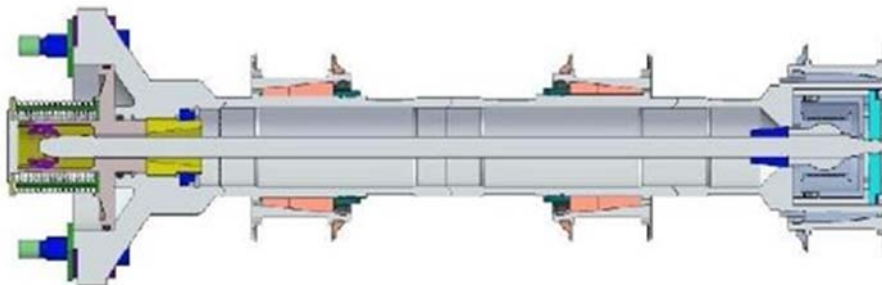


Fig. 6. Esquema del mecanismo de retención-liberación.

Todas las secciones de tubo, los insertos que las vinculan a los paneles y la barra de precarga están fabricadas en aleación de titanio, mientras que el conjunto de resortes es de acero inoxidable. Las superficies de contacto tipo copa y cono de las secciones de tubo, incorporaron un recubrimiento superficial para evitar eventos de soldadura en frío que se podrían producir por las condiciones de precarga y vacío que el mecanismo tenía que soportar en órbita antes de su accionamiento. El dispositivo de separación se muestra en la Fig. 7 y es una tuerca de separación electromecánica de la firma NEA Electronics Inc. (EEUU) con una capacidad de carga de hasta 148 KN.

Para realizar la operación de precarga, el mecanismo tiene dentro de la pieza ubicada sobre la Plataforma de Servicio, un pistón neumático vinculado al que se aplica presión mediante nitrógeno. Una vez aplicada la carga, la misma es mantenida mediante una tuerca que se ajusta sobre la barra.

Para facilitar las tareas de integración, tanto las secciones tubulares de los mecanismos como las piezas ubicadas sobre la Plataforma de Servicio del satélite, cuentan con dispositivos mecánicos que permiten la precisa alienación de las piezas, asegurándose de esa forma la adecuada transferencia, tanto de las precargas propias del mecanismo, como de las cargas que se generan durante el lanzamiento.

Una vez que los paneles se han liberado en órbita, el despliegue se realiza mediante actuadores rotacionales vinculados a Mecanismos de Bisagra ubicados en las vigas laterales de paneles adyacentes.

Se emplean para el despliegue 6 actuadores rotacionales, uno por cada etapa de despliegue. Estos actuadores deben proporcionar el par necesario para vencer la inercia del conjunto y la resistencia producida por la fricción en los mecanismos de bisagra, de traba y por los cables que pasan entre paneles. Para cumplir esta función se seleccionaron motoredutores paso a paso de corriente continua que tienen una capacidad de aproximadamente 100 Nm en las condiciones de operación previstas para el despliegue. Estos actuadores, que se muestran en la Fig. 8, fueron provistos por la empresa CDA Intercorp (EEUU).



Fig. 7. Dispositivo de liberación.



Fig. 8. Actuadores rotacionales.

Los actuadores de despliegue están vinculados a los Mecanismos de Bisagra mediante un acople elástico que permite absorber posibles desalineamientos entre ambos conjuntos, el cual está formado por dos piezas de aluminio de alta resistencia separadas por un elastómero apto para uso espacial (Hytrel ®).

Los Mecanismos de Bisagra permiten el despliegue de los paneles manteniendo la posición relativa de los mismos y soportan a los actuadores rotacionales. El diseño emplea un rodamiento esférico autolubricado (PTFE) y de bajo juego, apto para uso espacial suministrado por Ampep Ltd. (RU). Las piezas de estos mecanismos están fabricadas en aleación de Titanio, exceptuando los insertos que permiten la vinculación del mecanismo en los paneles, que están fabricados en INVAR 36 ® (aleación de Fe-Ni con bajo coeficiente de expansión térmica) para mantener la posición relativa entre paneles frente a cambios de temperatura.

La Fig. 9A y la Fig. 9B muestran una vista y un corte de uno de los Mecanismos de Bisagra que soportan los actuadores de despliegue, en donde también se puede ver el acople elástico que los vincula. Las únicas diferencias que presentan los Mecanismos de Bisagra sin actuador son, que los mismos permiten el desplazamiento axial para compensar diferencias de fabricación o integración y que poseen un potenciómetro de uso espacial que indica la posición angular de los paneles en el despliegue (Betatronix LLC, EEUU).

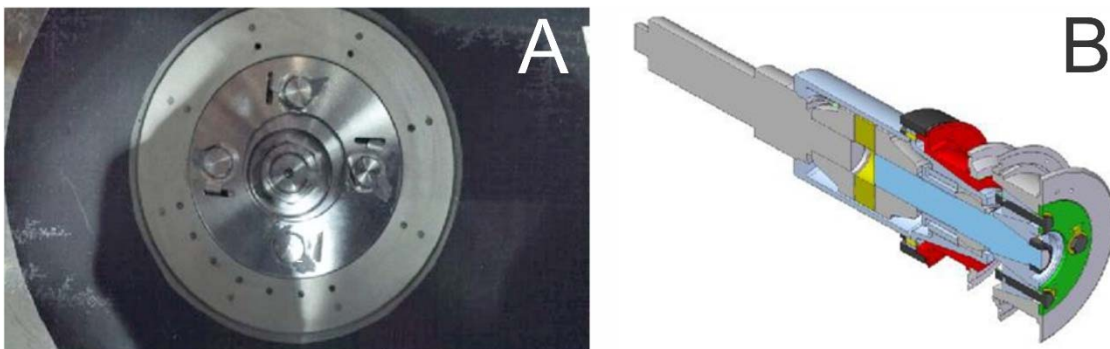


Fig. 9. A: Vista frontal del mecanismo de bisagra; B: Corte esquemático del mecanismo de bisagra.

Los Mecanismos de Bisagra también cuentan con un sistema de ajuste mecánico de la posición radial del eje del mecanismo, de forma de poder regular durante las tareas de integración de los paneles, la posición relativa entre los mismos y asegurar de esa forma tanto el adecuado funcionamiento de los mecanismos que fijan los paneles entre sí una vez que la antena se ha desplegado, como la planitud requerida para el conjunto de la superficie radiante de la antena.

La maniobra de despliegue de los paneles se completa con el accionamiento de los Mecanismos de Traba ubicados entre cada par de paneles adyacentes. Estos mecanismos fijan la posición relativa de los paneles y permiten que el conjunto de paneles desplegados alcance la rigidez requerida. Estos mecanismos incorporan sensores que indican el accionamiento y transmiten esa señal a Tierra durante el despliegue de los paneles, confirmando así el adecuado despliegue de los mismos.

La Fig. 10A y B presentan una vista y un esquema de estos mecanismos que están formados por una pieza denominada Base que se encuentra en el panel fijo y una pieza denominada Trinquete que se ubica en el panel móvil que se está desplegando. La traba del mecanismo se produce cuando una placa denominada Perno ubicada en la Base del mecanismo, cae dentro de la garganta que tiene el Trinquete al deslizarse éste último dentro de la Base. Para evitar distorsiones en la posición relativa de los paneles frente a cambios de temperatura, las piezas de estos mecanismos también están fabricadas en INVAR 36 ® y dada su complejidad, fueron realizadas mediante procesos de electro-erosionado.

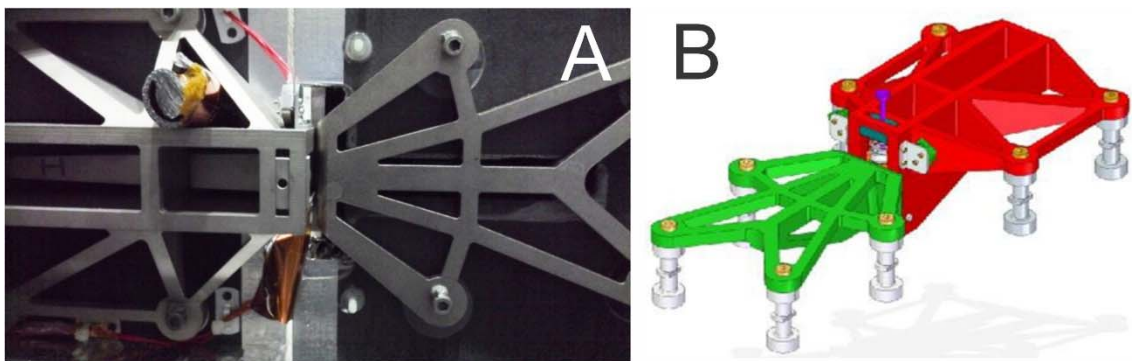


Fig. 10. A: Imagen del mecanismo de traba; B: Vista esquemática del mecanismo de traba.

Para reducir el torque resistivo que generan durante el despliegue de los paneles los mazos de cables que pasan de un panel a otro de la antena, se diseñaron soportes especiales, fabricados en aleación de aluminio, que guían los conjuntos de cables durante el despliegue. La Fig. 11A y 11B muestran un ejemplo de estos dispositivos, que presentan distintas formas y dimensiones según sea el par de paneles sobre los que deben trabajar dada la geometría de plegado en espiral del conjunto, y también dependiendo de la cantidad y tipo de cables que deben guiar.

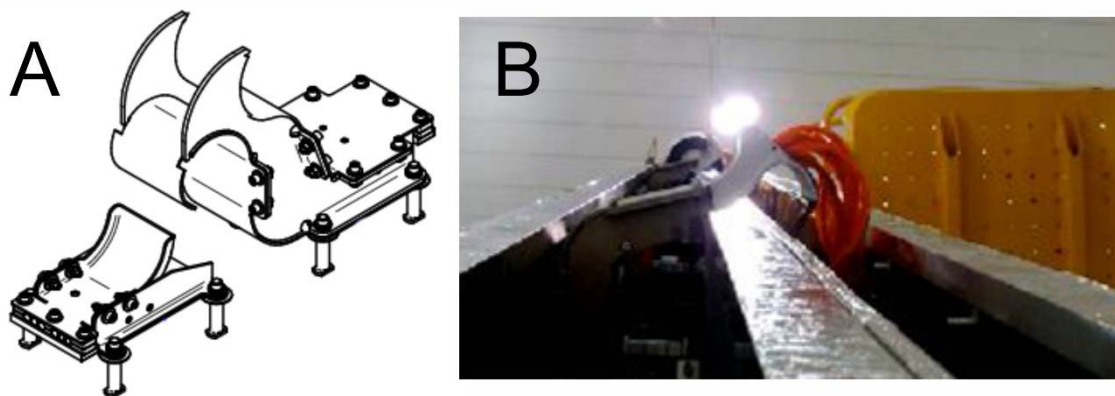


Fig 11. A: Esquema de un soporte guía de cables; B: Vista de un soporte guía de cables.

3.3. Módulos Radiantes

Los Módulos Radiantes que se fabricaron en CNEA están formados por un apilamiento de capas de de circuito impreso flexible (fibra de vidrio tipo E con un depósito de cobre electrolítico) intercaladas con una espuma dieléctrica. Las dimensiones del arreglo y la geometría que se le da a los circuitos impresos es lo que le confiere al conjunto las propiedades electromagnéticas requeridas. Las distintas capas no están pegadas entre sí, sino unidas a través de un conjunto de pines de cobre y para el soporte se les agrega unas guías laterales de fibra de vidrio que otorgan la rigidez necesaria al conjunto. Estos Módulos Radiantes se cubren además con una pintura blanca que actúa como parte del sistema de control térmico de la antena.

El soporte de los Módulos Radiantes a los paneles se hace mediante un conjunto de piezas de soporte fabricadas en aleación de aluminio y acero inoxidable que los fijan desde el centro geométrico y desde los laterales. Las fijaciones laterales permiten el deslizamiento de los módulos sobre unas guías de fibra de vidrio que forman sus laterales a fin de evitar deformaciones producidas por las diferencias entre los coeficientes de dilatación térmica de los Módulos Radiantes y los Paneles Estructurales. La Fig. 12A muestra un Módulo Radiante armado, antes del proceso de pintado y la Fig. 12B presenta un esquema de la ubicación y características de los soportes que los fijan a los paneles.

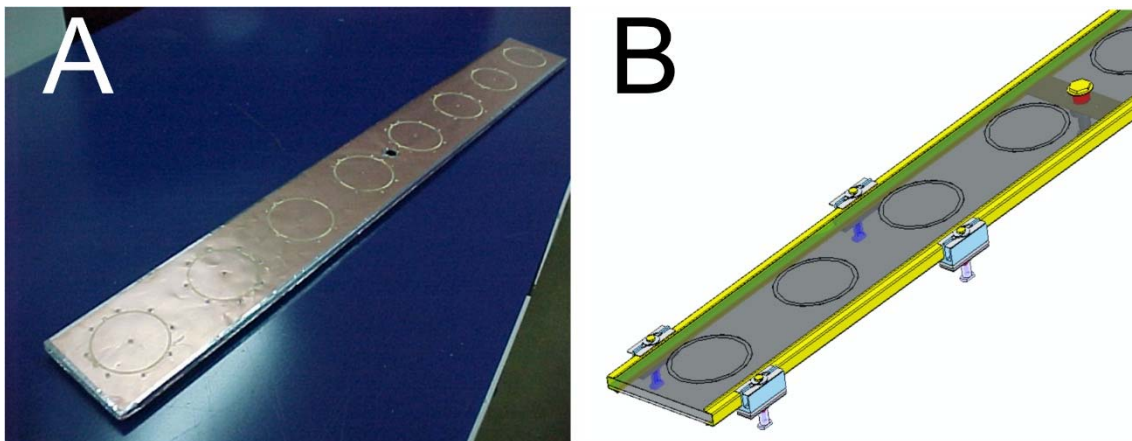


Fig. 12. A: Imagen de un Módulo Radiante; B. Esquema de los soportes de un Módulo Radiante.

4. Implementación del proyecto en CNEA

Para encarar este desafío de diseñar, fabricar y ensayar un sistema que tiene prácticamente 35 m² de superficie radiante, aproximadamente 1400 kg de masa y que emplea materiales de nueva tecnología, se formó en CNEA un

grupo interdisciplinario de personal con el aporte de distintos Departamentos, Gerencias y Gerencias de Área que se encuentran en el Centro Atómico Constituyentes, en el que llegaron a colaborar aproximadamente hasta 70 personas.

Desde el inicio de las actividades, estas fueron realizadas bajo un sistema de gestión de la calidad implementado para el Proyecto y acorde a los requerimientos de CONAE, que se basan en normas de las agencias espaciales NASA y ESA. Posteriormente se decidió complementar el mismo sistema de gestión con el cumplimiento de los estándares internacionales de la norma ISO 9001.2008, y finalmente se trabajó en la adaptación del sistema de gestión a los nuevos requisitos de la norma ISO 9001 emitida en septiembre del 2015.

En los años en que se llevó adelante este proyecto en CNEA, se completaron las fases de desarrollo y calificación que comprendieron diversas tareas que abarcan la ingeniería básica y de detalle de todos los conjuntos y partes, el desarrollo y calificación de los procesos de fabricación y la realización de los ensayos sobre los modelos de calificación, también fabricados e integrados en CNEA, debiéndose compatibilizar todo esto con el desarrollo de otros componentes de la antena que se encontraban a cargo de CONAE como es el caso del cableado, el sistema de control térmico y la electrónica del instrumento.

El desarrollo del proyecto en sus distintas fases incluyó un programa de auditorías internas periódicas realizadas por CNEA y distintas auditorías externas realizadas por CONAE. Además, la planificación del Proyecto SAOCOM definida por CONAE incluyó la participación de este proyecto de la Antena SAR en CNEA, en las distintas etapas de revisión como las PDR (Preliminar) y CDR (Crítica) con comités de revisión integrados por expertos de NASA, ESA y agencias espaciales de otros países.

Después de concluida la etapa de desarrollo de los procesos de manufactura, actualmente se cuenta con instalaciones para la fabricación de los componentes estructurales de la antena y la integración de los paneles, para la fabricación de los Módulos Radiantes (sala limpia clase 100 000 de 75 m³, cabina de pintura y procesos de soldadura calificados según normas ESA) y para la realización de distintos tratamientos sobre las superficies de piezas de sujeción de componentes y mecanismos de despliegue para que cumplan distintas funciones como conducción eléctrica, lubricación, barrera difusiva, anticorrosión, rugosidad para pegado estructural, etc. En este último aspecto, se debe destacar en particular el desarrollo, calificación y producción de recubrimientos multicapa de algunos micrones de espesor mediante técnicas de PVD (Physical Vapor Deposition). También se cuenta con la capacidad y equipamiento necesario para realizar ensayos de calificación de componentes y todos los ensayos asociados al control de los productos a lo largo del proceso

de fabricación, que van desde el control de los materiales hasta el del panel terminado.

Para el desarrollo y verificación de la ingeniería de los distintos componentes de la antena, se trabajó empleando software de diseño 3D con capacidad CAD-CAM para asistir en la fabricación de piezas y paneles, software de simulación dinámica para la evaluación del comportamiento de la estructura y los mecanismos durante el despliegue de los paneles y software de simulación por el método de elementos finitos para la evaluación del cumplimiento de los requerimientos y la simulación de ensayos ambientales de vibración (Fig. 13A y B).

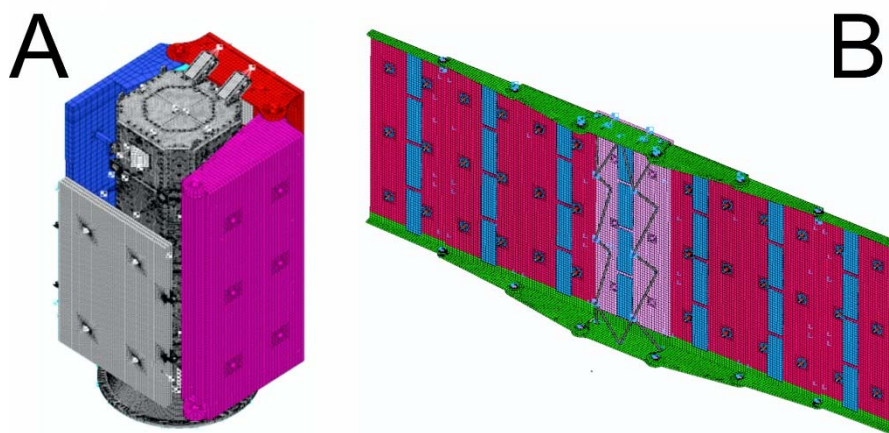


Fig. 13. A: Modelo de verificación de diseño por elementos finitos, configuración de lanzamiento; B: Modelo de verificación de diseño por elementos finitos, configuración de vuelo.

Para el proceso de polimerizado del preimpregnado de fibra de carbono que se emplea en la fabricación de los componentes estructurales se cuenta con una sala para la preparación de los laminados y con una autoclave que permite el curado de paneles de hasta 5 metros de longitud y 1,8 m de ancho que se muestran en la Fig. 14A y B.



Fig. 14. A: Elaboración de laminados de fibra de carbono; B: Autoclave para el proceso de polimerización.

El mecanizado de los paneles sándwich fabricados, para alcanzar las dimensiones finales y realizar los agujeros para la instalación de los insertos metálicos, se realiza empleando una fresadora tipo puente de grandes dimensiones, configurada especialmente para esta tarea, mientras que el para el mecanizado de insertos metálicos y partes de los mecanismos de despliegue se cuenta con equipos CNC convencionales. Ejemplos de este equipamiento se presentan en la Fig. 15 A y 15 B.



Fig. 15. A: Fresadora para el mecanizado de paneles; B: Equipo CNC para la fabricación de piezas metálicas.

Cabe señalar que tanto el autoclave para el polimerizado de materiales compuestos como la fresadora para el mecanizado de los paneles y los equipos auxiliares y herramienta asociados a los mismos, son equipos de fabricación nacional, realizados por la industria a partir de especificaciones detalladas generadas por el proyecto en CNEA.

Para realizar las tareas de integración, ensayo y acondicionamiento para el transporte (Fig. 16A, Fig. 16B) la instalación cuenta con una sala limpia Clase 100 000 (ISO 8) con un volumen de aproximadamente 490 m³.

Además del diseño y fabricación del equipamiento necesario para las tareas de integración y ensayo de los distintos componentes de la antena, se diseñaron y fabricaron contenedores para el transporte de los paneles estructurales y de los módulos radiantes que, de ser requerido, pueden emplearse con atmósfera inerte y además cuentan con sistemas de amortiguación que aseguran que los elementos transportados no sean sometidos a aceleraciones que puedan afectar sus características.



Fig. 16. A: Equipos de soporte para la integración de paneles; B: Contenedor de transporte.

En este área de trabajos, denominada Equipos Mecánicos de Soporte en Tierra (MGSE), una de las tareas de desarrollo más destacables fue el desarrollo conceptual, diseño, fabricación y calificación de un conjunto de dispositivos, denominados OG, que permiten simular las condiciones de falta de gravedad que tendrán los paneles de la antena durante las maniobras de despliegue en órbita, a fin de realizar en Tierra los ensayos de despliegue y asistir las tareas de integración del conjunto de la antena.

Estos dispositivos, que se presentan en la Fig. 17A y B, adoptaron el concepto de soportar el peso de los paneles durante el despliegue deslizándose sobre una superficie apropiada mediante el empleo de suspensiones neumáticas y un colchón de aire. Así, cada dispositivo estaba diseñado para transferir la sumatoria de cargas coaxialmente con la ubicación del centro de gravedad del panel de la antena y compensar no menos del 85% de la masa de cada panel, manteniendo esa compensación frente a cambios en la altura entre la superficie de deslizamiento y el panel que se desplegaba, producidos por ejemplo por las tolerancias propias en la ubicación de todos los equipos que intervienen en la maniobra (en la práctica se trabajó con variaciones menores al 5% de la masa de cada panel).

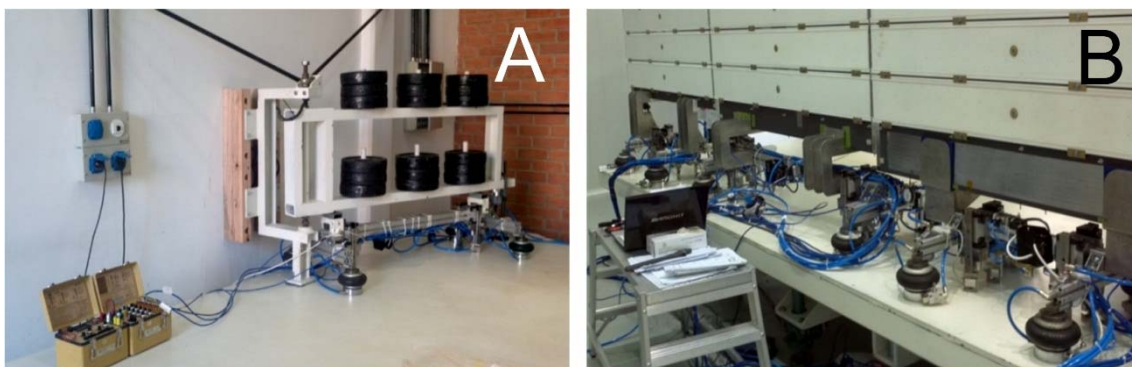


Fig. 17. A: Ensayos de calificación de los Dispositivos OG; B: Empleo de los Dispositivos OG para los ensayos de despliegue de los paneles de la Antena SAR en Tierra.

Cabe señalar que no existía experiencia previa en el país del empleo de dispositivos OG de este tipo y que la selección de esta tecnología frente a las previamente empleadas, se basó en que era necesario manejar la elevada masa de cada uno de los seis paneles desplegados individuales de la antena totalmente integrados que es de alrededor de 200 kg, frente a los 90 kg que por ejemplo debe manejar el dispositivo OG que se utilizó para ensayar el conjunto completo de paneles solares del satélite SAOCOM.

5. Etapa de calificación

Una vez confirmadas las características del lanzador que se seleccionó para la puesta en órbita de los satélites SAOCOM y congelado el diseño básico adoptado para la Antena SAR, se realizó el diseño de detalle y la fabricación en CNEA de los siguientes modelos de calificación:

- Un panel estructural para calificar los procesos de fabricación mediante ensayos ambientales de vibración y acústico, y para determinar las cargas de calificación a emplear a nivel de componentes como las cajas de electrónica (campana de ensayos realizada en el LIT-INPE de Brasil, Fig. 18).

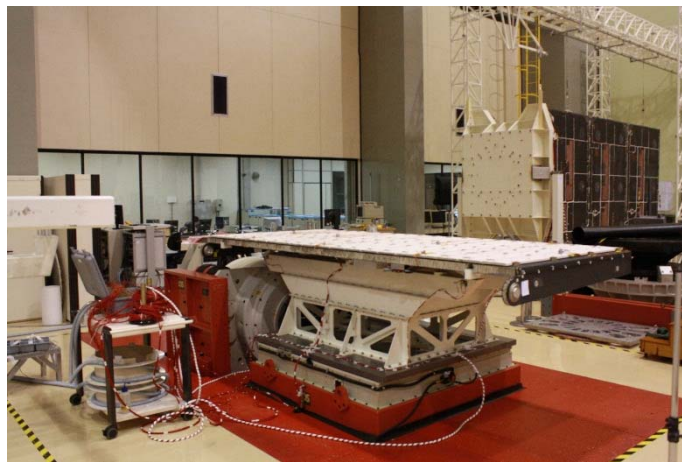


Fig. 18. Modelo de panel estructural ensayado en el LIT-INPE durante los ensayos de vibración.

- Dos paneles de desarrollo para evaluar las características funcionales de radiofrecuencia del instrumento, que se muestran en la Fig. 16 al completarse su fabricación e integración en CNEA (ensayos realizados por CONAE en sus instalaciones del LIE-CETT).
- Un Modelo Estructural formado por un conjunto de tres paneles desplegados, un panel fijo central y la Estructura de Interfaz, para la calificación de la estructura y los mecanismos mediante ensayos ambientales de vibración y acústicos realizados conjuntamente con el Modelo Estructural de la Plataforma de Servicio. Para este modelo, se

diseñó y fabricó un mock-up de aleación de aluminio que reemplazó al otro conjunto de paneles desplegable de la antena, el que como requisitos debía mantener no solamente la misma geometría y puntos de vinculación sino también, las mismas características de inercia y rigidez que el modelo real. Esta campaña de ensayos también permitió verificar la ingeniería de detalle y calificar los procedimientos de integración y montaje de la antena, conjunto de tareas que se realizaron en las instalaciones de CNEA como se muestra en las Figs. 19A, B y 20A, B (campaña de ensayos realizada en CEATSA-INVAP, Fig. 21A y B).



Fig. 19. A: Integración en CNEA del Modelo Estructural de la Antena SAR; B: Integración en CNEA del Modelo Estructural de la Antena SAR.

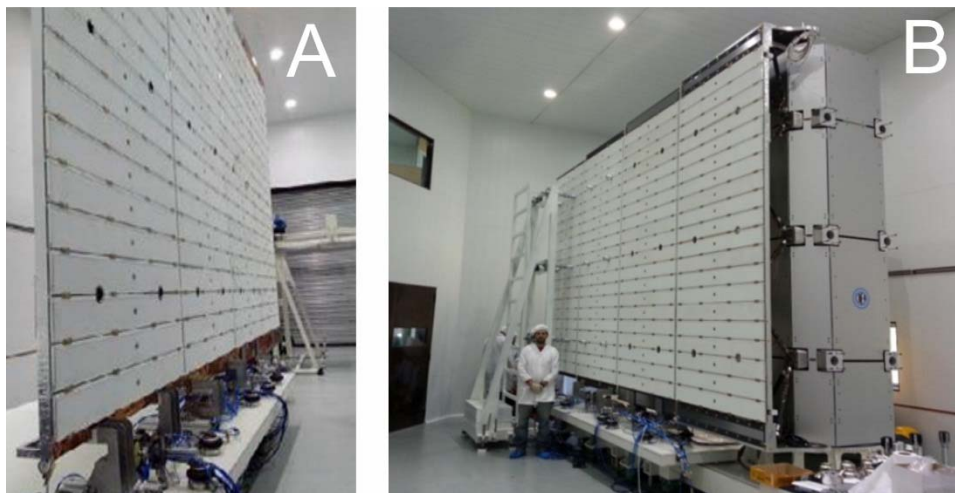


Fig. 20. A: Modelo Estructural de la Antena SAR en CNEA; B: Modelo Estructural de la Antena SAR en CNEA.

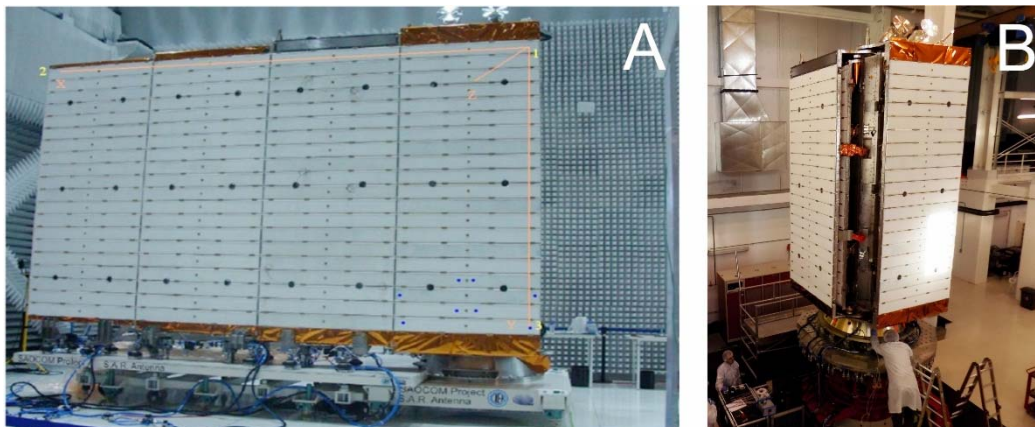


Fig. 21. A: El Modelo Estructural de la antena SAR durante los ensayos de despliegue de la campaña de calificación; B: El Modelo Estructural de la antena SAR durante los ensayos de vibraciones de la campaña de calificación.

- Un modelo ad-hoc, denominado Modelo de Calificación de Mecanismos, para calificar el diseño y funcionalidad del conjunto de los mecanismos de despliegue de la antena mediante ensayos ambientales de vibración y de ciclado térmico en vacío (campaña de ensayos realizada en el LIE-CETT de CONAE). El diseño de este modelo permitió realizar la actuación completa del conjunto de mecanismos que intervienen en el despliegue de los paneles de la antena SAR en condiciones de temperatura y vacío similares a las que se tienen en la órbita terrestre, pudiéndose de esa forma verificar el adecuado funcionamiento y performance de todos los mecanismos en esas particulares condiciones.
- Varios modelos de Módulos Radiantes para calificar el diseño mecánico y funcional mediante ensayos ambientales de vibración y ciclado térmico en vacío (campaña de ensayos realizada en CNEA y en el LIE-CETT de CONAE).
- Dos modelos térmicos (medio panel y un panel completo de la antena), que se emplearon para verificar los modelos matemáticos que definen el sistema de control térmico de la antena, mediante ensayos en cámara de termovacío y en un simulador solar, también en condición de vacío (campañas de ensayo realizadas por CONAE en el LIE-CETT y en la ESA, Alemania).
- Un panel estructural para el denominado Modelo de Ingeniería de la Antena SAR, destinado a la calificación funcional del Instrumento SAR (campañas de ensayo realizadas por CONAE en INVAP).

6. Modelos de Vuelo

Una vez completada la fase de calificación con la verificación experimental de todos los parámetros del diseño, se inició la fabricación de

las antenas para los modelos de vuelo del satélite, cuya integración se realizó en las instalaciones de CONAE en la Provincia de Córdoba. CNEA completó la entrega de las partes correspondientes a ambos modelos de vuelo de la antena, debiéndose considerar que la provisión prevista comprende los siguientes componentes:

- 14 Paneles Estructurales completamente integrados.
- 2 Estructuras de Interfaz con la Plataforma de Servicio del satélite.
- 24 Mecanismos de Retención-Liberación.
- 24 Mecanismos de Bisagras.
- 24 Mecanismos de Traba.
- 36 Dispositivos de Guía de Cables entre paneles y Placas de conexionado.
- 300 Módulos Radiantes.

Además de estos componentes de las antenas propiamente dichas, CNEA entregó todo el conjunto de equipos de soporte en tierra fabricado para permitir la integración y ensayo de ambas antenas, incluyendo nueve dispositivos OG que permitieron realizar estas operaciones sobre tres conjuntos de paneles desplegables en forma simultánea.

Personal de CNEA, conjuntamente con personal de CONAE e INVAP, participo de las operaciones de integración y ensayo de las antenas en la Provincia de Córdoba y luego de las tareas de integración de las antenas a las Plataformas de Servicio de los satélites en las instalaciones de INVAP, empleando los procedimientos desarrollados oportunamente en CNEA.

Posteriormente a estas tareas, se participó en la realización de los ensayos de aceptación de ambos satélites, en los que CNEA debió evaluar el comportamiento de la estructura de las antenas durante los ensayos ambientales de vibración y acústicos realizados en las instalaciones de INVAP y también evaluar el funcionamiento de los mecanismos durante los ensayos despliegue realizados después de someter a los satélites a cargas similares a las que debían soportar durante el lanzamiento. Las Figs. 22 y 23 muestran respectivamente las vistas anterior y posterior de uno de los satélites con las antenas SAR desplegadas después de uno de estos ensayos de funcionamiento de los mecanismos de despliegue, en las que se puede apreciar la distribución de los Dispositivos OG entre los paneles de la antena y las plataformas de despliegue, mientras que la Fig. 24 presenta al satélite completo con la antena SAR en configuración plegada o configuración de lanzamiento.



Fig. 22. Vista anterior de uno de los satélites con la antena SAR desplegada.



Fig. 23. Vista posterior de uno de los satélites con la antena SAR desplegada.



Fig. 24. Satélite con la antena SAR plegada en configuración de lanzamiento.

Es satélite SAOCOM 1A fue lanzado el 7 de Octubre de 2018 desde AFB Vandenberg en California, EEUU, mientras que el satélite SAOCOM 1B fue lanzado el 30 de agosto de 2021 desde AFB Cabo Cañaveral, Florida, EEUU. En ambos casos se empleó un lanzador Falcon 9 Block 5 de la empresa Space Exploration Technologies Corp. Algunas horas después del lanzamiento, se enviaron desde Tierra los comandos que activaron la secuencia de despliegue de las antenas, completándose las mismas en forma nominal sin ningún tipo de inconvenientes.

6. Conclusiones

El Proyecto Antena Radar de Apertura Sintética significó incorporar a CNEA la capacidad para el desarrollo, diseño, calificación y fabricación de sistemas y componentes para su empleo en satélites, siguiendo los lineamientos establecidos por la normativa internacional vigente.

El Proyecto Antena Radar de Apertura Sintética permitió desarrollar en CNEA los procesos de caracterización y manufactura de componentes empleando materiales compuestos avanzados, tecnologías con cada vez mayor

aplicación en distintas ramas de la ingeniería, incluyendo el sector nuclear, por lo que los conocimientos y experiencias adquiridas en el desarrollo de este proyecto resultan aplicables en otros proyectos y actividades de CNEA.

La etapa de calificación del Proyecto ha validado el diseño adoptado y los procesos de fabricación e integración desarrollados en CNEA para la Antena del Instrumento SAR del Proyecto SAOCOM de CONAE.

El lanzamiento de ambos satélites SAOCOM y el exitoso despliegue de las Antenas SAR, avalan la capacidad de CNEA para suministrar productos innovadores en sectores de alta tecnología.

Agradecimientos

A la Academia Nacional de Ciencias Exactas Físicas y Naturales por haber considerado el trabajo realizado en este proyecto merecedor de la distinción a la Innovación Tecnológica del año 2020.

A las distintas autoridades de la Comisión Nacional de Energía Atómica por el apoyo brindado a este proyecto, desde el necesario aprendizaje de sus inicios, a lo largo de todos los años de su desarrollo y hasta su conclusión con el despliegue de las antenas de ambos satélites.

A la gente de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales, en particular al Dr. Conrado Varotto, por haber confiado en este grupo de gente de la CNEA para llevar adelante este desafío.