

Consideraciones de diseño de acopladores de antena tipo T para estaciones de radiodifusión AM

Solis G. José J.; Pérez R. Javier

Resumen— Un acoplador de antena es una red pasiva utilizada en sistemas de radiodifusión de amplitud modulada (AM) para transformar la impedancia que presenta la antena, y hacerla igual a la impedancia característica de la línea de transmisión. El comportamiento de estas redes es muy importante en el sistema, permitiendo que el transmisor opere correctamente, a plena potencia, sin cortes en la transmisión por reflejo de señales, y con la mejor calidad de sonido al aire. Al mismo tiempo, evita la posibilidad de que se dañe el transmisor y la línea de transmisión por alto nivel de ondas estacionarias. El propósito de este artículo es presentar algunos criterios que se han implementado en sistemas ya instalados, de manera que puedan servir como referencia a aquellos que se inician en el diseño de este tipo de redes. Además, el artículo presenta el procedimiento de cálculo de las componentes de los acopladores T, el cálculo de las impedancias vistas a la entrada del acoplador a la frecuencia central y en sus bandas laterales, con sus correspondientes coeficientes de reflexión (CR) y relaciones de onda estacionaria (ROE), y las transformaciones de impedancia que realiza la línea de transmisión.

Palabras clave—Diseño de acopladores, acopladores de antena tipo T.

I. INTRODUCCIÓN

El principio de acoplamiento de impedancias es uno de los más elementales en ingeniería eléctrica; se refiere al hecho de que si necesitamos transferir la máxima potencia eléctrica de un sistema a su carga, la impedancia de salida del sistema debe ser igual a la impedancia de la carga [1]. La figura 1 ilustra este principio para cargas puramente resistivas.

Cuando este requisito entre la fuente de energía y su carga no se cumple, es necesario un acoplador o transformador. Éste hará que el sistema vea como su carga R_L' una impedancia igual a su impedancia de salida R_s , y que la carga vea que la impedancia de su fuente de señal R_s' es igual a su propia impedancia R_L , como se muestra en la figura 2.

En bajas frecuencias, donde las cargas son generalmente resistivas, es muy conocido el uso de transformadores. Considere por ejemplo, los transformadores de c. a. de líneas de alimentación doméstica e industrial y de entrada de c. a. de

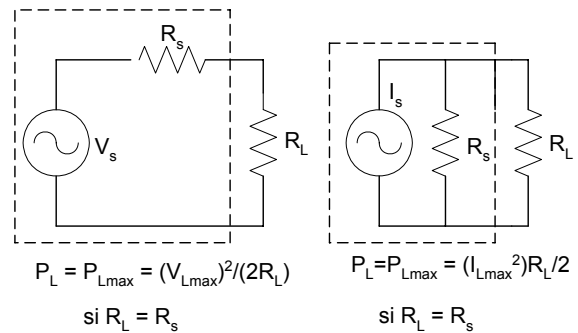


Fig. 1 Máxima transferencia de potencia si $R_s = R_L$.

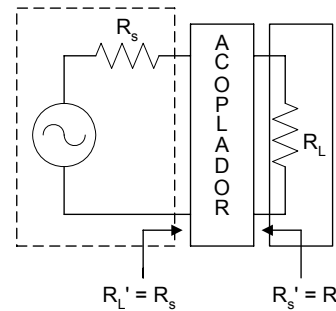


Fig. 2 Máxima transferencia de potencia si $R_s \neq R_L$.

equipos electrónicos, o los transformadores de acoplamiento de audio en amplificadores de potencia con bulbos o transistores. El acoplamiento es considerado en estos casos como de voltaje y/o corriente, aunque está implícita la función de transformación de impedancias.

En sistemas de radiofrecuencia, en donde las cargas y las fuentes de señal son de valores complejos (resistivos y reactivos a la vez), son poco utilizados los transformadores como tales (aunque se están utilizando actualmente en algunos transmisores de AM con modulación por ancho de pulso PWM [2]), y ceden su lugar a los acopladores de impedancias. Estos realizan la transformación de la parte resistiva mencionada anteriormente, pero también sintonizan o eliminan la parte reactiva de la carga y de la fuente de señal.

II ACOPLAMIENTO EN SISTEMAS DE AMPLITUD MODULADA

En sistemas de AM el transmisor es considerado la fuente de energía, y su carga es la antena, utilizándose una línea de transmisión como medio de conducción.

Manuscrito recibido el 9 de Julio de 2007. Este trabajo fue respaldado por el departamento de Ing. Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Sonora

Solis G. José J. hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor de Auxiliar en el Instituto Tecnológico de Sonora en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica Instituto Tecnológico de Sonora; Ave. Antonio Caso S/N Col. Villa ITSON; Ciudad Obregón, Sonora, México; C.P. 85138; C.P. 85130; Tel: (644) 4109000, ext. 1200; Fax: (644) 4109001.(e-mail jj_solis_ing@hotmail.com)

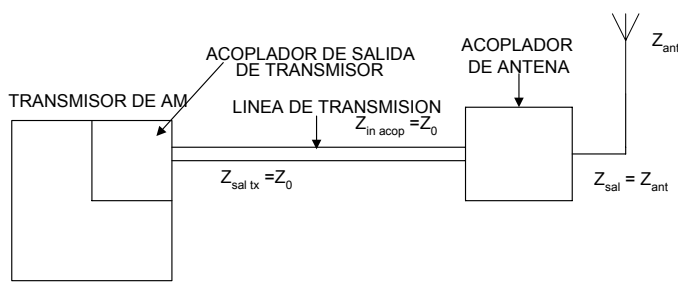


Fig. 3. Acoplamiento transmisor-antena en estaciones de AM.

Para realizar la máxima transferencia de potencia son necesarias generalmente dos etapas de acoplamiento, como muestra la figura 3: una del transmisor a la línea de transmisión, y la otra de la línea de transmisión a la antena.

Acoplamiento transmisor-línea de transmisión

El transmisor y la línea están generalmente acoplados, hablando específicamente de los fabricados hoy en día, puesto que ambos presentan impedancias de salida y característica respectivamente estandarizadas a $50\ \Omega$ [3],[4],[5].

Si durante el desarrollo de un proyecto se observa que la línea que se va a utilizar presenta una impedancia característica diferente a la anteriormente mencionada, como es el caso cuando se utilizan líneas bifilares [6], se hace la solicitud al fabricante para que el transmisor se fabrique con la impedancia de salida que se necesite.

Con todo esto, el transmisor posee en su salida un acoplador cuya función es acoplar la impedancia vista a la entrada de la línea de transmisión con la impedancia de salida de los amplificadores de radio frecuencia del propio transmisor.

La impedancia de entrada del acoplador del transmisor, con su carga de línea de transmisión, acoplador de antena y antena, debe ser igual a la impedancia de salida del amplificador de RF. A la vez, la impedancia a la salida de este acoplador debe ser igual a la impedancia vista a la entrada de la línea de transmisión, con la antena y el acoplador de antena conectados. Este acoplador permite realizar ajustes para los pequeños desbalances entre las impedancias mencionadas, a través de los controles de sintonía y carga del transmisor [5].

El acoplamiento de impedancias permite en este caso que el transmisor trabaje eficientemente para la carga, la potencia y la modulación a que fue diseñado, sin pérdidas de energía por calentamiento excesivo en los amplificadores de RF, evitando la posibilidad de daño de los mismos.

Acoplamiento línea de transmisión-antena

Las antenas de AM presentan características de impedancia que dependen, entre otras cosas, del tipo de antena, de su longitud eléctrica [8], y de sus valores de impedancia, que no pueden ser predichos con exactitud en la mayoría de los casos y deben ser medidos directamente.

La línea de transmisión, especialmente cuando es algún tipo de cable coaxial, posee características de impedancia definidas por el fabricante [3], [4]. El acoplador de antena, en este caso,

debe presentar en su entrada, a la frecuencia de la portadora, y de preferencia en todo el ancho de banda de transmisión utilizado, una impedancia igual a la impedancia de salida de la línea de transmisión con el transmisor conectado, y a su salida una impedancia igual a la impedancia medida de la antena.

El acoplamiento de impedancias, además de la máxima transferencia de potencia y la máxima radiación, evita la formación de ondas estacionarias en la línea de transmisión [6], el calentamiento y el posible daño a ésta y a los amplificadores de RF del transmisor, aumentando la eficiencia y reduciendo el consumo de energía eléctrica.

Pueden considerarse, durante el diseño, los cambios de impedancia que presentan las componentes del acoplador y la antena para las frecuencias de las bandas laterales, y construir acopladores de banda ancha, que proporcionan en su entrada impedancias lo más planas posibles en toda la banda de transmisión; es decir, impedancias cuya parte resistiva es muy cercana al valor de la impedancia característica de la línea, y cuya reactancia posee la misma magnitud y valor lo más cercano posible a cero pero de signo contrario de una banda lateral a otra.

También se pueden considerar los efectos de transformación de impedancia que genera la línea de transmisión [4], [6], sobre todo cuando su longitud eléctrica es comparable con la longitud de onda de la señal que se va a transmitir. La impedancia deberá ser plana en este caso en la entrada de la línea de transmisión, o lo que es lo mismo, a la salida del transmisor, generando una respuesta en frecuencia prácticamente lineal, ideal en la mayoría de los casos. El transmisor proporcionará la mejor calidad de sonido al aire, y se evitarán posibles cortes en la operación por picos de modulación que generen picos en la relación de onda estacionaria.

Por otra parte, cuando se solicita al fabricante un acoplador con anticipación a la instalación de la antena y a la medición de las características de impedancia, se utilizan tablas o gráficas de impedancias promedio o normalizadas en función de la longitud eléctrica de la antena [8]. Los acopladores resultantes deben ser diseñados de tal manera que puedan ajustarse, dentro de un rango amplio de valores, a la impedancia específica que presente la antena una vez que haya sido construida y medida.

Con todo esto, es posible que el usuario desee diseñar, fabricar e instalar su propio acoplador, en función de sus posibilidades económicas (se pueden conseguir ahorros bastante significativos respecto de los precios de un fabricante a nivel internacional), de los recursos disponibles (refacciones, equipos, tiempo y recurso humano, entre otros), y de los requerimientos específicos de su estación (calidad de transmisión, confiabilidad del sistema, etc.).

Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión más utilizadas actualmente en estaciones de AM son cables coaxiales con impedancias características de $50\ \Omega$ [3], [4]. Se utilizan de dieléctrico de espuma (foam) para potencias promedio hasta de 230 KW a 500 KHz, según el fabricante (el diámetro externo varía de 1/2 a 1 5/8 de pulgada para líneas ANDREW y FLEXWELL), y de dieléctrico de aire para potencias hasta de 1250 KW a 500 KHz (diámetro externo de 1/2 a 5 pulgadas para líneas ANDREW, y hasta de 9 pulgadas para líneas FLEXWELL).

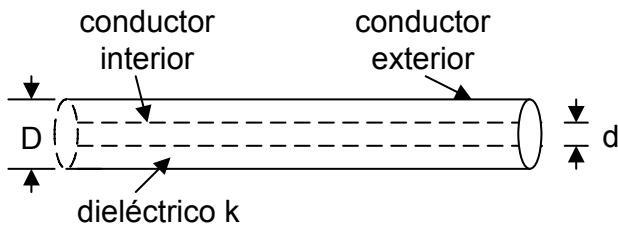


Fig. 4: Cable coaxial.

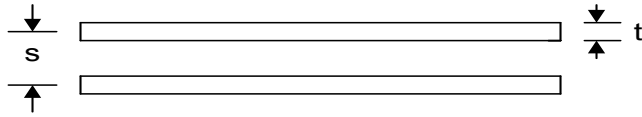


Fig. 5. Líneas bifilares.

También se utiliza cable coaxial del tipo RG-8, cuya impedancia característica es de 52Ω , en aplicaciones de baja potencia (menores de 5 KW), esto cuando la distancia entre transmisor y antena es corta para evitar la atenuación, y cuando se desea una línea de transmisión económica.

La impedancia característica de los cables coaxiales está dada por la ecuación [1], ilustrada en la figura 4:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{k}} \log \frac{D}{d} \Omega \quad (1)$$

donde k es la constante dieléctrica del material aislante entre los conductores

D es el diámetro del conductor exterior

d es el diámetro del conductor interior

Las líneas bifilares se utilizan cuando las potencias son elevadas y no hay un cable coaxial disponible. La impedancia característica varía de acuerdo con su geometría, y está dada por

la ecuación [6], ilustrada en la figura 5.

$$Z_0 = 276 \log \frac{2s}{t} \Omega \quad (2)$$

Donde s es la separación entre los cables y t es el diámetro de los cables.

Tipos de acopladores

En general, un acoplador de AM es una red formada por bobinas y condensadores, y puede tomar cualquier forma siempre que realice adecuadamente la transformación de impedancias mencionada.

Sin embargo, las dos formas más generales de acopladores son las redes PI y las redes T, mostradas en las figuras 6 y 7 respectivamente:

Los acopladores PI son utilizados frecuentemente como parte de los acopladores de los transmisores cuando los amplificadores de salida de RF son de bulbos, y su diseño no será considerado en este artículo.

Los acopladores T son más comúnmente utilizados como acopladores de antena, principalmente porque son más sencillos (requieren menos componentes) y más fáciles de ajustar.

Las ecuaciones de diseño del acoplador T son las 3, 4 y 5 [7]:

$$X_3 = -j \frac{\sqrt{(Z_0 R_{ant})}}{\text{sen } \theta} \quad (3)$$

$$X_1 = -X_3 - j \frac{Z_0}{\tan \theta} \quad (4)$$

$$X_2 = -X_3 - j \frac{R_{ant}}{\tan \theta} - jZ_{ant} \quad (5)$$

donde Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión

R_{ant} es la resistencia de radiación de la antena a la frecuencia de la portadora

Z_{ant} es la reactancia de la antena a la frecuencia de la portadora

y θ es el defasamiento que sufre la señal al pasar a través del acoplador

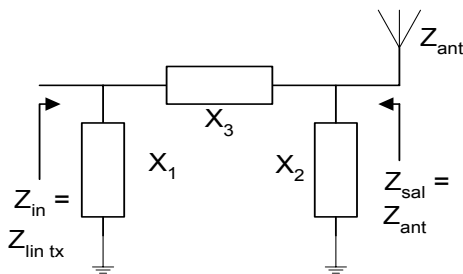


Fig. 6. Acoplador PI.

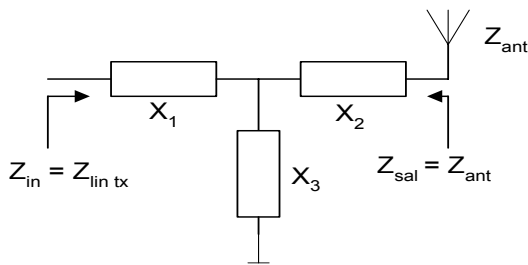


Fig. 7. Acoplador T.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS DE IMPEDANCIA DE ANTENA.

F(KHz)	R _{ant}	Z _{ant}
1090	55.5	j68.6
1100	57	j72.6
1110	61	j78.6

En ocasiones, cuando X_1 y X_2 son inductivas, se debe agregar un condensador en serie con X_2 , con el objeto de que cuando hay descargas eléctricas en la antena, este elemento desacople o impida el paso de las componentes de c. d. de la descarga hacia la línea de transmisión y el transmisor, reduciendo las posibilidades de daño en ambos.

Observe que en la fórmula de X_2 se incluye la parte de la reactancia de antena. Esto significa que esta parte del acoplador sintoniza a la antena, o dicho de otra manera, la reduce a un elemento puramente resistivo. Analizando la red podría demostrarse que X_1 sintoniza a la fuente de señal, mientras que X_3 es la reactancia que preponderantemente realiza la transformación de impedancias.

III CRITERIOS DE DISEÑO DE ACOPLADORES T

Se presentan dos criterios de diseño: el de corrimiento de fase de 90° , que es el más simple, y el de corrimientos de fase distintos de 90° , con el que se persigue mejorar la respuesta en frecuencia de la red. Integrados a ellos están los criterios: de ajustar los valores de las reactancias negativas con capacitancias que proporcionen la mejor respuesta en frecuencia del sistema; el de incluir capacitancias como parte de las reactancias positivas persiguiendo el mismo fin; el de implementar redes lo más sencillas posibles, cuando alguna reactancia posea valores muy pequeños, con el objeto de que la solución sea lo más económicamente posible; y el de incluir los efectos de la línea de transmisión sobre la respuesta en frecuencia del sistema. Cuando se diseña un acoplador en campo, aunque en este caso no se incluyen, se deben considerar: las restricciones de los valores de los componentes de que se dispongan en ese momento, o simplemente cuando deben restringirse a los valores de los componentes proporcionados por el fabricante; también deben considerarse los voltajes y las corrientes que soportará cada componente, con su respectiva tolerancia, pues de ellos depende obviamente su costo. En general, deben considerarse todos aquellos criterios que permitan que el sistema sea el mejor en términos de su comportamiento, de su confiabilidad, de su costo, y del consumo de recursos.

90° de retraso de fase

Se utiliza muy frecuentemente este criterio, cuando se desea un acoplador simple, sin complicaciones de diseño e implementación. También cuando la longitud eléctrica de la antena es cercana a los 90° , en el caso de antenas tipo Marconi (la longitud del elemento activo es igual a la longitud del elemento pasivo de radiación e igual a $\lambda/4$) [8], y en general, cuando la resistencia de radiación R_{ant} posee un valor muy cercano a los 50Ω . El procedimiento de diseño consiste en:

a) Calcular las reactancias del acoplador, utilizando una forma simplificada de las ecuaciones 3, 4 y 5. Puesto que $\text{Sen}(90^\circ) = 1$ y $\text{Tan}(90^\circ) \rightarrow \infty$, las reactancias X_3 , X_1 y X_2 estarán dadas por las ecuaciones 6 y 7.

$$X_3 = -j\sqrt{(Z_0 R_{ant})} = -X_1 \quad (6)$$

$$X_2 = -X_3 - jZ_{ant} \quad (7)$$

X_3 es una reactancia capacitiva, X_1 inductiva, y X_2 puede ser inductiva o capacitiva, dependiendo de los valores relativos de X_3 y Z_{ant} .

b) Calcular los valores de las componentes del acoplador, despejando C o L de las ecuaciones 8 y 9 según sea el caso

$$X_c = -j/(2\pi fC) \quad (8)$$

$$X_L = 2\pi fL \quad (9)$$

Donde f es la frecuencia central de operación

C es la capacitancia para reactancias capacitivas

y L es la inductancia para reactancias inductivas

c) Ajustar los valores de las componentes a los que proporcionan los fabricantes o a los disponibles al momento del diseño, en términos tanto de inductancias y de capacitancias como de voltajes y corrientes que deberán soportar con su respectiva tolerancia (estos últimos parámetros no serán considerados en este artículo, solamente lo que influya en la respuesta en frecuencia).

Los fabricantes suministran bobinas o inductancias ajustables y variables desde 0 a 5 μH hasta de 0 a 150 μH , condensadores variables desde 15 a 250 pF hasta de 15 a 1500 pF, y condensadores fijos desde 100 pF hasta 100,000 pF, pasando por valores de 150, 200, 250, 300, etc. Todas estas componentes son especificadas para diferentes niveles máximos de corriente y voltaje rms.

Cuando la reactancia calculada sea capacitiva, la primera opción parecería corresponder a un condensador variable, pero ésta es generalmente la solución más cara. La opción más barata consiste en utilizar un condensador fijo de capacitancia menor a la calculada, y por lo tanto de reactancia capacitiva mayor, en serie con una bobina ajustada de manera que elimine la diferencia y la reactancia total sea igual a la calculada originalmente.

Considere el caso por ejemplo, de una estación con las siguientes características:

$$f_0 = 1100 \text{ KHz},$$

$$P = 1 \text{ KW}$$

$$\text{Longitud del elemento activo de la antena} = 68 \text{ m}$$

$$\text{Longitud promedio de radiales} = 60 \text{ m}$$

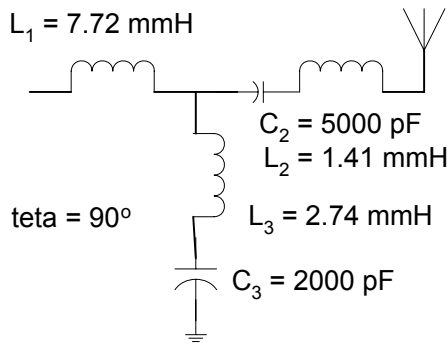
$$\lambda/4 = 68.2 \text{ m}$$

$$Z_0 = 50 \Omega$$

$$\text{Longitud de la línea de transmisión} = 7.5 \text{ m}$$

$$\text{Factor de velocidad de la línea} = 89 \%$$

Las impedancias de antena están dadas en la tabla I.

Fig. 8 Solución para $teta = 90^\circ$

Con un retraso de 90° , los valores de las componentes del acoplador, calculados con las ecuaciones 6 y 7, son:

$$X_3 = -j53.39 \Omega = -X_1$$

$$X_2 = -j19.21 \Omega$$

X_3 y X_2 representan reactancias capacitivas, y X_1 inductiva. Utilizando las ecuaciones 7 y 8 se tiene:

$$C_3 = 2710 \text{ pF}$$

$$C_2 = 7,531.8 \text{ pF}$$

$$L_1 = 7.72 \mu\text{H}$$

Se pueden implementar C_3 y C_2 combinando condensadores fijos y variables, pero esta solución es muy costosa debido principalmente al costo de los condensadores variables, como ya se mencionó. En lugar de esto, se utiliza normalmente para cada caso un condensador fijo de impedancia mayor a la calculada, lo que representa una capacitancia menor, y se agrega una bobina variable en serie que se ajusta para eliminar la diferencia. Para este ejemplo, si $C_3 = 2000 \text{ pF}$ ($X_{C_3} = -j72.34 \Omega$), deberá agregarse en serie una inductancia variable L_3 de 0 a $5 \mu\text{H}$, ajustada a $2.74 \mu\text{H}$ ($X_{L_3} = j18.94 \Omega$), de manera que la suma de las reactancias $X_{C_3} + X_{L_3} = X_3$. Si $C_2 = 5000 \text{ pF}$ ($X_{C_2} = -j28.94 \Omega$), se le agrega una bobina en serie L_2 de 0 a $5 \mu\text{H}$ ajustada a $1.41 \mu\text{H}$ ($X_{L_2} = j9.74 \Omega$) para que $X_{C_2} + X_{L_2} = X_2$. X_1 se implementará con una bobina variable L_1 de $10 \mu\text{H}$ ajustada a $7.72 \mu\text{H}$. El circuito es mostrado en la figura 8. El ajuste para obtener a la entrada del acoplador una resistencia de 50Ω se realiza con la bobina variable L_3 , y la sintonía de entrada, para tener una reactancia de 0Ω , se realiza con L_1 .

Si se analiza el comportamiento del sistema en las bandas laterales, tomadas a $\pm 10 \text{ KHz}$ alrededor de la frecuencia de la portadora (representan las componentes de modulación de audio), las impedancias de la antena y de las componentes de acoplador varían, las impedancias a la entrada del acoplador, el coeficiente de reflexión (CR) y la relación de onda estacionaria (ROE) son calculadas con las ecuaciones 10, 11 y 12, y los resultados mostrados en la tabla II:

TABLA II. IMPEDANCIAS, COEFICIENTE DE REFLEXIÓN (CR) Y RELACIÓN DE ONDA ESTACIONARIA (ROE) A LA ENTRADA DEL ACOPLADOR PARA $\theta = 90^\circ$

F(KHz)	$\text{Re}\{Z_{in}\}$	$\text{Im}\{Z_{in}\}$	CR	ROE
1090	52.51	$j3.59$	4.27 %	1.09
1100	50	$j0$	0	1
1110	44.67	$-j3.94$	7.00 %	1.15

$$Z_{in} = X_1' + \frac{X_3'(R_{ant}' + Z_{ant}' + X_2')}{(R_{ant}' + Z_{ant}' + X_2' + X_3')} \quad (10)$$

Donde R_{ant}' , Z_{ant}' , X_1' , X_2' y X_3' son las impedancias de cada elemento a la frecuencia de la banda lateral correspondiente.

$$CR = \frac{100(Z_{in} - Z_o)}{(Z_{in} + Z_o)} \quad (11)$$

$$ROE = \frac{1 + \frac{CR}{100}}{1 - \frac{CR}{100}} \quad (12)$$

Observe que las impedancias en las bandas laterales no se apartan mucho de la ideal de $50 + j0$ a la frecuencia de la portadora. Esto se debe principalmente a que la impedancia de la antena es muy cercana a los 50Ω de la línea de transmisión, lo que permite el diseño con corrimiento de fase cercano a 90° .

Estos cálculos, aunque no son muy complejos, requieren el uso de una computadora y de un programa especialmente diseñado para ello, principalmente porque, como veremos posteriormente, son muy repetitivos.

Corrimiento de fase distinto de 90°

Este criterio se utiliza cuando se desea un acoplador de banda ancha, que proporcione, como ya se mencionó, una impedancia prácticamente real y del mismo valor a la impedancia característica de la línea de transmisión en las bandas laterales. Las reactancias deben ser muy pequeñas e iguales de preferencia pero de signo contrario de una banda a otra. El procedimiento consiste en:

a) Realizar cálculos de impedancia a la entrada del acoplador para valores sucesivos de θ , dentro de rangos que varíen de 50° a 100° , o de 230° a 280° . Se consideran estos rangos porque representan valores de reactancias realizables, que pueden ser implementadas con componentes proporcionados por los fabricantes. Fuera de estos rangos es prácticamente imposible implementar los valores de dichas reactancias. Para cada caso deberán considerarse las capacitancias que pida la red.

b) Escoger el rango de defasamientos que proporcione la mejor respuesta en frecuencia.

c) Dentro del rango escogido, variar las capacitancias que pida la red a valores más pequeños y verificar la situación que presenta la mejor respuesta en frecuencia. Se incluye también la posibilidad de adherir capacitancias en serie con reactancias

TABLA III. COMPONENTES DEL ACOPLADOR PARA $\theta=71.3^\circ$

$X_3 = -j56.36 \Omega$	$C_3 = 2500 \text{ pF}$	$L_3 = 0.219 \mu\text{H}$
$X_1 = j39.44 \Omega$	$C_1 = 750 \text{ pF}$	$L_1 = 33.62 \mu\text{H}$
$X_2 = -j35.53 \Omega$	$C_2 = 4000 \text{ pF}$	$L_2 = 0.092 \mu\text{H}$

TABLA IV. IMPEDANCIAS, CR Y ROE A LA ENTRADA DEL ACOPLADOR PARA $\theta=71.3^\circ$

F(KHz)	Re $\{Z_{in}\}$	Im $\{Z_{in}\}$	CR	ROE
1090	49.04	j0.01	0.97 %	1.02
1100	50	j0	0	1
1110	49.05	-j2.55	2.74 %	1.06

positivas o inductivas, para tratar de mejorar la respuesta en frecuencia del sistema.

Siguiendo el mismo ejemplo con este procedimiento, se encuentra que con un retraso de 71.3° , las componentes del acoplador y las impedancias resultantes están dadas en las tablas III y IV.

Observe que los coeficientes de reflexión y las ROEs se acercan más a los valores ideales de 0 y 1 respectivamente, la parte real de la impedancia es más cercana a los 50 Ω ideales, y las partes imaginarias son más cercanas a los 0 Ω ideales, aunque no totalmente simétricas.

Al tomar en cuenta la línea de transmisión, se observa una nueva transformación de impedancias, como ya se mencionó, que depende de la longitud eléctrica de ésta en λ_s , dada por la ecuación 13.

$$le_\lambda = 100 * l * f / (F.V. * C) \quad (13)$$

- donde le_λ es la longitud eléctrica en λ 's
 l es la longitud física de la línea
 $F.V.$ es el factor de velocidad en %, o la velocidad a la que viaja la señal con respecto de su velocidad en el vacío.
 f es la frecuencia en Hertz
 C es la velocidad de la luz en el vacío, a saber, 300,000,000 m/seg

Considerando una atenuación muy baja para las frecuencias de AM, el coeficiente de reflexión y las impedancias a la entrada de la línea de transmisión están definidas por las ecuaciones 14, 15 y 16:

$$T(-le_\lambda) = T(0)e^{(-j4\pi le_\lambda)} \quad (14)$$

$$Z_{in \text{ lin}} = Z_{in \text{ acop}} (1 + T(-le_\lambda)) / (1 - T(-le_\lambda)) \quad (15)$$

donde $T(0)$ es el coeficiente de reflexión a la entrada de la línea de transmisión

$$T(0) = (Z_{in \text{ acop}} - Z_0) / (Z_{in \text{ acop}} + Z_0) \quad (16)$$

$T(-le_\lambda)$ es el coeficiente de reflexión a la entrada de la línea de transmisión, o a la salida del transmisor

Z_0 es la impedancia característica de la línea de

TABLA V. IMPEDANCIAS, CR Y ROE A LA ENTRADA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN PARA $\theta=71.3^\circ$.

F(KHz)	Re $\{Z_{in \text{ lin}}\}$	Im $\{Z_{in \text{ lin}}\}$	CR	ROE
1090	49.11	j0.37	0.97 %	1.02
1100	50	j0	0	1
1110	48.18	-j1.98	2.74 %	1.06

TABLA VI. COMPONENTES DEL ACOPLADOR PARA $\theta=57.6^\circ$.

$X_3 = -j63.23 \Omega$	$C_3 = 750 \text{ pF}$	$L_3 = 18.76 \mu\text{H}$
$X_1 = j35.1 \Omega$	$C_1 = 750 \text{ pF}$	$L_1 = 32.47 \mu\text{H}$
$X_2 = -j45.55 \Omega$	$C_2 = 3000 \text{ pF}$	$L_2 = 0.39 \mu\text{H}$

TABLA VII. IMPEDANCIAS, CR Y ROE A LA ENTRADA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN PARA $\theta=57.6^\circ$.

F(KHz)	Re $\{Z_{in \text{ lin}}\}$	Im $\{Z_{in \text{ lin}}\}$	CR	ROE
1090	48.83	j0.3	1.22	1.02
1100	50	j0	0	1
1110	48.83	-j2.81	3.08	1.06

transmisión

$Z_{in \text{ acop}}$ es la impedancia vista a la entrada del acoplador

$Z_{in \text{ lin}}$ es la impedancia a la entrada de la línea de transmisión o a la salida del transmisor

Estas transformaciones pueden ser también calculadas utilizando la Carta de Smith [9], pero se prefirió utilizar un método numérico, considerando que se tiene la herramienta de la computadora.

Para este caso particular, las impedancias en la entrada de la línea de transmisión están dadas en la tabla V:

Aunque los coeficientes de reflexión y las ROEs son del mismo valor que en el caso anterior, se observa la asimetría en las impedancias en las bandas laterales. Es deseable siempre que se tenga simetría en estas impedancias, como ya se comentó, para lo cual se realiza un nuevo cálculo, a 57.6° . Los resultados son mostrados en las tablas 6 y 7.

Estos son unos de los mejores resultados que se pueden encontrar, y aunque no hay simetría de los valores de las reactancias, estas son bastante pequeñas. Este puede ser considerado un ACOPLADOR DE BANDA ANCHA, que cumple con los requerimientos para transmisión de AM DIGITAL.

Observe que en el acoplador anterior se necesita una bobina $L_1=32.47 \mu\text{H}$, la cual puede ser relativamente costosa, si se le compara con una de $10 \mu\text{H}$. En el caso de que el diseño deba realizarse considerando la existencia de componentes económicas y en stock, los resultados no serán tan buenos como los anteriores en términos de respuesta en frecuencia, pero sí en términos de ingeniería.

El caso anterior es solamente un ejemplo, y muy fácil de realizar considerando que la antena tiene una impedancia muy cercana a la de salida del transmisor y a la de la línea de transmisión.

RIIE&C, REVISTA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN DE CORRIMIENTO DE FASE 2007
 TABLA VIII. CARACTERÍSTICAS DE IMPEDANCIA DE ANTENA CORTA.

F(KHz)	R _{ant}	Z _{ant}
550	22.5	-j41
560	24.1	-j33
570	25	-j28

X ₃ =j35.46 Ω	C ₃ =0	L ₃ =10.08 μH
X ₁ =-j32.46 Ω	C ₁ =650 pF	L ₁ =115 μH
X ₂ =-j1.07 Ω	C ₂ =30,000 pF	L ₂ =2.39 μH

TABLA IX. COMPONENTES DE ACOPLADOR PARA ANTENA CORTA A 90° DE CORRIMIENTO DE FASE.

X ₃ =-j35.4 Ω	C ₃ = 6800 pF	L ₃ = 1.817 μH
X ₁ = j35.4 Ω	C ₁ = 0	L ₁ = 10.06 μH
X ₂ = j68.4 Ω	C ₂ = 0	L ₂ = 19.44 μH

TABLA XII. IMPEDANCIAS, CR Y ROE A LA ENTRADA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN PARA ANTENA CORTA A 273.30 DE CORRIMIENTO DE FASE.

f(KHz)	R _{in lin}	Z _{in lin}	CR	ROE
550	50.07	j4.68	4.96 %	1.10
560	50	j0	0	1
570	50.1	j5.83	6.0 %	1.13

TABLA X. IMPEDANCIAS, CR Y ROE A LA ENTRADA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN PARA ANTENA CORTA A 90° DE CORRIMIENTO DE FASE

f(KHz)	R _{in lin}	Z _{in lin}	CR	ROE
550	57.84	j26.34	23.88	1.63
560	50	j0	0	1
570	36.2	-j6.66	19.38	1.48

En casos diferentes, y casi para cualquier situación, se pueden obtener muy buenos resultados siempre que se cuente con las herramientas de cálculo apropiadas. Si no se tienen es prácticamente imposible realizarlo.

Por otra parte, hay casos muy especiales, sobre todo para antenas muy cortas, en donde las reactancias de antena cambian de signo en las frecuencias de las bandas laterales, o donde las impedancias de antena cambian muy significativamente de la frecuencia central a las frecuencias de las bandas laterales. Esto significa que las curvas de resistencia de radiación y reactancia de antena tienen pendientes muy pronunciadas respecto de la frecuencia. En estos casos los resultados no serán tan positivos como los aquí encontrados, y deberá modificarse la longitud eléctrica de la antena si se desea mejorar la situación.

Considere otro ejemplo, el caso de una antena corta, cuyas características son mostradas a continuación, y las impedancias están dadas en la tabla VIII:

f_o = 560 KHz
 P = 1 KW
 Z_o = Z_{lin tx} = 50 Ω
 lon lin tx = 10 metros
 Factor de velocidad de lin = 66 %

A 90° de defasamiento el acoplador y su respuesta están dadas en las tablas IX y X.

Observe que las impedancias en las bandas laterales difieren mucho respecto de las del ejemplo anterior. Esto es porque la longitud de la antena no es cercana a 90° eléctricos, y su impedancia es muy diferente de 50 Ω. Los coeficientes de reflexión son altos así como las relaciones de onda estacionaria. Realizando distintos corrimientos de fase, junto con diferentes valores de condensadores, se llega que, 273.3° el circuito y las impedancias son las que se muestran en las tablas XI y XII.

Observe como han mejorado los coeficientes de reflexión y las relaciones de onda estacionaria, así como el hecho de que la impedancia es plana prácticamente en toda la banda de transmisión. El costo son componentes más grandes (observe el valor de L1), y aunque aquí no se analiza, los voltajes y las corrientes seguramente son mayores que para la solución a 90°.

Sin embargo, como ya se dijo, la calidad de transmisión será mejor, así como el desempeño del transmisor, entre otras cosas.

IV. CONCLUSIONES

Mostrar la forma en que se realizan los cálculos de impedancia a la entrada del acoplador y a la entrada de la línea de transmisión para valorar la respuesta en frecuencia del sistema en toda la banda de transmisión, y con ello poder diseñar acopladores de banda ancha, es una contribución original de este trabajo.

Es muy importante en sistemas de AM contar con acopladores de antena de banda ancha, pues de ello depende el comportamiento lineal del transmisor y su desempeño en general.

Igualmente importante es que el técnico o ingeniero conozca los criterios que debe tomar en cuenta al momento de diseñarlos, implementarlos, o simplemente al valorar el comportamiento de los mismos. Estos criterios pueden ser, entre otros, de simplicidad del sistema, de costos, de calidad de la respuesta en frecuencia, de tiempos de implementación y ajuste, de tamaño de componentes, voltajes, corrientes, etc.

Es necesario conocer la teoría de antenas, acopladores y de líneas de transmisión, y contar con las herramientas de cálculo apropiadas y saber utilizarlas, en especial con el software o programa, y la computadora. Si no se cuenta con ellas, es prácticamente imposible realizar un análisis completo del comportamiento de un sistema.

REFERENCIAS

- [1] Hayt, William H.; Análisis de circuitos en ingeniería; Mc Graw Hill, sexta edición; México 2003.
 - [2] Manual técnico de transmisor SENDER 1500 SS
 - [3] ANDREW catalog 36. Catálogo de líneas de transmisión ANDREW
 - [4] FLEXWELL RF & Microwave transmission line products. Radio Frequency Systems, Inc. Catálogo de líneas de transmisión FLEXWELL
 - [5] Manuales de servicio de transmisores Harris MW-1, MW-5, Gates I y Gates V, Nautel ND-1, Bauer 701 y 707, Sender 1500SS, Broadcast Electronics AM1, Continental-Lensa K5-A3, RCA BTA-1M y BTA1S
 - [6] Kennedy George; Electronic Communication Systems. Ed. Mc Graw Third Edition
 - [7] Shrader, Robert L.; Comunicación Electrónica. Mc Graw Hill. Segunda Edición; Albania, 1971.
 - [8] Soza Pedroza, Jorge Roberto; Radiación Electromagnética y antenas; LIMUSA; México 1991
- Johnk, Carl T. A.; Teoría Electromagnética: principios y aplicaciones;

McGrawHill;1973

Solis G. José Juan. Nació el 23 de Marzo de 1961 en Cd. Obregón, Sonora, México. Es Ingeniero en Electronica con especialidad en Comunicaciones, por la Universidad Autonoma Metropolitana, unidad Iztapalapa de la Cd. De Mexico, en 1986. José Juan trabajó como ayudante de profesor en la UAMI de 1984 a 1986. De 1986 a 1989 se desempeñó como maestro de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Sonora, y de 1989 a la fecha es Ingeniero de campo en el área de radiodifusión comercial AM y FM y maestro auxiliar en el ITSON Sus áreas de interés son la ingeniería de campo en comunicaciones, instrumentación y control industrial.

Pérez R. Javier, nació el 2 de Febrero de 1973. Obtuvo el título de Lic. en electrónica en la Universidad Autónoma de Puebla en 1999, el grado de Maestro en Ciencias en Ing. Electrónica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, en Cuernavaca Morelos, en el 2000.

Del 2000 a la fecha labora como profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Sonora, en Ciudad Obregón, Sonora, México. Sus áreas de interés son: control automático, procesamiento de imágenes y electrónica de potencia.