



ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE POTENCIA DE UN AMPLIFICADOR DE TUBO DE ONDA PROGRESIVA

INFORMACIÓN DE LOS AUTORES:

Nombre

M. C. Eduardo Merino Valadez (Profesor de Tiempo Completo en la UTT)
Dr. Alexandre Zemliak (Profesor de Tiempo Completo en la FCFM-BUAP)

Afiliación

Miembro # 41252873 del IEEE

Dirección

Av. Universidad Tecnológica # 1 Col. El Montesillo, Tecamachalco Pue.

E-mail

edu1414@hotmail.com

RESUMEN

El modelado y diseño de dispositivos de microondas utilizando programas de cómputo, han contribuido a los avances que se tienen hasta ahora en funcionamiento y capacidad de tales dispositivos. En éste trabajo se presenta la propuesta del salto de tensión (simple y doble), con la idea de mejorar las características de potencia de un amplificador de tubo de onda progresiva de hélice. Como herramienta de simulación se utiliza un programa de cómputo. El estudio del dispositivo se realiza sobre la base de un modelo adecuado no lineal. El modelo contiene parámetros normalizados y está constituido por ecuaciones diferenciales cuya solución analítica queda descartada debido al gran número de iteraciones que se necesitan para obtener los resultados esperados, la solución es utilizar un método numérico para resolver las ecuaciones diferenciales por computadora. El método numérico que se utiliza para realizar la integración de dichas ecuaciones diferenciales es el de Runge-Kutta de cuarto orden. El primer paso en este trabajo consiste en plantear el algoritmo, después se realiza un estudio de convergencia para conocer sus alcances y limitaciones, para después comenzar a estudiar los regímenes del tubo de onda progresiva, analizar sus características de potencia y finalmente optimizarlas. Debo decir que el modelo utilizado ya existe y la matemática utilizada para su deducción se encuentra en las referencias citadas en este trabajo.

1. INTRODUCCION

El amplificador de tubo de onda progresiva (TOP) de hélice es sin duda un dispositivo muy versátil, y es que los TOP de hélice tienen un excepcional ancho de banda y una construcción especialmente simple comparada con otros tubos de microondas. Estos dispositivos han sido usados ampliamente por muchos años como

amplificadores en sistemas de microondas terrestres y vía satélite. Recientemente junto con el incremento en la capacidad de las comunicaciones y el advenimiento de los dispositivos de estado sólido, TOP con potencia de salida alta, ancho de banda amplia y frecuencia de operación altas han sido deseados fuertemente.

Los estudios convencionales para TOP para cumplir con las características de alto funcionamiento han sido enfocados principalmente a mejorar su eficiencia. En 1984 se alcanzó una eficiencia mayor de 33% usando técnicas que involucran disminución de velocidad de la onda electromagnética y colectores de varias etapas que recuperan energía. En ese mismo año K. Tsutaki, Y. Yuasa y Y. Morizumi [1] realizaron el análisis numérico y diseño para alto funcionamiento de TOP. Con este nuevo método de diseño se mejoraron los resultados obtenidos con el método propuesto por B. J. Mcmurry y P. K. Tien [2].

Ahora existe un considerable interés en desarrollar dispositivos que puedan desarrollar potencias altas y anchos de banda amplios en las regiones de microondas y milimétrica para aplicaciones en: radares de alta resolución y sistemas de comunicaciones de alta velocidad, donde los patrones de radiación estrechos y anchos de banda amplios son necesarios. Esto ha llevado al desarrollo de nuevos dispositivos tales como el amplificador de alta calidad Gyro-TOP.

En este trabajo se presenta la propuesta del salto de tensión (simple y doble) con la idea de mejorar las características de potencia de un Amplificador de Tubo de Onda Progresiva, con base en un modelo adecuado no lineal.



El objetivo principal de este trabajo consiste en realizar un análisis a las características de potencia de un Amplificador de Tubo de Onda Progresiva, después, con base en el análisis anterior, se encontraran los valores de los parámetros normalizados, con los cuales se obtienen los mejores resultados (los óptimos). Todo este estudio se realizará utilizando un modelo no lineal de Tubo de Onda Progresiva que ya existe y herramientas de cómputo (métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales). Claramente explique la naturaleza del problema, trabajo previo, propósito y contribución del trabajo.

2. CUERPO DEL TEXTO

Modelo no lineal del tubo de onda progresiva

Para realizar un buen estudio de un sistema es importante tener un modelo matemático adecuado en el que se tomen en cuenta todas las condiciones y parámetros principales de este. A continuación se presenta el modelo matemático no lineal para un tubo de onda progresiva.

La ecuación diferencial en forma normalizada que relaciona el campo eléctrico de la onda electromagnética con la corriente del haz electrónico esta dada por [3] y [4]:

$$\frac{dF}{d\theta} + jrF = -(1 + bC_g)^2 I, \quad (2.62)$$

En esta ecuación F representa la magnitud del campo eléctrico de la onda e I es la corriente de convección. Para el caso general

$$F = F_1 + jF_2, \quad (2.63)$$

$$I = I_1 + jI_2, \quad (2.64)$$

$$r = b - jd, \quad (2.65)$$

También de aquí en adelante θ representa la distancia normalizada dada por

$$\theta = \beta_e C_g z, \quad (2.66)$$

donde

β_e es la constante de propagación del haz electrónico

C_g es el coeficiente de amplificación normalizado dado por la ecuación (2.68)

z es la dirección de propagación del haz electrónico

Los coeficientes b , C_g y d son características propias de cada tubo específico. Estos coeficientes están definidos de la siguiente manera

$$b = \frac{V_e - V_f}{C_g V_f}. \quad (2.67)$$

El coeficiente b representa la sincronización entre onda electromagnética y haz electrónico.

V_e es la velocidad de fase de los electrones del haz electrónico.

V_f es la velocidad de fase de la onda electromagnética de RF.

$$C_g = \left(\frac{I_0 R_1}{4V_0} \right)^{1/3} \quad (2.68)$$

El parámetro C_g es el coeficiente de amplificación normalizado.

R_1 es la resistencia de interacción entre haz electrónico y onda electromagnética.

I_0 es la densidad de corriente permanente del haz electrónico.

V_0 es el voltaje de d.c para acelerar a los electrones.

El coeficiente d representa las pérdidas dentro del sistema.

Si se sustituye las ecuaciones (2.63), (2.64) y (2.65) en la ecuación (2.62) obtenemos una ecuación más general que tiene la forma

$$\frac{dF_1}{d\theta} + j \frac{dF_2}{d\theta} + j(b - jd)(F_1 + jF_2) = -(1 - bC_g)^2 (I_1 + jI_2) \quad (2.69)$$

a la ecuación (2.69) la podemos dividir en dos ecuaciones de la siguiente manera

$$\frac{dF_1}{d\theta} = bF_2 - dF_1 - (1 + bC_g)^2 I_1 \quad (2.70)$$

$$\frac{dF_2}{d\theta} = -bF_1 - dF_2 - (1 + bC_g)^2 I_2. \quad (2.71)$$

Las ecuaciones (2.70) y (2.71) representan la parte real y compleja de la ecuación (2.69) respectivamente. Para describir el movimiento de las partículas (grupos de electrones), se hace uso de la segunda ley de Newton. En este modelo la ecuación que nos describe el movimiento de las partículas tiene la forma



$$\frac{d^2 u_i}{d\theta^2} = -\left(1 + C_g \frac{du_i}{d\theta}\right)^3 \operatorname{Re}\{F e^{ju_i} + F_{q_i}\}. \quad (2.72)$$

En la ecuación (2.72) el coeficiente i indica el número de partícula corriente, $i = 1, 2, 3, \dots, N$. F_{q_i} es la fuerza de repulsión o atracción entre las partículas [11] y [13], la cual será descrita a detalle en el siguiente capítulo. Las u_i representan las velocidades de fase de cada partícula individual i . A la ecuación (2.72) la podemos dividir (utilizando una variable auxiliar) en dos ecuaciones diferenciales de primer orden de la siguiente manera:

$$\frac{du_i}{d\theta} = w_i, \quad (2.73)$$

$$\frac{dw_i}{d\theta} = -(1 - C_g w_i)^3 \{F_1 \cos u_i - F_2 \operatorname{sen} u_i + F_{q_i}\} \quad (2.74)$$

Finalmente la expresión para la corriente si se considera solo a la primera armónica de corriente, tiene la forma

$$I = \left(\frac{2}{n}\right) \sum_{i=1}^N \cos u_i - j \left(\frac{2}{n}\right) \sum_{i=1}^N \operatorname{sen} u_i, \quad (2.75)$$

Si relacionamos la ecuación (2.64) con la ecuación (2.75) hallamos las dos componentes de I (I_1 e I_2), las cuales se utilizan en las ecuaciones (2.70) y (2.71).

Las formas de onda de F e I en función de la distancia normalizada θ tienen la forma que se muestra en la figura 2.2.

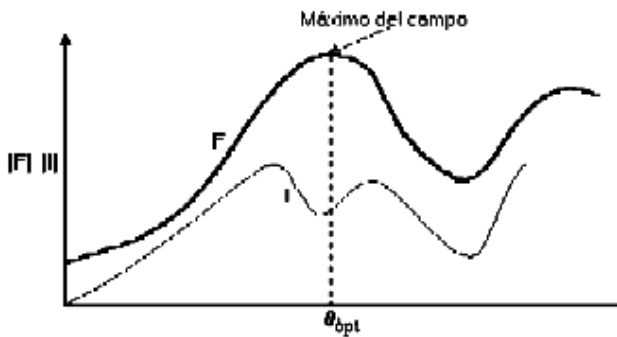


Figura 2.2. Formas de onda del campo F y la corriente I en función de la distancia normalizada θ .

Es a este modelo al cual se le realizará el estudio de potencia.

Resultados

A continuación presento los resultados obtenidos más relevantes para el caso de salto de tensión simple y doble.

En la tabla 1 se presentan los cálculos de eficiencia y potencia para salto simple con respecto al caso normal (sin salto de tensión). La tabla 2 contiene los resultados obtenidos para el caso de salto doble.

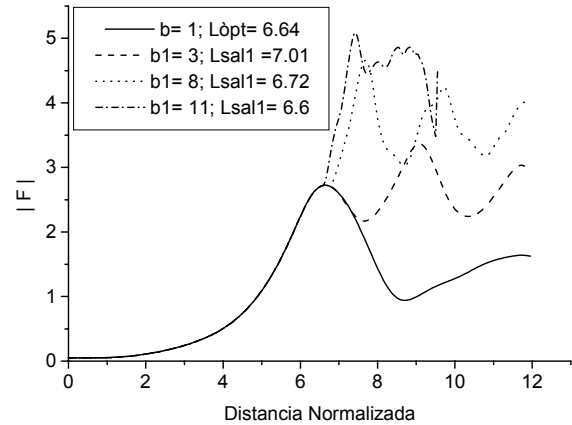


Figura 4.25. Gráficas de los resultados obtenidos al utilizar el salto de tensión simple con $Q = 0.5$ y $C_g = 0.1$.

Para el caso de doble salto de tensión uno de los mejores resultados es el siguiente:

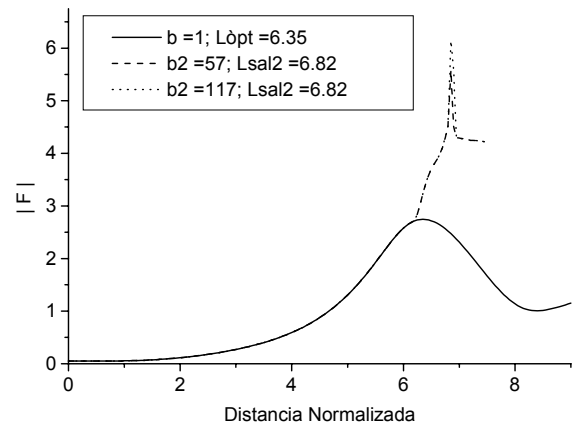


Figura 4.25. Gráficas de los resultados obtenidos al utilizar salto de tensión doble con $Q = 0.1$ y $C_g = 0.1$.

$ F_o $	$ F_o ^2$	$ F(\theta_{opt}) $	$ F(\theta_{opt}) ^2$	Q	B1	C_g	η	$\Delta\eta$	P_m [W]
							[%]	[%]	
0.05	0.0025	4.87631	23.77839	0	8	0.05	30.32	55.08	81.14



0.05	0.0025	4.96068	24.60834	0	11	0.1	27.89	-10.4	1125.33
0.05	0.0025	4.89734	23.98393	0.5	8	0.05	30.58	61.37	80.24
0.05	0.0025	5.09439	25.95280	0.5	11	0.1	29.42	-4.01	1146.31
0.05	0.0025	4.69734	22.06500	0.9	8	0.05	28.14	58.09	74.6
0.05	0.0025	4.93304	24.33488	0.9	10	0.1	30.41	4.05	1083.85

Tabla 1. Resultados y comparación de eficiencia y potencia para el caso de salto simple con $F1=0.05$; $F2=0$; $N=40$; $h=0.01$ y $d=0.02$.

$ F_o $	$ F_o ^2$	$ F(\theta_{opt}) $	$ F(\theta_{opt}) ^2$	Q	B2	C_g	η [%]	$\Delta\eta$ [%]	P_m [W]
0.05	0.0025	6.12718	37.54233	0	23	0.05	23.30	3.85	102
0.05	0.0025	6.14262	37.73178	0	117	0.1	1.17	-96	1393.5
0.05	0.0025	6.21659	38.64599	0.5	27	0.05	17.49	-7.6	101.87
0.05	0.0025	6.09216	37.11441	0.5	34	0.07	11.37	-53	361
0.05	0.0025	6.01521	36.18275	0.9	23	0.05	19.56	9.88	95.5
0.05	0.0025	6.40410	41.01249	0.9	31	0.07	14.28	-38	368.91

Tabla 4.3. Resultados y comparación de eficiencia para el caso de salto doble con $F1=0.05$; $F2=0$; $N=40$; $h=0.01$ y $d=0.02$.

3. CONCLUSION

- Puedo decir que en nuestro país existe muy poca investigación en el tema de tubos electrónicos de microondas, por lo tanto, cualquier investigación que se realice al respecto será de gran utilidad.
- En este trabajo se ha realizado una aplicación práctica del método de Runge-Kutta para resolver un sistema de $N+2$ ecuaciones diferenciales.
- Ha sido desarrollado algoritmo y programa para el análisis de tubos de onda progresiva.
- Se deja al público en general el diseño del algoritmo para estudiar los regímenes de amplificadores de tubo de onda progresiva de hélice con un buen grado de confiabilidad.
- Se ha realizado el estudio de convergencia del algoritmo para comprobar su funcionamiento y

margen de utilidad. El estudio ha dejado buenos resultados y por consiguiente se tiene seguridad al utilizarlo.

- Se han realizado ejemplos de cómo utilizar el algoritmo para el estudio del comportamiento del TOP con valores arbitrarios de los parámetros más dinámicos del sistema.
- Se ha realizado el cálculo minucioso de la distancia óptima para realizar los saltos de tensión (simple y doble). Con dichos saltos se ha logrado incrementar hasta en un 87% la magnitud del campo $|F|$ con salto simple y hasta un 133% con salto doble.
- Se realizaron los cálculos de eficiencia relativa para conocer los valores óptimos de los parámetros más dinámicos, los cuales ayudarán en el momento en que se realice el diseño del TOP de hélice.
- Finalmente concluyo que el diseño del tubo de onda progresiva sirve como primer paso para construir el dispositivo con características de potencia óptimas.

REFERENCIAS

Las referencias deben ser enumeradas en el orden citado en el manuscrito e indicadas en el texto por un número encerrado en paréntesis cuadrados.(e.g. [1]).

Artículos de Proceedings :

- [1] K. Tsutaki, Y. Yuasa and Y. Morizumi. "Numerical analysis and design for high performance helix travelling-wave tubes". IEEE Trans. ED-32, 1985, pp 1842-1849.
- [2] P. K. Tien, L. R. Walker, and V. M. Wolontis, "A large signal theory of travelling wave amplifiers," Proc. IRE, vol. 43, pp. 260-277, Mar. 1955.

Libros:

- [3] M. B. Ceitlin, A. M. Katz "Travelling wave tube," Rusia, Soviet Radio, 1964.
- [4] Rowe J. E. "Theory of nonlinear phenomenon for microwave devices" N. Y. Academic, 1965.