DISEÑO ÓPTIMO DE ANTENAS YAGUI-UDA

Carlos Iván Páez Rueda* Roberto Bustamante Miller **

Resumen

Este artículo presenta una investigación realizada en el área de antenas. Combina el análisis electromagnético con el diseño por medio de algoritmos genéticos para resolver problemas de radiación que surgen en aplicaciones de telecomunicaciones y similares.

Palabras Claves

Antenas, Métodos Numéricos, Algoritmo Genético.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad innata del ser humano de comunicarse en cualquier momento y en cualquier lugar ha impulsado los mas asombrosos avances tecnológicos. Ya hace mas de un siglo que Hertz demostró la posibilidad de enviar ondas electromagnéticas de un punto al otro vía inalámbrica. Menos de una década después, Marconi puso en marcha la primera comunicación transatlántica dando origen al negocio de las telecomunicaciones.

En particular, el arte de los transductores electromagnéticos (Antena) ha sido analizado con todo el rigor por los científicos, produciendo una gran diversidad de formas y tamaños de acuerdo a la aplicación específica.

En los últimos treinta años, gracias al avance de los computadores y de las técnicas numéricas se han producido mejoras significativas en los parámetros de desempeño de las antenas, debido a que se han podido implementar dichos métodos numéricos para estructuras muy complejas.

Un tipo de antena muy utilizada debido a su simplicidad y facilidad de construcción, es conocida con el nombre de Antena de Alambre Delgado. Dicha estructura es producto de moldear uno o mas buenos conductores en una forma tubular y con un diámetro pequeño comparado con su longitud total.

Modificaciones y adiciones a este tipo de estructuras han sido propuestas infinidad de veces produciendo cada vez mas novedosos y sorprendentes tipos de antenas, entre las cuales se puede mencionar las antenas en forma Recta, de Circulo, en forma de V y entre las estructuras mas complejas, se puede mencionar las antenas helicoidales, Antenas periódicas logarítmicas y Antenas Yagui-Uda.

En especial, este último tipo de antena fue propuesto por primera vez en 1927 por el profesor S. Uda de la Universidad Imperial de Tohoku en Japón y fue dada a conocer en Occidente por su colega H. Yagui, convirtiéndose inmediatamente en un clásico de la teoría de antenas [1].

* M.Sc Ingeniería Eléctrica, Uniandes.

** Profesor Asociado, Dpto. Ing. Eléctrica y Electrónica Uniandes.

Debido a que ésta permite tener unas características de radiación importantes, como son una emisión o recepción directiva en cierta región del espacio (Alta Directividad), una baja radiación o recepción de ondas desde la parte trasera de la antena (F/B) y una facilidad de acoplamiento (impedancia, VSWR), ha sido objeto de un extenso y exhaustivo análisis y experimentación en los últimos cincuenta años (ver figura No. 1).

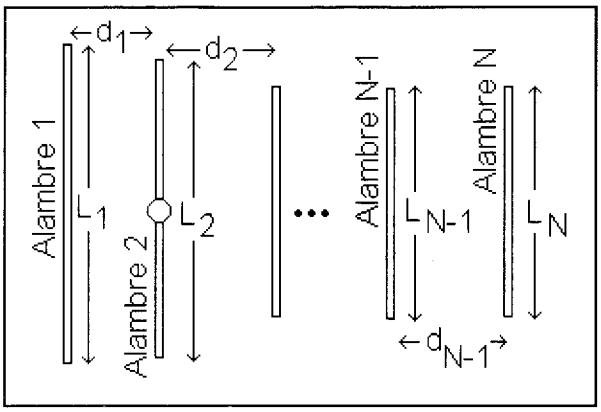

Figura No. 1. *Forma de la Antena Yagui-Uda Recta*

Resultados para el diseño de este tipo de antena se encuentran en [2,3 y 4] y métodos de diseño se encuentran [1,5,6,7 y 8]. Sin embargo, éstos solo se encuentran implementados con métodos de optimización basados en gradientes y/o para estructuras cuyos alambres son rectos.

En la primera parte del presente artículo, se presenta una introducción al problema y el método de solución electromagnético asociado con antenas de alambre curvilíneo, en la segunda parte se presenta el algoritmo de optimización utilizado para solucionar el complejo problema del diseño de este tipo de Antena. A continuación, se plantea curvar la forma del alambre de una antena Yagui-Uda para producir una mejora sustancial en sus parámetros de radiación [13]. Los resultados de esta topología (Antena Yagui-Uda Curvilínea) fueron obtenidos por medio de un computador Silicon Graphics (SGI origin 2000) con 600 MFLOPS perteneciente a la Universidad de los Andes.

2. Formulación General.

El problema de radiación de una antena se puede reducir a determinar a partir de la forma y composición de la estructura en conjunto con la posición de las fuentes de alimentación, las variables desconocidas en campo lejano, a través de pasos intermedios que involucran las variables y ecuaciones de Maxwell [1]. Este método se puede resumir con el siguiente diagrama en bloques.

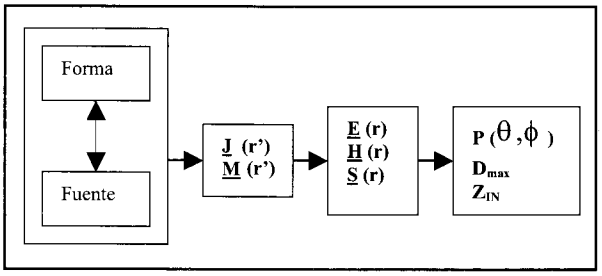

Figura No. 2. *Método de Solución.*

Donde $P(\theta,\phi)$ es la forma (patrón) de radiación de la antena, D_{max} es la Directividad máxima de la antena y Z_{IN} es la impedancia de entrada de la misma.

Dada la complejidad que involucra realizar este proceso es muy difícil encontrar soluciones genéricas a todo tipo de problema. Es aquí cuando los métodos numéricos juegan un papel fundamental. En la década de los cincuenta, Harrington [9] propuso un método numérico general el cual se conoce hoy en día como el nombre de Método de los Momentos (MoM), el cual estima las Densidades de Corrientes Eléctrica Impresa $\underline{\mathbf{J}}(\mathbf{r}')$ a partir de los parámetros de la estructura y la frecuencia de operación. Este método fue implementado en el presente análisis, para obtener los resultados de la antena propuesta.

2.1. Hipótesis del Problema.

Para iniciar el análisis, se considera que la antena es del tipo de Alambre Delgado y se encuentra en un medio dieléctrico ideal (vacío) y formada por un material con conductividad ideal ($\underline{\mathbf{M}}(\mathbf{r}')=0$) [1].

Bajo estas condiciones, se puede considerar

como nulas las variaciones transversales de las Densidades de Corrientes Eléctrica impresa **J(r')** en la superficie S' del alambre, permitiendo aproximar ésta, por medio de una Densidad de Corriente filamental **I**. (ver figura No. 3) [8].

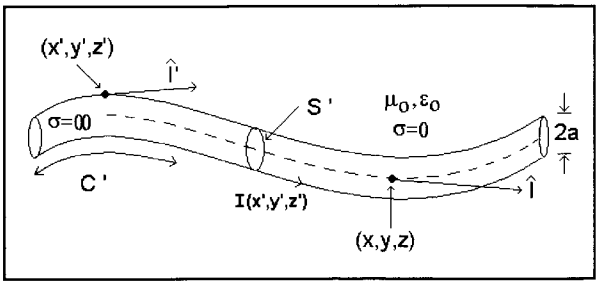

Figura No. 3. *Geometría del Problema*

Para solucionar este problema, se debe plantear las condiciones de frontera en las superficies del alambre, la cual consiste en que las componentes de la Intensidad del campo eléctrico (**E**) tangenciales a la superficie son cero. Dichas componentes están formados por las componentes $\mathbf{E}^s$ y $\mathbf{E}^i$, que representan la Intensidad del Campo Eléctrico Radiado y producido por el generador en la superficie conductora, respectivamente. Bajo estas condiciones, la Corriente **I** debe cumplir la ecuación integro-diferencial de Pocklington definida en (1) donde G(r,r') es la función de Green en el espacio libre [10].

$$\mathbf{E}^i(r)o\hat{l} = \frac{-1}{jw\varepsilon}\int_{C'} I(l')\left\{\beta^2 G(r,r')\hat{l}'o\hat{l} - \frac{\partial}{\partial l}\frac{\partial}{\partial l'}G(r,r')\right\}dl' \quad (1)$$

2.2. Técnicas de Solución.

Para solucionar esta expresión, se subdivide la antena curvilínea como si ésta estuvieran formada por la unión de diferentes segmentos lineales (figura No. 4).

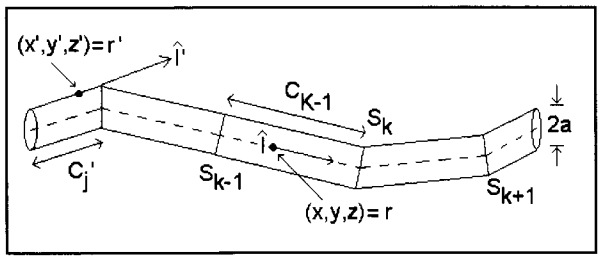

Figura No. 4. *Segmentación del Alambre.*

Se expresa la Corriente **I**, como una combinación lineal de funciones base conocidas, definidas en (2).

$$I(l') = \sum_{k=1}^{k=n} a_k f_k(l') \quad (2)$$

Para disminuir el error numérico producido al considerar n diferentes puntos de prueba a lo largo del alambre $(r = r_j, \forall j = 1,\ldots,n)$ en (1) y (2), se define un producto interior entre dichas funciones y una nuevas funciones g_j, denominadas funciones de Peso [9].

Aplicando éste operador y reorganizando la expresión de forma matricial, se obtiene (3).

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{1n} \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot & \cdot \\ Z_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}^i(r_1)o\hat{l}_1, g_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \mathbf{E}^i(r_n)o\hat{l}_n, g_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde los términos de la matriz Z_{ij} se conocen en la teoría de antenas como las impedancias mutuas de la estructura y pueden ser determinados a partir de (1) [9].

Los coeficientes desconocidos a_k, se pueden determinar por medio de técnicas de inversión de matrices, ya que se puede estimar en todo punto la Intensidad del Campo Eléctrico Impreso sobre la superficie del alambre ($\mathbf{E}^i$).

Cuando se escoge la misma forma para las funciones base y las funciones de Peso, el MoM recibe el nombre de procedimiento Galerkin. Para el presente trabajo se escogió dicho procedimiento con funciones del tipo subdominio, denominadas Paso Sinusoidales [1 y 10].

2.4. Cálculo de Variables.

Para determinar las variables que permiten caracterizar a una antena en campo lejano, se siguió el procedimiento esquematizado en la figura No. 2 y profundizado en la referencia [10]. Los resultados obtenidos por medio de este método se pueden observar en la siguiente figura, para una antena de Alambre delgado de forma

curva alimentada por el centro, con un arco total de 1.5l y una frecuencia definida por medio de f=3e8/λ.

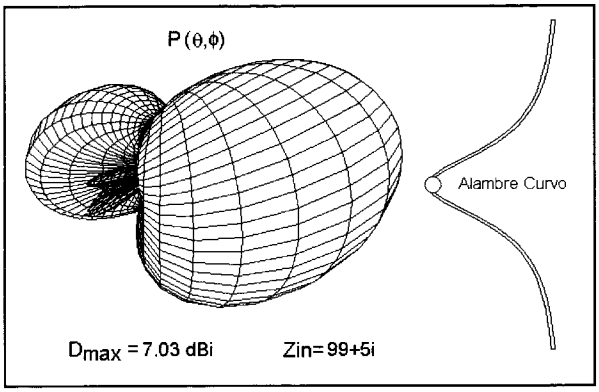

Figura No. 5. *Resultados de una antena Curvo.*

Desde el punto de vista de diseño, se desea modificar los parámetros de la forma y de la longitud de la antena para encontrar entre otros parámetros, la mayor Directividad máxima posible y una impedancia de entrada de la antena, tal que permita el máximo acoplamiento de ésta a la línea de transmisión de alimentación. Para el presente trabajo, se consideró una línea de transmisión típica para aplicaciones de radio con un valor de la Impedancia característica de 50Ω.

Para obtener una medida cuantitativa de la influencia de todos los parámetros, se elaboró la función definida por medio de (4), la cual con los valores adecuados de las constante a, b y c, permite evaluar en conjunto el desempeño de la antena.

$$g(x) = aD_{max} - b\,50 - \mathrm{Re}\{Z_{IN}\} - c\,\mathrm{Im}\{Z_{IN}\} \quad (4)$$

3. Método de Optimización.

La función definida en (4), para estructuras complejas como lo es la antena Yagui-Uda, presenta demasiados máximos y mínimos, haciendo del procedimiento de maximización un problema técnico importante. Por esto, se decidió utilizar un Algoritmo Genético (AG) como método de optimización, ya que éste permite con el concepto heurístico de la evolución natural encontrar si no el óptimo de la función, si una respuesta al diseño con excelentes medidas de desempeño. Para este algoritmo se tomó como parámetros de entrada la forma, tamaño y separación de cada alambre del cual esta compuesta la antena Yagui-Uda [12].

3.1. Descripción.

El uso de un AG requiere la definición de seis parámetros fundamentales a saber: El Cromosoma, La Función de Selección, Los Operadores Genéticos, La Población Inicial, El Criterio de Terminación y por último, La Función Objetivo [11 y 12].

Se define un Cromosoma o Individuo j como una secuencia de genes (A_k) de un cierto alfabeto, representados por medio de un vector de *m* dimensiones. Para una antena Yagui-Uda conformada con alambres rectos (ver figura No. 1), se puede entender el cromosoma j como el vector definido en (5), donde los genes están conformados por las variables que definen la longitud y separación de cada alambre.

$$\mathbf{A}j = [L_1, L_2, ..., L_{N-1}, L_N, d_1, d_2, ..., d_{N-1}] \quad (5)$$

La función de Selección se encarga de elegir los individuos mas aptos de cada generación. El criterio utilizado para esta función se denomina *Clasificación Geométrica Normalizada*, la cual asigna a todo Individuo j una probabilidad de ser escogido P_j de acuerdo a la jerarquía u ordenamiento de la función objetivo, que para el problema particular fue definida por medio de (4) [10 y 11]. En este caso, se observa el papel fundamental que juega el MoM, ya que permite integrar el método numérico electromagnético (MoM) con el AG.

Los Operadores Genéticos proveen el mecanismo básico de búsqueda del AG. Estos operadores son utilizados para generar nuevas soluciones basados en las soluciones ya existentes en la población. Los dos operadores básicos utilizados fueron: El Cruzamiento y La Mutación.

El Cruzamiento, es un operador que genera dos nuevas soluciones (Hijos) a partir de dos ya existente (Padres). El criterio utilizado se denomina *Cruzamiento Aritmético*, el cual produce dos nuevas soluciones a partir de combinaciones lineales de sus Padres por medio de (6), donde r es una variable uniformemente distribuida en

el intervalo 0 y 1.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_m &= r \cdot \mathbf{A}_m + (1-r) \cdot \mathbf{A}_n \\ \mathbf{A}_n &= (1-r) \cdot \mathbf{A}_m + r \cdot \mathbf{A}_n \end{aligned} \qquad (6)$$

La Mutación, es un operador encargado de mantener la diversidad de la población. Este operador altera un individuo para producir una nueva solución. El criterio utilizado se denomina *Mutación Aleatoria Uniforme*, la cual selecciona un gen (A_k) de un individuo aleatoriamente escogido y lo reemplaza por una variable aleatoria uniformemente distribuida entre los límites del gen [11].

El Criterio de Terminación está dado por el número máximo de generaciones o por un nivel de variación de la función objetivo.

La Población Inicial se determina por la medio de la inicialización de N cromosomas ya sea por un criterio de selección aleatoria o alguna específica producto del conocimiento previo del problema.

En la figura No. 6 se detalla el diagrama en bloques de la interacción de todos los componentes del Algoritmo Genético.

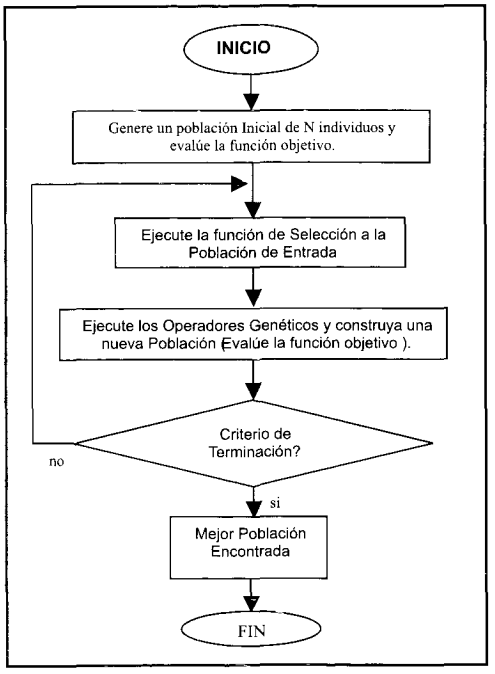

Figura No. 6. *Diagrama en Bloques del AG.*

3.2. Parámetros del Algoritmo.

Para el diseño de la antena Yagui-Uda curvilínea, se generó una población inicial de 40 a 150 individuos uniformemente distribuidos y para el criterio de terminación, se considero un rango de 20 a 30 generaciones, dependiendo del tipo de antena. Para efectos de comparación y diseño, se consideraron dos diferentes casos de optimización: Máxima Directividad (MaxD) y Máxima Directividad con impedancia acoplada (MaxDRin). Los valores adecuados de las constantes a, b y c fueron de 1, 0 y 0 para el caso MaxD y 40, 1 y 1 para el caso MaxDRin, respectivamente [7].

4. Antenas Yagui-Uda Curvilíneas

Es bien sabido en la teoría de antenas, que cuando se incrementa la longitud de una Antena de alambre mas allá de una longitud de onda ($L>\lambda$), ésta empieza a disminuir su Directividad máxima y a presentar grandes lóbulos de radiación secundarios. Landstorfer razonó en [13], que en este caso en particular, curvando la forma del alambre se podría incrementar la Directividad máxima (D_{max}), a causa de la compensación de la fase de la onda en las variables electromagnéticas de campo lejano.

Tomando en cuenta este análisis, se propuso curvar la forma de los alambres de los cuales esta compuesta la antena Yagui-Uda para incrementar su D_{max} permitiendo disminuir la cantidad de alambres de las cuales esta formada.

4.1. Parámetros de Diseño.

En términos generales, se consideró la geometría de dichos alambres por medio de varias ecuaciones analíticas con un máximo de cuatro (4) variables de entrada por alambre, produciendo las geometrías observadas en la figura No. 7.

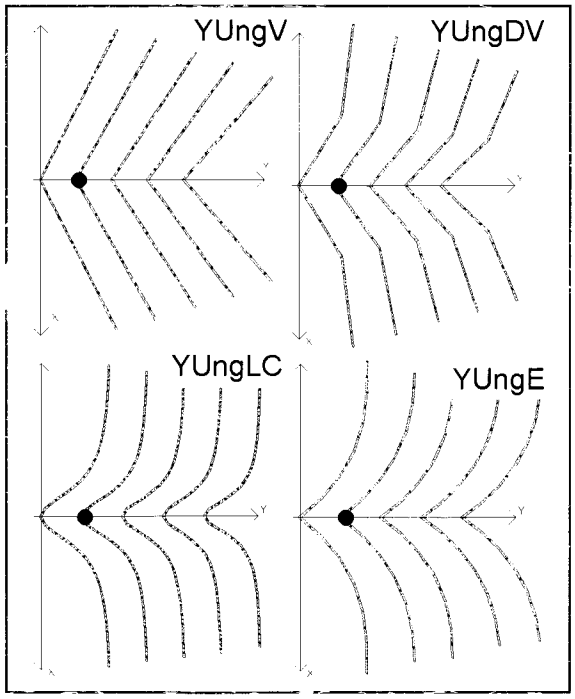

Figura No. 7. *Antenas Yagui-Uda Curvilíneas analizadas.*

En todos los casos se mantuvo el criterio de la fuente de alimentación en el segundo alambre, ya que se encontró que se conserva el mismo principio de diseño de las antenas con geometría recta (YUngR) [1].

Con fines de diseño, se consideró una separación entre alambres adjuntos (d_K) en el rango de 0.15λ-0.5λ y una longitud o arco total por alambre (L_J) entre 1.3λ-1.6λ. Este rango de longitud por alambre, fue seleccionado al analizar el impacto de la forma curva en una antena formada por solo un alambre (Dipolo Curvilíneo).

Las antenas con geometría en V (YUngV) y Doble V (YUngDV) se consideraron por su facilidad de construcción. Las Antenas con geometría Lian-Chen (YUngLC) y Exponencial (YUngE) fueron consideradas por el grado de libertad que surgen en la forma de sus alambres. Debidos al costo de computación asociado con el diseño de este tipo de antenas, se consideró el diseño de estas estructuras con tres (n=3) y para la mejor de ellas con cuatro alambres (n=4) en los casos de optimización MaxD y MaxRin.

Como método comparativo, se diseñaron dos antenas Yagui-Uda conformadas por 5 (YU5gR) y 6 (YU6gR) elementos rectos, con el mismo procedimiento de optimización. El tamaño de cada alambre para este caso, se mantuvo en el rango de 0.3λ-0.6λ.

4.2. Discusión de Resultados.

La Tabla 1 resume los resultados de la Directividad Máxima (D_{max}), Tamaño, VSWR, Relación Frente espalda (F/B), Rango de operación (Intervalo) y ancho de Banda (BW) de los diferentes antenas considerando una normalización de la estructura (en función de la longitud de onda λ) y una cantidad de alambres fijos [10].

Antena	Caso de Opt.	Dmax [dBi]	F_B [dB]	VSWR	Largo	Ancho	Intervalo (fo)	BW/fo
YU5gR	MaxDRin	11	12	1.21	1.14λ	0.48λ	[0.942,1.025]	0.083
YU6gR	MaxDRin	12.2	9.6	1.10	1.27λ	0.48λ	[0.981,1.013]	0.032
YU3gV	MaxD	8.7	7.24	6.35	1.30λ	1.32λ	-	-
YU3gDV	MaxDRin	11.2	15.7	1.00	0.83λ	1.27λ	[0.969,1.037]	0.068
YU4gDV	MaxDRin	12.9	12.8	1.40	1.16λ	1.32λ	[0.982,1.013]	0.031
YU3gLC	MaxD	12.4	13.5	5.80	0.74λ	1.24λ	-	-
	MaxDRin	10.6	6	1.19	0.84λ	1.31λ	[0.980,1.044]	0.064
YU3gE	MaxD	12.5	14.7	5.31	0.76λ	1.23λ	-	-
	MaxDRin	11	11.6	1.16	0.96λ	1.27λ	[0.977,1.033]	0.056

Tabla 1. *Comparación de Resultados.*

La antena YUngDV presentó unas medidas de desempeño comparables y en algunos casos superiores a sus equivalentes totalmente rectos y curvos conservando la facilidad de construcción de su compañera en forma de V (YUngV).

Contrario a lo que se puede encontrar normalmente en la literatura, si bien la antena en geometría en V (YUngV) tiene una mejora con respecto a su equivalente recto, no es esta antena la que presenta las mejoras sustanciales. En el caso de la antena YUngLC, al igual que en el caso anterior, disminuye sus parámetros de desempeño al considerar el caso MaxDRin (ver Tabla 1). La antena YUngE, aunque presenta un buen desempeño, tiene posibles inconvenientes de construcción debido a la forma del punto de alimentación (Centro) y la maquinaria necesaria para el doblaje de cada alambre.

Como se concluye de los resultados de la Tabla 1, el equivalente de una antena Yagui-Uda con geometría Doble V de tres alambres es una antena Yagui-Uda de cinco alambres con geometría recta. Si adicionalmente, se considera un método tradicional de diseño de este último tipo de antenas, se encontraría que ésta estaría conformada por una cantidad de alambres en el rango de 7 a 10 [1,8]. Es aquí cuando se valora fuertemente el método de optimización escogido.

4.3. Respuesta en frecuencia.

Otro parámetro de gran importancia, es la variación de las características de radiación de la antena Yagui-Uda con la frecuencia.

La figura No. 8, detalla la suma de la D_{max} [dBi] de la antena y el porcentaje de la potencia Transmitida $\{1-|\Gamma|^2\}$ [dB] hacia la misma, considerando una variación de la frecuencia normalizada. Como criterio de evaluación y comparación de la respuesta en frecuencia se consideró una disminución no menor a 2dB en dicha suma.

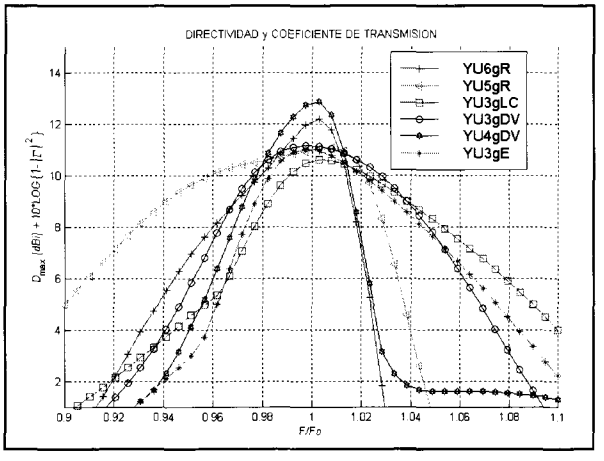

Figura No. 8. *Variación oon la frecuencia.*

5. Conclusiones.

El método numérico implementado, aunque permite tener una segura y rápida convergencia en sus resultados, presenta el inconveniente de un tiempo de computación demasiado largo. Como ejemplo la optimización de una antena YU3gDV duró típicamente tres días.

En las antenas analizadas, se concluye que se puede encontrar la impedancia de entrada deseada a costa de un pequeño sacrificio en la Directividad, pero según la geometría escogida pueden desmejorarse otros parámetros como la relación frente espalda y el tamaño. Aunque la Antena Yagui-Uda tiene una característica inherente de bajo ancho de banda se encontró que dicha variable podía ser mantenida en las estructuras con geometrías curvas.

De los resultados comparativos, se sugiere utilizar la geometría en Doble V. Al comparar el tamaño de las antenas YUngR con sus equivalentes curvos, se encontró que se puede disminuir el largo pero a costa de incrementar el ancho de la misma. como conclusión, no se puede disminuir el área de instalación de las antenas.

Específicamente, en Antenas Yagui-Uda y Antenas periódicas logarítmicas (LPDA), éstos resultados permiten diseñar estructuras con excelente desempeño y con menos cantidad de alambres, permitiendo disminuir las pérdidas parásitas. Este hecho puede ser aprovechado en aplicaciones comerciales donde el incremento del arco del alambre no sea un parámetro fundamental (>500 MHz).

El AG si bien no encuentra el óptimo real de la función, encuentra unos resultados aceptables considerando la naturaleza del problema. Incluir métodos heurísticos de optimización, a costa de no encontrar una solución exacta, permite generar respuestas al diseño con excelentes medidas de desempeño.

Como aportes adicionales del presente trabajo, se sugiere cambiar el procedimiento Galerkin, para disminuir el costo de computación asociado a la simulación de la antena.

El siguiente paso a realizar por el grupo de investigación será el crear una ayuda de diseño y análisis de antenas óptimas consistente de tablas y gráficas que incluyan la respuesta en frecuencia, el ancho de banda, la Directividad Máxima, el número de alambres e.t.c.