



## Sector Tecnológico - Observatorio

### Propuesta para el desarrollo del proyecto MIA “Multipurpose Interferometric Array”

Document N°:

IAR-OBS-MIA-0001-DG-R00

Autores: G. Gancio, G.E. Romero, J.A. Combi.

Revisado: P. Benaglia, M. Fernández López, L. García, M. Salibe,  
E. Rasztoky, F.P. Hauscarriaga, E. Fliger.

Aprobado: G.E. Romero.

*Resumen* *El presente documento describe, de forma resumida, una propuesta para la construcción y el desarrollo de un nuevo instrumento de observación radioastronómico basado en las técnicas interferométricas, ofreciendo una gran resolución angular en la banda de 21 cm, con la intención de mejorar y extender las prestaciones actuales de los instrumentos utilizados en el Instituto Argentino de Radioastronomía. Esto permitirá realizar investigación científica competitiva de nivel internacional y adquirir know-how científico y tecnológico de frontera en dichas técnicas, posibilitando realizar medidas interferométricas y desarrollar técnicas de muy larga línea de base o VLBI. El proyecto se denomina MIA por sus siglas del inglés “Multipurpose Interferometric Array”.*

## Contenido

1. Introducción.....	2
2. Multipurpose Interferometric Array (MIA).....	4

3.	Objetivos científicos .....	4
4.	Objetivos tecnológicos .....	6
5.	Descripción del instrumento.....	7
6.	Etapas propuestas para el desarrollo del instrumento.....	10
6.1.	Búsqueda de sitio .....	10
6.2.	Etapa 0 - prototipo MIA Pathfinder .....	11
6.2.1.	Sección de antena .....	13
6.2.2.	Sección de radio frecuencia .....	14
6.2.3.	Sección de digitalización .....	15
6.2.4.	Sección de procesamiento y almacenamiento de datos .....	16
6.2.5.	Conectividad.....	16
6.2.6.	Sección de potencia y alimentación.....	17
6.3.	Costos del prototipo .....	17
6.4.	Etapa 1 - infraestructura.....	18
6.5.	Etapa 2 - construcción de equipos e instalación en sitio.....	18
6.6.	Etapa 3 - verificación funcional.....	18
6.7.	Etapa 4 - verificación de ciencia.....	18
6.8.	Diagrama temporal.....	20
7.	Possibilidad de expansión instrumental .....	20
8.	Sinergías con otros instrumentos en el país y el mundo.....	21
9.	Recursos humanos .....	21
9.1.	Recursos humanos necesarios para el diseño y operación del instrumento.....	21
9.2.	Recursos humanos a formar durante el desarrollo del instrumento.....	22
9.3.	Potencial para formación de nuevos recursos humanos luego del comienzo de las operaciones .....	23
10.	Oportunidad de transferencia de tecnología y vinculación tecnológica .....	23
11.	Conclusiones.....	23
12.	Referencias .....	25

## **1. Introducción**

El Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR) se fundó en 1962 como un observatorio radioastronómico pionero en América del Sur, con el propósito de promover y coordinar la investigación y el desarrollo técnico de la radioastronomía, equipado con dos

antenas parabólicas de disco simple de 30 metros de diámetro. El radiotelescopio “Carlos Varsavsky” vio su primera luz en 1966, mientras que el segundo radiotelescopio “Esteban Bajaja” se construyó en 1977 (Fig. 1).

El propósito científico inicial del IAR era realizar una serie de mapas de alta sensibilidad del hidrógeno neutro (línea de 21 cm) del cielo del hemisferio sur. Estos mapas fueron concluidos satisfactoriamente en una primera etapa por Colomb et al. (1980) y luego por Testori et al. (2001) y Bajaja et al. (2005), los cuales dieron lugar a varias publicaciones realizadas en colaboración con instituciones alemanas y holandesas.

Aunque el IAR ha sido un centro de intensa investigación científica y actividad tecnológica desde su fundación, los radiotelescopios no han sido utilizados en ningún proyecto científico desde 2000. Durante la reunión anual de la Asociación Argentina de Astronomía que se llevó a cabo en el año 2006, se realizó la presentación para la construcción de un instrumento interferométrico que permitiese ampliar y potenciar las capacidades de la Unidad Ejecutora, E.M. Arnal et al. (2006).

En el año 2015, utilizando el radiotelescopio “Carlos Varsavsky” se realizaron una serie de observaciones a modo de ensayo con la finalidad de evaluar un nuevo receptor digital de bajo costo, mediante la técnica denominada “Radio Definida por Software”. Este módulo permite, mediante la escritura de diferentes códigos de programación en una computadora, realizar diferentes funciones para la toma y el procesamiento de datos, obteniendo distintos productos de ciencia. Con este equipo y de forma relativamente sencilla, se pudieron observar nuevamente perfiles de líneas espectrales en 21 cm y algunos objetos compactos, como los púlsares.

Como consecuencia de estos resultados se decidió actualizar los sistemas electrónicos de la antena Carlos Varsavsky con receptores digitales de mejores prestaciones, que una vez integrados al radiotelescopio comenzaron a dar excelentes resultados. De esta manera, se inició una demanda de mayor tiempo de observación, por lo que se decidió recuperar la antena “Esteban Bajaja” mediante una serie de reparaciones y actualizaciones, entre ellas el desarrollo de un nuevo receptor digital. En la actualidad, ambos radiotelescopios se encuentran realizando un monitoreo intensivo de púlsares. Estos datos, los cuales cumplen con los más altos estándares científicos que impone la comunidad astronómica internacional, ya han dado como resultado un trabajo que ha sido recientemente publicado en *Astronomy & Astrophysics* (Gancio et al. 2020). Además, se ha comenzado con nuevos programas de observación, que incluyen el estudio de variabilidad de blazares.



Figura 1: Radiotelescopios del IAR

Cabe destacar que el *know-how* adquirido durante las etapas de actualización de la antena “Carlos Varsavsky” y del desarrollo del nuevo receptor de la antena “Esteban Bajaja” posibilitaron incorporar nuevas tecnologías y técnicas de procesamiento digital, trabajar en

desarrollos de última generación, e iniciar la interacción con otros grupos extranjeros expertos en dichas áreas. Un ejemplo de esto último es la participación y exposición del IAR en el Workshop de Casper 2019, donde se discutieron los últimos desarrollos y proyectos de instrumentación científica [https://www.cfa.harvard.edu/events/2019/casper/CASPER2019\_files/agenda.html].

## 2. Multipurpose Interferometric Array (MIA)

Se propone la construcción de un interferómetro multipropósito de baja frecuencia (entre 50 MHz y 2 GHz) y gran ancho de banda (250 MHz en la fase I) formado por un núcleo de 16 antenas de 5 m de diámetro. La línea de base máxima del instrumento será de 55 km. Estará localizado en un sitio con baja interferencia de radio, en el oeste de la República Argentina. En una segunda etapa (fase II), el arreglo de antenas se podrá extender hasta 64 antenas, incluyendo líneas de base más largas. Este instrumento permitirá alcanzar objetivos científicos y tecnológicos múltiples. De esta forma, el MIA es un instrumento perfecto para la enseñanza práctica de la interferometría en radio tanto a nivel científico como tecnológico para Argentina. Esto potenciará las capacidades científico-tecnológicas del IAR, y ubicará a este último en una zona científicamente competitiva hasta mediados del siglo XXI.

## 3. Objetivos científicos

El principal objetivo del proyecto MIA consiste en proporcionar una nueva herramienta multipropósito que opere a bajas frecuencias (entre 50 MHz y 2 GHz) y que permita realizar una gran variedad de observaciones astronómicas y cosmológicas, competitiva a nivel internacional. El instrumento podrá operar esencialmente en tres modos: observaciones del continuo, observaciones de línea y medidas de *timing* (alta resolución temporal). Sus contribuciones principales serán en tres campos: formación estelar, objetos variables en radio frecuencia, HI a diferentes corrimientos al rojo y fuentes no térmicas.

Las aplicaciones científicas principales de MIA son las siguientes:

**Formación estelar:** el interferómetro podrá ser usado para el estudio de regiones de formación estelar con jets térmicos y no-térmicos, regiones de gas ionizado y eventos energéticos de acreción en discos circunestelares. En particular relevantes serán los estudios de la emisión de radio continuo con gran resolución angular, pero también de gran importancia serán las observaciones de líneas de recombinación en radio con las que no sólo se podrán caracterizar espacialmente las propiedades físicas, sino obtener información de la cinemática del gas ionizado. Además, será también interesante explotar el gran ancho de banda de MIA en la observación de algunas transiciones máser (por ejemplo, las de OH a 1665MHz), cuya variabilidad en intensidad y velocidad radial son foco de estudios de varios trabajos actuales. Trabajando a bajas frecuencias, MIA podrá complementar las observaciones de ALMA desde el hemisferio Sur, lo que permitirá explorar radiación no térmica en fuentes detectadas a energías más altas o en líneas moleculares.

**HI:** Con su gran ancho de banda y extensiones hacia bajas energías, MIA será ideal para investigar la evolución del hidrógeno neutro a lo largo de la historia del universo. Permitirá realizar observaciones desde los 50 MHz, equivalente a un corrimiento al rojo de  $z=17$ , o sea desde el comienzo de la era de re-ionización.

**Fuentes no-térmicas:** el instrumento servirá para investigar la evolución temporal de los espectros de fuentes no-térmicas activas como ser *blazars*, *flat-spectrum radio quasars*, galaxias Seyfert, y otras clases de Active Galactic Nuclei. Además permitirá la realización de mapas de índices espectrales de radio fuentes extendidas de radiación sincrotrón, como Centaurus A, y de galaxias cercanas con actividad no-térmica (por ejemplo el *starburst* NGC 253). También permitirá realizar mapas espectrales de regiones galácticas de formación estelar e identificar, posibilitando la detección e identificación de aceleradores de partículas a través de la caracterización espectral de la radio emisión.

**Púlsares:** el instrumento permitirá realizar observaciones con muy alta resolución temporal (mejor que el microsegundo) de diferentes fuentes variables. En particular servirá para investigar los cambios en el tiempo de arribo de señales de púlsares, investigaciones de la densidad electrónica del medio interestelar, el estudio de *glitches*, erupciones en magnetares, y podrá contribuir a los esfuerzos por detectar ondas gravitacionales por medio de la observación de púlsares. También será adecuado para investigar eventos transitorios de diferentes tipos, desde *Fast Radio Bursts* (FRBs, eventos cuya duración es del orden del milisegundo) hasta contrapartidas de fuentes de ondas gravitacionales, de *Gamma-Ray Bursts* (GRBs), y variabilidad de Núcleos Galácticos Activos (AGNs). Algunas investigaciones se están realizando desde el IAR con los actuales receptores, pero MIA permitirá una mejora cualitativa y cuantitativa sustancial, debido a su mayor ancho de banda, sensibilidad y resolución temporal (Gancio et al. 2020).

**Escuela de interferometría para astrónomos:** el telescopio MIA supone la primera experiencia radio-interferométrica en Argentina con fines científicos. Es un emprendimiento que podrá ser usado como un telescopio escuela para la capacitación práctica de nuevos expertos en el área. Este aspecto es relevante debido a la reciente proliferación de radio interferómetros a nivel global. En particular MIA, será muy útil a la hora de capacitar a los astrónomos para que conozcan la limitación que la tecnología impone en las observaciones interferométricas. En experiencias similares (GMRT en India y JVLA o ASKAP en Australia, por ejemplo), los astrónomos adquieren conocimientos para planear y justificar la realización de un experimento, aprender el uso y manejo de un interferómetro y calibrar y producir imágenes de calidad.

A modo de resumen se presentan las líneas de investigación más importantes para las capacidades de MIA:

- Investigación de la línea de HI a distancias cosmológicas para caracterizar la época de re-ionización del universo.
- Estudios multifrecuencia de variabilidad de núcleos galácticos activos (AGNs).
- Regiones de formación estelar; en particular, fenómenos no térmicos en las mismas.
- Estudios de contrapartidas de fuentes de rayos gamma no identificadas.
- Estudios de morfología y distribución espectral de remanentes de supernova.

- Estudio espectro-temporal de sistemas binarios de rayos X y microcuásares.
- Mapeo de fuentes extendidas no térmicas.
- Detección de contrapartidas transitorias de GRBs.
- Estudio de FRBs.
- Estudio y *timing* de púlsares.
- Observación de *flares* en magnetares.
- Estudio del medio interestelar con alta resolución angular.
- Caracterización física y cinemática de regiones HII.
- Seguimiento de variabilidad del máser de OH en regiones de formación estelar y estrellas masivas evolucionadas.

La infraestructura instalada para el interferómetro abrirá la posibilidad de realizar estudios a diferentes frecuencias y con diferentes tipos de antenas. MIA tendrá fuerte sinergia con otros instrumentos de disco simple instalados en el país como: LLAMA, CART, las antenas del espacio profundo CLTC y DSA-3 y los propios radiotelescopios del IAR.

#### **4. Objetivos tecnológicos**

El objetivo tecnológico principal a través del desarrollo del proyecto es la capacitación del personal de ingeniería en diferentes áreas de instrumentación científica. Entre las más relevantes podemos mencionar: el procesamiento en tiempo real de señales de radiofrecuencia de gran ancho de banda, la transmisión digital de alta velocidad, las técnicas de observación interferométrica y su correlación, los sistemas de correlación para interferometría de larga línea de base (VLBI) y sincronización de sistemas digitales. Estos desarrollos de última generación están descriptos en detalle en Hickish et al. (2016), y son parte de los últimos avances del grupo CASPER (Collaboration for Astronomy Signal Processing and Electronics Research). Esto permite tener una base de conocimiento que se puede aplicar directamente a otros instrumentos o experimentos, como el desarrollo de espestrómetros de gran ancho de banda, utilizados en los rangos mm y submm, o el desarrollo de técnicas de observación VLBI.

Con estos conocimientos se espera promover la radioastronomía instrumental en la Argentina y acceder al manejo y desarrollo de instrumentos de última generación. Un objetivo a largo plazo es el de colaborar con otras instituciones internacionales. En particular, al presente en Sudáfrica y Australia se está avanzando en la construcción del Square Kilometer Array o SKA; un instrumento de última generación y con una inversión de la comunidad europea que supera los 650 millones de euros. Será el radiotelescopio de mayor tamaño y sensibilidad construido hasta la fecha. Al estar el SKA distribuido entre dos continentes, se presenta una excelente oportunidad a futuro de realizar observaciones sin precedentes entre los tres continentes, africano, oceánico y americano. Sin duda, la construcción del instrumento propuesto permitirá obtener datos de calidad para realizar investigaciones de punta y demostraría las capacidades tecnológicas de la Argentina en esta área. Además, se contaría con las condiciones ideales para posibles inversiones por parte del proyecto SKA.

## 5.Descripción del instrumento

MIA será implementado haciendo uso de las últimas técnicas de procesamiento digital de señales y de sistemas de radiofrecuencia, las cuales son utilizadas hoy día en los observatorios astronómicos más modernos, y realizable gracias al conocimiento adquirido en la construcción de los nuevos receptores digitales, actualmente operativos en el IAR.

La nueva facilidad será un radio interferómetro de 16 antenas en su primera fase (MIA-16), con un correlador capaz de operar hasta 64 antenas, en función de su diseño. Con el objetivo de iniciar el desarrollo tecnológico y realizar la capacitación técnica, se propone primeramente la construcción de un prototipo, el cual será financiado en el marco del Proyecto de Unidades Ejecutoras del CONICET (PUE-CONICET-CCT La Plata, presentación 2019). Este prototipo, que denominaremos “MIA Pathfinder”, será suficiente para validar el concepto del instrumento y se describe en la siguiente sección. MIA se basará en el construcción de 5 NODOS de 3 antenas más un NODO de una antena, de 5 metros de diámetro cada una, con montura alt-azimutal, que operará en la banda L (1 - 2.3 GHz), con dos polarizaciones lineales ortogonales. El ancho de banda instantáneo será de 250 MHz, la temperatura del receptor de aproximadamente 45 K. El instrumento propuesto en su fase 1 con 16 antenas y una línea de base aproximada de 55 km, tendrá una resolución angular de 1.14 segundos de arco a 1420 MHz. Esto significa que se obtendrá una mejora de 1.5 órdenes de magnitud (o un factor 15), respecto de los actuales radiotelescopios del IAR, cuya resolución es de 30 minutos de arco.

El desarrollo de MIA estará basado principalmente de instrumentos con características similares a los telescopios: DSA-10, KAT-7 y HERA.

El Deep Synoptic Array 10 (DSA-10, Kocz, et al. 2019), es un arreglo de 10 antenas de 4.5 metros de diámetro con una línea de base de 100 metros, instalado en el Owens Valley Radio Observatory (Fig. 2). El instrumento terminado, que constará de unas 2000 antenas, ha sido optimizado para la detección de *Fast Radio Burst* (FRBs).



Figura 2: Vista del DSA-10

El Karoo Array Telescope (KAT-7) es un interferómetro de 7 antenas de 12 metros de diámetro instalado en Sudáfrica. Precursor del Square Kilometer Array (SKA), el telescopio presenta una línea de base máxima de 185 metros (Carignan 2005) (Fig. 3).



Figura 3: Vista del KAT-7

El proyecto HERA (por sus siglas en inglés, Hydrogen Epoch of Reionization Array) es un radiotelescopio destinado a observar la estructura a gran escala durante y antes de la época de la reionización (Fig. 4). HERA es un instrumento de segunda generación que combina los esfuerzos y las lecciones aprendidas del *Murchison Widefield Array* (MWA) y el *Donald C. Backer Precision Array* para sondear la época de la reionización (De Boer et al. 2017). El arreglo de antenas es una gran cuadrícula de paráolas fijas sin seguimiento de 14 metros de diámetro distribuidas en una extensión hexagonal de 300 m de ancho. Este aumento sustancial del área de recolección proporciona un orden de magnitud más de sensibilidad que los instrumentos de primera generación, y además tiene la sensibilidad necesaria como para obtener las primeras imágenes de estructura de HI a gran escala.



Figura 4. Imagen del arreglo de antenas HERA.

Cabe destacar que el instrumento propuesto está ideado para ser de bajo costo por sus características de diseño. Si bien al momento no hay un presupuesto detallado, el costo calculado de componentes, el cual no incluye costos de infraestructura ni mano de obra, para MIA-16 (fase 1) es de unos 500.000 U\$D.

A continuación, se detallan las características principales del proyecto propuesto MIA-16 (fase 1), considerado como un primer paso para el desarrollo de instrumentos observacionales de este tipo, no solo en Argentina sino también en Latinoamérica.

- Cantidad de antenas para la primera luz: 16, utilizando 5 NODOS de 3 antenas y un NODO de una antena.
- Diámetro de cada antena = 5 metros (con montura alt-azimutal).
- Mínima línea de base = 400 metros.
- Máxima línea de base = 55 km.
- Resolución angular = 1.14 arcsec a 1420 MHz.
- Temperatura de receptor = 45 K.
- Densidad de flujo equivalente del sistema, SEFD  $\sim$  1060 Jy.
- Frecuencia de operación de 1 a 2.3 GHz (a confirmar).
- Envío de señales analógicas de radio frecuencia mediante fibra óptica.
- Ancho de banda de 250 MHz.
- Digitalización por cada subconjunto de antenas.
- Correlación en nodo central.
- Resolución espectral configurable, ancho de canal típico posible 1 kHz, para anchos de banda de 64 MHz (configurable).

Es importante resaltar que gran parte del desarrollo se centra en los sistemas computacionales y de procesamiento de datos de alto rendimiento. Estos equipos electrónicos como receptores y digitalizadores ya han sido desarrollados por el grupo de técnicos e ingenieros del IAR, y además han sido ampliamente probados, tanto en el IAR como en los otros instrumentos previamente mencionados. Otro desafío se ve reflejado en la infraestructura necesaria para la interconexión de las antenas mediante un tendido de fibra óptica, así como de las etapas de potencia. El siguiente diagrama (Fig. 5) ilustra el esquema de conexión propuesto, el que se basa en el esquema utilizado por el instrumento HERA (De Boer et al. 2017).

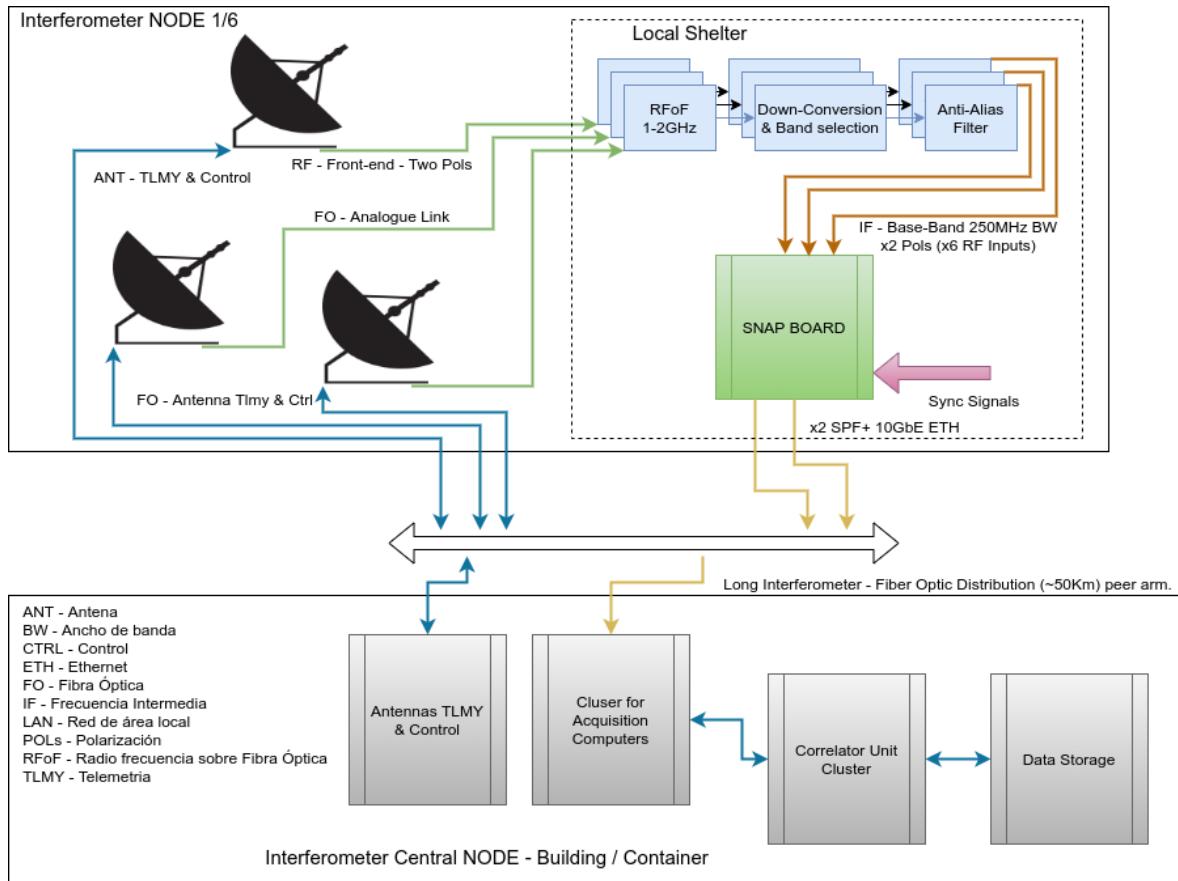


Figura 5. Diagrama del interferómetro propuesto MIA, uno de los nodos constará de una sola antena.

## 6. Etapas propuestas para el desarrollo del instrumento

Si bien el desarrollo será llevado a cabo en el IAR, la construcción del instrumento MIA-16, así como su operación involucrará la participación de varias instituciones relacionadas con la investigación astronómica. Previo a las dos primeras etapas planteadas (búsqueda de sitio y Etapa 0, presentadas a continuación), las cuales han sido aprobadas por el CD del IAR y serán realizadas como parte de la presentación del Proyecto de Unidades Ejecutoras del CONICET (PUE-CONICET-CCT La Plata, presentación 2019), se realizará durante el periodo 2020 el diseño y desarrollo de ingeniería previo a la construcción de la etapa 0. Dichas etapas representan las de menor costo y mayor impacto en el desarrollo del instrumento. Se prevé que las etapas de trabajo propuestas sean ejecutadas en un plazo aproximado de un año cada una, dando un tiempo total de construcción de 5 años para el instrumento MIA-16.

### 6.1. Búsqueda de sitio

La búsqueda de sitio implica en primer lugar realizar medidas de interferencia electromagnética. Este punto es crucial para el correcto desempeño del instrumento, pues la zona a utilizarse deberá estar alejada de ciudades y pueblos. La altura sobre el nivel del mar no es un limitante para la instalación del instrumento ya que a las frecuencias de operación la atmósfera es transparente.

La extensión del terreno a utilizarse para la instalación de las antenas debería ser del orden de los 50 km (Este-Oeste) y 50 km (Norte-Sur) y con cierta infraestructura ya instalada (por ejemplo, que esté cerca de otro observatorio).

## 6.2. Etapa 0 - prototipo MIA Pathfinder

El primer paso incluye la construcción de un prototipo denominado “MIA Pathfinder”, que representa un NODO del MIA-16 (fase 1). El mismo consta de tres antenas, a instalarse en el predio del IAR. Esta etapa se compone de dos partes: i) la verificación operativa de los receptores montados en cada antena, así como del apuntado y control de las mismas, brindando información del rendimiento general del modelo construido; y ii) el desarrollo de un sistema de correlación para realizar el proceso de interferometría entre las tres antenas. Uno de los objetivos es lograr una resolución angular de 10 minutos de arco, utilizando 100 metros de línea de base para el sitio propuesto de instalación, a una frecuencia de 1420 MHz. Esta configuración podría cambiar para facilitar el desarrollo del proyecto, ya que la resolución angular no es un factor determinante en esta etapa (Fig. 6).



Figura 6: Vista de la ubicación propuesta de las 3 antenas.

Utilizando la aplicación “The Friendly Virtual Interferometer” [<https://crpurcell.github.io/friendlyVRI/>] se pueden ensayar diferentes configuraciones de arreglos de antenas, ya que con ella es posible realizar la simulación de la respuesta del prototipo. De esta forma, se puede verificar la resolución angular esperada para la línea de base utilizada. Para el ejemplo, del prototipo de tres antenas con línea de base de 100 metros, resolución de 10 minutos de arco. A modo de ejemplo y como se esperaba, el arreglo logra resolver los lóbulos de la emisión de radio de una radiogalaxia, pero sin resolver su estructura interna, lo cual es la respuesta esperada (Fig. 7).

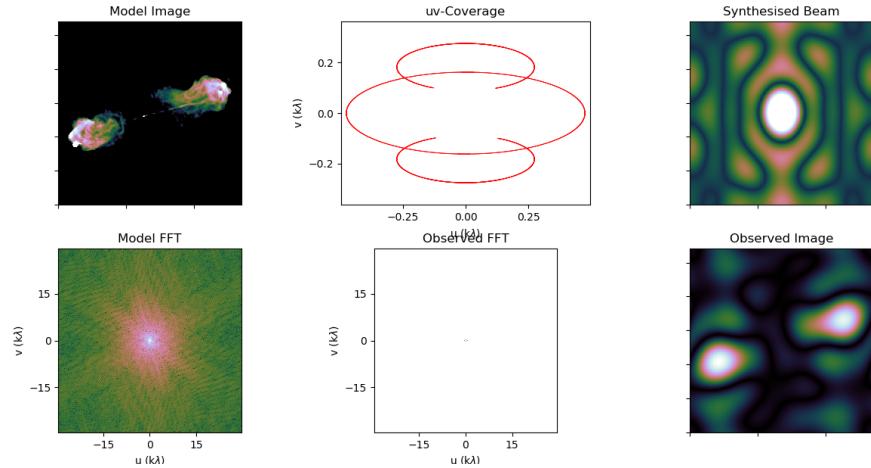


Figura 7: Simulación del arreglo prototípico de tres antenas y 100 metros de línea de base. El lóbulo principal del haz sintetizado tiene un ancho aproximado de 10 minutos de arco.

El siguiente diagrama funcional (Fig. 8) muestra las diferentes secciones y la configuración utilizada para su interconexión.

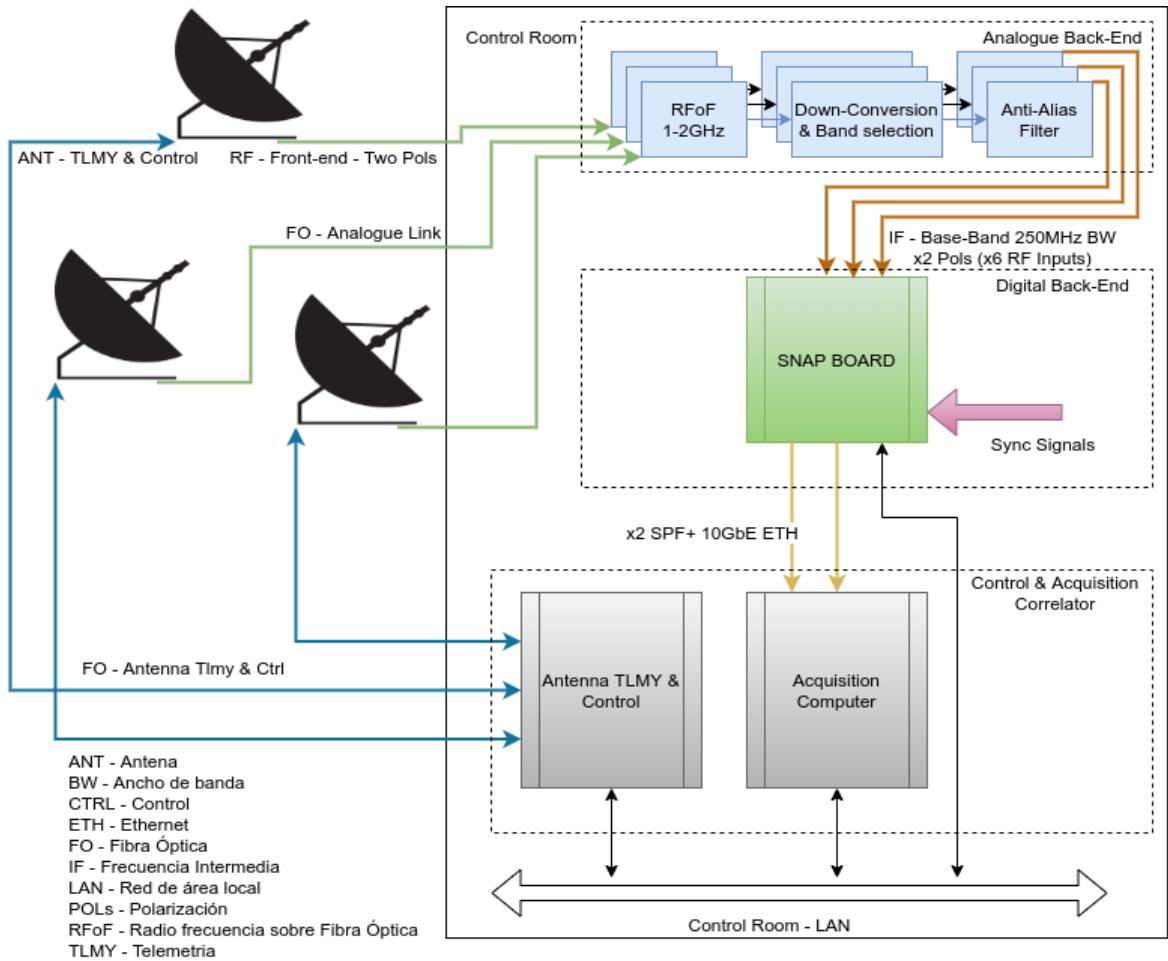


Figura 8. Diagrama en bloques de la configuración de prototipo “MIA Pathfinder”.

En las siguientes secciones se describen los diferentes módulos que componen el prototipo y su costo estimado.

### 6.2.1. Sección de antena

Al momento de realizar la propuesta para el desarrollo del proyecto MIA hay dos diseños principales de antena (Fig. 9), el denominado de tipo offset y el parabólico. Ambos modelos tienen sus beneficios y problemas. La antena tipo offset brinda la ventaja de no tener ningún tipo de obstrucción en su campo visual y un mejor acceso a la electrónica, pero su construcción es más elaborada. El reflector parabólico presenta una construcción más sencilla pero tiene una superficie efectiva menor y presenta cierta dificultad para montar el receptor en su foco debido a la altura.



Figura 9. Antena offset del Allen Telescope Array.



Antena reflector parabólico.

En ambos casos la electrónica de control y posicionamiento es la misma, variando solo la estructura de soporte y reflector parabólico. Las características de diseño preliminares son las siguientes:

- Diámetro mínimo 4.5 metros.
- Eficiencia de antena 60 %.
- Movimiento alt-azimutal, de “Horizonte a Horizonte”.
- Motores controlados mediante variadores de velocidad.
- Electrónica de control local y conectividad ethernet.
- Base de material u hormigón.

El costo estimado del conjunto por cada antena es de U\$D 1170.

### 6.2.2. Sección de radio frecuencia

La etapa de radiofrecuencia o *front-end* (Fig. 10), está basada en la transmisión de la señal analógica de RF mediante fibra óptica hacia la unidad digitalizadora en sala de control. La misma tendrá dos cadenas receptoras para brindar dos polarizaciones lineales ortogonales. El diseño por desarrollarse en el IAR presenta la novedad de que será fabricado en el mismo sustrato impreso que la antena, es decir que la antena será del tipo impresa y contendrá los amplificadores de bajo ruido, filtros y módulos de RFoF necesarios. De esta manera, se obtiene la gran ventaja de presentar una menor temperatura de sistema al eliminar cableados internos, una mejor aislación a fuentes de interferencia, menor costo y volumen. Las características de diseño preliminares son las siguientes:

- Alimentador tipo impreso Vivaldi polarización lineal.
- Temperatura de receptor = 45 K (primera etapa: Skyworks ultra-lna).
- Rango de frecuencia máximo, desde 1 GHz hasta 2.3 GHz.
- Ganancia total de RF = 60 dB.
- Módulo receptor de FO y conversión de frecuencia.

- Control de temperatura electrónica o TEC, mediante celda peltier.
- Un módulo por polarización, dos módulos en total.

El costo estimado por ambos módulos de RF para una sola antena es de 500 U\$D-FOB. Dicho desarrollo, una vez aceptado, podrá ser aplicado a ambos radiotelescopios como parte de las mejoras propuestas. El siguiente diagrama ilustra el módulo de radio frecuencia.

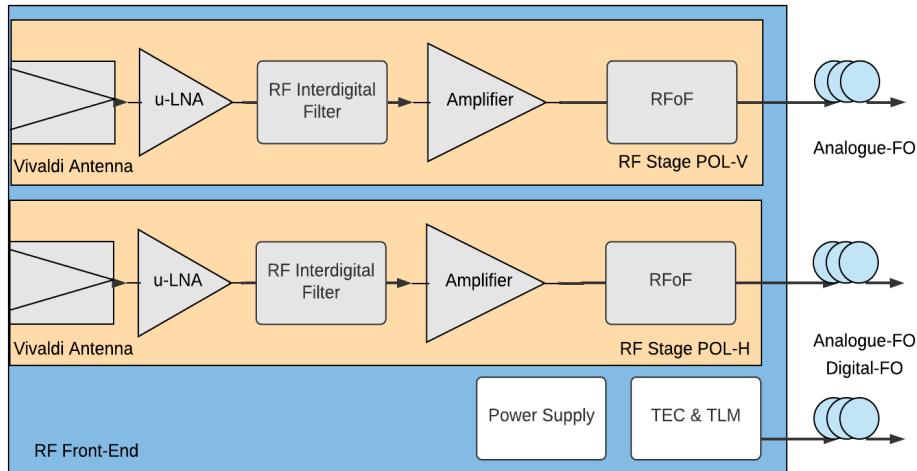


Figura 10. Diagrama de la sección de radiofrecuencia o Front-end.

### 6.2.3. Sección de digitalización

La sección de digitalización o Back-end Digital, está basado en las placas del grupo CASPER para instrumentación en radiotelescopios. Al presente, estas placas forman parte de los instrumentos astronómicos más importantes a nivel mundial, como el Square Kilometer Array en desarrollo, el Green Bank Telescope e incluso el proyecto Event Horizon Telescope. Las mismas representan la vanguardia en la adquisición y procesamiento de datos científicos. Esta placa se instalará en la sala de control para operar junto a los radiotelescopios del IAR y será utilizada de forma simultánea para los ensayos y verificación del funcionamiento del interferómetro. Las características principales de esta placa digitalizadora son:

- Doce entradas de señal de RF.
- Ancho de banda de digitalización instantáneo para seis entradas de 250 MHz.
- Comunicación vía red mediante dos puertos 10 Gbit SFP+.
- Programación mediante diseños y librerías *opensource* del grupo CASPER.

El costo FOB de cada una de estas placas es de 3500 U\$D. Dicha placa y los procesos que realiza serán verificados junto a los radiotelescopios del IAR, con la finalidad de extender la funcionalidad del instrumental. Esto permite utilizar todos los recursos de la placa junto a los instrumentos del IAR.

Las funciones específicas del receptor digital estarán definidas por su programación, por lo que será necesario desarrollar el software que se requiere para nuestro observatorio. Se utilizarán para esta tarea las herramientas y bibliotecas de *software* de acceso abierto, mencionadas anteriormente y disponibles para tal fin. Dichas herramientas ya están instaladas en el sistema informático del IAR.

#### **6.2.4. Sección de procesamiento y almacenamiento de datos**

Los datos generados por las placas de adquisición digital deben ser procesados por una computadora de alto rendimiento, la cual debe tener la capacidad de procesar información en tiempo real, es decir que el procesamiento se realiza junto a la adquisición de los datos. Para ello, se deben desarrollar programas de adquisición y procesamiento de datos basados en sistemas de procesadores gráficos (GPU). Las herramientas de proceso, así como librerías están disponibles de forma abierta u open source. La computadora de proceso cuenta con los siguientes detalles principales:

- Procesador Intel core i7 7700 K.
- Memoria Kingston 8 Gb DDR4 ECC.
- Disco de estado sólido SX6000 128 GB.
- Placa de proceso gráfico EVGA GTX 1080.
- Disco de almacenamiento Western Digital Purple Gold (Datacenter) 6 TB.
- Conectividad fibra óptica MiniGBic SFP+.
- Fiber Patches.

El costo estimado de dicho sistema es de U\$D 2250-FOB.

Uno de los productos principales para el desarrollo de la sección de proceso y digitalización de datos es la implementación de un correlador digital para interferometría. El componente central de este instrumento es el correlador digital, el cual adquiere las señales de las diferentes antenas y realiza su correlación. Se obtiene así el primer paso en el proceso de las señales y la posterior generación de la imagen radioastronómica mediante la síntesis de imágenes. Estas técnicas de proceso se emplearán luego en la correlación de observaciones de muy larga línea de base o VLBI. El sistema de proceso se basará en el procesador del instrumento HERA (De Boer et al. 2017), del cual se tomaron las características principales.

#### **6.2.5. Conectividad**

Para conectar cada una de las antenas, tanto la comunicación digital para el control de estas, como para las secciones analógicas de RF, se utilizarán diferentes enlaces y conectorizado de fibra óptica. El detalle de estos se describe a continuación:

- Enlace de fibra multimodo de 4 hilos para red digital por 350 metros.
- Enlace de fibra monomodo de 2 hilos para red analógica por 350 metros.

También es necesario contar con una estación de trabajo (computadora de escritorio) y para el manejo del prototipo y la ejecución de las rutinas de observación, esta estación de menor rendimiento que el sistema de adquisición se utiliza para la ejecución del sistema de forma remota.

El costo estimado de dicha sección es de 1350 U\$D.

#### **6.2.6.Sección de potencia y alimentación**

La sección de potencia y alimentación es la responsable de proveer las tensiones necesarias para cada etapa operativa del instrumento, ya que el mismo se divide en varias etapas y cada una de ellas alimenta diferentes secciones mediante diversas fuentes de alimentación. El mismo deberá tener su propia telemetría y unidad de control para verificar su correcto funcionamiento y distribución de las tensiones mediante un cableado apropiado.

Para presentar las características del mismo es necesario avanzar en el detalle de ingeniería de cada uno y su costo estimado en función de sistemas similares es de 450 U\$D-FOB.

#### **6.3. *Costos del prototipo***

La siguiente tabla presenta las secciones y sus costos estimados a modo de referencia:

Ítem	Nombre	Costo U\$D	Observaciones
6.2.1	Antena: 1170 U\$D x 3 unidades	3510	
6.2.2	Etapa de Radiofrecuencia: 500 U\$D x 3 unidades	1500	FOB
6.2.3	Sección de digitalización	3500	FOB
6.2.4	Proceso y almacenamiento de datos	2250	FOB
6.2.5	Conectividad	1350	
6.2.6	Sección de potencia y alimentación: 450 U\$D x3	1350	FOB
	Costo total estimado	13460	
	Costo total estimado + 20% de contingencia	16152	

Los costos presentados para la etapa del prototipo MIA Pathfinder no son representativos del instrumento definitivo, es decir que no se puede extrapolar el gasto de las

16 antenas en función de las 3 del prototipo. Esto se debe principalmente a que las unidades computacionales de adquisición de datos, proceso y correlación, así como de almacenamiento de datos, son de alto rendimiento y de exigencia mucho mayores. De esta manera, se podrá cumplir con el requerimiento de trabajar con 16 antenas, la cual será compatible con una futura extensión de 64 antenas.

#### ***6.4. Etapa 1 - infraestructura***

Teniendo en cuenta que ya existe cierta infraestructura en el sitio seleccionado, como caminos de acceso, electricidad, conectividad y edificaciones, la infraestructura prevista constaría únicamente del emplazamiento de las antenas y de su interconexión. Esto incluye básicamente los siguientes puntos:

- Fundación para cada antena.
- Tendido de fibra óptica para la interconexión de hasta 100 km y distribución de señales de referencia.
- Tendido de líneas de tensión para cada antena, trifásica de 220 Vac.
- Instalación de shelters para cada nodo.
- Instalación de GPS en shelters para distribución de tiempo.

#### ***6.5. Etapa 2 - construcción de equipos e instalación en sitio***

La instalación en el sitio comprende el traslado de las antenas desde su lugar de construcción, en principio el IAR, hasta cada punto de instalación en sus bases y su posterior conexión. La construcción de cada antena con sus módulos de electrónica, radiofrecuencia, fibra óptica, etc. se realizará de forma simultánea con la construcción de la infraestructura necesaria del ítem 6.4.

#### ***6.6. Etapa 3 - verificación funcional***

Una vez instaladas todas las antenas en su sitio, se procede con la verificación operativa de cada una de ellas de forma independiente, para luego hacer los ensayos de interferometría. Las rutinas y programas para la ejecución de las diferentes verificaciones que se deben realizar se llevarán a cabo durante la etapa de verificación del prototipo.

#### ***6.7. Etapa 4 - verificación de ciencia***

En esta última etapa se verifica el rendimiento del instrumento y su capacidad de generar los productos de ciencia requeridos. Utilizando la aplicación anteriormente descrita para la simulación de la respuesta de un interferómetro, y con las 16 antenas dando una línea de base máxima de 50 km (Fig. 11) simularemos su respuesta, donde la resolución angular debería ser del orden de un segundo de arco. Con esta mejor resolución angular se aprecian muchos más detalles de la morfología de la estructura interna de la emisión de la imagen

utilizada a modo de ejemplo (Fig. 12). Esta etapa hará un extenso uso del know-how adquirido durante el desarrollo del prototipo el cual será utilizado directamente en el instrumento.

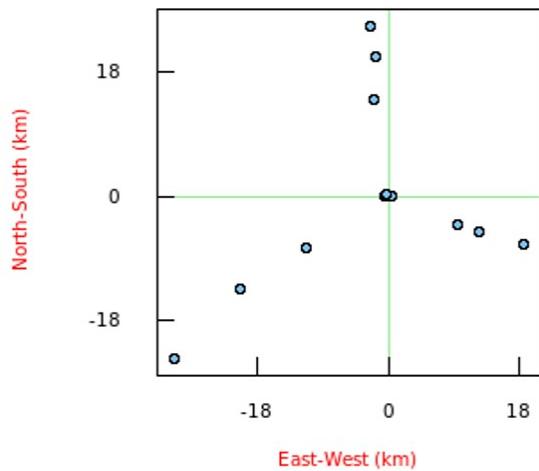


Figura 11: Distribución espacial de las 16 antenas.

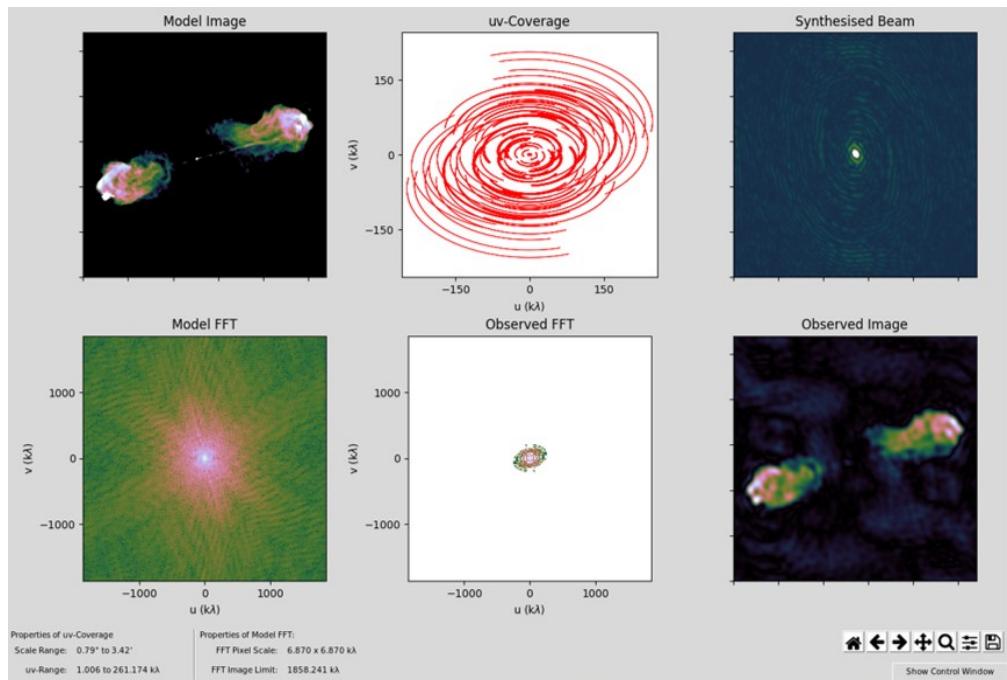
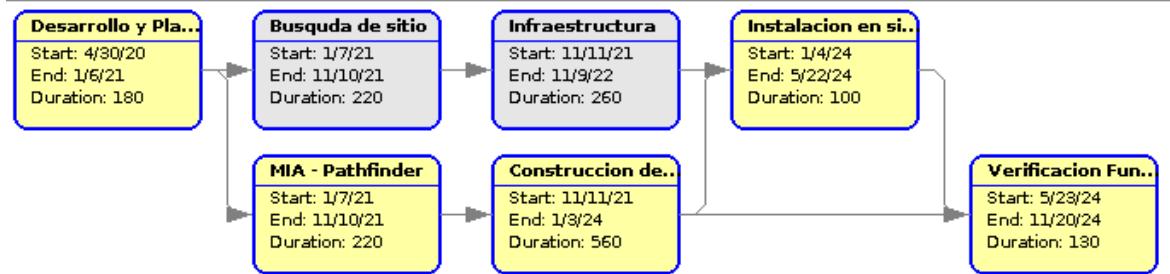


Figura 12: Respuesta simulada del arreglo propuesto de 16 antenas, con ancho de lóbulo sintetizado de un segundo de arco.

## 6.8. Diagrama temporal

Las tareas presentadas anteriormente se estiman tengan una duración aproximada de un año de ejecución, a continuación se presenta un diagrama con la distribución de las tareas planteadas.



## 7. Posibilidad de expansión instrumental

Una vez construido y verificado el instrumento con sus 16 antenas principales, se abren posibilidades de nuevas líneas de investigación científica e instrumentación. Las etapas de adquisición y correlador digital podrán compartirse o extenderse con diferentes tipos de antenas y a diferentes frecuencias. Un ejemplo de esto son las antenas de baja frecuencia para el estudio de la época de reionización en radio. Para este estudio se necesita realizar mapas del cielo y estudiar la línea de emisión en radio a altos corrimientos al rojo (valores de  $z$  de 7 a 12), que corresponde a las frecuencias de 100 MHz a 200 MHz, utilizando arreglos de antenas de muy bajo costo dispuestas en un área determinada. Cada una de estas antenas, de un costo mucho menor al de una antena parabólica, se conecta a las mismas unidades de digitalización y correlación utilizadas por el instrumento principal. Debido al bajo costo de cada elemento receptor o antena, se puede instalar una mayor cantidad de antenas, que como resultado da una mayor área colectora y sensibilidad a bajas frecuencias. Se muestra una de las antenas de bajo costo (Fig. 13) del proyecto PAPER para el estudio de la época de reionización en radio instalado en el desierto de Karoo en Sudáfrica [<http://eor.berkeley.edu/>], y un diagrama (Fig. 14) de un nodo auxiliar para conectarse a la misma red del sistema de adquisición y correlación.



Figura 13. Fotografía de una antena del proyecto PAPER instalado en Sudáfrica.

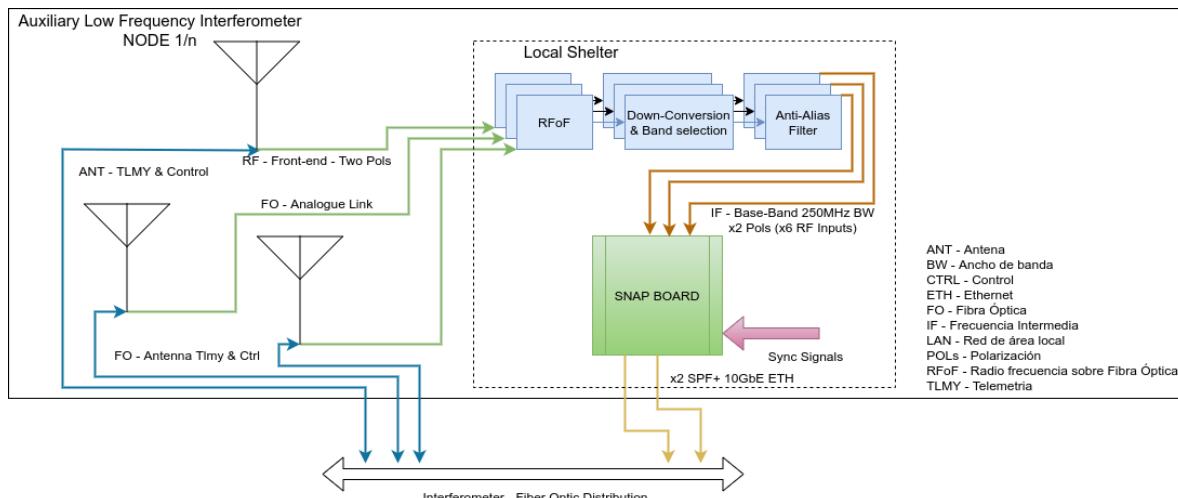


Figura 14. Diagrama de un nodo auxiliar para elementos de antenas a diferentes frecuencias.

## 8. Sinergias con otros instrumentos en el país y el mundo

## 9. Recursos humanos

### 9.1. Recursos humanos necesarios para el diseño y operación del instrumento

Los recursos humanos principales para el diseño y operación del instrumento “MIA-Pathfinder” se ubican dentro del personal actual del IAR, los mismos cuentan con más de diez años de experiencia en desarrollos tecnológicos de alto nivel y los cuales garantizan la ejecución de las diferentes etapas del diseño y desarrollo del instrumento, de ellos se desprenden los siguientes perfiles requeridos, que corresponden al personal disponible:

- Gestión técnica del proyecto (Project Manager), definición de objetivos y requerimientos, planificación, evaluación de avance y supervisión.
- Diseño electromagnético de antenas y alimentadores.
- Diseño de receptor y etapas de radio frecuencia.
- Armado y ensamblaje de módulos electrónicos.
- Verificación y validación de los sistemas de radiofrecuencia.
- Diseño de planos y gabinetes de electrónica
- Diseño de estructuras y antenas.
- Construcción de estructuras mecánicas y antenas.
- Programación de software sistemas digitales de adquisición.
- Programación de hardware de los sistemas digitales de adquisición.
- Programación de los sistemas de observación, control y monitoreo del instrumento
- Programación para productos de ciencia y Operación del instrumento.

### ***9.2. Recursos humanos a formar durante el desarrollo del instrumento.***

Durante el desarrollo del instrumento, el cual hace uso de las tecnologías de última generación, se abre la posibilidad de formar nuevos recursos en diversas áreas como ser la ingeniería electrónica, ingeniería en sistemas informáticos, e ingeniería mecánica, además de permitir el intercambio con expertos en áreas de desarrollo instrumental. De forma general se puede trabajar con dos aspectos en las carreras de ingeniería:

- Ingeniería electrónica/mecánica/sistemas, prácticas profesionales: para estudiantes del último año de la carrera: con una duración de 2 a 4 meses trabajando junto a un profesional en el desarrollo o construcción de algún modulo determinado.
- Ingeniería electrónica/mecánica/sistemas, tesis final de grado: para estudiantes del ultimo año de la carrera con una duración de 12 meses, donde deberá llevar adelante el desarrollo de algún modulo en particular siendo supervisado y dirigido por un profesional durante el periodo.

Algunos de los puntos específicos que el desarrollo del instrumento permitirá formar son los siguientes:

- Formación en desarrollo amplificadores y filtros de radiofrecuencia, así como en el uso de instrumental de medición.
- Formación en el desarrollo de sistemas de control digital y aplicaciones de microcontroladores.
- Formación en el desarrollo de software de control, y telemetría de sistemas digitales.
- Formación en la aplicación y diseño de estructuras mecánicas y utilización de herramientas de diseño CAD.
- Formación en desarrollo de software de aplicaciones para productos de ciencia.

### **9.3. Potencial para formación de nuevos recursos humanos luego del comienzo de las operaciones.**

## **10. Oportunidad de transferencia de tecnología y vinculación tecnológica**

El IAR es proveedor tecnológico de instituciones del más alto nivel, como CONAE, INVAP, CNEA, ENACOM e INTI entre otras, transfiriendo tecnología a través del CONICET, a los organismos más importantes que forman parte del sector Aeroespacial y de comunicaciones a nivel nacional. El IAR participó en grandes misiones con impacto socio-económico tales como la misión satelital SAC-C, la misión satelital SAC-D, los lanzadores TRONADOR-II (vehículo y en el segmento terreno), la misión satelital SAOCOM, el Plan Nacional de Radarización, entre otras misiones de gran importancia a nivel nacional. Actualmente se encuentra desarrollando uno de los instrumentos principales del satélite SABIA-MAR. El proyecto MIA sería de gran valor estratégico, ya que permitiría mantener la dinámica y la actualización del know-how del personal técnico, en temas estratégicos tales como la ingeniería en materiales, el diseño estructural, la gestión de bases de datos, el control de procesos, los sistemas de radiofrecuencia, la electrónica de potencia y el procesamiento de señales, entre otros.

De esta manera, el proyecto MIA abriría un abanico de posibilidades, no solo de vinculación tecnológica, sino también de transferencia de tecnología y conocimiento tecnológico, teniendo el potencial de convertirse en incubadora de nuevos conocimientos y productos, transferibles no solo a los sectores académicos, sino también a los sectores productivos tanto públicos como privados. En la actualidad existe un auge en la puesta en órbita de satélites de investigación universitaria (CubeSat) y nano satélites, debido al bajo coste de construcción y tiempo de ensamblaje. Dichas misiones satelitales, usualmente no pueden afrontar los costos de montar su propia red de estaciones terrenas o de alquilar dichos servicios a las agencias espaciales. Es por este motivo que MIA podría ser una oportunidad de vinculación entre el IAR y este tipo de misiones. Partiendo de los sistemas de comunicación de los nano satélites, se puede adaptar el receptor y las antenas desarrolladas para MIA, formando así una red de estaciones terrenas para bajada de datos, dando soporte a este tipo de misiones satelitales de bajo costo, y aprovechando el despliegue de una red de estaciones terrenas. De esta manera, se podrá brindar apoyo a las misiones académicas, o de empresas que se estén iniciando en el ámbito satelital.

## **11. Conclusiones**

Se presenta a modo de propuesta, el desarrollo de un nuevo instrumento observacional, que pretende extender la infraestructura radioastronómica actual en la Argentina y continuar con las observaciones que se realizan de forma diaria en el IAR. El proyecto se presenta como una oportunidad para trabajar en conjunto con otros institutos nacionales y extranjeros relacionados con la investigación astronómica y el desarrollo instrumental, el cual permitirá capacitar una nueva generación de radioastrónomos e ingenieros en la Argentina. Desde el punto de vista científico, el proyecto permitirá incorporar un nuevo telescopio con buena resolución angular (la mejor obtenida por un telescopio argentino), que nos acerca al estado del arte actual en el plano internacional. Es

también un telescopio que atraerá a jóvenes investigadores argentinos a temas de investigación desde un punto de vista novedoso para nuestro país.

## **12. Referencias**

- Arnal E.M., P. Benaglia, G.E. Romero, et al., BAAA 49, 2006.  
Bajaja E., E. M. Arnal, J. J. Larrarte, et al., A&A 440, 2005.  
Carignan C., et al., AJ 146, 2013.  
Colomb, F.R., Poppel, W.G.L., Heiles, C., et al., A&AS 40, 1980.  
DeBoer D.R., PASP 129, 2017.  
Gancio, G., Lousto, C. O., Combi, L., et al., A&A 633, 2020.  
Hickish J., Z. Abdurashidova, Z. Ali, et al., JAI 5, 2016.  
Kocz J., V. Ravi, M. Catha, et al., MNRAS 489, 2019.  
Testori J. C., P. Reich, J. A. Bava, et al., A&A 368, 2001.