

# CAMBIADORES DE FASE ÓPTIMOS PARA EXCITACIÓN DE ARREGLOS LINEALES DE ANTENAS

J. L. Ramos, J. Hernández, S. Ruíz, M. J. Martínez.

Universidad de Guadalajara, Departamento de Electrónica; Av. Revolución No. 1500, puerta 10, Módulo O, Planta Baja, S. R. C.P. 44840 Tel/Fax (013) 619 84 71, email: [jramos@quantum.ucting.udg.mx](mailto:jramos@quantum.ucting.udg.mx)

## RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño de circuitos cambiadores de fase diferencial para microondas, los cuales son elementos fundamentales para la excitación de arreglos lineales de antenas, donde cierta amplitud y fase tiene que ser alimentada a cada elemento. Así mismo se muestra el diseño y características de diversos tipos de cambiadores de fase diferencial con respuesta de banda amplia. Para cambiadores de fase diferencial de  $180^\circ$ , se presenta el diseño directo de varios casos y posteriormente se enfoca hacia la conexión en cascada de dos elementos cada uno de ellos con respuesta de fase de  $90^\circ$ , ya que la construcción de los primeros es muy difícil en los sustratos convencionales.

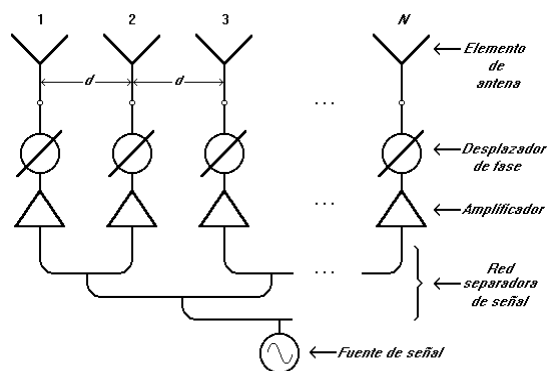
## ABSTRACT

In this work is presented a design for the microwave cascaded differential phase shifter circuits which are one of most the fundamental elements of excitation for linear array antennas. For the design of phase shifters was chosen the cascaded differential phase shifter, employing inverse plus tight sections since it has a good performance in a broad bandwidth. Relevant results not available in the literature are presented in this work for the circuits "inverse plus tight" and "estándar plus tight".

## 1.- INTRODUCCIÓN

En muchas aplicaciones es necesario utilizar antenas con alta directividad, orientación de lóbulos y nulos, etc., normalmente esto se logra con el uso de antenas parabólicas de gran tamaño, que además de su alto costo, no disponen de mucha versatilidad. Por otra parte, antenas simples tipo dipolo, tienen un patrón de radiación muy amplio y en consecuencia baja directividad.

Es posible obtener antenas especiales agrupando un número de antenas simples en disposiciones geométricas y eléctricas comunmente conocidas como arreglos de antenas cuya respuesta en conjunto puede ser manejada para que posea una alta directividad, entre otras características deseables [1-3].



Para excitar los arreglos de antenas, se requiere de una red alimentadora como se muestra en la figura 1, la cual aplica señales de cierta amplitud y cierta fase a cada elemento. La amplitud deseada se obtiene con el uso de amplificadores o atenuadores y la fase requerida por medio de circuitos cambiadores de fase [4].

Fig. 1.- Esquema de una red alimentadora para un arreglo lineal.

**2.- CAMBIADOR DE FASE**

Un cambiador de fase es un dispositivo cuya función principal es cambiar la fase de propagación de una señal. Cualquier reactancia colocada en serie o en derivación con una línea de transmisión introduce cambios de fase y, por consiguiente hay un número ilimitado de posibles configuraciones de circuitos cambiadores de fase [5]. Sin embargo, considerando dispositivos con mínimas pérdidas de inserción y reflexión, se reduce el número de circuitos prácticos. Cada uno ofrece ventajas con respecto al tamaño, ancho de banda, fase obtenida por elemento, etc.

**2.1.- Cambiador de fase diferencial**

Un cambiador de fase diferencial es un dispositivo que consiste de dos líneas de transmisión, una de ellas acoplada para que sea dispersiva [6]. Mediante la selección apropiada de la longitud de estas líneas y del grado de acoplamiento, la diferencia de fase entre ellas puede ser hecha para que sea casi constante sobre un ancho de banda amplio [7-10].

Hay varios tipos de cambiadores de fase diferencial: estándar, inverso, doble, en cascada, paralelo, etc., algunos casos se presentan en la figura 2.

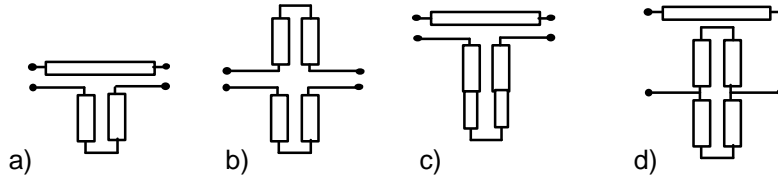


Fig. 2.- Diferentes configuraciones de un cambiador de fase diferencial: a) estándar, b) doble, c) secciones en cascada, d) paralelo.

**2.2.- Cambiadores de fase diferencial estándar,  $\Delta\Phi_e=90^\circ$**

Para este circuito, el cambio de fase diferencial viene

$$\Delta\Phi_e = K_e q_e - \cos^{-1} \left[ \frac{r - \tan^2 q_e}{r + \tan^2 q_e} \right] \tag{1}$$

Donde  $K_e\theta_e$  es la longitud eléctrica de la línea y  $\rho$  es la razón de impedancias definida como  $\rho=Z_{oe}/Z_{oo}$  donde  $Z_{oe}$  y  $Z_{oo}$  son las impedancias de modo par e impar de la sección acoplada y  $\theta_e$  es la longitud eléctrica de la línea acoplada. En la figura 3 y en la tabla 1 se presentan algunas características del cambiador de fase diferencial estándar,  $\Delta\Phi_e=90^\circ, \theta_e=90^\circ$  y  $K_e=3$ .

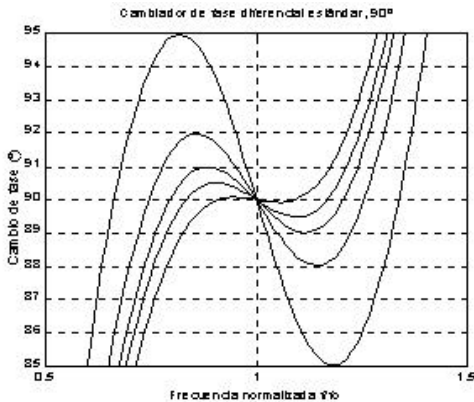


Fig. 3.- Respuesta del cambiador de fase diferencial estándar para  $\Delta\Phi_e=90^\circ$ .

Tabla 1.- Características del cambiador de fase diferencial estándar;  $\Delta\Phi_e=90^\circ \pm \epsilon, K_e=3, \theta_e=90^\circ$

$\epsilon$ (°)	$\rho$	$Z_{oe}$ ( $\Omega$ )	$Z_{oo}$ ( $\Omega$ )	C (dB)	B (%)
$\pm 5$	3.02	86.9	28.77	5.98	80.6
$\pm 2$	2.62	80.963	30.88	6.98	64.00
$\pm 1$	2.47	78.65	31.79	7.45	49.86
$\pm 0.5$	2.39	77.25	32.36	7.76	39.00
$\pm 0.1$	2.29	75.75	33.00	8.11	24.00

**2.3.- Cambiadores de fase diferencial estándar,  $\Delta\Phi_e=180^\circ$**

De (1) observamos que se puede conseguir un cambio de fase diferencial de  $180^\circ$  con respuesta de banda amplia cuando:  $\Delta\Phi_e=180^\circ, \theta_e=90^\circ$  y  $K_e=4$ .

En la figura 4 y en la tabla 2 se presentan algunas características del cambiador de fase diferencial estándar de 180°.

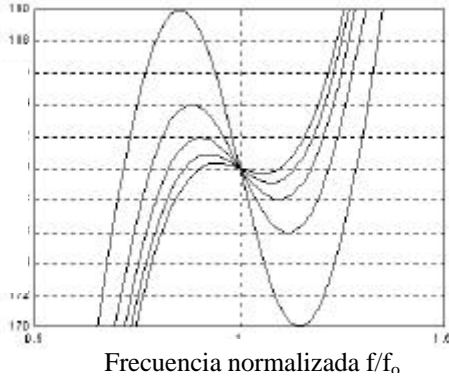


Fig. 4.- Respuesta del cambiador de fase diferencial estándar para  $\Delta\Phi_e=180^\circ$ .

**Tabla 2.- Características del cambiador de fase diferencial estándar;  $\Delta\Phi_e=180^\circ\pm\varepsilon$ ,  $K_e=4$ ,  $\theta_e = 90^\circ$ .**

$\varepsilon$ (°)	$\rho$	$Z_{oe}$ ( $\Omega$ )	$Z_{oo}$ ( $\Omega$ )	C (dB)	B (%)
$\pm 10$	6.76	129.99	19.23	2.58	71
$\pm 4$	5.25	114.56	21.82	3.34	52
$\pm 2$	4.71	108.51	23.03	3.74	42
$\pm 1$	4.40	104.88	23.83	4.01	16.06
$\pm 0.2$	4.20	102.46	24.39	4.21	10.98

**2.4.- Cambiador de fase diferencial inverso,  $\Delta\Phi_i=90^\circ$ .**

En este caso el cambio de fase,  $\Delta\Phi_i$  de un cambiador de fase diferencial inverso es obtenido como la diferencia de fase de transmisión entre una sección acoplada y una línea de transmisión uniforme, dada como [6]

$$\Delta\Phi_i = \cos^{-1} \left[ \frac{r - \tan^2 q_i}{r + \tan^2 q_i} \right] - K_i q_i \tag{2}$$

El cambio deseado es obtenido de (2) por la selección apropiada de  $\theta_i$ ,  $K_i$  y  $\rho$ . También de esta ecuación podemos ver que cuando  $\theta_i$  es escogida para que valga  $\pi/2$  ó  $\pi$  a la frecuencia central, la respuesta de cambio de fase es antisimétrica con respecto a la frecuencia central y respuesta de banda amplia es obtenida en estos casos. Usando (2) con el fin de obtener cambio de 90° cuando  $\theta_i=\pi$  a la frecuencia central, vemos que  $K_i=1.5$  (los casos cuando  $\theta_i=\pi/2$  y  $K_i=1$  ó  $K_i=5$  dan resultados muy pobres). La respuesta deseada del cambiador de fase es obtenida variando  $Z_{oe}$  y los valores correspondientes para  $Z_{oo}$ ,  $\rho$  y C. En la figura 5 y en la tabla 3, se presentan algunas de las características de los cambiadores de fase diferencial inverso.

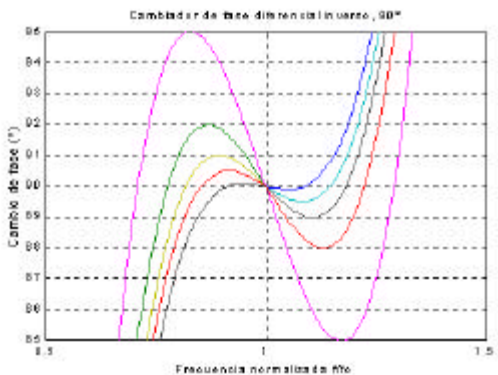


Fig. 5.- Cambiador de fase diferencial inverso

**Tabla 3.- Características del cambiador de fase diferencial inverso;  $\Delta\Phi_i=90^\circ\pm\varepsilon$ ,  $K_i=1.5$ ,  $\theta_i=180^\circ$**

$\varepsilon$ (°)	$\rho$	$Z_{oe}$ ( $\Omega$ )	$Z_{oo}$ ( $\Omega$ )	C (dB)	B (%)
$\pm 5$	2.52	79.3	31.53	7.31	66.6
$\pm 2$	2.12	72.8	34.34	8.9	51.6
$\pm 1$	1.98	70.35	35.54	9.66	41.8
$\pm 0.5$	1.9	68.92	36.27	10.16	33.6
$\pm 0.1$	1.82	67.4	37.09	10.73	19.9

**2.5.- Cambiador de fase diferencial inverso,  $\Delta\Phi_i=180^\circ$ .**

Para obtener un cambio de fase diferencial de 180° con este cambiador, encontramos de (2) que:  $\Delta\Phi_i=180^\circ, \theta_i=180^\circ$  y  $K_i=1$ . En la figura 6 y en la tabla 4, se presentan algunas de las características de los cambiadores de fase diferencial inverso de 180°.

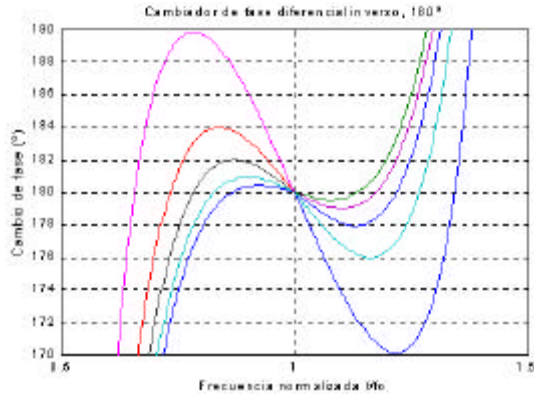


Fig. 6.- Cambiador de fase diferencial inverso; respuestas para  $DF_i=180^\circ$  con  $K_i=1$ .

Tabla 4.- Características del cambiador de fase diferencial inverso;  $\Delta\Phi_i=180^\circ \pm \epsilon$ ,  $K_i=1$ ,  $\theta_i=180^\circ$

$\epsilon$ (°)	$\rho$	$Z_{oe}$ ( $\Omega$ )	$Z_{oo}$ ( $\Omega$ )	C (dB)	B (%)
$\pm 10$	9.72	155.8	16.03	1.79	76.15
$\pm 4$	6.25	125.0	20.00	2.80	67.41
$\pm 2$	5.25	114.5	21.82	3.34	62.23
$\pm 1$	4.71	108.5	23.03	3.74	58.81
$\pm 0.2$	4.40	104.8	23.83	4.01	56.52

**2.6.- Cambiador de fase diferencial denso,  $\Delta\Phi_d=90^\circ$ .**

Observando (1), vemos que un cambio de fase diferencial,  $\Delta\Phi_d=90^\circ$  puede obtenerse también seleccionamos  $\theta_d=180^\circ$ ,  $K_d\theta_d=90^\circ$  y  $K_d=0.5$ , nuevamente, la respuesta de cambio de fase es antisimétrica con respecto a la frecuencia central y respuesta de banda amplia es obtenida en estos casos. Sin embargo, a diferencia de los casos anteriores, la respuesta de estos circuitos es “casi complementaria”, es decir su respuesta es del tipo cóncava para las frecuencias inferiores a la frecuencia central y convexa para las frecuencias superiores. La respuesta deseada del cambiador de fase es obtenida variando  $Z_{oe}$  y los valores correspondientes para  $Z_{oo}$ ,  $\rho$  y C. En la figura 7 y en la tabla 5, se presentan algunas de las características de los cambiadores de fase diferencial denso de  $90^\circ$ .

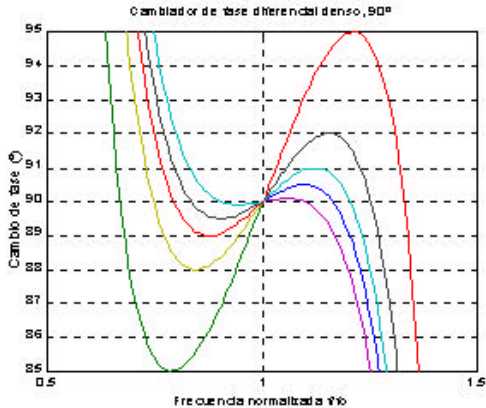


Fig. 7.- Cambiador de fase diferencial denso; respuestas para  $DF_d=90^\circ$  con  $K_d=0.5$ .

Tabla 5.- Características del cambiador de fase diferencial denso;  $\Delta\Phi_d=90^\circ \pm \epsilon$ ,  $K_d=0.5$ ,  $\theta_d=180^\circ$ .

$\epsilon$ (°)	$\rho$	$Z_{oe}$ ( $\Omega$ )	$Z_{oo}$ ( $\Omega$ )	C (dB)	B (%)
$\pm 5$	40.4	217.80	7.87	0.43	73
$\pm 2$	25.6	252.98	9.88	0.68	54
$\pm 1$	21.3	230.76	10.83	1.82	46
$\pm .5$	19.1	248.51	11.44	0.91	36
$\pm .1$	17.0	206.16	12.13	1.02	24

**2.7.- Cambiador de fase diferencial denso,  $\Delta\Phi_d=180^\circ$ .**

Al igual que para el caso anterior, se obtienen las condiciones para las cuales obtenemos un cambio diferencial de fase de  $180^\circ$  con los siguientes valores:  $\Delta\Phi_d=180^\circ$ ,  $\theta_d=180^\circ$ , y  $K_d=1$ . En la figura 8 y en la tabla 6, se presentan algunas de las características de los cambiadores de fase diferencial denso de  $180^\circ$ .

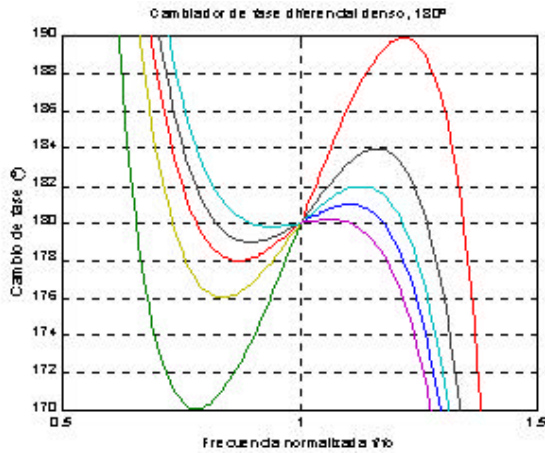


Fig. 8.- Cambiador de fase diferencial denso; respuestas para  $DF_d=180^\circ$  con  $K_d=1.0$ .

Tabla 6.- Características del cambiador de fase diferencial denso;  $\Delta\Phi_d=180^\circ\pm\varepsilon$ ,  $K_d=1.0$ ,  $\theta_d = 180^\circ$ .

$\varepsilon$ (°)	$\rho$	$Z_{oe}$ ( $\Omega$ )	$Z_{oo}$ ( $\Omega$ )	C (dB)	B (%)
$\pm 10$	9.75	156.13	16.01	1.79	76
$\pm 4$	6.24	124.90	20.02	2.80	65
$\pm 2$	5.24	114.46	21.84	3.35	62
$\pm 1.0$	4.725	108.69	23.00	3.73	60
$\pm 0.2$	4.23	102.84	24.31	4.18	56

### 3.- CAMBIADORES DE FASE DIFERENCIAL EN CASCADA

Debido a que para obtener  $\Delta\Phi=90^\circ$  es más fácil (requiere acoplamiento más débil) que para obtener  $\Delta\Phi=180^\circ$ , una solución posible para diseñar este caso es poner en cascada dos de los casos anteriores. Así, el cambio de fase diferencial total está dado por:

$$\Delta\Phi_t = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 \tag{3}$$

Donde  $\Delta\Phi_1$  y  $\Delta\Phi_2$  están dados por (1) ó (2). En general  $\Delta\Phi_1 \neq \Delta\Phi_2$  pero en el caso de usar secciones iguales, (3) se reduce a.

$$\Delta\Phi_t = 2\Delta\Phi_1 = 2\Delta\Phi_2 = 2\Delta\Phi \tag{4}$$

Un cambiador de fase diferencial en cascada de  $\Delta\Phi=180^\circ$ , puede obtenerse con diversos casos.

#### 3.1.- Estándar (90°) más estándar (90°), $\Delta\Phi_{et}=180^\circ$ .

En este caso cada sección tendrá las siguientes especificaciones:  $\Delta\Phi_e=90^\circ$ ,  $\theta_e=90^\circ$ ,  $K_e\theta_e=270^\circ$  y  $K_e=3$ . En la figura 9 y en la tabla 6, se presentan algunas características para este tipo de cambiador de fase.

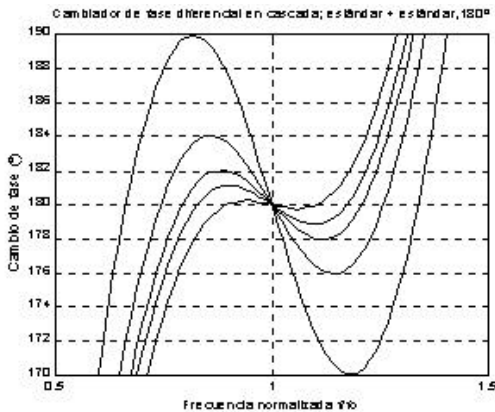


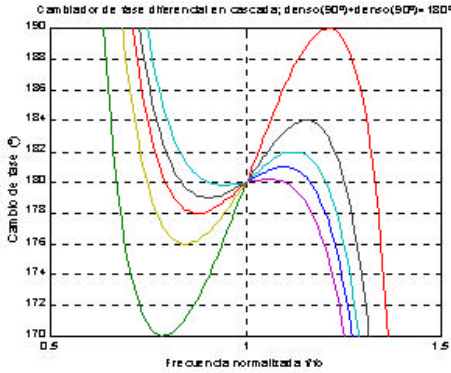
Fig. 9.- Cambiador de fase diferencial en cascada, estándar más estándar; respuestas para  $DF_{et}=180^\circ$ , con  $K_e=3.0$ .

Tabla 6.- Características del cambiador de fase diferencial en cascada, estándar más estándar;  $\Delta\Phi_{et}=180^\circ\pm\varepsilon$ ,  $K_e=3.0$ ,  $\theta_d = 180^\circ$ .

$\varepsilon$ (°)	$\rho$	$Z_{oe}$ ( $\Omega$ )	$Z_{oo}$ ( $\Omega$ )	C (dB)	B (%)
$\pm 10$	3.02	86.8	28.7	5.97	80.00
$\pm 4$	2.62	81.0	30.8	6.96	60.00
$\pm 2$	2.47	78.6	31.7	7.44	41.93
$\pm 1.0$	2.4	77.4	32.2	7.70	40.00
$\pm 0.2$	2.3	75.8	32.9	8.09	20.00

**3.2.- Denso (90°) más denso (90°),  $\Delta\Phi_{dt}=180^\circ$ .**

En este caso cada sección tendrá las siguientes especificaciones:  $\Delta\Phi_d=90^\circ$ ,  $\theta_d=180^\circ$ ,  $K_d\theta_d=90^\circ$  y  $K_d=0.5$ . En la figura 10 y en la tabla 7, se presentan algunas características para este tipo de cambiador de fase.



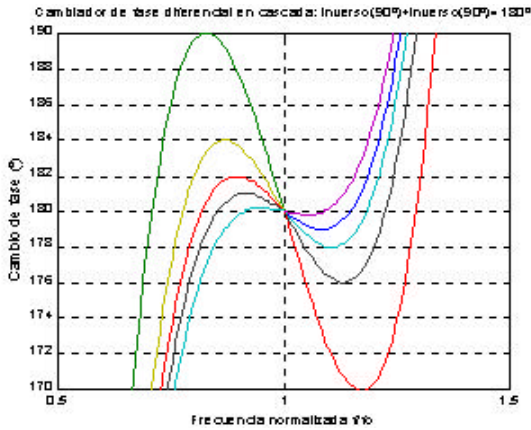
**Tabla 7.- Características del cambiador de fase diferencial en cascada, denso más denso;  $\Delta\Phi_{dt}=180^\circ \pm \epsilon$ ,  $K_d=0.5$ ,  $\theta_d=180^\circ$**

$\epsilon$ (°)	$\rho$	$Z_{oe}$ ( $\Omega$ )	$Z_{oo}$ ( $\Omega$ )	C (dB)	B (%)
$\pm 10$	40.45	318.0	7.86	0.42	72.85
$\pm 4$	25.6	252.9	9.88	0.67	57.15
$\pm 2$	21.34	230.9	10.82	0.81	45.71
$\pm 1.0$	19.1	218.5	11.44	0.91	36.78
$\pm 0.2$	16.97	205.9	12.13	1.02	21.50

Fig. 10.- Cambiador de fase diferencial en cascada, denso más denso; respuestas para  $DF_{dt}=180^\circ$  con  $K_d=0.5$ .

**3.3.- Inverso (90°) más inverso (90°),  $\Delta\Phi_{it}=180^\circ$ .**

En este caso cada sección tendrá las siguientes especificaciones:  $\Delta\Phi_i=90^\circ$ ,  $\theta_i=90^\circ$ ,  $K_i\theta_i=270^\circ$  y  $K_i=1.5$ . En la figura 11 y en la tabla 8, se presentan algunas características para este tipo de cambiador de fase.



**Tabla 8.- Características del cambiador de fase diferencial en cascada, inverso más inverso;  $\Delta\Phi_{it}=180^\circ \pm \epsilon$ ,  $K_i=1.5$ ,  $\theta_d=180^\circ$ .**

$\epsilon$ (°)	$\rho$	$Z_{oe}$ ( $\Omega$ )	$Z_{oo}$ ( $\Omega$ )	C (dB)	B (%)
$\pm 10$	2.52	79.37	31.49	7.29	66.79
$\pm 4$	2.12	72.80	34.34	8.89	51.43
$\pm 2$	1.98	70.35	35.53	9.65	41.79
$\pm 1.0$	1.90	68.92	36.27	10.16	33.57
$\pm 0.2$	1.82	67.45	37.06	10.72	20.72

Fig. 11.- Cambiador de fase diferencial en cascada, inverso más inverso; respuestas para  $DF_{it}=180^\circ$  con  $K_i=1.5$ .

Los cambiadores de fase aquí presentados tienen una desviación de fase total  $\epsilon_t$  que es obtenida como la adición de las desviaciones de fase de los cambiadores de fase diferencial individuales, i. e., Donde en el caso de usar secciones idénticas,  $\epsilon_t$  se reduce a:

$$e_t = e_1 + e_2 \tag{5}$$

$$e_t = 2e_1 = 2e_2 = 2e \tag{6}$$

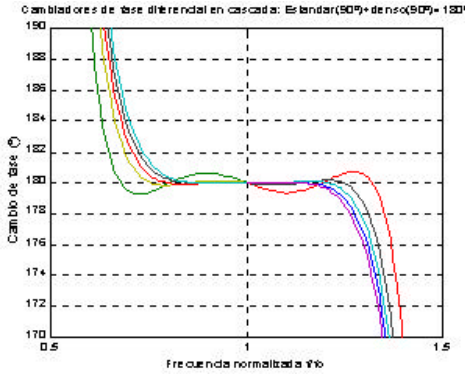
De (6) vemos que tenemos que diseñar cada sección con la mitad de la desviación de fase permitida. Esto, reduce el ancho de banda operacional del circuito.

**4.- CAMBIADORES DE FASE DIFERENCIAL EN CASCADA: CONEXIÓN ÓPTIMA.**

Con el objetivo de reducir la desviación de fase total, teniendo el mismo ancho de banda y al menos el mismo grado de acoplamiento, se investigaron los siguientes casos:

**4.1.- Estándar (90°) más denso (90°),  $\Delta\Phi_{it}=180^\circ$ .**

En este caso cada sección tendrá las siguientes especificaciones:  $\Delta\Phi_e=90^\circ$ ,  $\theta_e=90^\circ$ ,  $K_e\theta_e=270^\circ$  y  $K_e=3$ ;  $\Delta\Phi_d=90^\circ$ ,  $\theta_d=180^\circ$ ,  $K_d\theta_d=90^\circ$  y  $K_d=0.5$ . En la figura 12 y en la tabla 9, se presentan algunas características para este tipo de cambiador de fase.



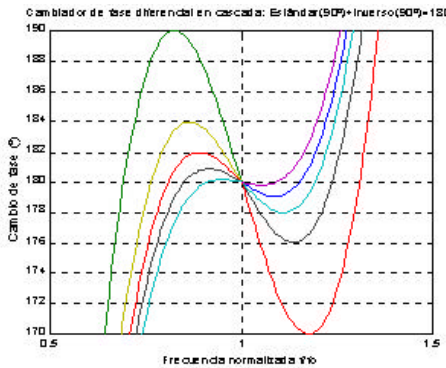
**Tabla 9.- Características del cambiador de fase diferencial en cascada, estándar más denso;  $\Delta\Phi_i=180^\circ \pm \epsilon_s$ ,  $\theta_s=90^\circ$ ,  $\theta_d=180^\circ$ .**

$\epsilon_s + \epsilon_d$ (°)	$\rho_s$	$\rho_d$	$Z_{oes}$ (Ω)	$Z_{oos}$ (Ω)	$Z_{oed}$ (Ω)	$Z_{ood}$ (Ω)	$C_s$ (dB)	$C_d$ (dB)	B (%)
$\pm .83$	3.0	40.4	73.99	33.78	156.5	15.9	8.56	1.77	76
$\pm .33$	2.6	25.6	70.35	35.53	132.2	18.9	9.65	2.49	61
$\pm .16$	2.4	21.3	68.92	36.27	127.9	19.5	10.16	2.67	51
$\pm 0$	2.3	19.1	68.19	36.66	127.4	19.6	10.43	2.69	41
$\pm 5$	2.2	16	67.45	37.06	125.9	19.8	10.72	2.75	25

Fig. 12.- Cambiador de fase diferencial en cascada, estándar más denso, respuestas para  $DF_i=180^\circ$ .

**4.2.- Estándar (90°) más inverso (90°),  $\Delta\Phi_{it}=180^\circ$ .**

En este caso cada sección tendrá las siguientes especificaciones:  $\Delta\Phi_e=90^\circ$ ,  $\theta_e=90^\circ$ ,  $K_e\theta_e=270^\circ$  y  $K_e=3$ ;  $\Delta\Phi_i=90^\circ$ ,  $\theta_i=180^\circ$ ,  $K_i\theta_i=270^\circ$  y  $K_i=1.5$ . En la figura 13 y en la tabla 10, se presentan algunas características para este tipo de cambiador de fase.



**Tabla 10.- Características del cambiador de fase diferencial en cascada, estándar más inverso;  $\Delta\Phi_i=180^\circ \pm \epsilon_s$ ,  $\theta_s=90^\circ$ ,  $\theta_i=180^\circ$ .**

$\epsilon_s + \epsilon_d$ (°)	$\rho_s$	$\rho_i$	$Z_{oes}$ (Ω)	$Z_{oos}$ (Ω)	$Z_{oei}$ (Ω)	$Z_{ooi}$ (Ω)	$C_s$ (dB)	$C_i$ (dB)	B (%)
$\pm 10$	3.02	2.52	86.9	28.77	79.37	31.49	5.98	7.29	71
$\pm 4$	2.62	2.12	80.96	30.88	72.80	34.34	6.98	8.89	63
$\pm 2$	2.47	1.98	78.65	31.79	70.35	35.53	7.45	9.65	58
$\pm 1.0$	2.37	1.90	77.25	32.36	68.92	36.27	7.76	10.2	55
$\pm 0.5$	2.29	1.82	75.75	33.00	67.45	37.06	8.11	10.7	51

Fig. 13.- Cambiador de fase diferencial en cascada, estándar más inverso, respuestas para  $DF_i=180^\circ$ .

**4.3.- Denso (90°) más inverso (90°),  $\Delta\Phi_{it}=180^\circ$ .**

En este caso cada sección tendrá las siguientes especificaciones:  $\Delta\Phi_d=90^\circ$ ,  $\theta_d=180^\circ$ ,  $K_d\theta_d=90^\circ$  y  $K_d=0.5$ ;  $\Delta\Phi_i=90^\circ$ ,  $\theta_i=180^\circ$ ,  $K_i\theta_i=270^\circ$  y  $K_i=1.5$ . en la tabla 11, se presentan algunas características para este tipo de cambiador de fase.

**Tabla 11.- Características del cambiador de fase diferencial en cascada, denso más inverso;  
 $\Delta\Phi_i=180^\circ\pm\epsilon$ .**

$\epsilon_d+\epsilon_i$ (°)	$\rho_d$	$\rho_i$	$\theta_d, \theta_i$ (°)	$Z_{oed}$ ( $\Omega$ )	$Z_{ood}$ ( $\Omega$ )	$Z_{oei}$ ( $\Omega$ )	$Z_{ooi}$ ( $\Omega$ )	$C_d$ (dB)	$C_i$ (dB)	B (%)
$\pm 10$	22	1.5	180, 180	234.5	10.66	61.23	40.82	0.79	13.97	84.13
$\pm 4$	12.5	1.4	180, 180	176.7	14.14	59.15	42.25	1.39	15.56	70.52
$\pm 2$	9	1.3	180, 180	150.0	16.67	57.00	43.85	1.93	17.69	58.97
$\pm 1.0$	7	1.2	180, 180	132.2	18.89	54.76	45.64	2.49	20.82	52.07
$\pm 0.5$	5.5	1.1	180, 180	117.2	21.32	52.44	47.67	3.19	26.44	38.28

## 5. REFERENCIAS

1. J. Ramos, G. Vega, M. Martínez, M. Ruiz, *Arreglos Lineales de Antenas y Dispositivos de Excitación*, Memorias SOMI XI Congreso de Instrumentación, 1996.
2. J. Ramos, G. Vega, M. Martínez, *Arreglos Lineales de Antenas con separación no uniforme*, Memorias SOMI XII Congreso de Instrumentación, 1997.
3. J. Ramos, M. Martínez, M. Ruiz, G. Vega, *Análisis de arreglos lineales de antenas apoyado por computadora y cálculo numérico de la impedancia propia y mutua entre dipolos basada en el método de momentos*, Memorias SOMI XIII Congreso de Instrumentación, 1998.
4. D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison-Wesley, 1990.
5. Robert E. Collin, *Foundations for microwave engineering*, (Ed. Mc.Graw-Hill Inc., 1992).
6. Stig Rehmark, *Theory and Application of Microwave Couplers, Phase Shifters and Power Dividers*, (Ed. Chalmers University of Technology, Suecia)
7. E. M. T. Jones and J. T. Bolljahn, *Coupled Strip Transmission Line Filters and Directional Couplers*, (IRE MTT)
8. B. M. Sniffman, *A new class of broad-Band Microwave 90-degree Phase Shifters*, (Ed. IRE MTT)
9. Burchard Shiek and Jurgen Kohler, *A Method for Broad-Band Matching of Microstrip Differential Shifters*, (IEEE MTT-25)
10. J. Ramos Quirarte and J. Piotr Starski, *Synthesis of Schiffman Phase Shifters*, (IEEE MTT-39)
11. J. Ramos Quirarte and J. Piotr Starski, *Novel Schiffman Phase Shifters*, (Ed. Chalmers University of Technology, Suecia)