

# **MODELO DE UN SISTEMA DE ARREGLO DE ANTENAS, COMO ALTERNATIVA EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES SATELITALES DE ORBITA BAJA (MICROSATELITE UDSAT)**

**Andrés Leonardo Jutinico Alarcón**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogota, Colombia, [ajutinico@ieee.org](mailto:ajutinico@ieee.org)

**Jaime Contreras**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogota, Colombia

**Ing. Ignacio Castañeda, Profesor**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogota, Colombia, [icasteda@udistrital.edu.co](mailto:icasteda@udistrital.edu.co)

## **RESUMEN**

Este artículo muestra el análisis y comparación de diferentes tipos de agrupaciones de antenas, con el objetivo de ser utilizados en sistemas de comunicaciones satelitales de órbita baja, con este fin se hace la comparación tanto en directividad como en ángulo de desplazamiento del lóbulo principal en arreglos lineales, planares y circulares, utilizando como antena principal una del tipo corner reflector.

## **PALABRAS CLAVES**

Satelite orbita baja, arreglo de ntenas, directividad, NPLS.

## **1. INTRODUCCION**

En comunicaciones satelitales de órbita baja es muy importante garantizar el seguimiento de los diferentes satélites LEO(Neri Vela, Rodolfo,2003), (Gibson, D Jerry,1997) en el transcurso de su orbita, durante el intervalo de tiempo que dura el avistamiento. Esto es llevado a cabo por una estación terrena determinada, la cual debe poder realizar el optimo enlace entre el satélite y la estación misma a partir de una ubicación muy precisa del lóbulo de radiación ubicado en el espacio, coincidiendo a plenitud con el punto en el cual se encuentra ubicado el satélite. Esto se logra diseñando unos sistemas de seguimiento que brinden una alta directividad y un ángulo de apuntamiento preciso.

Es sabido que es posible lograr arreglos de antenas que entreguen muy diversos patrones de radiación(Krauss J. D,1985),(Balanis, Constantine A,1982), sin embargo la dificultad radica en determinar cual es el tipo de arreglo que garantiza las mejores condiciones de seguimiento. Estas condiciones redundan en la capacidad de las agrupaciones para modificar el diagrama de radiación de la antena principal, que puede aprovecharse para sintetizar un diagrama de radiación que este dentro de las especificaciones de directividad y apuntamiento de haz principal necesario para un radio enlace.

## 2. LA ANTENA PRINCIPAL

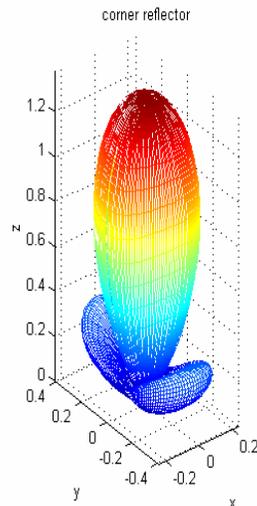
En sistemas de comunicaciones satelitales de órbita baja utilizados por los radioaficionados, es común utilizar antenas tipo Yagui-Uda en las estaciones terrenas. Sin embargo, la solución planteada en el presente trabajo hace uso de una antena tipo córner reflector debido a la sencillez de su modelo y a que los análisis realizados sobre agrupaciones mas complejas pueden ser fácilmente adaptados en términos de antenas tipo Yagui-Uda<sup>1</sup> o helicoidal cuyas directividades y lóbulos principales pueden llegar a ser similares bajo diferentes parámetros.

Una de las formas mas simple de concentrar la radiación de una fuente primaria es mediante reflectores diedricos(Balanis, Constantine A,1982), cuyo estudio se realiza mediante la teoría de imágenes de tal manera que para un ángulo de reflector de  $90^0$  y utilizando como fuente primaria un dipolo de  $\lambda/2$  se puede lograr un diagrama de radiación como el mostrado en la figura1, cuya descripción analítica esta dada por la ecuación 1.

$$AF(\theta, \phi) = 2 \left[ \cos(ks \sin \theta \cos \phi) - \cos(ks \sin \theta \sin \phi) \right]$$

$$E(\theta, \phi)_c = \left[ \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \right] * AF(\theta, \phi)$$

**Ecuación 1: Campo eléctrico  $E(\theta, \phi)_c$  para corner reflector, donde s es la distancia al elemento activo en longitud de onda.**



**Figura 1: Diagrama de radiación de Corner reflector con  $s = 0.8\lambda$  .**

## 3. AGRUPACIONES LINEALES Y PLANARES

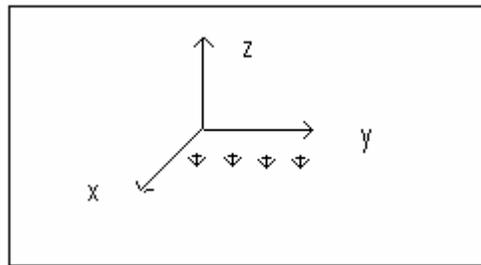
<sup>1</sup>C.A.Chen and D.K. Cheng.(1973).”Optimum Spacings for Yagi-Uda Arrays”., IEEE Transactions on Antennas and Propagation., Vol. AP-21. No 5, pp. 615-623, September.

En el desarrollo de este trabajo se plantea como elemento de diseño el principio de multiplicación de patrones para sintetizar diferentes tipos de arreglos utilizando como antena principal la descrita en el apartado anterior.

Los tipos de agrupaciones más sencillos utilizados en la actualidad para arreglos de antenas son los del tipo lineal uniforme, sin embargo estos son los que presentan el peor NPLS (nivel de lóbulo principal a secundario), comparado con los obtenidos a partir de sistemas de alimentación de arreglos realizados por ejemplo con síntesis como la de Chebychev, triangular y distribuciones tales como la circular o elíptica (Balanis, Constantine A, 1982), los cuales constituyen el eje central del presente artículo.

### 3.1 ARREGLO LINEAL UNIFORME

La descripción analítica para un arreglo lineal uniforme como el mostrado en la figura 2, en el cual la antena principal es del tipo corner reflector esta dada por la ecuación 2.



**Figura 2: Distribución espacial para un arreglo lineal cuyas antenas principales son del tipo corner reflector.**

$$AF_{al} = \left| \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{M\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right|$$

$$\psi_x = kd_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x$$

$$E(\theta, \phi)_{alc} = E(\theta, \phi)_c * AF_{al}$$

**Ecuación 2: Campo eléctrico  $E(\theta, \phi)_{alc}$  para un arreglo lineal uniforme, cuya antena principal es del tipo corner reflector, donde  $d_x$  es la distancia entre antenas en longitud de onda, M es el número de antenas,  $\beta_x$  es el desfase entre las corrientes de cada antena en relación al centro del arreglo,  $E(\theta, \phi)_c$  es el campo eléctrico producido por la antena principal y  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ .**

Al desarrollar simulaciones con este tipo de arreglos se observa que puede variar su ángulo de lóbulo principal, tan solo en el eje en el que está ubicado el arreglo, además, el NPLS disminuye a medida que este se aleja de la dirección del campo de la antena principal ocasionando que suceda lo mismo con la directividad del arreglo.

### 3.2 ARREGLO PLANAR

Debido a la necesidad de tener una antena capaz de desplazar su lóbulo principal con la mayor cantidad de grados de libertad, para poder seguir cualquier órbita realizada por un satélite, es necesario considerar arreglos que estén acordes con esta característica, uno de estos es el del tipo planar

uniforme(Krauss J. D,1985),(Balanis, Constantine A,1982) cuya descripción analítica esta dada en la ecuación 3; también se puede ver su distribución espacial en la figura 3.

$$AF_{alx} = \frac{\left| \sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right) \right|}{\left| M\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right) \right|}$$

$$\psi_x = kd_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x$$

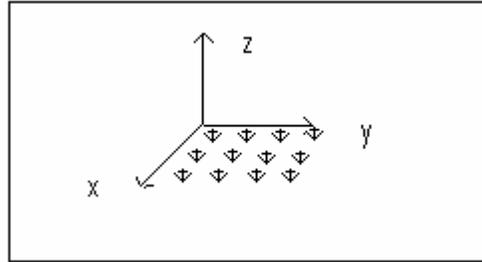
$$AF_{aly} = \frac{\left| \sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right) \right|}{\left| N\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right) \right|}$$

$$\psi_y = kd_y \sin(\theta) \sin(\phi) + \beta_y$$

$$AF_{ap\_u} = AF_{alx} * AF_{aly}$$

$$E(\theta, \phi)_{apuc} = E(\theta, \phi)_c * AF_{ap\_u}$$

**Ecuación 3: Campo eléctrico  $E(\theta, \phi)_{puc}$  para un arreglo planar uniforme, cuya antena principal es del tipo corner reflector.**



**Figura 4: Distribución espacial para un arreglo planar cuyas antenas principales son del tipo corner reflector.**

Este tipo de arreglos presenta una mayor libertad en cuanto al desplazamiento de lóbulo principal en comparación con el arreglo lineal, sin embargo aún se presenta una disminución en su NPLS a medida que este se aleja de la dirección en la que se encuentra el campo producido por la antena principal, por lo tanto se ha decidido, probar con la misma distribución espacial del arreglo, pero no solo variando las fases de la corriente ( $\beta_x, \beta_y$ ) de entrada en la antena, sino variando también sus amplitudes, utilizando el método llamado síntesis de Chebychev.

Esta síntesis utiliza los polinomios de Chebychev de tal manera que se cumplen las ecuaciones 4.

$$T_n(x) = \begin{cases} \cos nt, & x = \cos t \quad |x| \leq 1 \\ chnt, & x = ch t \quad |x| \geq 1 \end{cases}$$

$$T_{n+1} = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x)$$

**Ecuación 4:** Con los polinomios  $T_0(x) = 1$  y  $T_1(x) = x$  se pueden obtener los demás.

Para realizar este tipo de síntesis se trabajo tanto con la transformada Dolph, como con la transformada Riblet(Krauss J. D,1985),(Balanis, Constantine A,1982) teniendo en cuenta en juntos casos diferentes NPLS como parámetro de diseño y se observo que los lóbulos secundarios en juntos casos disminuyeron, sin embargo en todos los casos se genero un lóbulo trasero simétrico al lóbulo principal después de un determinado ángulo de desplazamiento (como se puede ver en la figura 4), que en general debe ser producido por el tipo de distribución espacial de esta forma de arreglo.

La expresión analítica de la transformada Dolph y de la transformada Riblet se muestra en las ecuaciones 5 y 6, junto con los polinomios generales para cada factor de arreglo(FA).

$$\begin{aligned}
 a) x &= x_0 \cos \frac{\psi}{2} \\
 b) NPLS &= T_n(x_0) \\
 x_{cm} &= \cos \left( \frac{2m-1}{n} \frac{\pi}{2} \right), m=1,2,\dots,n \\
 \psi_{cm} &= 2ar \cos \left( \frac{x_{cm}}{x_0} \right) \\
 c) AF &= \frac{x_0^{N-1}}{2} \prod_{m=1}^{\frac{N-1}{2}} (z^2 - 2z \cos \psi_{cm} + 1)
 \end{aligned}$$

**Ec.uación 5:** a) Transformada Dolph. b) Ecuaciones necesarias para calcular los coeficientes del arreglo(valor de las corrientes de alimentación en las antenas). c) Polinomio que describe el factor del arreglo (AF) para una agrupación lineal con síntesis de Chebychev- Dolph; para una agrupación planar se considera un arreglo en la coordenada x y otro en la coordenada y. Si el numero de antenas es par  $N = n+1$ , de lo contrario es N.

$$\begin{aligned}
 a) x &= a \cos \psi + b \\
 b) NPLS &= T_n(a + b) \\
 -1 &= a \cos kd + b \\
 \psi_{cm} &= ar \cos \left( \frac{x_n - b}{a} \right) \\
 c) AF &= \frac{a^{N-1}}{2} \prod_{n=1}^{\frac{N-1}{2}} (z^2 - 2z \cos \psi_n + 1)
 \end{aligned}$$

**Ecuación 6:** a) Transformada Riblet. b) Ecuaciones necesarias para calcular los coeficientes del arreglo(valor de las corrientes de alimentación en las antenas). c) Polinomio que describe el factor del arreglo (AF) para una agrupación lineal con síntesis de Chebychev- Riblet; para una agrupación planar se considera un arreglo en la coordenada x y otro en la coordenada y. El número de antenas N es igual al número de términos del polinomio.

Con el animo de garantizar un número de pruebas suficientemente diciente de los resultados alcanzados, se decidió probar como opción alternativa, considerando la misma distribución espacial, una distribución de corrientes triangular, lo cual condujo a una serie de resultados prácticamente iguales que condujeron a corroborar la existencia de lóbulos traseros simétricos. La expresión analítica del campo eléctrico para este tipo de distribución esta dada en la ecuación 7 y una comparación de los

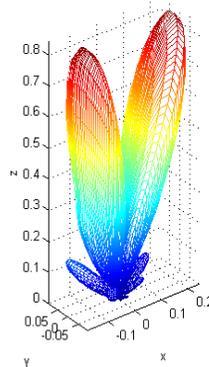
resultados obtenidos tanto en directividad, NPLS y ángulo de desplazamiento del lóbulo principal se puede observar en la tabla 1.

#### 4. ARREGLO CIRCULAR

Otra opción de distribución espacial es la del tipo circular (Suarez, et al, 2003), (Suarez, et al, 2004), (Balanis, Constantine A, 1982), (Lozano, et al, 2002) en la cual todas las antenas están ubicadas a una distancia  $r$  del centro; es de aclarar que en este apartado también se utiliza el principio de multiplicación de parámetros y como antena principal una del tipo corner reflector, en este tipo de agrupación la expresión analítica para el campo eléctrico esta dada por la ecuación 8 y en la figura 5 se puede ver la ubicación de cada antena sobre el arreglo.

Este tipo de agrupación presenta en las simulaciones un mejor desempeño cuando lo comparamos los arreglos mencionados en los apartados anteriores, ya que no presenta lóbulos traseros simétricos, los cuales no son deseables para una comunicación satelital, sin embargo el ángulo de desplazamiento de lóbulo principal es reducido En la tabla dos se pueden ver los datos obtenidos.

AGRUPACION DE CORNER REFLECTOR, ARREGLO PLANAR ch



**Figura 4: Agrupacion de Corner Reflector, Arreglo planar Chevichev.**

En esta figura se puede observar los lóbulos simétricos producidos por este tipo de distribución espacial (planar-rectangular), para un arreglo de 5x5 antenas, con todas las antenas están en fase para el eje x, y poseen un desfase de  $90^0, 120^0, 0^0, 90^0, 150^0$  con respecto a la antena central.

Una mejor opción es utilizar un arreglo circular de antenas pero con una distribución espacial de doble anillo como el mostrado en la figura 6, cuya expresión analítica es simplemente la suma del campo eléctrico producido por los dos arreglos circulares y es expresada en la ecuación 9 (Lozano, et al, 2002). Esta distribución espacial presenta mejores características que las presentadas anteriormente, tanto en directividad, NPLS y ángulo de desplazamiento de lóbulo principal, además no presenta lóbulos traseros simétricos y el número de antenas siguen siendo comparable al de un arreglo planar rectangular.

$$AF_{atx} = \frac{\left| \sin\left(\frac{M+1}{4}\psi_x\right) \right|^2}{\left| \sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right) \right|^2}$$

$$\psi_x = kd_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x$$

$$AF_{aty} = \frac{\left| \sin\left(\frac{N+1}{4}\psi_y\right) \right|^2}{\left| \sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right) \right|^2}$$

$$\psi_y = kd_y \sin(\theta) \sin(\phi) + \beta_y$$

$$AF_{ap-t} = \frac{AF_{alx} * AF_{aly}}{N * M}$$

$$E(\theta, \phi)_{aprc} = E(\theta, \phi)_c * AF_{ap-t}$$

**Ecuación 7: Campo eléctrico  $E(\theta, \phi)_{aprc}$ , para una agrupación con distribución triangular y antena principal corner reflector.**

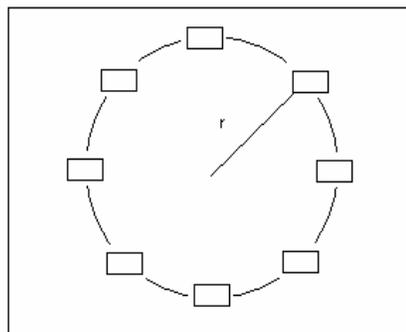
$$AF(\theta, \phi)_{cir} = \sum_{n=1}^N I_n e^{j[k \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + \alpha_n]}$$

donde

$$\alpha_n = -k \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n)$$

$$E(\theta, \phi)_{cir-c} = E(\theta, \phi)_c * \frac{AF(\theta, \phi)_{cir}}{N}$$

**Ecuación 8: Campo eléctrico  $E(\theta, \phi)_{cir-c}$ , para una agrupación circular de anillo simple y antena principal corner reflector.**  $\alpha_n$  es la fase de excitación (relativa al centro del arreglo) del enésimo elemento.  $I_n$  es la amplitud de excitación del enésimo elemento.  $\phi_n$  es la posición angular del enésimo elemento sobre el plano x-y.  $(\theta_0, \phi_0)$  son los ángulos de dirección del lóbulo principal en su máximo.



**Figura 5: Distribución espacial para un arreglo circular cuyas antenas principales son del tipo corner reflector.**

$$AF(\theta, \phi)_{cir\_r1} = \sum_{n=1}^N I_n e^{j[k a_1 \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + \alpha_{n-1}]}$$

donde

$$\alpha_{n-1} = -k a_1 \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n)$$

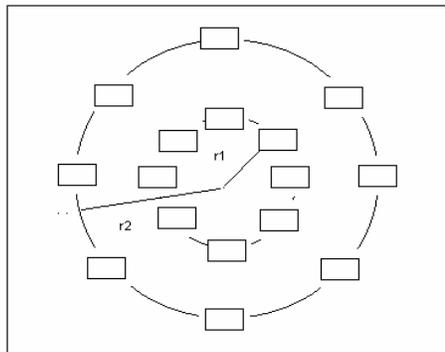
$$AF(\theta, \phi)_{cir\_r2} = \sum_{n=1}^N I_n e^{j[k a_2 \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + \alpha_{n-2}]}$$

donde

$$\alpha_{n-2} = -k a_2 \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n)$$

$$E(\theta, \phi)_{cir\_c2} = E(\theta, \phi)_c * \left[ \frac{AF(\theta, \phi)_{cir\_r1}}{N1} + \frac{AF(\theta, \phi)_{cir\_r2}}{N2} \right]$$

**Ecuación 9: Campo eléctrico  $E(\theta, \phi)_{cir\_c2}$ , para un arreglo circular de doble anillo y antena principal corner reflector.  $a_1$  y  $a_2$  son los radios  $r_1$  y  $r_2$  respectivamente.**



**Figura 6: Distribución espacial para un arreglo circular de doble anillo cuyas antenas principales son del tipo corner reflector.**

## 5. RESULTADOS NUMERICOS Y CONCLUSIONES

En la tabla 1 se pueden observar algunos datos obtenidos en las diferentes simulaciones. Estas simulaciones se realizaron con los arreglos de antenas planteados en el presente artículo. Es claro que todos presentan directividades similares, sin embargo las agrupaciones circulares presentan mejores características para realizar enlaces punto a punto con satélites de órbita baja ya que no presentan lóbulos traseros simétricos, especialmente las agrupaciones circulares de doble anillo, tienen esta característica y pueden generar un desplazamiento de lóbulo principal mayor que las anteriores, de tal manera que son las más adecuadas para este tipo de comunicaciones donde los ángulos de elevación y azimut varían dependiendo de la órbita del satélite.

También se realizaron simulaciones con diferentes patrones de radiación de la antena principal y se observa que en cuanto sean menores los lóbulos laterales de esta, es posible lograr mejores niveles de directividad como de los diferentes NPLS generados por el arreglo.

**Tabla 1: Tabla Comparativa para diferentes tipos de arreglos de antenas, cuya antena principal es del tipo corner reflector.**

<b>ANTENA PRINCIPAL CORNER REFLECTOR (NPLS=7.18dB, Directividad=)</b>			
<b>TIPO ARREGLO</b>	<b>ANGULO DESPLAZAMIENTO (máximo en grados)</b>	<b>NPLS (mínimo) (dB)</b>	<b>DIRECTIVIDAD (máxima) (dB)</b>
<b>Planar Uniforme</b>	48	5.1	22.58
<b>Planar Triangular</b>	39	4.3	23.1
<b>Planar (Chevichev-Dolph)</b>	40	6.2	19.3
<b>Planar (Chevichev-Riblet)</b>	40	6.2	19.3
<b>Circular (anillo sencillo)</b>	70	5.8	19.2
<b>Circular (anillo doble)</b>	100	5.9	19.2

## REFERENCIAS

Krauss, J. D. (1985). "Antenas" 3ª ed., McGraw-Hill, Madrid.

Balanis, C. A. (1982). "Antenna Theory", ed, John Wiley and Sons Inc.

Gibson, D J. (1997). "The Communications Hand Book.", IEEE Press.

Lozano, M. V., Franceschetti G., Ares-Pena, F. J, Moreno-Piquero, E. (2002). "Analysis and Synthesis of Printed Array for Satellite Communications with Moving Vehicles", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol 50, No. 11, November.

Neri Vela, R. (2003). "Comunicaciones Por Satélite", Thomson, Mexico.

Chen, C.A., and Cheng, D.K.(1973). "Optimum Spacings for Yagi-Uda Arrays", IEEE Transactions on Antennas and Propagation., Vol. AP-21. No 5, pp. 615-623, September.

Suarez, C. A, Gaona, E., Rincón, D. Y., Bataller, M. F., Valero Noriega, A. (2003). "De la síntesis con Agruaciones Lineales a la síntesis con Agrupaciones Circulares", Ingeniería, Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Vol 8 No.1 año.

Suarez, C. A, Bataller, M. F., Valero Noriega A., Gaona, E. (2004). “Síntesis con agrupaciones circulares de dipolos”., Ingeniería, Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Vol 9 No.1 año.

## **INFORMACION BIOGRAFICA**

Andres Leonardo JUTINICO ALARCON. Estudiante de 10 semestre de Ingeniería Electronica de la Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogota. Actualmente Presidente del Capitulo de Comunicaciones de la rama IEEE de Universidad Distrital.

Ing. Jose Ignacio CASTAÑEDA FANDIÑO. Ingeniero Electronico, Especialista en Telecomunicaciones Moviles. Desarrollo e implementacion del laboratorio de digitalizacion de sonido musical y del curso de apreciacion musical correspondiente. Profesor de Planta Universidad Distrital desde 1998 hasta la fecha. Profesor Hora Catedra Univesidad Catolica(Mayo 1997 - Diciembre 1998). Profesor Hora Catedra Universidad Santo Tomas desde 1999 hasta la fecha.

### **Autorizacion y negacion**

Los autores autorizamos a LACCEI para publicar los papers en los procedimientos de la conferencia en el CD y en la web. Ni LACCEI ni los redactores será responsables del contenido o de las implicaciones de qué se expresa en el paper.