

# Designing a radio-interferometric array of Yagi-Uda antennas with spectral window centre at 400 MHz

**Ángel G. Muñoz S. & Leonardo Hernández V.**

*Grupo de Investigaciones de Física Teórica, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad del Zulia. E-mails: agmunoz@luz.ve / leohernan@ieee.org*

## Abstract

It is well known that the observation of celestial bodies through the use of radioastronomic devices has, generally speaking, important advantages in comparison to traditional studies concerning the visual spectrum. Moreover, radio-interferometry gives additional advantages to the device, such as the enhancement of the signal receptor effective area, higher gaining and better array directivity. Despite the number of experimental details, the design of a radio-telescope made up of an array of antennas whose radiation fields interfere among themselves does not involve excessive theoretical complications, in particular if Yagi-Uda antennas are used. The authors describe in this paper the designing and characteristics of a radio-interferometric array with Mills Cross symmetry, 4x4 twelve elements Yagi-Uda antennas, set to 400 MHz. Finally, the potential of the array is briefly analysed in order to be used for radio-heliographics studies.

**Key words:** Instrumentation: interferometers, radiotelescope: Yagi-Uda, radio-interferometry.

## Diseño de un arreglo radiointerferométrico de antenas Yagi-Uda con centro de ventana espectral en 400 MHz

### Resumen

Es bien sabido que la observación de objetos celestes a través del empleo de instrumentos radioastronómicos posee en general importantes ventajas con respecto a los tradicionales estudios en el espectro visible. Además, la radiointerferometría otorga ventajas adicionales al instrumento, como el aumento del área efectiva del receptor de señal, mayor ganancia y directividad del arreglo. A pesar de la cantidad de detalles experimentales, el diseño de un radiotelescopio conformado por un arreglo de antenas cuyos campos de radiación interfieren entre sí no involucra excesivas complicaciones teóricas, en particular si se emplean antenas Yagi-Uda. Los autores describen en el presente trabajo el diseño y características de un arreglo radiointerferométrico con simetría tipo Cruz de Mills de 4x4 antenas Yagi-Uda de 12 elementos, con centro de ventana espectral en 400 MHz. Finalmente, se analiza brevemente el potencial del arreglo para estudios radioheliográficos.

**Palabras clave:** Instrumentación: interferómetros, radiotelescopio: Yagi-Uda, radiointerferometría.

### 1. Introducción

Existen diferencias importantes entre el espectro visible y el espectro de radio. La longitud de onda del intervalo espectral correspondiente a

las ondas de radio abarca desde el orden de los milímetros ( $10^{-3}$  m) hasta las decenas de kilómetros ( $10^4$  m), si bien el rango asociado a la recepción de señales de radio provenientes del espacio es menor (aproximadamente entre  $10^{-3}$  y  $10^2$  m),

debido a la reflexión ionosférica de la atmósfera terrestre [1]. Pero el rango espectral de la radiación visible se encuentra ubicado apenas entre las 0,8 y 0,4 micras (en el orden de  $10^{-6}$  m). Adicionalmente, las nubes son transparentes a las ondas electromagnéticas correspondientes a la ventana de radio y éstas a su vez no interfieren con las ondas correspondientes al visible, por lo que es posible recibir información del cielo independientemente de la nubosidad y de la hora del día; obviando pérdidas atmosféricas, en general basta con que el campo directivo del radiotelescopio esté apuntando hacia la fuente objeto de estudio y que las frecuencias de emisión y recepción coincidan para poder obtener medidas, mejores o peores de acuerdo a las características particulares del instrumento. La interferometría también proporciona otra ventaja a la radioastronomía: es posible construir un conjunto de radiotelescopios dispuestos de manera tal que se comporten como un único instrumento mayor. De allí que se suelen emplear arreglos radiointerferométricos para maximizar los parámetros de recepción de señal.

La ubicación geográfica privilegiada de Venezuela permite hacer observaciones de un amplio número de objetos celestes tanto del hemisferio boreal como del austral, por lo que la construcción de un arreglo de radioantenas a esta latitud resulta un proyecto prometedor.

Aunque es cierto que hablar de un arreglo radiointerferométrico<sup>1</sup> de gran escala involucra una gran inversión, puede diseñarse un arreglo radiotelescópico sencillo de muy bajo costo y esfuerzo, y que sin embargo sea útil para la determinación de ciertos parámetros físicos de la radiofuente. Técnicamente hablando, el objetivo principal del presente trabajo es diseñar un radiointerferómetro que bajo los criterios de funcionalidad, portabilidad y economía, proporcione ganancia y directividad máximas.

Para este fin, puede emplearse como base una antena muy común y económica en la actualidad: la Yagi-Uda, inventada en Japón en 1926 por S. Uda y dada a conocer internacionalmente poco después por H. Yagi. La característica más

importante de esta antena es su simplicidad: consiste en un dipolo resonante de media onda y varios dipolos cortocircuitados: el primero, conocido como **elemento activo**, es conectado por su centro directamente a una línea de transmisión, mientras que los otros (**elementos parásitos**), actúan como radiadores cuyas corrientes son inducidas por acoplamiento mutuo y están dispuestos todos en un mismo plano, sobre un soporte común (*boom*) y paralelos entre sí (Figura 1) [2].

Así pues, tras una breve revisión de las ecuaciones básicas en la sección 2, se presenta en las siguientes páginas la descripción del diseño (sección 3) y las características electromagnéticas (sección 4) de un arreglo de antenas Yagi-Uda, con una ventana espectral de recepción cuyo centro está a una frecuencia UHF de 400 MHz (una longitud de onda de 75 cm). En la sección 5 se explorará el potencial del arreglo para observaciones de la corona interior solar y se finaliza con la sección de discusión de resultados.

## 2. Ecuaciones Básicas

Para pequeños diámetros (con respecto a la distancia a la fuente  $z'$ ) de los elementos que conforman la antena Yagi-Uda, la corriente ( $I_n$ ) sobre cada uno de ellos se puede aproximar por la siguiente serie finita de Fourier:

$$I_n(z') = \sum_{m=1}^M I_{mn} \cos\left[(2m-1)\frac{\pi z'}{l_n}\right], \quad m = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (1)$$

donde  $I_{mn}$  representa el coeficiente de corriente compleja de modo  $m$  (componente armónica de la corriente para cada elemento) sobre el elemento  $n$  y  $l_n$  la correspondiente longitud del elemento.

Usando la formulación de los potenciales retardados [2], se puede demostrar que el campo eléctrico radiado por todos los elementos de la antena Yagi-Uda, cada uno con una corriente dada por (1), es:

$$\vec{E}_\theta = \sum_{n=1}^N \vec{E}_{\theta_n} = -jn \frac{e^{-jkr}}{4r} \vec{F}_T(\theta, \phi), \quad (2)$$

1 Se refiere a un conjunto de radio-receptores trabajando como un único instrumento a través de interferometría.

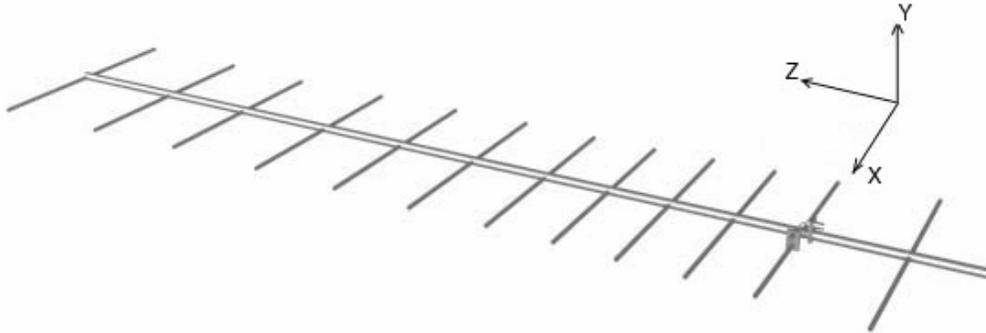


Figura 1. Vista general de una antena Yagi-Uda de 12 elementos. De derecha a izquierda: un reflector, un elemento activo (con un adaptador Gamma) y diez directores. Se indica la escogencia de los ejes coordenados.

donde,

$$|\vec{F}_T(\theta, \phi)| = \text{sen } \theta \sum_{n=1}^N \left\{ I_n e^{j\Psi_n} \left[ \sum_{m=1}^M (-1)^m \frac{(2m-1)I_{mn} \cos\left(\frac{\pi I_n}{\lambda} \cos \theta\right)}{(2m-1)^2 - \left(\frac{2I_n}{\lambda} \cos \theta\right)^2} \right] \right\} \quad (3)$$

proporciona el diagrama de radiación y

$$\vec{\Psi}_n \equiv k(\hat{\gamma}_n \text{sen } \theta \cos \phi + \hat{y}_n \text{sen } \theta \text{sen } \phi + \hat{z}_n \cos \theta) \quad (4)$$

siendo  $\lambda$  la longitud de onda,  $k$  el número de onda,  $\theta$  y  $\phi$  las coordenadas altazimutales y  $j \equiv \sqrt{-1}$ .

Una vez escogida la Yagi-Uda como antena base, se procede a calcular el diagrama de radiación para un arreglo planar de  $A \times B$  antenas iguales equiespaciadas (Figura 2) y con excitación uniforme, que vendrá dado por [2]:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 FA(\vec{\Psi}) \quad (5)$$

siendo

$$|FA(\vec{\Psi})| = \sum_{m=0}^{A-1} \sum_{n=0}^{B-1} a_m a_n e^{jm\Psi_x} e^{jn\Psi_y} = \frac{1}{AB} \left( \frac{\text{sen } \frac{A\Psi_x}{2} \text{sen } \frac{B\Psi_y}{2}}{\text{sen } \frac{\Psi_x}{2} \text{sen } \frac{\Psi_y}{2}} \right) \quad (6)$$

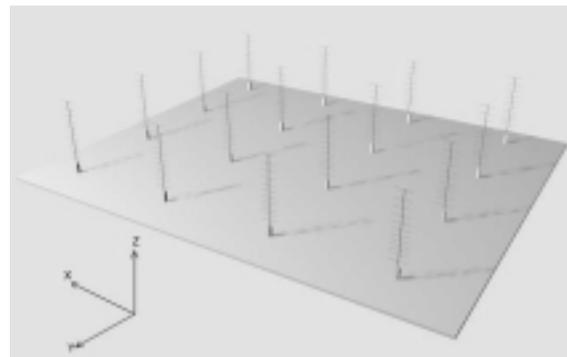


Figura 2. Vista general del arreglo planar de 16 antenas Yagi-Uda sugerido en el presente trabajo. La distancia inter-antenas es de 3.58m y el área total es de aproximadamente 115.52m<sup>2</sup>.

siendo los coeficientes  $a_m$  y  $a_n$  las magnitudes de las corrientes de excitación de las antenas base. De (4),

$$\begin{aligned} \Psi_x &= kd \text{sen } \theta \cos \phi + \beta \\ \Psi_y &= kd \text{sen } \theta \text{sen } \phi + \beta' \end{aligned} \quad (7)$$

con  $\beta$  el desfase de la corriente entre antenas y  $d$  la distancia entre las mismas.

Por otra parte, se ha demostrado que la presencia de la tierra induce una modificación importante en el diagrama de radiación total [2, 3]; así, para una antena con polarización horizontal, ubicada a una altura  $h$  sobre una superficie conductora (una rejilla sobre la superficie terrestre, con cuadrículas de lado menor que  $0,1 \lambda$ ) el factor de arreglo generado es:

$$FA_R(\Psi) = \frac{1}{2} \left( \frac{\text{sen } \Psi_R}{\text{sen } \frac{\Psi_R}{2}} \right) \quad (8)$$

donde

$$\Psi_R = 2kh \cos \theta \pm \pi \quad (9)$$

El diagrama de radiación total, que describe la forma del campo eléctrico del arreglo radiointerferométrico que se busca es, pues,

$$\vec{E}_T = \vec{E}_0 FA_T(\Psi) = \vec{E}_0 FA(\Psi) FA_R(\Psi) \quad (10)$$

El factor  $\vec{E}_0$  en (10) no es más que la contribución al campo total definida por el campo radiado de la antena escogida como base del arreglo, en nuestro caso dada por (2). La directividad de un arreglo puede calcularse, hasta primer orden de exactitud debido a que existe un lóbulo principal y lóbulos secundarios de valores reducidos (modelo rectangular), en función del ángulo sólido definido por los anchos de haz a media potencia en las coordenadas altitudinal y azimutal,  $\Delta\theta$  y  $\Delta\phi$ , respectivamente [3]:

$$D(\theta, \phi) \cong \frac{4\pi}{\Delta\theta\Delta\phi} \quad (11)$$

mientras que su eficiencia será, consistentemente hasta primer orden de exactitud:

$$\eta \cong \frac{G(\theta, \phi)}{D(\theta, \phi)} \quad (12)$$

donde  $G(\theta, \phi)$  es la ganancia del instrumento. Finalmente, su área efectiva puede calcularse, en función del ángulo sólido del haz, por medio de [4]:

$$A_e \cong \frac{\lambda^2}{\Delta\theta\Delta\phi} \quad (13)$$

### 3. Diseño del Arreglo

El problema estriba en diseñar un conjunto de antenas bajo los requerimientos de funcionalidad, portabilidad y economía, que proporcionen ganancia y directividad máximas, así como un ancho de haz a media potencia (AHMP) pequeño. Por pequeño se entiende del orden de unas pocas

veces el diámetro angular de la radiofuente en estudio.

El objetivo físico del arreglo es el estudio electro-magnético de la corona interior del Sol, astro que ostenta aproximadamente  $0.5^\circ$  en la bóveda celeste. Una frecuencia adecuada para este estudio es 400 MHz, en la banda UHF. Se requiere que el arreglo a diseñar sea lo suficientemente portátil como para poder llevar el conjunto de antenas al sitio deseado para las observaciones y como para cambiar fácilmente el área efectiva del arreglo simplemente variando la distancia entre las antenas. El hecho de escoger las Yagi-Uda garantiza, en principio, la economía del arreglo. El requerimiento de una determinada amplitud del haz principal de radiación es uno de los más importantes, puesto que para observar la corona interior solar de manera adecuada sería necesario, en términos del arreglo, un ancho del haz entre los primeros nulos (AHPN) del orden de los  $5^\circ$  ó  $6^\circ$ .

Las longitudes y diámetros de los elementos, así como las respectivas distancias de unos a otros, determinan las óptimas características de la antena base en cuestión, y a su vez la determinación de tales valores óptimos juega un papel fundamental en el diseño posterior del arreglo. Para llevar a cabo esta tarea pueden emplearse métodos experimentales, como en [5], simulaciones numéricas o bien procedimientos netamente analíticos (véase [6]). En el presente trabajo se partirá de valores experimentales como datos iniciales y se procederá, en base a los criterios expuestos, a elaborar un código en lenguaje C que proporcione los valores óptimos de los diversos parámetros de las antenas y el arreglo total.

La antena Yagi-Uda más sencilla que se puede construir es la formada por un reflector, un dipolo de media onda y un director, y puede alcanzar una directividad de hasta 9 dBi. Directividades mayores, del orden de 18 dBi, pueden ser alcanzadas si se incrementa el número de elementos, aunque tal incremento posee un límite práctico [4]. La idea es que la antena base resultante se ubique entre ambos extremos de manera que cumpla los requisitos recién expuestos. Una vez diseñada, se empleará un arreglo planar uniforme para la distribución de las antenas, debido a la simplicidad que éste conlleva (ver ec. (5)).

Tabla 1  
Longitud y espaciado de elementos de la Yagi-Uda Optimizada (cm)

Elemento	Espaciado	Longitud	Elemento	Espaciado	Longitud
Reflector	17,957	37,441	Director 05	17,383	32,445
Activo	0,000	35,319	Director 06	18,246	31,114
Director 01	12,938	33,816	Director 07	20,421	32,646
Director 02	13,528	33,369	Director 08	22,315	33,011
Director 03	13,602	32,883	Director 09	24,935	31,915
Director 04	15,360	31,665	Director 10	28,604	31,372

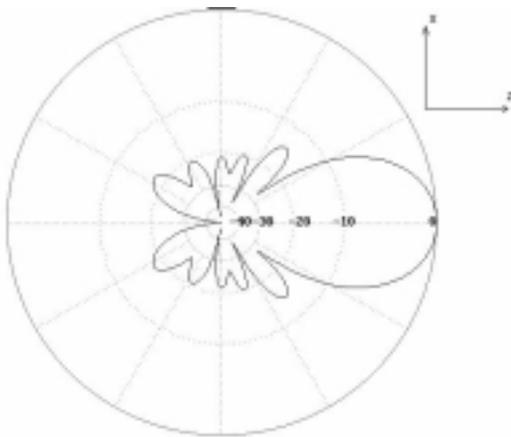


Figura 3. Campo de radiación de la antena base a 90° de elevación (plano del campo eléctrico **E**), a 400 MHz y en espacio libre.

Se observa un AHMP de 38,5°.  
Normalizado a 0 dB = 14,50 dBi.

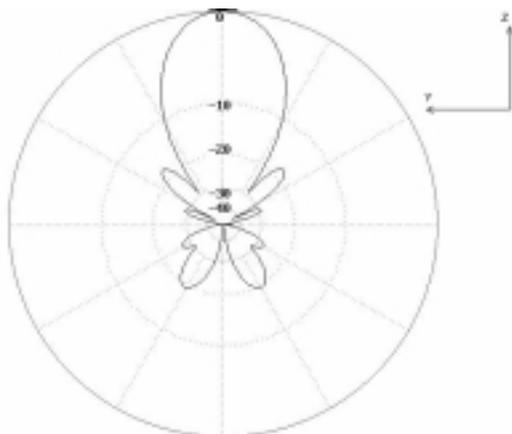


Figura 4. Campo de radiación de la antena base a 0° de elevación (plano del campo magnético **H**), a 400 MHz y en espacio libre.

Se observa un AHMP de 35,9°.  
Normalizado a 0 dB = 14,50 dBi.

### 3.1. Las antenas base

El diseño inicial de la antena se realizó en función de datos proporcionados en investigaciones experimentales llevadas a cabo por la *National Bureau of Standards* [4] para determinar cómo seis parámetros, a saber: el diámetro, longitud y separación de los elementos, el diámetro del soporte (*boom*), el número de reflectores y la longitud total de la antena, afectan la medida de su ganancia, directividad y ancho del haz a media potencia. Se escogió que, en base a los criterios de diseño escogidos, un diseño versátil y económico consideraría una frecuencia central de 400 MHz, un elemento activo, un reflector y diez directores; doce elementos en total. Conociendo esto, la referencia recién mencionada proporcionó los parámetros iniciales de diseño, a partir de los cuales se llevó a cabo una optimización numérica que proporcionó las máximas directividad y ganancia posibles, así como un ancho de haz mínimo. Los parámetros de diseño finales son visibles en la Tabla 1 (sección 4). El correspondiente campo de radiación de la antena se obtuvo numéricamente de la ecs. (2)-(3), y se muestra en coordenadas polares logarítmicas en las Figuras 3 y 4.

Teniendo el cálculo numérico de la ganancia, y los valores de apertura del haz para cada componente del campo total, pueden calcularse fácilmente la directividad (11), la eficiencia (12) y el área efectiva (13) de la antena (sección 4.1).

### 3.2. El adaptador gamma

Usualmente la antena Yagi-Uda tiene baja impedancia de entrada. Una vía para aumentarla sin afectar el desempeño de otros parámetros y

Tabla 2  
Características del adaptador gamma a 400 MHz para una impedancia de entrada de 50  $\Omega$

Diámetro Elem. Control.: 0,930 cm	Diámetro Cil gamma: 0,930 cm
Resistencia Elem. Control.: 31,0 $\Omega$	Espaciado Cil. Gamma: 2,700 cm
Reactancia Elem. Control.: -15,1 $\Omega$	Longitud Cil. gamma: 4,920 cm
Impedancia del coaxial: 50,0 $\Omega$	Capacitor gamma: 6,4 pf



Figura 5. Vista general del adaptador gamma.  
El elemento visible es el activo.

poder así adaptar la antena a la línea de transmisión es usar un elemento elevador de impedancia, tal como un adaptador gamma para líneas coaxiales de 50 ó 75  $\Omega$ . Tal dispositivo no es más que un capacitor cilíndrico que debe ser calibrado en función de la impedancia deseada. Las características del adaptador óptimo para la antena se muestran en la Tabla 2 y su aspecto general puede visualizarse en la Figura 5.

### 3.3. El arreglo interferométrico

La resolución de un radiotelescopio puede mejorarse aumentando la apertura útil del instrumento, que en el caso de una Yagi-Uda implica el incremento del número de directores. Sin embargo, este procedimiento posee sus limitaciones, ya que como se ha mencionado anteriormente, existe un límite máximo de ganancia para estas antenas aunque se aumenten indefinidamente los directores.

La solución más adecuada al problema es aumentar el área efectiva del instrumento, haciendo uso, por ejemplo, de una distribución planar de antenas equiespaciadas una distancia  $d$  entre sí. Se escogió así un arreglo planar cuadrado de dieciséis antenas ( $A = B = 4$ , ver ecs. (5)-(6)) y se procedió a calcular las características electromagnéticas; básicamente la configuración

necesaria para producir una apertura del lóbulo principal del arreglo del orden de 5° ó 6° con máxima ganancia. Este orden de apertura de haz tiene fácil explicación: para un radiointerferómetro, el ancho del haz entre los primeros nulos (AHPN) del lóbulo principal ( $\theta = \pi / 2$ ) está dado por [7]:

$$AHPN = 2\text{sen}^{-1}\left(\frac{1}{Nd_\lambda}\right) \quad (14)$$

donde  $d_\lambda = d / \lambda$ . Si excede la unidad, aparecen lóbulos laterales que son de igual amplitud que el lóbulo principal. Estos son llamados grandes lóbulos y tienen un espaciado desde el lóbulo principal de [7]:

$$\theta_G = \text{sen}^{-1}\left(\frac{m}{d_\lambda}\right) \quad m = 1,2,3, \dots \quad (15)$$

Si  $\theta_G$  es más grande que la extensión de la fuente, sólo un lóbulo del patrón estará sobre la fuente a la vez. Al escoger el AHPN del orden mencionado, se tiene un ancho del haz lo suficientemente grande como para efectuar medidas adecuadas de la fuente. Si la apertura es muy cercana al diámetro angular del astro, el tiempo de tránsito de éste a través del lóbulo será muy pequeño, dificultándose las medidas. Por el contrario, si el AHPN es mucho mayor que el diámetro de la fuente, se corre el riesgo de recibir ruido de otras fuentes distintas a la de interés, se perdería directividad. Para evitar efectos de confusión, en todo caso, siempre hay que tratar de que no existan otras fuentes de significativa potencia en los grandes lóbulos.

En radioastronomía, cuando se trabaja con un interferómetro a lo largo de una línea Este-Oeste junto con un sistema similar trabajando en una línea Norte-Sur, el resultado es precisamente un arreglo cuya proyección en el plano

tangente al cenit es una cruz. Tales interferómetros, comúnmente llamados Cruz de Mills [8], son usados ampliamente. En este tipo de arreglo, si se hace la diferencia entre los registros obtenidos con ambas líneas de antenas conectadas en fase y en oposición de fase, el resultado es un registro que corresponde a las señales procedentes del área central de la cruz. El presente arreglo es un ejemplo de dicho tipo de distribución. Del cálculo numérico de (10) se obtiene el patrón de radiación, visible en sus componentes en las Figuras 6 y 7, y en coordenadas esféricas en la Figura 8.

En vista de que precisamente se desea obtener una máxima radiación en el plano perpendicular al arreglo, no debe existir progresión de fase en las corrientes, con lo que  $\beta$  debe ser nula en la ecuación (7). Experimentalmente esto se logra haciendo que la red de excitación sea uniforme desde cada uno de los elementos del arreglo hasta el receptor.

Deseando un  $AHPN=6^\circ$ , y con los valores  $\lambda = 0,75$  m y  $A = 4$ , de la ecuación (14) se obtiene la distancia correcta a la que hay que espaciar las antenas para el diagrama de radiación buscado. Ver sección 4.3 para los valores obtenidos.

## 4. Características

### 4.1. Antena base

El diseño contempla una antena Yagi-Uda de doce elementos (diez directores, un reflector y un alimentador), con una longitud total de 2,10 m. Se escogió el diámetro de los elementos parásitos en 0,93 cm (3/8") y el diámetro del soporte de 2,54 cm (1"), debido a la existencia de cilindros de aluminio comerciales con estas medidas. En cuanto a la longitud y espaciado de los elementos, los resultados se muestran en la Tabla 1.

El cálculo numérico provee los siguientes valores para las aperturas del haz:

$$\text{Plano E: } \Delta\theta = 38,5^\circ = 0,672 \text{ rad} \quad (16)$$

$$\text{Plano H: } \Delta\phi = 35,9^\circ = 0,627 \text{ rad} \quad (17)$$

Análogamente, se obtuvo una ganancia:

$$G = 14,50 \text{ dBi} \quad (18)$$

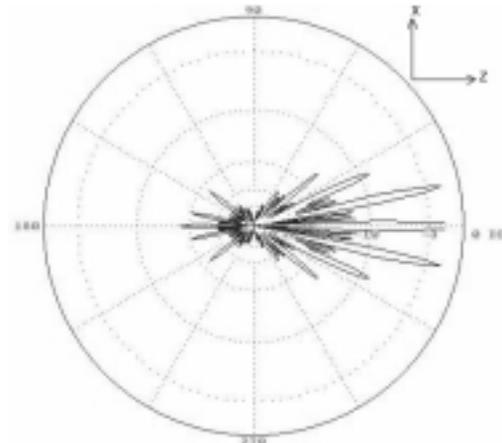


Figura 6. Campo de radiación del arreglo 4×4 para el plano del campo eléctrico  $E$ , a 400 MHz. Normalizado a 20.79 dBi.

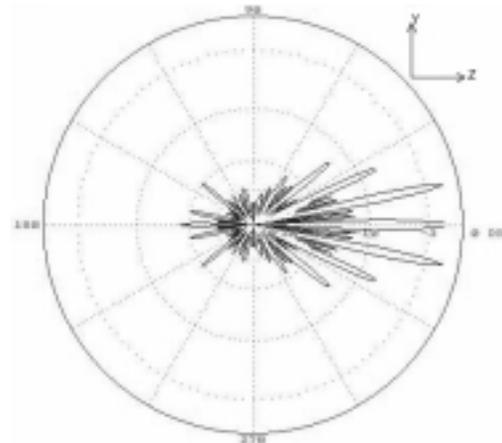


Figura 7. Campo de radiación del arreglo 4×4 para el plano del campo magnético  $H$ , a 400 MHz. Normalizado a 20.79 dBi.

Y, a partir de (11), (16) y (17), se obtiene una directividad:

$$D \approx 29,8467 = 14,7485 \text{ dBi} \quad (19)$$

Como conocemos (18) y (19), de (12) tenemos,

$$\eta = 0,9832 \quad (20)$$

Luego tenemos una antena Yagi-Uda con una eficiencia teórica del 98,32%. En cuanto a la apertura útil, de (13) tenemos:

$$A_e \approx 1,32 \text{ m}^2 \quad (21)$$



Figura 8. Campo de radiación total del arreglo diseñado, en coordenadas esféricas.

#### 4.2. Adaptador gamma

Las características del adaptador se resumen, para una frecuencia de 400 MHz, en la Tabla 2.

#### 4.3. El arreglo

Para un AHPN de  $6^\circ$ , se obtiene que:

$$d_\lambda = 4,7768 \quad \text{ó} \quad d = 3,583m \quad (22)$$

El equiespaciado de las antenas requerido en el arreglo planar es de unos 3,58 m. El tamaño total del arreglo es entonces de aproximadamente  $115,52 \text{ m}^2$ . Para los puntos de media potencia del haz tenemos:

$$AHMP_{arreg} = 2,731^\circ = 0,477 \text{ rad} \quad (23)$$

En cuanto a la distancia angular de los grandes lóbulos al lóbulo principal en el primer cuadrante, de (15) se tienen los valores siguientes:  $\theta_{G1} = 77,916^\circ$ ,  $\theta_{G2} = 65,248^\circ$ ,  $\theta_{G3} = 51,095^\circ$  y  $\theta_{G4} = 33,135^\circ$ .

De (9), la altura desde el suelo (o plano de tierra) a la que debe ubicarse cada antena debe ser:

$$h_{pt} = 18,75 \text{ cm} \quad (24)$$

Puede obtenerse un estimado de la directividad del arreglo a partir del valor de AHMP, resultando:

$$D_{arreg} \approx 771,3653 = 28,87 \text{ dBi} \quad (25)$$

y asumiendo, en primera aproximación, que la eficiencia del arreglo y de la antena base sean del mismo orden, se obtendría una ganancia para el interferómetro de unos 28,39 dBi. En base a (25), la apertura útil del arreglo es aproximadamente  $A_{earreg} \approx 34,53 \text{ m}^2$ .

### 5. Propuesta de Uso

Un arreglo multielemento de este tipo ha sido usado por Christiansen & Warburton [9] para estudios solares<sup>2</sup>. Y ciertamente, un arreglo como el presentado puede ser útil, por ejemplo, para caracterizar la sección de la corona interior del Sol ubicada a unos 1,3-1,5 radios solares. Precisamente esta sección, como Smerd [10] ha mostrado, emite radiación electromagnética eminentemente a 400 MHz, que puede ser recibida por el radiointerferómetro Yagi-Uda diseñado.

Es posible caracterizar el plasma electrónico emisor a través de cuatro parámetros [1]: el parámetro de impacto, el camino libre medio, la distancia media entre partículas y la longitud de Debye; el presente arreglo puede utilizarse para determinarlos. Además, también podrían obtenerse datos que permitiesen calcular medias de la intensidad del campo eléctrico, velocidad de los electrones, permitividad y conductividad del

2 Ya que se trata de estudios solares empleando las longitudes de onda correspondientes a la ventana de radio, se le conoce a esta disciplina como investigaciones radioheliográficas.

plasma, densidad volumétrica electrónica mínima, la temperatura de la fuente, etc. Puede, pues, llevarse a cabo un estudio exhaustivo de tal sección de la corona solar. Naturalmente, la caracterización física aquí propuesta puede llevarse a cabo también con cualquier otra fuente radioemisora a la misma frecuencia.

En cuanto a la precisión de las medidas proporcionadas por este instrumento, puede afirmarse que con la ganancia obtenida (del orden de los 28,39 dBi), más que del propio arreglo depende de la sensibilidad y de la temperatura de ruido del sistema receptor. Ya que las señales recibidas de una radiofuente poseen comúnmente muy baja intensidad, a fin de alcanzar una relación señal/ruido aceptable, además de incrementar la ganancia de la antena base a través del radiointerferómetro diseñado, se debe reducir la temperatura de ruido del sistema haciendo, por ejemplo, uso de un adecuado LNA (Low Noise Amplifier), un DownConverter/Receiver (convertidor de frecuencia de recepción, a frecuencia intermedia) y líneas de transmisión con un mínimo de pérdidas a 400 MHz.

## 6. Discusión y Conclusiones

El diseño relativamente poco complicado de antenas Yagi-Uda, aunado a su fácil construcción, las han hecho muy comunes entre los radioastrónomos amateur. Sin embargo se ha mostrado que las características de una única antena Yagi empleada como radiotelescopio no son del todo satisfactorias; mas al emplearlas como elementos constituyentes de un arreglo radiointerferométrico, los parámetros de recepción de señal pueden configurarse de manera que puedan obtenerse mejores medidas de la radiofuente. Es, en efecto, posible diseñar (y construir) un arreglo radiointerferométrico económicamente viable y con cierta utilidad física si se emplean antenas Yagi-Uda.

En el presente diseño, se ha obtenido una eficiencia teórica para el instrumento del orden del 98%, un excelente resultado, aún considerando que la eficiencia efectiva pudiera disminuir por pérdidas óhmicas. En cuanto a la directividad, en teoría, el arreglo es capaz de recibir señales sólo de aproximadamente 1/771 partes de la bóveda celeste, un muy buen valor, sobre

todo si se compara con el 1/30 partes (aproximadamente) de una única Yagi-Uda. El diagrama de radiación total (Figura 8), que toma en cuenta incluso el efecto de la contribución de un plano de tierra, muestra un gran número de haces finos que apuntan más o menos uniformemente a distintos puntos de la bóveda celeste; al sumar las contribuciones, lo que se obtiene es precisamente una cruz en el plano tangente al cenit; esta simetría tipo Cruz de Mills proporciona en gran medida la directividad del arreglo, en el orden de los 28,39 dBi. Además, variando la distancia entre elementos, ecuación (22), podemos cambiar la directividad del arreglo, según la fuente objeto de estudio.

Entre los aspectos negativos del empleo de estas antenas, hay que mencionar el ancho de banda relativamente angosto (del orden del 2%), siendo ésta su principal desventaja: el diseño posee una directividad máxima para 400 MHz, pero su ventana de directividad recorre aproximadamente 5 MHz por encima y por debajo de tal valor. Fuera de este rango, la antena no es direccional y el arreglo no es útil para definir la ubicación de la fuente.

El objetivo del presente trabajo era precisamente diseñar un radiointerferómetro como parte receptora de un radiotelescopio. El instrumento completo requiere de dispositivos adicionales como el LNA y el DownConverter/Receiver. Una vez escogidos estos últimos, puede entonces estimarse la precisión de las medidas que el instrumento como un todo aporte. Es posible adelantar, sin embargo, que el arreglo diseñado sería perfectamente capaz de determinar ciertas cantidades fundamentales del plasma emisor, lo que lo haría útil para estudios, por ejemplo de la corona interior solar (sección 5).

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento a los Profesores Augusto Gallo y Néstor Sánchez por sus valiosos y estimulantes comentarios, así como al Sr. Emiro Hernández por los dibujos computarizados (*rendering*) de la antena base y el adaptador gamma. También están en deuda con un árbitro anónimo por sus detallados comentarios. Este trabajo ha sido financiado en parte por la División de Investigación de

la Facultad de Ciencias de la Universidad del Zulia (Sesión Ordinaria No. 08-2001).

### Referencias Bibliográficas

1. Pacholczyk, A.G.: "Radioastrofísica", Editorial Reverté, S.A., Caracas, 1979.
2. Barboza de Vielma, Z.: "Antenas y Propagación", Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Mérida, 1991.
3. Cardama, Á. et al.: "Antenas", Ediciones UPC, Barcelona, España, 1998.
4. Kraus, J.D.: "Electromagnetismo", McGraw-Hill, 3ª edición, México D.F., 1986.
5. Viezbicke, P. P.: "Yagi Antenna Design" NBS Technical Note 688, U.S. Department of Commerce/National Bureau of Standards, December 1968, pp. 404-408.
6. Stutzman, W.L. & Thiele, G.A.: "Antenna Theory and Design", John Wiley & Sons, Nueva York, 1981.
7. Krauss, J.D.: "Radio Astronomy", Cygnus-Quasar Books 2<sup>nd</sup> Edition, 1986.
8. Mills, B.Y.: "Nonthermal Radio Frequency Radiation from the Galaxy", Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2 (1963), 185-212.
9. Christiansen, W.N. and Warburton, J.A.: "Distribution of Radio-Brightness over the Solar Disc at Wavelength of 21 cm", Australian J. Phys., Vol 6 (Jun 1953), pp 190-202.
10. Smerd, S.S.: "Radiofrequency Radiation from the Quiet Sun", Australian J. Sci. Res. (1950), Vol 3A, pp 34-59.

Recibido el 23 de Julio de 2002

En forma revisada el 05 de Diciembre de 2002