



## Simulación y Descripción Matemática de Patrones Derivados de Sistemas de Radiación Tipo Dipolos

### Simulation and Mathematical Description of Patterns Derived from Dipol-type Radiation Systems

**Julio Galárraga** Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Sangolquí-Ecuador, [jgalarraga1@espe.edu.ec](mailto:jgalarraga1@espe.edu.ec)

**Guillermo Albuja** Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Sangolquí-Ecuador, [gaalbuja@espe.edu.ec](mailto:gaalbuja@espe.edu.ec)

#### HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recepción: 01/03/2024  
Recibido tras revisión: 30/04/2024  
Aprobación: 01/05/2024  
Publicación: 15/06/2024

#### PALABRAS CLAVE

Simulación matemática, sistemas de radiación tipo dipolos, patrones de radiación, simulación con Matlab.

#### KEY WORDS

Mathematics simulation, dipole type radiation systems, radiation patterns, Matlab simulation.

#### ABSTRACT

This work shares the research carried out on the modeling and simulation of linear dipole arrays. A generalized modeling is achieved, based on the models developed from the Pocklington integral applied to Yagi Uda arrays. Starting from the models found, they are simulated using the Method of Moments, generalizing what was previously developed for Yagi Uda arrays and their results are compared with patterns obtained through the free MMANA GAL simulator and with those given by the antenna manufacturers. An excellent match is obtained for both the simple dipole patterns and the Yagi Uda type arrays, but poor agreement is obtained for the radiation patterns for the Log Periodic type arrays.

#### RESUMEN

En el presente trabajo se comparte la investigación realizada sobre la modelación y simulación de arreglos lineales de dipolos. Se llega a una modelación generalizada, basándose en los modelos desarrollados a partir de la integral de Pocklington aplicada a arreglos Yagi Uda. Partiendo de los modelos encontrados, se los simula usando el Método de los Momentos, generalizándose lo previamente desarrollado para arreglos Yagi Uda y se comparan sus resultados con patrones obtenidos mediante el simulador libre MMANA GAL y con los datos por los fabricantes de antenas. Se obtienen una excelente coincidencia tanto para los patrones de dipolos simples como para los arreglos tipo Yagi Uda, pero poca coincidencia para los patrones de radiación para arreglos tipo Log Periódico.

## 1. INTRODUCCIÓN

Lograr las mejores configuraciones de sistemas radiantes para cubrir zonas de sombra es una tarea a la que se enfrentan comúnmente los diseñadores y planificadores de coberturas de los servicios de radiodifusión.

La modelación y simulación matemática es un campo abierto para su optimización; por lo que su utilización para los sistemas radiantes no es una salvedad, en particular de aquellos que son de uso más extendido en la radiodifusión: arreglos de sistemas radiantes que usan como radiador elemental: el dipolo, siendo los sistemas radiantes más comunes: los arreglos Yagi – Uda y los log periódicos.

Para la modelación se usó los desarrollos ampliamente aceptados presentados por Balanis en su texto [2], mientras que para su simulación se optó por el Método de los Momentos, a partir de programas libres que usan este mismo proceso para obtener los diagramas de radiación y características de todo tipo de antenas y sistemas radiantes, resultados con los que se compararon los obtenidos mediante los programas desarrollados durante la investigación.

La importancia de contar con modelación y simulación de sistemas radiantes para el desarrollo de las competencias de profesionales relacionados al área de telecomunicaciones queda de manifiesto en trabajos como los realizados por [5] y [6], en [5] hacen uso del software propietario CST Studio y en [6] declaran las líneas de investigación que

van a llevar adelante, en las que se incluyen las relacionadas con el presente trabajo.

Para la simulación del comportamiento de las antenas se hace uso del método de los momentos, cuya utilización para éstos fines se encuentra documentado en [7] y las comparaciones de los resultados obtenidos se realizan haciendo uso de MMANA-GAL, que se encuentra documentado su uso para éstos fines en [8] y [9].

En el presente documento en la sección de materiales y métodos se describe el proceso de modelación y simulación de las antenas elementales y de los sistemas radiantes que se construyen en base de ellas, se presentan los algoritmos en base de los que se desarrollaron los programas para su simulación; en la sección de resultados y discusión se definieron los criterios para establecer las comparaciones, y sus resultados muestran una excelente coincidencia entre los principales parámetros de los patrones de radiación, tanto para dipolos simples como para los arreglos tipo Yagi Uda, y escasa coincidencia para los patrones de radiación de arreglos tipo Log Periódico, por lo que en la sección de conclusiones se consideran varias hipótesis para dar continuidad a la modelación de este tipo de arreglos, en espera de obtener mejores resultados.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los procesos de modelación y simulación de sistemas radiantes siguen los mismos criterios de los procesos de modelación y simulación en ingeniería: se parte de un modelo teórico que debe encontrarse ampliamente sustentado y aceptado, modelo que nos permite contar con funciones que representan el fenómeno que se quiere estudiar y representar, dicho modelo debe ser trabajado y modificado para cumplir con los objetivos de su estudio, lograda su adecuada representación, se compara con otros resultados previamente encontrados para validar los resultados obtenidos.

Dado que MMANA-GAL calcula sus diagramas de radiación a la distancia de  $r = 1 \text{ Km}$ , se los calcula manteniendo éste mismo criterio con el fin de poder comparar los resultados, se trabaja con un voltaje pico de  $V = 1 \text{ V}$  para el cálculo de los campos y potencias de radiación.

## 2.1 Modelación de los patrones de sistemas de radiación tipo dipolos

Se usan los modelos dados por Balanis para obtener las expresiones de los patrones de sistemas de radiación tipo dipolos. Se va de lo sencillo a lo complejo, del dipolo elemental, del dipolo de  $\lambda/2$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la frecuencia fundamental ( $\nu$ ) de resonancia del sistema radiante, que cumplen:  $C = \lambda \cdot \nu$ ; donde  $C$  es la velocidad de la luz, velocidad a la que se mueven las ondas electromagnéticas y de los posibles arreglos de dipolos más usados: yagi uda y log periódico.

### 2.1.1 Modelación de los patrones de radiación del dipolo elemental:

Son considerados dipolos elementales, los que tienen una longitud de:  $h \leq \lambda/50$ . Las expresiones que determinan las magnitudes de los campos radiados por este tipo de dipolo, vienen dadas por [2]: ver pág. 159.

$$E_{\theta} \approx j\omega \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} I h \text{sen}(\theta) \quad (2.1)$$

y

$$H_{\phi} \approx jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} I h \text{sen}(\theta) \quad (2.2)$$

Siendo:  $r$ , distancia a la que es calculado el campo.  
 $k$ , desfase espacial.  
 $I$ , corriente que circula en el dipolo elemental.  
 $h$ , longitud del dipolo elemental.  
 $\omega = 2\pi\nu$ , frecuencia angular de la señal a ser radiada.  
 $e$ , Neper.  
 $\mu$ , permeabilidad magnética del medio.  
 $\Theta, \phi, r$  coordenadas esféricas respecto del centro del dipolo.

### 2.1.2 Modelación de los patrones de radiación del dipolo de $\lambda/2$ :

Para este tipo de dipolo, las magnitudes de los campos radiados vienen dadas por las expresiones [2]: ver pág. 172.

$$E_{\theta} \approx j\eta \frac{I e^{-jkr}}{2\pi r} \left[ \frac{\cos\left(\frac{kh}{2} \cos(\theta)\right) - \cos\left(\frac{kh}{2}\right)}{\text{sen}(\theta)} \right] \quad (2.3)$$

y

$$H_{\phi} \approx j \frac{I e^{-jkr}}{2\pi r} \left[ \frac{\cos\left(\frac{kh}{2}\cos(\theta)\right) - \cos\left(\frac{kh}{2}\right)}{\sin(\theta)} \right] \quad (2.4)$$

Siendo: r, distancia a la que es calculado el campo.

k, desfase espacial.

I, corriente que circula en el dipolo.

h, longitud del dipolo.

$\eta$ , impedancia característica del medio.

e, Neper.

$\Theta, \phi, r$  coordenadas esféricas respecto del centro del dipolo.

Ecuaciones y desarrollo que son válidos para dipolos de longitud finita, que cumplen con:  $\lambda/10 \leq h \leq 3\lambda$

### 2.1.3 Modelación de los patrones de radiación de los arreglos de dipolos

Los arreglos de dipolos más usados son los conocidos como antenas Yagi – Uda y Log – Periódicos.

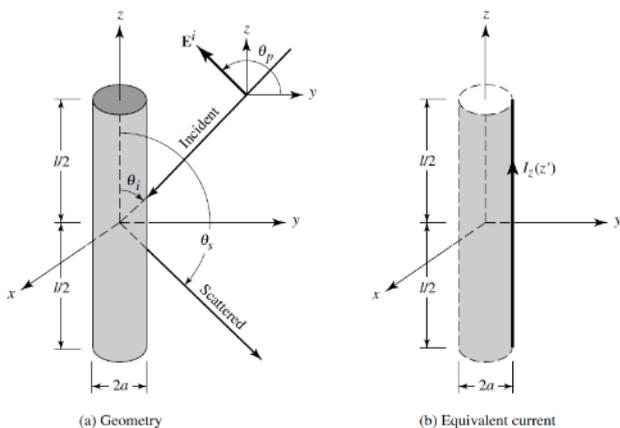
De las antenas Yagi – Uda:

Para la modelación de su patrón de radiación se estudió y corrigió el trabajo desarrollado por [3], en base del artículo realizado por [10] y de lo sistematizado por [2], en su texto; haciendo las correcciones necesarias para llegar a plantear un modelo generalizado del arreglo.

Para la modelación se hace uso de la siguiente definición de los elementos y las variables que intervienen:

#### Figura 1.

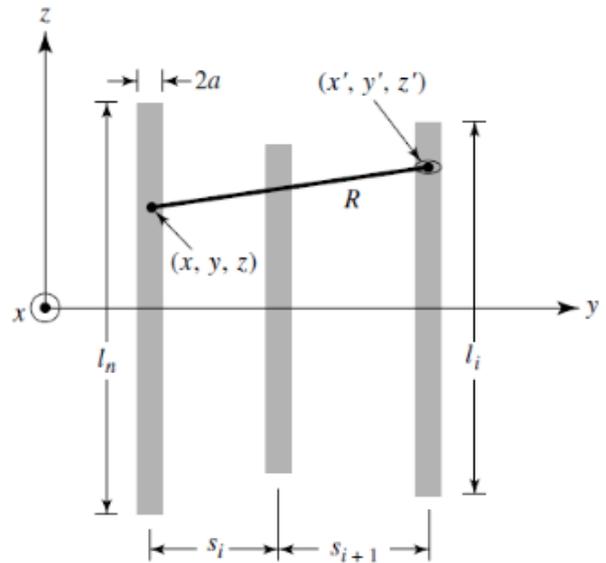
Parámetros y disposición de elementos en sistema radiante y sistema de coordenadas



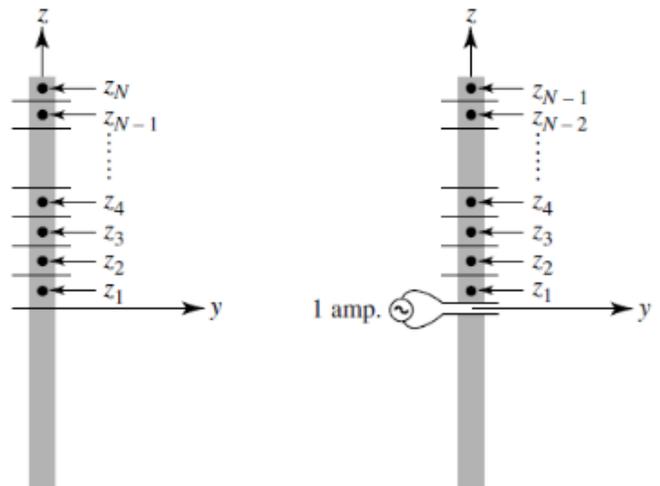
Tomado de [2], pág. 404

#### Figura 2.

Consideraciones para Método de los Momentos en Yagi-Uda



(a) Separation distance



(b) Parasitic elements

(c) Driven element

Nota: Adaptado de [2], pág. 584

Haciendo uso del Método de los Momentos, en el que a cada uno de los N elementos del sistema radiante se le divide en M modos, se llega a las expresiones de las magnitudes de los campos radiados por los arreglos tipo Yagi-Uda, en las que se consideran las interrelaciones que se presentan entre cada una de las partes de cada uno de los elementos con cada una de las partes de los otros elementos, obteniéndose matrices de éstas interrelaciones, así:

$$\sum_{m=1}^M I_{nm} \left\{ \begin{aligned} &(-1)^{m+1} \frac{(2m-1)\pi}{l_n} G_2 \left( x, x', y, \frac{y'}{z}, \frac{l_n}{2} \right) + \left[ k^2 - \frac{(2m-1)^2 \pi^2}{l_n^2} \right] \\ &\times \int_0^{l_n/2} G_2 \left( x, x', y, \frac{y'}{z}, z'_n \right) \cos \left[ \frac{(2m-1)^2 \pi^2}{l_n^2} z'_n \right] dz'_n \end{aligned} \right\} = j4\pi\omega\epsilon_0 E_z^t$$

, donde:

$$G_2 \left( x, x', y, \frac{y'}{z}, z'_n \right) = \frac{e^{-jkR_-}}{R_-} + \frac{e^{-jkR_+}}{R_+}$$

$$R_{\pm} = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + a^2 + (z \pm z')^2}$$

Siendo:

n, el subíndice del elemento en estudio del arreglo.

m, el subíndice del número de modo que se está considerando del elemento en estudio.

$I_{nm}$ , corriente del elemento n en el modo m.

$l_n$ , longitud del elemento n.

$\omega=2\pi\nu$ , frecuencia angular de la señal a ser radiada.

$\epsilon_0$  permitividad dieléctrica del vacío.

x,y,z son las coordenadas del elemento n en el modo m.

$x',y',z'$  son las coordenadas del elemento con respecto del que se quiera calcular su interacción o coordenadas del punto del espacio al que se quiere encontrar su radiación

$E_z^t$  campo eléctrico total en el punto z.

Como se tiene un solo elemento activo alimentado centralmente, se usa:

$$\sum_{m=1}^M I_{nm}(z' = 0) |_{n=N} = 1 \quad (2.5)$$

Con lo que, se obtiene:

$$E_{\theta} = \sum_{n=1}^N E_{\theta_n} = -j\omega A_{\theta} \quad (2.6)$$

, donde:

$$A_{\theta} = \sum_{n=1}^N A_{\theta_n} = -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \sum_{n=1}^N \left\{ e^{jk(x_n \sin\theta \cos\phi + y_n \sin\theta \sin\phi)} \times \sum_{m=1}^M I_{nm} \left[ \frac{\sin(z^+)}{z^+} + \frac{\sin(z^-)}{z^-} \right] \frac{l_n}{2} \right\} \quad (2.7)$$

En las que:

$$z^+ = \left[ \frac{(2m-1)\pi}{l_n} + k \cos\theta \right] \frac{l_n}{2}$$

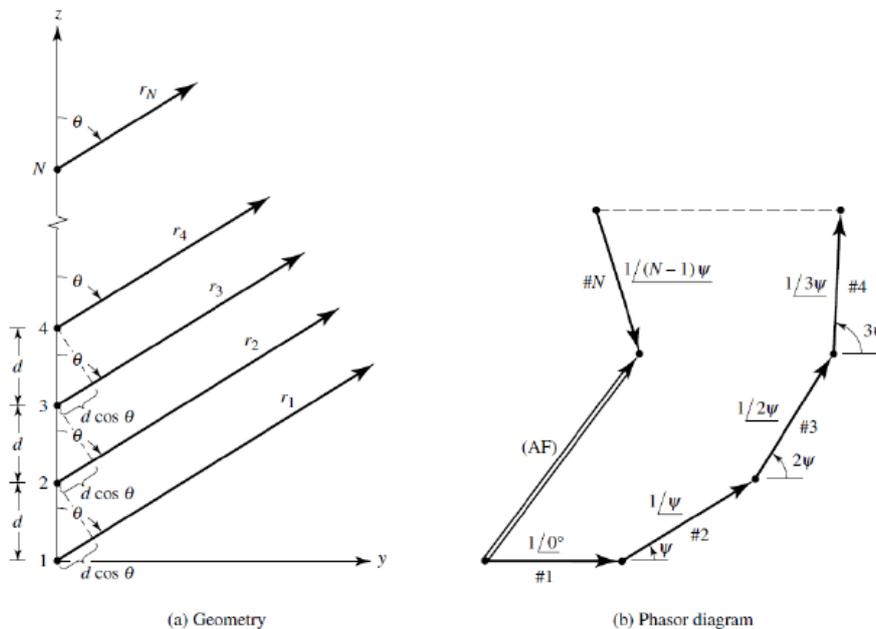
$$z^- = \left[ \frac{(2m-1)\pi}{l_n} - k \cos\theta \right] \frac{l_n}{2}$$

De las antenas Log – Periódicas:

e partió de la modelación realizada para las antenas Yagi–Uda, haciendo generalizaciones, considerando:

### Figura 3.

Para N elementos isotrópicos. Representación fasorial de campos lejanos



Tomado de [2], pág.293

Con base en lo previamente realizado para la antena Yagi – Uda, se generaliza con el fin de modelar las antenas tipo Log – Periódicas, para  $n$  elementos activos, voltajes de alimentación iguales o distintos, tamaños de los elementos y longitudes de separación entre los elementos, a elección.

Las generalizaciones modifican las expresiones 2.6 y 2.7 que pueden ser calculadas mediante métodos numéricos, al presentar sumatorios limitados de sus términos.

Para realizar el cálculo del campo total que se genera con el sistema radiante, se toma elemento por elemento, considerando al elemento de análisis como elemento activo que tiene elementos directores los ubicados al frente de su dirección principal de radiación y elementos reflectores los ubicados tras su dirección principal de radiación.

Se hace uso del teorema de superposición, considerando tanto posible diversidad espacial como posible diversidad fasorial de cada uno de los elementos que componen el sistema radiante. Tal como se muestra en la Figura 1, para elementos isotrópicos y separados una misma distancia, por lo que, de manera general, se obtiene:

$$\vec{E}_T^t(r) = \vec{E}_1^t(r) + \vec{E}_2^t(r) + \dots + \vec{E}_i^t(r) + \dots + \vec{E}_n^t(r) \quad (2.8)$$

Donde:

$E_T(r)$  = Campo eléctrico total generado por todos los elementos activos del arreglo lineal de dipolos.

$E_i(r)$  = Campo eléctrico total generado por el  $i$ -ésimo elemento activo del arreglo lineal de dipolos.

En la expresión 2.8, para un  $\phi$  fijo, la magnitud de los campos eléctricos vendrá dada por 2.6, multiplicada por un factor que abarcará la diferencia de fase que se puede tener en la alimentación a cada elemento activo y la diferencia de fase por la diversidad espacial. Para facilitar la modelación, se considera al primer elemento del arreglo en  $y = 0$ , con lo que la magnitud de los campos eléctricos obtenidos punto a punto sería:

$$|\vec{E}_i^t(r)_{\phi fijo}| \approx E_{i\theta} e^{j(kd_i \cos\theta + \beta_i)} \quad (2.9)$$

Donde:

$d_i$  = Distancia desde  $y = 0$  al  $i$ -ésimo elemento activo del que se obtiene su campo.

$\beta_i$  = Variación de fase en la alimentación del  $i$ -ésimo elemento activo del arreglo lineal de dipolos del que se obtiene su campo.

Obteniéndose los parámetros considerando el voltaje de entrada al primer elemento activo = 1 V y en base de la geometría del arreglo; la alimentación al resto de elementos activos se verá idealmente afectados por el desfase producido por la distancia al primer elemento activo, por lo que se usará:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \beta_i = d_i \times \frac{\pi}{.25}$$

y

$d_i$  vendrá dado como múltiplo de  $\lambda$ , por lo que 2.8 quedaría:

$$E_T^t(r)_{\phi fijo} = E_1^t(r)_{\phi fijo} + E_2^t(r)_{\phi fijo} + \dots + E_i^t(r)_{\phi fijo} + \dots + E_n^t(r)_{\phi fijo}$$

, quedando

$$E_T^t(r)_{\phi fijo} = E_{1\theta} e^{j(kd_1 \cos\theta + \beta_1)} + E_{2\theta} e^{j(kd_2 \cos\theta + \beta_2)} + \dots + E_{i\theta} e^{j(kd_i \cos\theta + \beta_i)} + \dots + E_{n\theta} e^{j(kd_n \cos\theta + \beta_n)}$$

## 2.2 Simulación de los patrones de sistemas de radiación tipo dipolos

Con base en los modelos previamente presentados, se procede a desarrollar algoritmos cuyos programas fueron implementados con MATLAB R2018a en una laptop ACER i5-5200U de 2,2 GHz y con 6 GB de RAM para la simulación de los patrones de sistemas de radiación tipo dipolos más usados:

### 2.2.1. Simulación de los patrones de radiación del dipolo elemental

El algoritmo en base del que se elaboró el programa con el que se obtuvo este patrón es:

ALGORITMO 1: Diagramas de radiación del dipolo elemental.

INGRESE:  $f$  (frecuencia central de trabajo, en MHz: );  $r$  (distancia a la que se quiere calcular el campo, en Km: );  $n$  (Factor multiplicador de lambda, debe ser menor a 1/50: );

Calcula: la longitud de onda:  $\lambda = 300 / f$ ; La longitud del dipolo elemental:  $L = n * \lambda$ ; La constante de la onda:  $B = 2 * \pi / \lambda$ ;

Se calcula y se grafica el campo eléctrico generado, haciendo el lazo:

Para t desde 0, cada 0.01 hasta  $2 * \pi$ ;

$E = \text{abs}(f * n / r * L * \sin(t)) .^2$ ;

Fin Para

Se presentan las gráficas que se obtienen

`figura()`

`polar(t,E)`

### 2.2.2. Simulación de los patrones de radiación del dipolo de $\lambda/2$ :

Se presenta el algoritmo con el que se realizó el programa para dipolos de longitud finita, que cumplen con:  $\lambda/10 \leq h \leq 3\lambda$

ALGORITMO 2: Diagramas de radiación del dipolo de longitud finita.

INGRESE: f (frecuencia central de trabajo, en MHz: ); r (distancia a la que se quiere calcular el campo, en Km: ); n (Factor multiplicador de lambda, debe ser mayor a 1/10 y menor que 3, generalmente  $n=0.5$ );

Calcula: la longitud de onda:  $\lambda = 300 / f$ ; La longitud del dipolo:  $L = n * \lambda$ ; La constante de la onda:  $B = 2 * \pi / \lambda$ ;

Se calcula y se grafica el campo eléctrico generado, haciendo el lazo:

Para t desde 0, cada 0.01 hasta  $2 * \pi$ ;

$E = \text{abs}(0.060 / r * (\cos(B * L / 2 * \cos(t)) - \cos(B * L / 2)) / \sin(t)) .^2$ ;

Fin Para

Se presentan las gráficas que se obtienen

`figura()`

`polar(t,E)`

### 2.1.3 Simulación de los patrones de radiación de los arreglos de dipolos

En los algoritmos que se basan para la realización de los programas obtenidos para los arreglos de dipolos más usados, se incluyen los datos que se obtuvieron con el software libre MMANA-GAL, con el objeto de realizar una comparación entre los resultados obtenidos con esta herramienta y los desarrollos realizados en la investigación.

Se presenta únicamente el algoritmo con el que se modeló las antenas log periódicas, dado que es una

generalización del algoritmo con el que se modeló las antenas Yagi – Uda:

ALGORITMO 3: Diagramas de radiación de antenas Log – Periódicas

INGRESE: M (Ingrese el número de modos: ); N (Ingrese número de elementos: );

`si (N > 1)`

`Imprimir (¿Todos los elementos poseen la misma longitud?\n);`

INGRESE: RESP (Y o N);

`entonces`

`RESP = N;`

`Fin si`

`si (RESP == Y o y)`

INGRESE: Lelem (Longitud uniforme de elementos (en cantidad proporcional de longitudes de onda = );

Se asigna un vector de almacenamiento de las longitudes de los elementos:

`Le = Lelem * ones(1,N);`

`entonces (RESP == N);`

`a = 1;`

`mientras a <= N`

`Imprimir (Longitud del elemento # 2d (en cantidad proporcional de longitudes de onda = ,a);`

INGRESE: b;

`Le(a) = b;`

`a = a + 1;`

`Fin mientras`

`Fin si`

`si (N > 2)`

`Imprimir (¿Es la separación entre elementos uniforme?);`

INGRESE: RESP (Y O N);

`entonces`

`RESP == N;`

`Fin si`

`si (RESP == Y o y)`

INGRESE: DDIR (La separación uniforme entre elementos (en cantidad proporcional de longitudes de onda) es:)

`D = DDIR * ones(1,N-1);`

`entonces RESP == N;`

`a = 1;`

`mientras a <= (N-1)`

`Imprimir (Separación entre elemento # 2d y # 2d (en cantidad proporcional de longitudes de onda) = , a, a+1);`

INGRESE: b

`D(a) = b;`

```

        a = a + 1;
    Fin mientras
Fin si

INGRESE: b( Radio de todos los elementos usados(en cantidad proporcional de longitudes de onda));
radio = b;

```

Se asigna un vector de almacenamiento de las ubicaciones de los elementos:

Se asegura de que el vector esté vacío:

```

YP = zeros(1, N);
    Imprimir(La ubicación del primer dipolo en el eje y(en cantidad proporcional de longitudes de onda) viene dado por:);

```

```

INGRESE: b
YP(1) = b;
    Para m desde 1 hasta N-1
        YP(m+1) = D(m) + YP(m);
    Fin Para

```

```

    si (N > 1)
        Imprimir(¿Todos los elementos tienen el mismo voltaje de alimentación?);
        INGRESE: RESP: (Y o N);
        entonces
            RESP = N;
    Fin si

```

```

INGRESE: Valim(Voltaje de alimentación en elemento ubicado en y=0(en voltios) = );

```

Se asigna un vector de almacenamiento de los voltajes de alimentación:

Se asegura de que el vector esté vacío:

```
Vf = zeros(N, 1);
```

Se generan las matrices para aplicar el método de los momentos:

```

LM = zeros(N, M);
fracLM = Le / (2 * M - 1);
fracLM = fracLM';
    Para m desde 1 hasta M
        LM(:, m) = fracLM * (m - 1);
    Fin Para

```

Se realiza el cálculo de los elementos de las matrices aplicando el método de los momentos:

```

Anm = zeros(M * N, M * N);
    Para N1 desde 1 hasta N

```

```

        Para M1 desde 1 hasta M
            Para N2 desde 1 hasta N
                Para M2 desde 1 hasta M
                    si N1 == N2
                        alpha = radio;
                    entonces
                        alpha = 0;
                    Fin si
                Rred = alpha ^ 2 + (YP(N1) - YP(N2)) ^ 2;
                UL = Le(N2) / 2;
                Parte1 = quadl(@integralG2, 0, UL);
                G2 = sumatoria G2(UL);
                Anm(((N1 - 1) * M + M1), ((N2 - 1) * M + M2))
                    (N2)) * (-1) ^ (M2 + 1) * G2 + ((2 * pi) ^ 2 - (2 * M2 - 1) ^ 2 * pi ^ 2
                    / Le(N2) ^ 2) * Parte1;
            Fin Para
        Fin Para
    Fin Para

```

Se realiza el cálculo de la distribución de corriente sobre cada elemento radiante en base de lo calculado con el método de los momentos:

```

Inmglob = [zeros(M * N, 1)];
Etheta = [zeros(1, 3601)];
    si (RESP == Y o y)

```

```

        Para i desde 1 hasta N
            s = [zeros(1, M * N)];
            s(1, i * M) = Valim * -1i * (2 * M - 1) / Le(i);
            s = s';
            Inm = Anm \ s;
            size(Inm);
            phi = 1;
            Para theta desde 1 hasta 3600
                SumEN = 0;
                Para n desde 1 hasta N
                    AAA = exp(1i * 2 * pi * YP(n) * sin(theta * pi / 1800)) * sin(phi * pi / 2);
                    SumEM = 0;
                    Para m desde 1 hasta M
                        SumEM = Inm((M * (n - 1) + m), 1) * (Zmas(m, (theta * pi / 1800), n) + Zmenos(m, (theta * pi / 1800), n)) + SumEM;
                    Fin Para
                SumEN = SumEM * AAA * Le(n) + SumEN
            Fin Para

```

```

        Fin Para
        Etheta(1, theta + 1) = 1i * (3 * 10 ^ 8) * (4 * pi * 10 ^ -7) / 4 * sin(theta * pi / 1800) + YP(n) * pi / . 2 5 ) * SumEN;
        Inmglob = Inmglob + Inm;
    Fin Para

```

```

Fin Para
entonces (RESP == No n)
si (N>1)
    Imprimir (¿El voltaje de ali
    mentación depende solode la distancia de
    separación de los elementos?);
    INGRESE: RESP (Y o N);
    entonces
        RESP = N ;
Fin si
Para i desde 1 hasta N
    s = [zeros(1,M*N)];
    si (RESP == Y o y)
        b=Valim*cos(YP(i) * pi /
        .25);
        Vf(i) = b;
        s(1,i*M)=b*-1i*(2*M-1)/
        Le(i)
        entonces (RESP == No n );
        Imprimir (Voltaje de alimentación
        del elemento #2d (en voltios) = );
        INGRESE: b ;
        s(1,i*M)=b*-1i*(2*M-1)/Le(i);
Fin Para
    s = s' ;
    Inm = Anm \ s ;
    phi = 1 ;
Para theta desde 1 hasta 3600
    SumEN = 0 ;
Para n desde 1 hasta N
        AAA = exp (1i*2*pi*YP(n)*sin (t
        heta * pi / 1800) * sin (phi * pi / 2) );
        SumEM = 0 ;
        Para m desde 1 hasta M
            SumEM =
            Inm((M*(n-1)+m),1) *(Zmas(m, (theta * pi / 1800),
            n) + Zmenos (m, (theta * pi / 1800), n)) + SumEM;
Fin Para
        SumEN = SumEM * AAA * Le(n)
+SumEN ;
Fin para
    Etheta(1,theta+1)=
    Etheta(1,theta+1)+li*(3*10^8)*(4*pi*10^-7)/4
    *sin(theta*pi/1800)*exp(1i*2*pi*YP(n)*cos (t
    heta * pi / 1800+YP (n) * pi / .25) *SumEN;
    Inmglob=Inmglob+Inm;
Fin Para
Fin Para
    Vf;
Fin si
    AbsEtheta = abs (Etheta);
    MaxAbsTheta = max (AbsEtheta);
    tabla(3600,2) = zeros ;
Para theta desde 1 hasta 3600
        E(theta)=(AbsEtheta(theta)).^2;
        tabla(theta,1)=theta/10;
        tabla(theta,2)=E(theta);
        si (AbsEtheta(theta)/MaxAbsTheta) >
        (10^-6)
            EthetaDB(theta)= 20*log10 (AbsEthe
            ta(theta) / MaxAbsTheta);
            entonces
                EthetaDB (theta) = -120;
Fin si
Fin Para
    leng=length(tabla);
    Cálculo del ancho del haz de la antena, directividad y
    relación delante - atrás
    MaxEtheta=max(E);
    tol=MaxEtheta/100;
Para theta desde 1 hasta 3600
        si E(theta) == MaxEtheta
            thetadir=theta;
            si thetadir-1800<0
                RFB=10*log10 (abs
                (E(thetadir) / E (thetadir+1800)));
            entonces
                RFB= 10 * log10 (abs
                (E(thetadir) / E (thetadir-1800)));
Fin si
Fin Para
Fin si
Fin Para
    MaxEnmax=Enmax(thetadir/1800*pi,pi/2)
    Piso=integral2 (@Energia, 0,pi,0,2 *
    pi, Method, iterated , AbsTol ,1e-3, Rel
    Tol ,1e-5);
    Dir=4*pi*MaxEnmax/ abs (Piso);
    direct= 10*log10 (Dir);
Imprimir (La ganancia máxima del arreglo lineal
    de antenas dipolo de d elementos es: f dB\n ,N, direct );
Para theta desde thetadir hasta 3600
        si E (theta) >= 1 / 2 * MaxEtheta &&
        E(theta) <= 1 / 2 * MaxEtheta + tol
            thetamed=theta;
            sale del lazo
Fin si
Fin Para
    AnB=2* abs ((thetadir-thetamed) / 10);
Imprimir (La relación delante atrás del arreglo
    lineal de antenas dipolo de d elementos es: f dB
    \n , N, RFB);
Imprimir (El ancho del haz del arreglo lineal de
    antenas dipolo de d elementos es: f grados\n , N,
    AnB);
    __INCLUSIÓN DE ARCHIVO CON DATOS GENERADOS
    EN MMANA-GAL
    filename = ... 34lambda100s.csv ;
    delimiter = , ;
    startRow = 2;
    ParamatSpec = _f_f_f_f_f_[^ \n \r ] ;
    
```

```

fileID = fopen(filename, r);
dataArray=textscan(fileID, ParamatSpec, Delimiter, d
elimiter, TextType, string, HeaderLine
s, startRow-1, ReturnOnError, false, Fin
OfLine, \r\n);
fclose(fileID);
lambda3_4100s = table(dataArray
{1:fin-1}, VariableNames, {ZENITHDEG,
AZIMUTHDEG, VERTdBi, HORIdBi, TOTALdBi});
clearvars filename delimiter startRow
ParamatSpec fileID dataArray ans;
Comp=lambda3_4100s(:,4);
Comp=Comp{:, :};
C=Comp';
Cálculo del ancho del haz de la antena, directividad y
relación delante-atrás, con datos de MMANA-
GAL
MaxEtheta=-15;
Para theta desde 1 hasta 3600
    si C(theta)>MaxEtheta
        MaxEtheta=C(theta);
    Fin si
Fin Para
MaxEtheta;
direct=MaxEtheta;
Imprimir(La ganancia máxima del arreglo lineal de
antenas dipolo, usando MMANA-GAL, de elementos
es: f dB \n, N, direct);
tol=MaxEtheta/100;
Para theta desde 1 hasta 3600
    si C(theta)==MaxEtheta
        thetadir=theta;
        si thetadir-1800<0
            RFBM=abs(C(thetadir)-C(t
hetadir+1800));
        entonces
            RFBM=abs(C(thetadir)-C(t
hetadir-1800));
        Fin si
    Fin si
Fin Para
Para theta desde thetadir hasta 3600
    si C(theta)>=MaxEtheta-3 && C(th
eta)<=MaxEtheta-3+tol
        thetamed=theta;
        sale del lazo
    Fin si
Fin Para
AnBM=2*abs((thetadir-thetamed)/10);
Imprimir(La relación delante atrás del arreglo lineal
de antenas dipolo, usando MMANA-GAL, de elementos
es: f dB \n, N, RFBM);
Imprimir(El ancho del haz del arreglo lineal de
antenas dipolo, usando MMANA-GAL, de elementos
es: f grados \n, N, AnBM);

```

```

theta desde 0, cada pi/180 hasta 2*pi-pi/18
00;
Se presentan las gráficas que se obtienen
figura(1);
polar(theta, Etheta DB, green);
figura(2);
polar(theta, E, red);
figura(3);
polar(theta, C, blue);
Definición de funciones para el programa:
Función para cálculo de la integral de la Función de
Green de la integral de Pocklington
función y=integral G2(Z)
global Le LM N1 N2 M1 M2 Rred
Rplus=sqrt(Rred+(LM(N1,M1)+Z).^2);
Rminus=sqrt(Rred+(LM(N1,M1)-Z).^2);
y=((exp(-1i*2*pi*Rminus)/(Rminus)) +
((exp(-1i*2*pi*Rplus)/(Rplus))))*cos((2*M2-1)*pi
.*Z./Le(N2));
Función para cálculo de la sumatoria de la Función de
Green de la integral de Pocklington
función G2=sumatoria G2(UL)
global Rred N1 M1 LM
Rplus=sqrt(Rred+(LM(N1,M1)+UL).^2);
Rminus=sqrt(Rred+(LM(N1,M1)-UL).^2);
G2=exp(-1i*2*pi*Rplus)/
Rplus+exp(-1i*2*pi*Rminus)/Rminus;
Función para el cálculo de la componente angular
positiva del potencial vectorial.
función y=Zmas(m,theta,n)
global Le
y1=(((2*m-1)*pi)/Le(n)+2*pi*cos(theta))*Le(n)/2
si y1==0
    y=1;
    entonces
        y=sin(y1)./y1;
    Fin si
Función para el cálculo de la componente angular
negativa del potencial vectorial.
función y=Zmenos(m,theta,n)
global Le
y1=(((2*m-1)*pi)/Le(n)-2*pi*cos(theta))*Le(n)/2
si y1==0
    y=1;
    entonces
        y=sin(y1)./y1;
    Fin si
Función para el cálculo de la energía acumulada
alrededor del elemento radiante y por influencia de
elementos colindantes.
función y=Energia(theta,phi)
global MN YP Le Inm glob
SumEN=0;
Para n desde 1 hasta N
    AAA=exp(1i*2*pi*YP

```

```
(n).*sin(theta).*sin(phi));
    SumEM= 0;
    Para m desde 1 hasta M
        SumEM=Inmglob((M*(n-1)+m)
,1)*(Zmas(m,theta,n)+Zmenos(m,theta,n))+SumEM
    Fin Para
    SumEN=SumEM.*AAA.*Le(n)/2+
SumEN;
    Fin Para
    y=3.75*pi.*(abs(SumEN).^
2).*(sin(theta).^3);
Función para el cálculo de la energía máxima acumulada
alrededor del elemento radiante y por influencia de
elementos colindantes.
función y=Enmax(theta,phi)
global MN YP Le Inm glob
SumEN = 0;
Para n desde 1 hasta N
    AAA=exp(1i*2*pi*YP(n).*sin(
theta).*sin(phi));
        SumEM= 0;
        Para m desde 1 hasta M
            SumEM= Inm
glob((M*(n-1)+m),1)*(Zmas(m,theta,n)+
Zmenos(m,theta,n))+SumEM;
        Fin Para
        SumEN = SumEM.*AAA.*
Le(n)/2+SumEN;
    Fin Para
    y=3.75*pi.*(abs(SumEN).^
2).*(sin(theta).^2);
```

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realiza la comparación de los patrones de radiación obtenidos en la investigación, con los dados por los fabricantes, los presentados en los textos y los obtenidos mediante el uso del simulador MMANA – GAL.

Se trabajó con antenas o sistemas radiantes a las frecuencias de operación: banda III, de 174 a 200 MHz y banda IV, de 470 a 488 MHz y de 512 a 608 MHz.

#### 3.1 Criterios de comparación para los parámetros de los diagramas de radiación

Dado que al encontrar los diagramas de radiación de los elementos o sistemas radiantes se obtienen

gráficas que presentan magnitudes relativas de los campos que se generan, las comparaciones geométricas entre los diagramas de radiación van a ser fundamentales, así:

**Tabla 1.**

*Criterios de valoración para definir la relación de aspecto de los diagramas de radiación obtenidos*

Parámetros	TOTAL	SIGNIFICATIVA	INEXISTENTE
Ubicación angular del diagrama	5		Patrón no Válido
Número de lóbulos principales	5		Patrón no Válido
Número de lóbulos secundarios	5	3	1
Magnitud de lóbulos	5	3	1
Nulos	5	3	1

Los diagramas que no presenten coincidencia en su ubicación angular ni en su número de lóbulos principales, se les considera inhabilitados para análisis posteriores de sus patrones.

Con la suma de los criterios de la Tabla 1, se define la Tabla 2:

**Tabla 2.**

*Valoraciones de la Relación de Aspecto de los diagramas de radiación obtenidos*

Relación de aspecto	$\sum crit$
Excelente	$23 \leq \sum crit \leq 25$
Con mucha coincidencia	$20 \leq \sum crit < 23$
Con poca coincidencia	$15 \leq \sum crit < 20$

Además de los criterios geométricos de comparación de los patrones de radiación, también se plantean otros criterios que permiten comparar de manera más cuantitativa los patrones de radiación obtenidos:

**Tabla 3.**

*Criterios de valoración para comparar los diagramas de radiación obtenidos*

Parámetros	Excelente o a comparar	Con mucha coincidencia o	Con poca coincidencia o
	$ \xi_r \%  \leq 3\%$	$3\% <  \xi_r \%  \leq 10\%$	$10\% <  \xi_r \%  \leq 20\%$
Relación de aspecto	5	3	1
RFB	5	3	1
Directividad	5	3	1
Ancho del haz	5	3	1

Al hacer uso del error relativo porcentual, se consideran como valores reales los de referencias externas a la investigación y como valores medidos los obtenidos en la investigación.

Con la suma de los criterios de la Tabla 3, se define la Tabla 4:

**Tabla 4.**

Valoraciones de los patrones de radiación obtenidos

Patrones de Radiación	de	$\sum crit$
Excelente		$18 \leq \sum crit \leq 20$
Con coincidencia mucha		$16 \leq \sum crit < 18$
Con coincidencia poca		$10 \leq \sum crit < 16$

### 3.2 De las antenas dipolo

Se realizó la comparación de las características de los patrones de radiación del dipolo elemental:  $h \leq \lambda/50$ , con respecto del dado por [6] y con respecto del obtenido haciendo uso del simulador MMANA-GAL obteniéndose una Excelente coincidencia entre sus características, así:

**Tabla 5.**

*Comparación de los diagramas de radiación del dipolo elemental*

Parámetros a comparar	En la investigación	Según Luna, Alejandro	$ \xi_r \% $	MMANA-GAL	$ \xi_r \% $
Relación de aspecto		Excelente		Excelente	
RFB (dB)	0	0	0	0	0
Directividad (dBi)	1.76	1.76	0	1.76	0
Ancho del haz (°)	89	90	1.111	88.4	0.679

Para la comparación de los patrones de radiación del dipolo de longitud finita:  $\lambda/10 \leq h \leq 3\lambda$ , se lo realizó tanto para un dipolo de  $\lambda/2$  como para un dipolo de  $3/2 \lambda$  con respecto de los dados por [7] y con respecto de los obtenidos haciendo uso del simulador MMANA-GAL obteniéndose unas Excelentes coincidencias entre sus características, como se muestra en la siguiente tabla: (Anexo Tabla 6)

### 3.3. De los arreglos de antenas dipolo

#### 3.3.1. Del arreglo tipo Yagi – U da

Se realizó la comparación de las características de los patrones de radiación de un arreglo Yagi-Uda de 3 elementos, con respecto del dado por [3] y con respecto del obtenido haciendo uso del simulador MMANA-GAL obteniéndose poca coincidencia entre sus características, como se muestra en la tabla: (Anexo Tabla 6)

La comparación de los patrones de radiación de un arreglo Yagi-Uda de 6 elementos, con respecto de los dados por [8] presentan mucha coincidencia; y se encuentra que tienen poca coincidencia entre sus características con las del patrón de radiación resultante del uso del simulador MMANA – GAL, como se muestra en la tabla: (Anexo Tabla 7)

Al comparar los patrones de radiación de un arreglo Yagi-Uda de 5 elementos, se encuentra que tanto con respecto de los dados por [9] como el resultante de usar el simulador MMANA – GAL, presentan una excelente coincidencia entre sus características; como se muestra en la tabla: (Anexo Tabla 8)

#### 3.3.2. Del arreglo tipo Log – Periódico

Se realizó la comparación de las características de los patrones de radiación de un arreglo Log – Periódico de 5 elementos, con respecto del dado por [10] y con respecto del obtenido haciendo uso del simulador MMANA-GAL obteniéndose escasa coincidencia entre sus características, como se muestra en la tabla: (Anexo Tabla 9)

La comparación de los patrones de radiación de un arreglo Log – Periódico de 13 elementos, con respecto de los dados por [10] presentan poca coincidencia; y se encuentra que tienen escasa coincidencia entre sus características con las del

patrón de radiación resultante del uso del simulador MMANA – GAL, como se muestra en la tabla: (Anexo Tabla 10)

#### 4. CONCLUSIONES

4.1 Dados los resultados obtenidos de las comparaciones de las características de los patrones de radiación, se encuentra que el programa desarrollado entrega excelentes resultados para antenas simples, dipolos elementales y dipolos cortos, y tiene validez pues entrega resultados muy cercanos a los esperados para los arreglos de dipolos lineales tipo Yagi – Uda, pero no entrega resultados adecuados para los arreglos de dipolos lineales tipo Log – Periódicos, para los que se lograron pocas coincidencias entre las características esperadas, siendo la característica más aceptable que se obtiene, la de la directividad del arreglo.

4.2 El papel de la modelación y la simulación en los procesos de enseñanza-aprendizaje en la ingeniería, y en particular de los ingenieros en electrónica y telecomunicaciones se destaca con la presente investigación.

4.3 Al modelo trabajado en la presente investigación, que se basa en la integral de Pocklington, le hace falta considerar la influencia mutua entre los elementos activos, dado que se asume para la modelación que el elemento activo en análisis es el único que se encuentra radiando, sin considerar en efecto que los otros elementos se encuentran radiando simultáneamente.

Se llega a la anterior conclusión puesto que cuando se trabaja con distinta cantidad de modos en este tipo de sistemas radiantes con varios elementos activos, los lóbulos principales de radiación no mantienen la misma disposición angular.

4.4 En el modelo desarrollado en la investigación realizada no se considera la posibilidad de contar con elementos con distinto radio, situación que no permite obtener las mejores características de los patrones de radiación que se esperan; la diferenciación de los distintos radios de los elementos lo tiene incorporado el MMANA-GAL, lo que hace que este programa libre sea uno de los más confiables para la modelación y simulación de arreglos de antenas.

#### REFERENCIAS

- [1] GALÁRRAGA, J., *Simulación y Descripción Matemática de Patrones Derivados de Sistemas de Radiación Tipo Dipolos para señales de TDT ISDB-T Internacional*, Master's thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, ag 2021.
- [2] C. BALANIS, *Antenna Theory, analysis and Design*, John Wiley & Sons, third ed., 2005.
- [3] I. CASTILLO, JOSÉ Y QUIROZ, *Desarrollo de software para el diseño de antenas yagi-uda y reflector de esquina*, Master's thesis, Universidad San Francisco de Quito, dec 2009.
- [4] ZUÑIGA, S. Jun 2014. *MANUAL MMANA-GAL*. Recuperado el 30 de octubre de 2023 de: [http://www.ea1uro.com/pdf/Manual\\_XQ2CG\\_-\\_MMANA\\_Gal\\_v1.pdf](http://www.ea1uro.com/pdf/Manual_XQ2CG_-_MMANA_Gal_v1.pdf).
- [5] ALCIVAR, R., *Desarrollo de una plataforma virtual como apoyo para el aprendizaje autónomo de sistemas radiantes de Telecomunicaciones*. (Tesis de Grado) Universidad Nacional de Chimborazo. Riobamba, Ecuador, nov. 2023.
- [6] ALVARADO, R. y DIETES, F., *Plataforma Corporativa Grupo de Investigación en Nuevas Tecnologías (GNET)*, Oficina de investigaciones Unidades Tecnológicas de Santander, Colombia, feb. 2017.
- [7] SARKAR, T. K., DJORDJEVIC, A. R., & KOLUNDZIJA, B. M.. *Method of moments applied to antennas*. In *Handbook of Antennas in Wireless Communications* (pp. 8-1). CRC Press. 2018.
- [8] PÉREZ, J., et al. “*Construcción y simulación de una antena Yagi-Uda de 550 MHz con MMANA-Gal*.” *Visum Mundi* 5.1 (2021).
- [9] PRAMONO, EKO, y NUR WIDJIYATI. “*Analisa Front To Back Ratio Antena Yagi Pada Sistem LoRa Di Frekuensi 915 Mhz Menggunakan Software MMANA-Gal*.” *Smart Comp: Jurnalnya Orang Pintar Komputer* 12.2 (2023): 347-355.
- [10] G. THIELE, *Analysis of Yagi-Uda-Type Antennas*, vol. AP-17 of *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, IEEE, first ed., jan 1969.
- [11] A. LUNA, *Desarrollo de una guía para la representación 2d y 3d del diagrama de radiación de antenas*, jul 2017.
- [12] A. Y PÉREZ, *Antenas*, Universidad de Cataluña, first ed., 2005.
- [13] P. L. Y. C. R. GÓMEZ J., *Diseño de antenas yagi uda usando algoritmos genéticos*, *Ciencia Investigación Academia Desarrollo*, 8 (2003), pp. 19–24.
- [14] KATHREIN, *Selector de antena de transmisión*.
- [15] ELEKTRONIK, *Datasheet 9108*, 2013

## Anexos

**Tabla 6.**  
*Comparación de los diagramas de radiación del dipolo de  $\lambda/2$*

Parámetros a comparar	En la investigación	Según Anguera y Pérez	$ \xi_r \%$	MMANA-GAL	$ \xi_r \%$
Relación de aspecto			Excelente		Excelente
RFB (dB)	0	0	0	0	0
Directividad (dBi)	2.14	2.18	1.835	2.18	1.835
Ancho del haz ( $^\circ$ )	89	90	1.111	88.4	0.679

**Tabla 6.**  
*Comparación de los diagramas de radiación del arreglo tipo Yagi - Uda de 3 elementos*

Parámetros a comparar	En la investigación	Según Castillo y Quirós	$ \xi_r \%$	MMANA-GAL	$ \xi_r \%$
Relación de aspecto			Con poca coincidencia		Con poca coincidencia
RFB (dB)	9.06	12.81	29.27	11.11	18.45
Directividad (dBi)	9.66	9.25	4.43	9.43	2.44
Ancho del haz ( $^\circ$ )	54.6	52.48	4.04	53.6	1.87

**Tabla 7.**  
*Comparación de los diagramas de radiación del arreglo tipo Yagi - Uda de 6 elementos*

Parámetros a comparar	En la investigación	Según Gómez-Páez-Celeita	$ \xi_r \%$	MMANA-GAL	$ \xi_r \%$
Relación de aspecto			Excelente		Con poca coincidencia
RFB (dB)	8.6	9.42	8.71	9.16	6.11
Directividad (dBi)	11.17	11.53	3.12	11.93	1.93
Ancho del haz ( $^\circ$ )	39.8	42.19	5.67	39.6	0.51

**Tabla 8.**  
*Comparación de los diagramas de radiación del arreglo tipo Yagi - Uda 600265 de 5 elementos*

Parámetros a comparar	En la investigación	Según Kathrein	$ \xi_r \%$	MMANA-GAL	$ \xi_r \%$
Relación de aspecto			Con poca coincidencia		Excelente
RFB (dB)	9.59	15	36.07	9.37	2.35
Directividad (dBi)	9.35	8.15	14.72	9.06	3.2
Ancho del haz ( $^\circ$ )	52.8	55	4	53.2	0.75

**Tabla 9.**  
*Comparación de los diagramas de radiación del arreglo tipo Log - Periódico 75010242 de 5 elementos*

Parámetros a comparar	En la investigación	Según Kathrein	$ \xi_r \%$	MMANA-GAL	$ \xi_r \%$
Relación de aspecto			Excelente		Con mucha coincidencia
RFB (dB)	8.17	17	51.94	6.83	19.62
Directividad (dBi)	8.35	7.15	16.78	7.88	5.96
Ancho del haz ( $^\circ$ )	52.4	60	12.67	49.4	6.07

**Tabla 10.**  
*Comparación de los diagramas de radiación del arreglo tipo Log - Periódico D9108A de 13 elementos*

Parámetros a comparar	En la investigación	Según ELEKTRONIK	$ \xi_r \%$	MMANA-GAL	$ \xi_r \%$
Relación de aspecto			Excelente		Con mucha coincidencia
RFB (dB)	19.86	18	10.33	12.8	51.16
Directividad (dBi)	6.98	6.9	1.16	6.86	1.75
Ancho del haz ( $^\circ$ )	57.2	64	10.63	71	19.44