



Diseño y Simulación de Amplificadores de Microondas de Ganancia Variable

María Susana Ruíz Palacios



1. ¿por qué es eligió este tema?
2. ¿cuál es el pontencial de aplicación del tema?
3. ¿cuál o cuáles son los problemas que se pretenden resolver al realizar esta investigación?



Puntos que se trataran en la exposicion:

1. Introducción
2. Técnicas de variación de la ganancia reportadas en la literatura
3. Una técnica de Variación de Ganancia en Redes de Adaptación
4. Diseño y Simulación de Amplificadores de Ganancia Variable
5. Caso de Estudio
6. Conclusiones



Introducción

Clasificación de Amplificadores

Bajas
frecuencias

Audio
Video

Tipo A, AB, D

Frecuencias
intermedias

Potencia RF tipo C, E y F

Alta
frecuencias

Baja potencia

Baja distorsión

Alta potencia

No lineal y distorsión alta

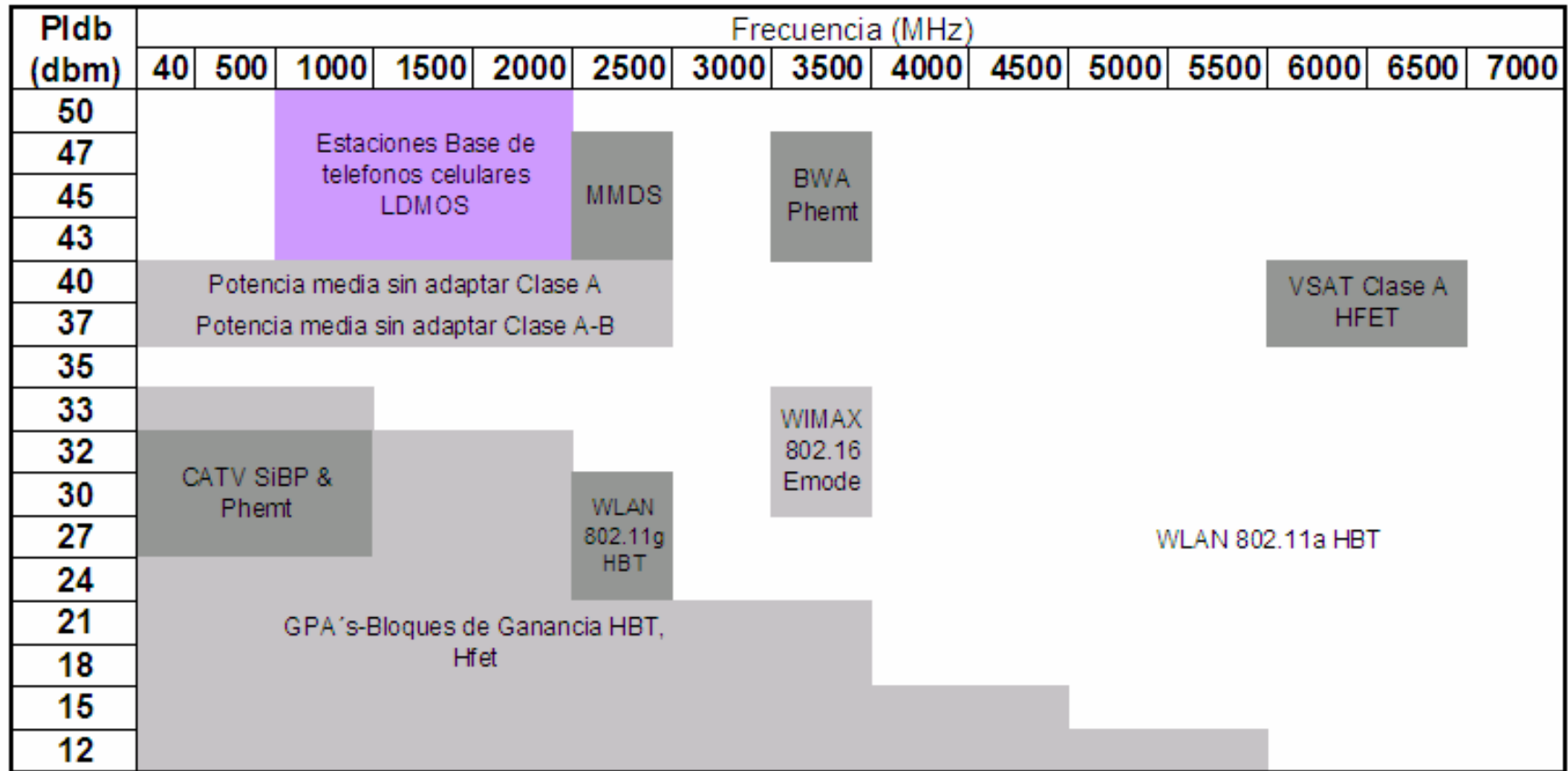


Introducción

- La amplificación de señales de RF y Microondas es uno de los procesos mas importantes en sistemas de comunicación inalámbrica ya que se emplea en diversos puntos: Etapas de entrada, de salida, frecuencia intermedia, etcétera.
- Las características que debe tener un amplificador depende de la aplicación.
- Las características generales de interés son: Ganancia, nivel de potencia de salida, ancho de banda, figura de ruido, linealidad, eficiencia, arquitectura(topología), tipo de retroalimentación y la vía de alimentación.
- Algunas aplicaciones requieren funciones adicionales de un amplificador, tal como la ganancia variable, los cuales son conocidos como **AMPLIFICADOR DE GANANCIA VARIABLE (VGA)**

Introducción

Aplicaciones de bloques amplificadores





Introducción

Aplicaciones de los VGA

- En sistemas de control automático de ganancia en receptores.
- En control de potencia de transmisión en etapas de salida.
- En redes combinadoras para antenas adaptivas.



Introducción

Características de Amplificadores de RF y microondas en transmisores y receptores

•En Receptores

Los amplificadores de alta ganancia y bajo ruido son de señal pequeña y proporcionan niveles bajos de potencia a la salida siendo ampliamente utilizados en el receptor donde los niveles de señal son bajos. **Los parámetros S de pequeña señal son utilizados en el diseño de estos amplificadores.**

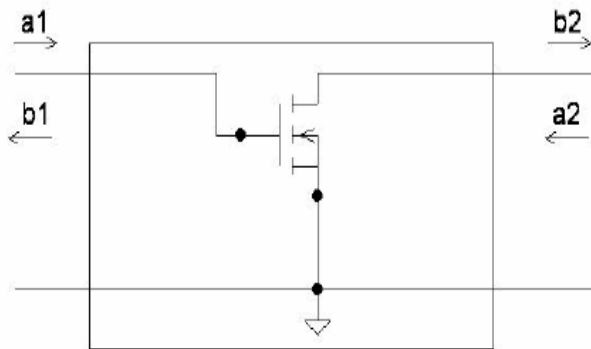
•En Transmisores

Los amplificadores de alta potencia son usados en el transmisor donde los niveles de la señal son altos para que se pueda transmitir a las distancias deseadas.

Tradicionalmente el ajuste de la ganancia se realiza variando la polarización. Esta técnica no puede ser utilizada en los nuevos sistemas ya que afecta fuertemente la linealidad del amplificador. Por lo que es necesario un bloque de control de ganancia separado, el cual debe proporcionar suficiente linealidad en un rango de control en todas las condiciones de operación.

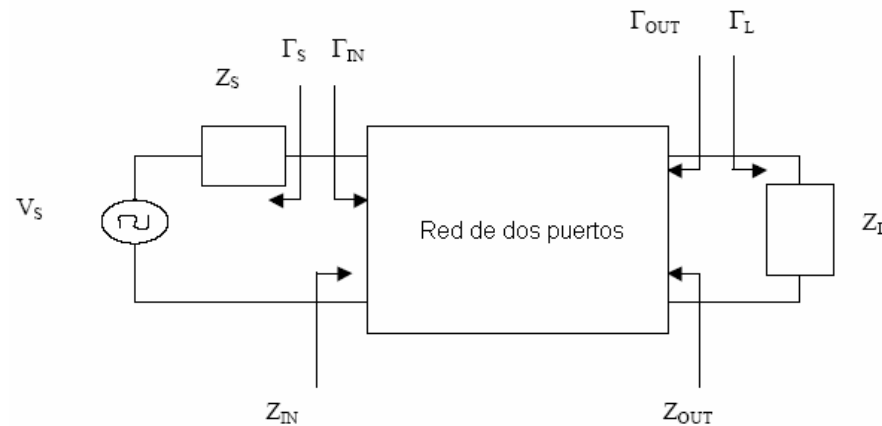
Introducción

Diseño de Amplificadores en sistemas receptores



$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2$$

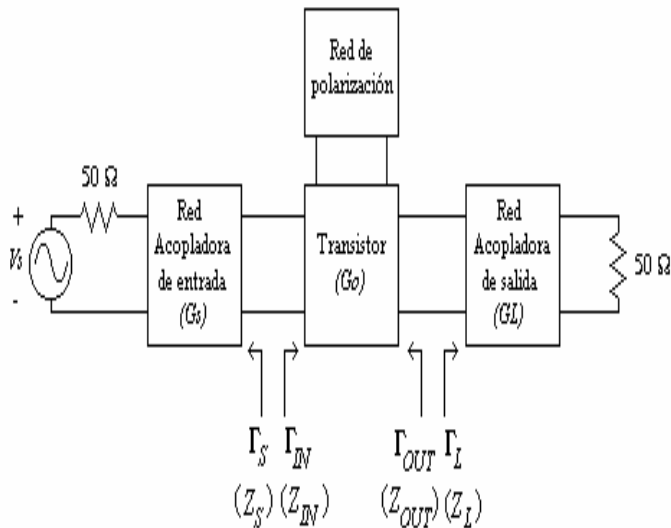


Introducción

Diseño de amplificadores en sistemas receptores

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} > 1$$

$$|\Delta| = |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}| < 1$$

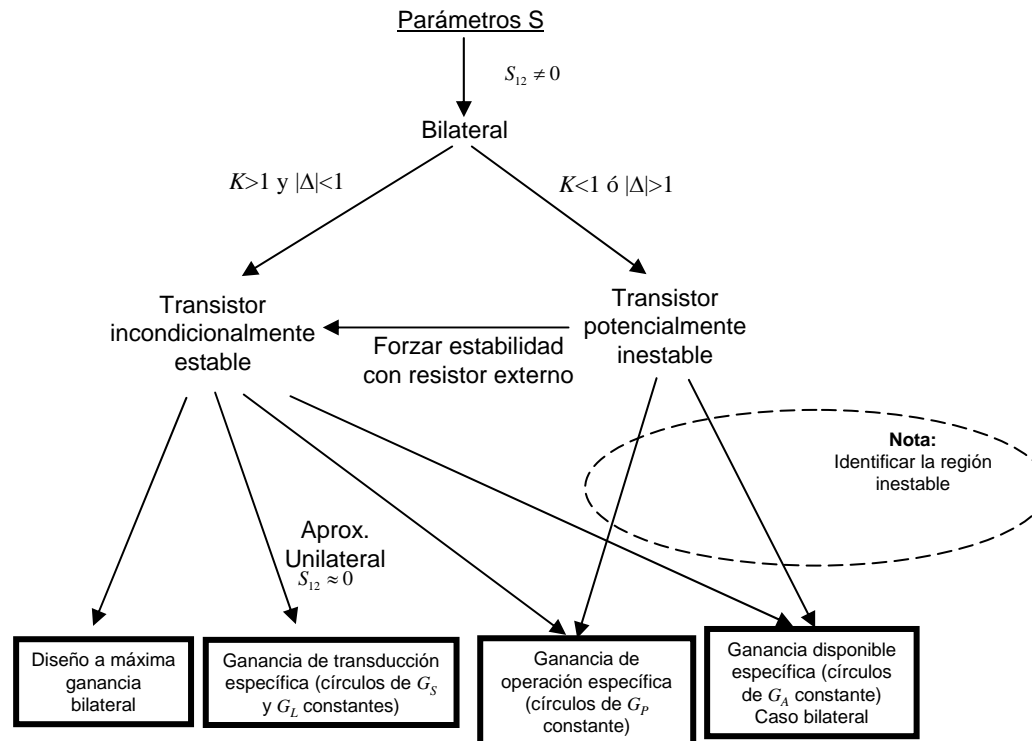


Las redes de adaptación se pueden implementar con:

1. Elementos concentrados: resistencias, capacitores y bobinas, utilizando el modelo de voltaje y corriente sin permitir variaciones de voltaje a lo largo de la trayectoria de la señal. Estos elementos deben ser más pequeños que las longitud de onda de la señal.
2. Elementos distribuidos: líneas de transmisión, que permiten la variación del voltaje a lo largo de la trayectoria de la señal
3. Combinación de elementos concentrados y distribuido

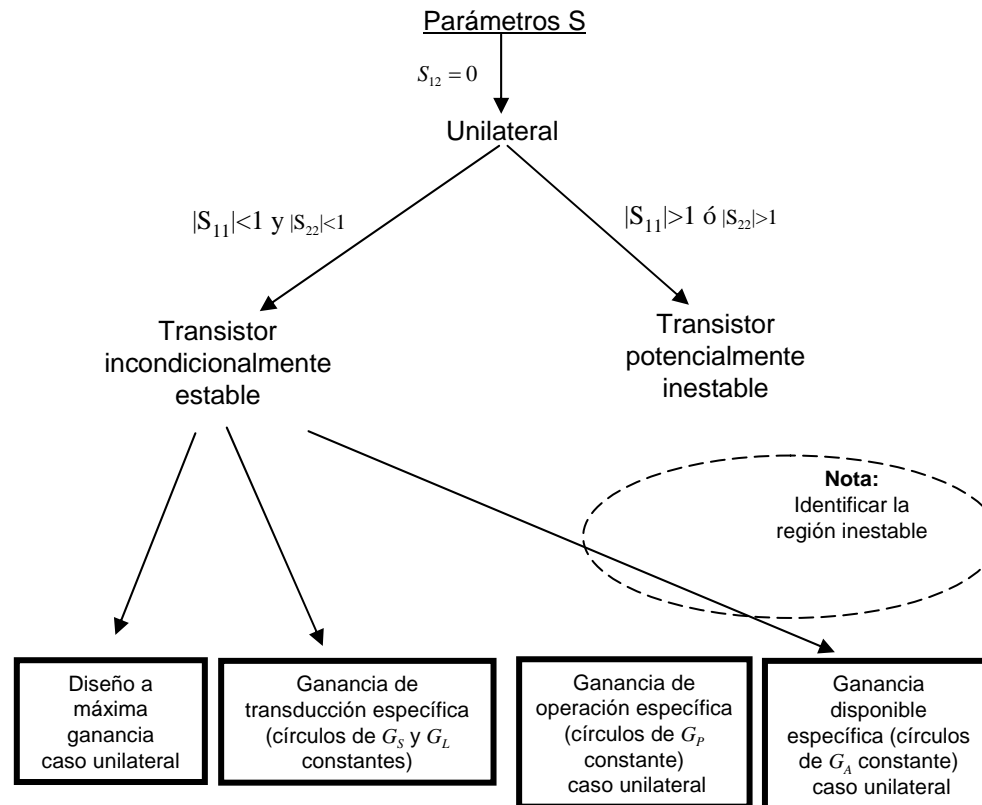
Introducción

Condiciones que debe satisfacer un transistor



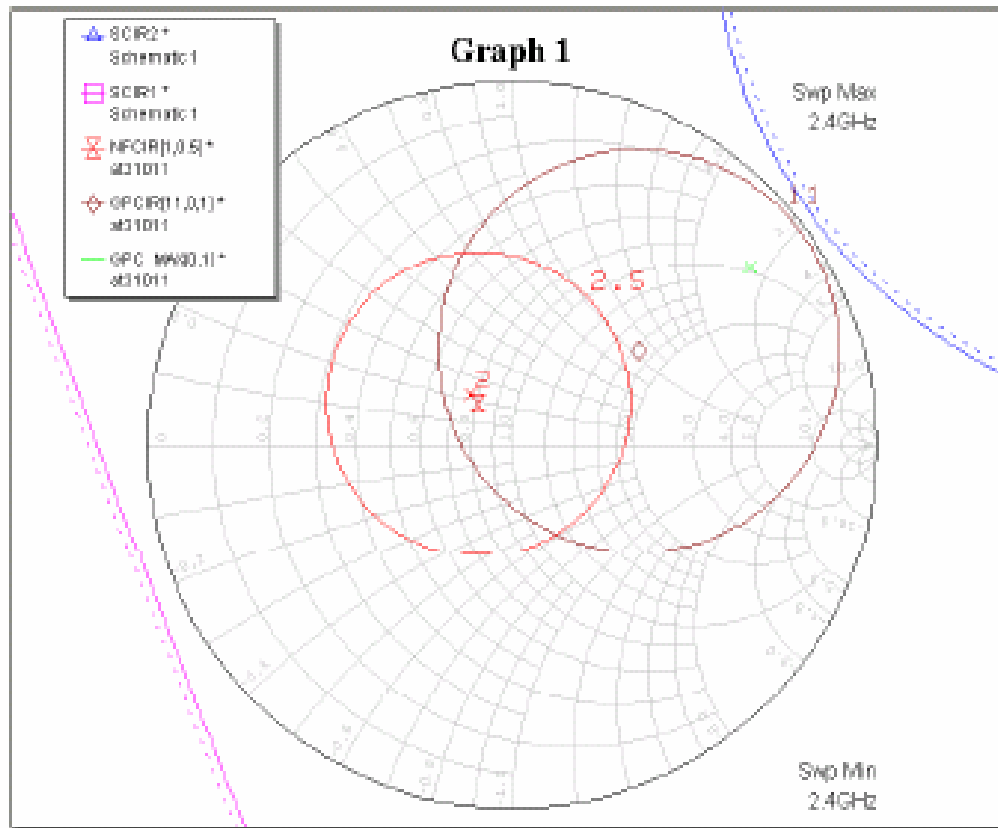
Introducción

Condiciones que debe satisfacer un transistor



Introducción

Diseño de amplificadores en sistemas receptores.





Introducción

Amplificadores en transmisores

La diferencia principal en el diseño es que los amplificadores de potencia es que emplean otras técnicas para obtener sus propias impedancias de los puertos de entrada y salida del transistor. Algunas de las técnicas usadas en el diseño del amplificador de potencia son la red convencional load-pull, activa load-pull y la caracterización de la señal de la red de dos puertos.

Técnicas de señal grande para una red de dos puertos.

La caracterización de señales grandes para una red de dos puertos es hecha básicamente con las mediciones de los parámetros S respecto a una impedancia de referencia de 50 Ohms. Hay dos métodos:

El de extensión directa de las mediciones de pequeña señal y

El de aproximaciones de quasi señales grandes donde los parámetros S para gran señal son medidos para aplicaciones simultáneas de dos señales coherentes a la misma frecuencia para la entrada y salida de el dispositivo.

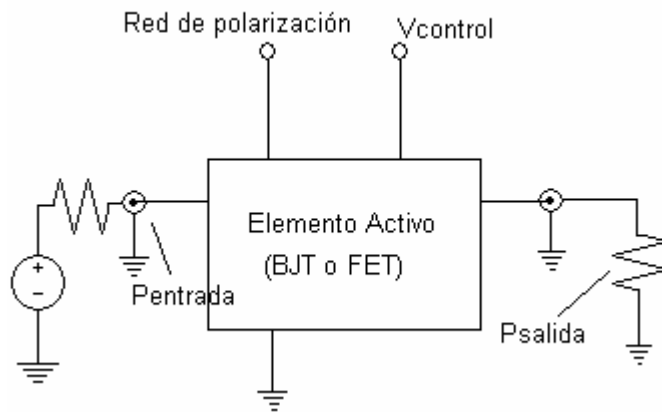


Técnicas de ajuste de ganancia

1. **Variación de la ganancia empleando un FET de GaAs de doble compuerta**
2. **Variación de ganancia usando retroalimentación activa**
3. **Variación de la ganancia empleando HEMT-p-i-n-HBT**
4. **Variación de la ganancia empleando un circuito atenuador lineal.**
5. **Variación de la ganancia empleando un amplificador cascode de SiGe MMIC**
6. **Variación de la ganancia empleando la celda de Gilbert**

Técnicas de ajuste de ganancia

Cuando la ganancia varía en función de un voltaje de control se puede escribir como



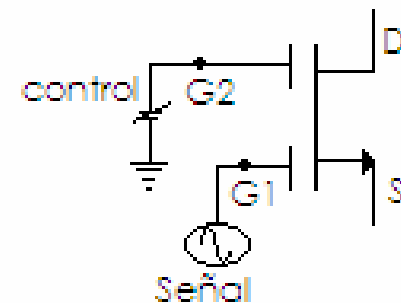
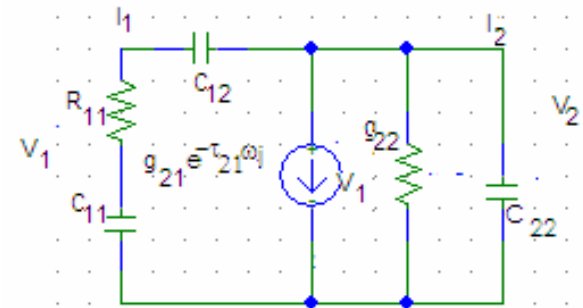
$$G_P = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} = f(V_{\text{control}})$$

La relación entre la ganancia máxima y la mínima expresada en decibeles, se denomina **Variación de ganancia total** o **intervalo de control de ganancia**

Técnicas de ajuste de ganancia

Variación de la ganancia empleando un FET de GaAs de doble compuerta

- La característica del control de ganancia en el FET de GaAs de doble compuerta es debido al hecho de que la transconductancia puede variarse ajustando el voltaje de la compuerta, tanto en la primera como en la segunda. Las compuertas G1 y G2 proporcionan el voltaje necesario para la activación del FET, por lo que cuando una señal alterna se induce a través de la compuerta G1 propiciará una corriente alterna de amplitud fija en el drenaje, y a la vez el voltaje de G2 (voltaje de control) modula el canal, de manera que la corriente alterna en el drenaje se ajusta, produciendo un efecto de ganancia variable en el FET según el voltaje de control aplicado, básicamente por efecto del cambio de transconductancia.

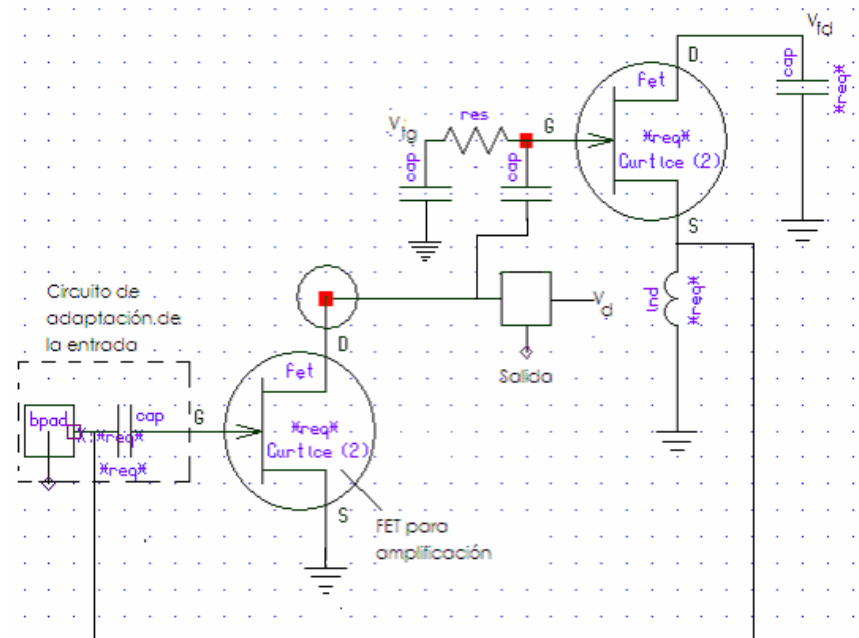


Técnicas de ajuste de ganancia

Variación de ganancia usando retroalimentación activa

El circuito amplificador de ganancia variable consiste en una configuración de fuente común que realiza la función de amplificación propiamente dicha, además de una configuración en drenaje común que establece la trayectoria de retroalimentación para la señal de corriente alterna, lo cual se logra a través de los capacitores de acoplamiento. Existen tres puntos clave para este efecto:

- 1.- La ganancia del amplificador, representada en el valor de A_v , es maximizada, cuando la polarización del CDF se coloca en estrangulamiento, .
- 2.- La impedancia de entrada del VGA es minimizada cuando tiene el valor más alto. La impedancia de entrada decrece con la ganancia.
- 3.- La variación de la ganancia cerca de la condición de ganancia mínima puede ser suprimida sobre un amplio rango de temperatura debido a la disminución de del nivel de la señal de retroalimentación en contraste con el decremento de la transconductancia del FET de amplificación.

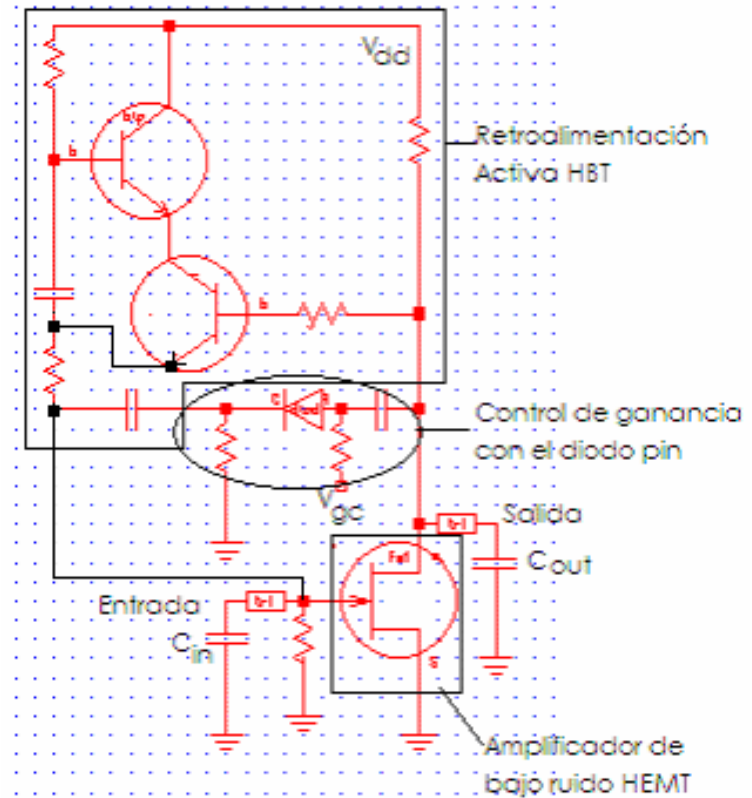


Técnicas de ajuste de ganancia

Variación de la ganancia empleando HEMT-p-i-n-HBT

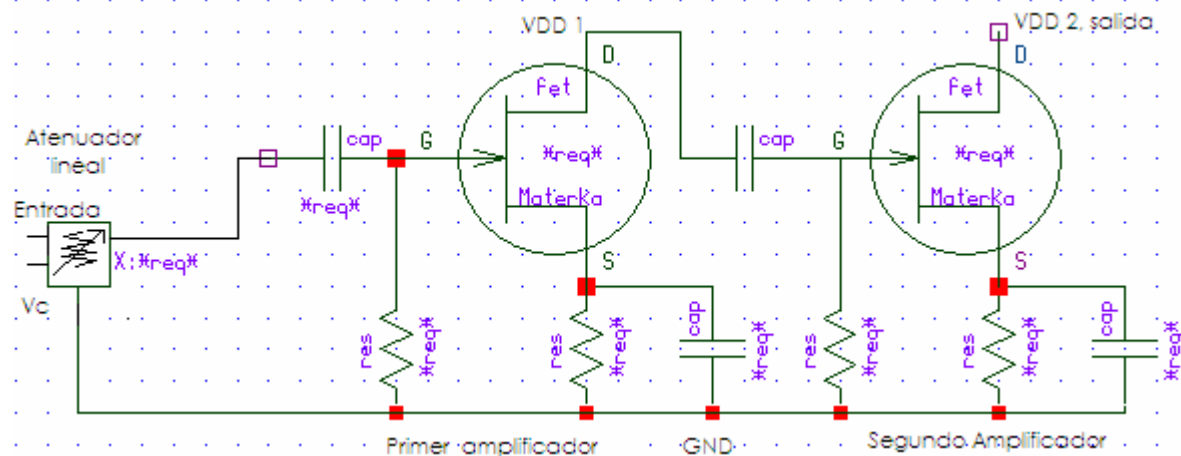
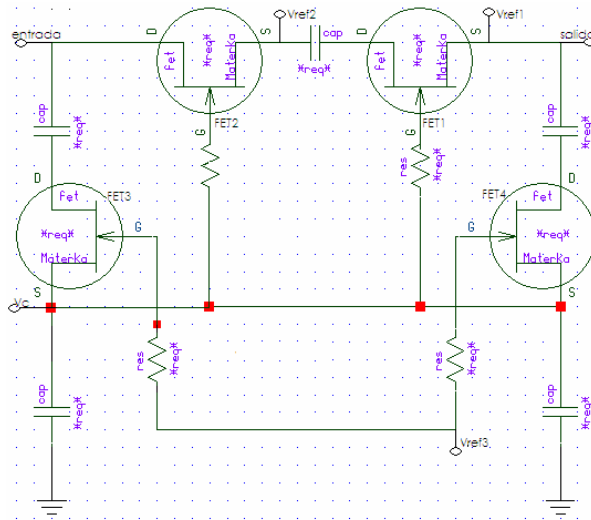
El control electrónico de ganancia variable se obtiene por medio de:

- El diodo p-i-n conectado en realimentación paralelo, que a través del voltaje V_{gc} modifica la resistencia dinámica del mismo diodo afectando el paso de la corriente a la entrada y
- Un emulador de bobina (neutralizador del efecto capacitivo) implementado con transistores HBT cuya impedancia, al estar conectada en paralelo con el diodo p-i-n y la capacitancia de las terminales de drenaje-compuerta del amplificador, actúa como un circuito resonante en paralelo lo que permite tener un efecto resistivo dentro del ancho de banda dominado por la resistencia dinámica del diodo p-i-n.



Técnicas de ajuste de ganancia

Variación de la ganancia empleando un circuito atenuador lineal.

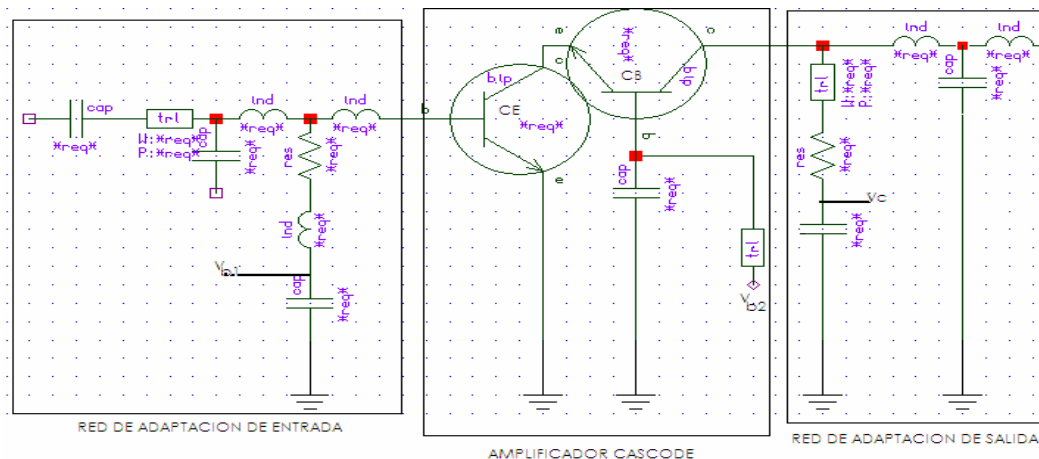


Técnicas de ajuste de ganancia

Variación de la ganancia empleando un amplificador cascode de SiGe MMIC

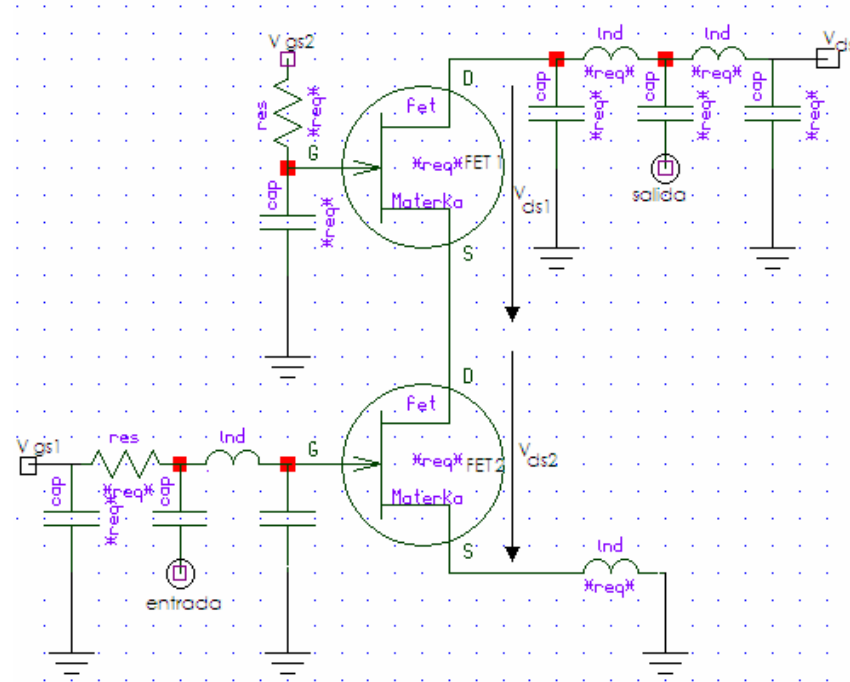
Tiene la propiedad de ser un dispositivo unilateral debido a que el parámetro y_{12} es aproximadamente igual a cero, por lo que la ganancia de potencia se determina por la ecuación

El control de la ganancia se realiza ajustando la corriente de la base de la sección del transistor de base común. Para que el amplificador tenga un valor de VSWR adecuado, es importante adaptar el dispositivo compuesto para que permanezca invariante a los cambios requeridos en la corriente de base para un conjunto de atenuaciones.



Técnicas de ajuste de ganancia

- Las propuestas actuales, manejan modificaciones de circuitos Cascode como elementos de control de ganancia. Como se muestra en la figura.





Técnicas de ajuste de ganancia

Tabla de características de las diversas técnicas para diseñar VGAs

Técnica empleada	Ventaja	Aplicaciones
FET de doble compuerta	Proporciona un bajo ruido	Sistemas receptores que operen a 6GHz.
Retroalimentación Activa	Es fácil obtener los parámetros de admitancia	En sistemas que operen a 20GHz.
Diodos p-i-n	Permite variar la ganancia como un circuito resonante.	Aplicaciones de 1-10GHz en sistemas receptores.
Atenuador lineal Π	Proporciona alta linealidad en la respuesta	CDMA
Circuito cascode	Permite diseñar las redes de adaptación en forma independiente al circuito	Sistemas de Radar a 6GHz
Celda de Gilbert	Emplea el principio del voltaje diferencial	Para sistemas de transmisión, amplificadores de potencia.



Una Técnica de Variación de Ganancia en Redes de Adaptación

Líneas de investigación exploradas la inicio:

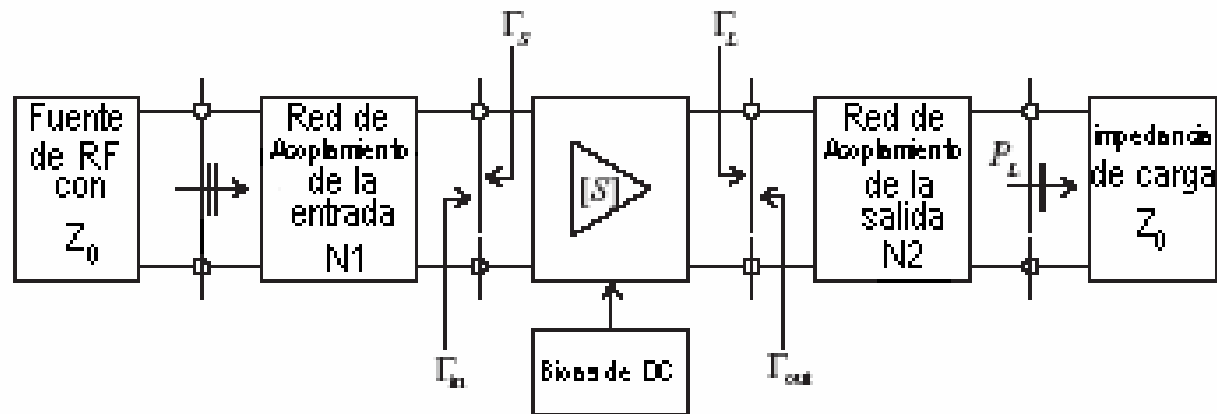
Redes Neuronales

Control de la ganancia con dispositivos externos como DSPs

Modificación de arquitecturas existentes

Influencia de las redes de adaptación en ganancia

Una Técnica de Variación de Ganancia en Redes de Adaptación



$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L}$$

$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S}$$

Una Técnica de Variación de Ganancia en Redes de Adaptación

En el análisis de los problemas de ganancia del amplificador de microondas, uno de los casos ampliamente considerados es el de la transferencia de potencia entre el generador con una impedancia de Thevenin a la carga con una impedancia y no necesariamente deben de ser iguales a la impedancia de referencia por lo que los coeficientes de reflexión son generalmente diferentes de cero. Por lo tanto, la figura de mérito, que también es conocida como el factor de adaptación se define de la siguiente manera

$$M(\Gamma_A, \Gamma_B) = \frac{(1 - |\Gamma_A|^2)(1 - |\Gamma_B|^2)}{|1 - \Gamma_A \Gamma_B|^2}$$

Cuando excede de 1, se tiene

$$G_T(\Gamma_S, \Gamma_L) = G_{disp}(\Gamma_S)M(\Gamma_{out}, \Gamma_L) = G_{pot}(\Gamma_L)M(\Gamma_S, \Gamma_{in})$$

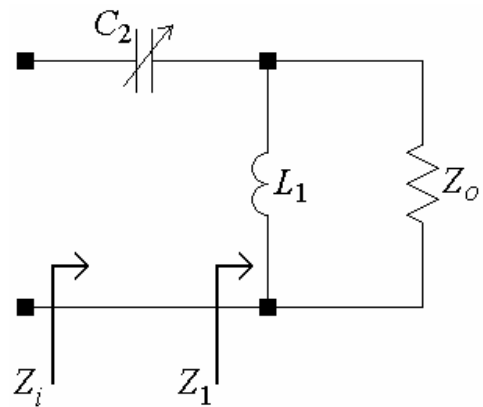
$$|\Gamma_{in}| = \sqrt{1 - \frac{(1 - |\Gamma_{out}|^2)(1 - |\Gamma_{in}|^2)}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{in}|^2}}$$

$$|\Gamma_{out}| = \sqrt{1 - \frac{(1 - |\Gamma_{out}|^2)(1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - \Gamma_{out} \Gamma_L|^2}}$$

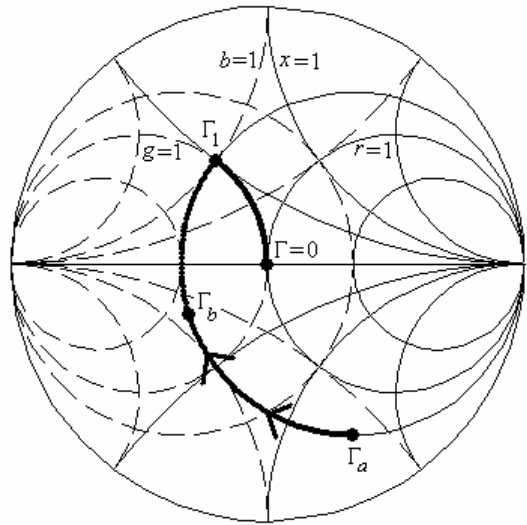
Una Técnica de Variación de Ganancia en Redes de Adaptación

Variando el elemento capacitivo de una red de adaptación

$$C_a \leq C_2 \leq C_b$$



$$\Gamma_i = \frac{z_i - 1}{z_i + 1} \quad \Gamma_1 = \frac{z_1 - 1}{z_1 + 1}$$



$$Z_1 = \frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{j\omega L_1}} = \left(\frac{\omega^2 L_1^2 Z_0}{Z_0^2 + (\omega L_1)^2} \right) + j \left(\frac{\omega L_1 Z_0^2}{Z_0^2 + (\omega L_1)^2} \right)$$

Una Técnica de Variación de Ganancia en Redes de Adaptación

$$z_1 = r_1 + jx_1 = \frac{Z_1}{Z_0} = \left(\frac{(\omega L_1/Z_0)^2}{1 + (\omega L_1/Z_0)^2} \right) + j \left(\frac{(\omega L_1/Z_0)}{1 + (\omega L_1/Z_0)^2} \right)$$

$$r_1 = \frac{(\omega L_1/Z_0)^2}{1 + (\omega L_1/Z_0)^2}$$

$$x_1 = \frac{(\omega L_1/Z_0)}{1 + (\omega L_1/Z_0)^2}$$

$$x_1 = \sqrt{r_1(1 - r_1)}$$

$$z_1 = r_1 + j\sqrt{r_1(1 - r_1)}$$



Una Técnica de Variación de Ganancia en Redes de Adaptación

Variación de la ganancia

- 1) Con el fin de que la variación del capacitor C_2 , de C_a a C_b , produzca un cambio de ganancia siempre creciente o decreciente, se debe satisfacer:

$$\Gamma_i = \Gamma_b = S_{ii}^* \quad \Gamma_i = \Gamma_a = S_{ii}^*$$

- 2) Dado que muchos mecanismos de variación de capacitancia no permiten grandes proporciones entre el valor máximo y el mínimo (por ejemplo, en uniones de diodo inversamente polarizado se maneja entre 5 y 10), aquí se incorpora un factor definido por:

$$n = C_b / C_a$$

para que $C_b > 0$, se requiere $\sqrt{r_1(1-r_1)} > x_b$

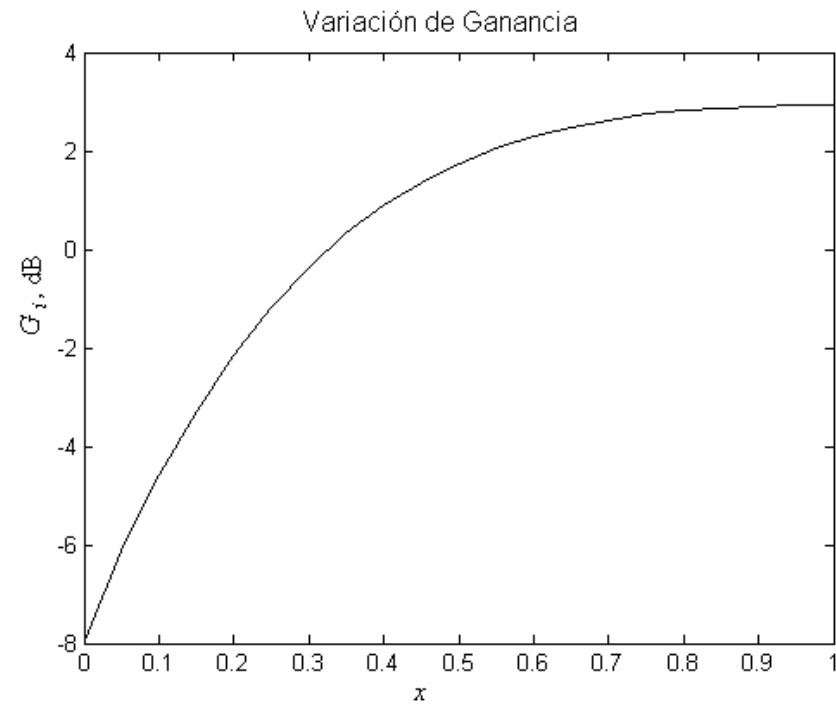
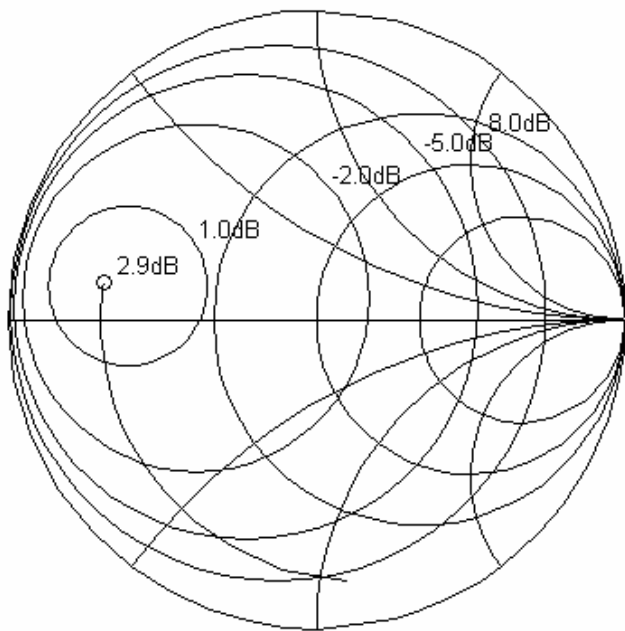


Una Técnica de Variación de Ganancia en Redes de Adaptación

Calcular un circuito como el de la figura 2a) si va a operar en un sistema de 50Ω a una frecuencia de 1GHz, y se sabe que $S_{ii} = 0.8\angle -120^\circ$ y la relación de la capacitancia máxima a la mínima es de 5

Aplicando el algoritmo se obtienen los siguientes resultados: El monopuerto es estable, $r_1 = 0.1778$ y $x_a = 0.0847$ y sí existe solución, $C_b = 10.697$ pF, $C_a = 2.1393$ pF y $L_1 = 3.7003$ nH. La trayectoria que sigue como función del parámetro Γ_i se muestra en la figura siguiente x

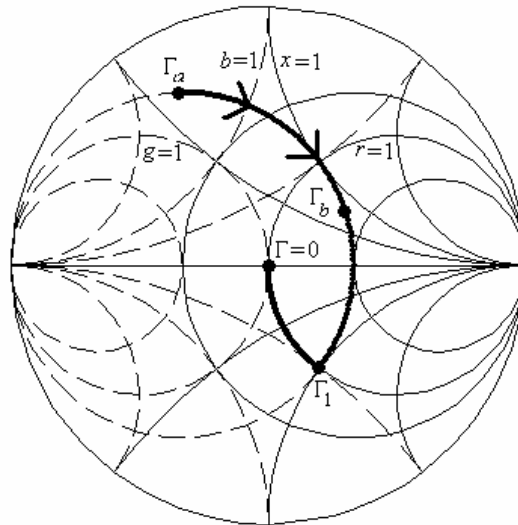
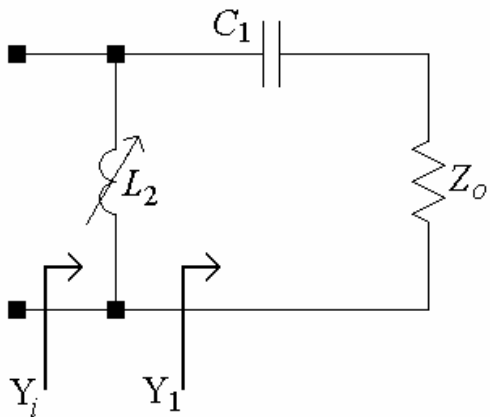
Una Técnica de Variación de Ganancia en Redes de Adaptación



Una Técnica de Variación de Ganancia en Redes de Adaptación

Variando el elemento inductivo en una red de adaptación

$$Y_1 = \frac{1}{Z_0 + \frac{1}{j\omega C_1}} = \left[\frac{Z_0(\omega C_1)^2}{1 + (\omega Z_0 C_1)^2} \right] + j \left[\frac{\omega C_1}{1 + (\omega Z_0 C_1)^2} \right]$$

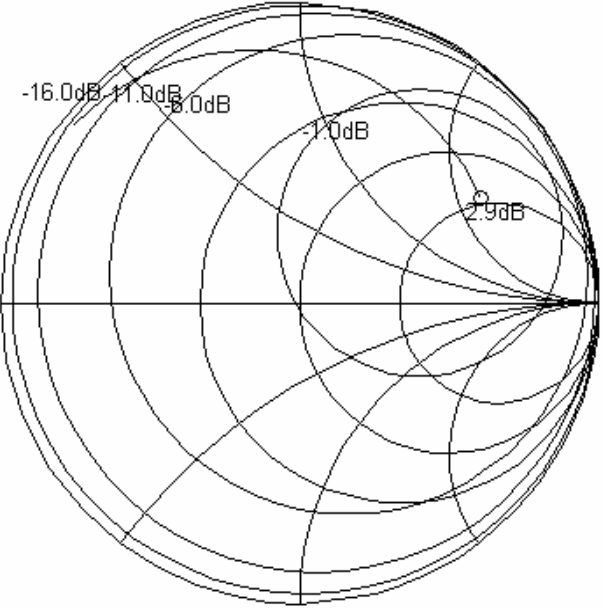


$$\Gamma_i = \frac{1 - y_i}{1 + y_i} = \frac{1 - (g_i + jb_i)}{1 + (g_i + jb_i)} = -\frac{(g_i - 1) + jb_i}{(g_i + 1) + jb_i}$$

Una Técnica de Variación de Ganancia en Redes de Adaptación

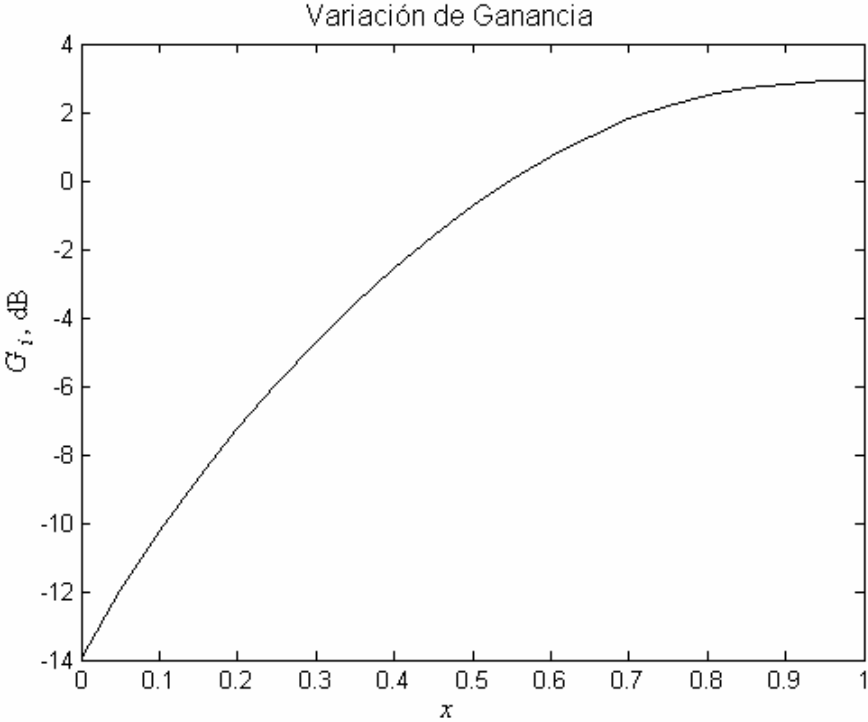
Calcular un circuito que opera en un sistema de 50Ω a una frecuencia de 1GHz, y se sabe que S_{ii} y la relación de la inductancia máxima a la mínima es de 5

$$S_{ii} = 0.7 \angle -30^\circ$$



$$g_1 = 0.1887 \quad b_b = -0.2590 \quad L_a = 2.447\text{nH}$$

$$L_b = 12.237\text{ nH} \quad C_1 = 1.5352\text{ pF}$$





Diseño y Simulación de Amplificadores de Ganancia Variable

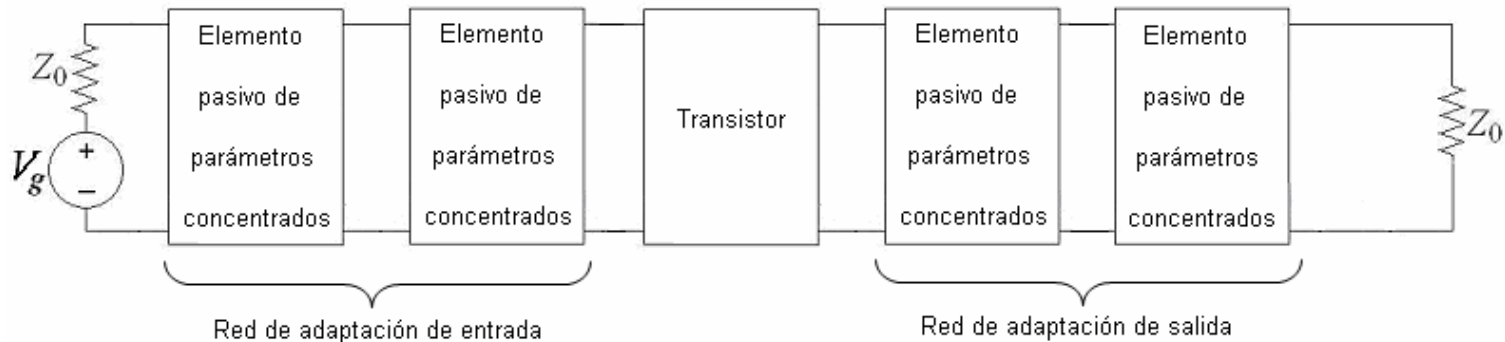
Requerimientos

1. Variación de ganancia mínimo
2. La relación de ondas estacionarias de voltaje en la entrada,
3. ancho de banda,
4. la cifra de ruido,
5. la potencia máxima de salida, entre otros

consideraciones para establecer un procedimiento de diseño:

1. El diseño del amplificador de ganancia variable se basa en el diseño de amplificadores de banda angosta con redes de adaptación con parámetros concentrados tipo L , usando transistores unilaterales (o bilaterales donde el error de la ganancia de transconductancia unilateral no sea excesiva).
2. Utilizar circuitos de adaptación de impedancia de ganancia variable en la entrada y salida, de manera que la ganancia del amplificador es variada a partir de estas aquellas.
3. Que el diseño de las redes de adaptación se base en los algoritmos presentado.
4. Utilizar datos de parámetros de dispersión de transistores reales.
5. El valor seleccionado para la relación en el cambio de capacitancia o inductancia n tenga valores realistas ($5 \leq n \leq 10$).
6. Determinar otros parámetros funcionales del amplificador.

Diseño y Simulación de Amplificadores de Ganancia Variable



El método de tableau, el manejo de matrices dispersas y la aplicación de algoritmos de cruces por cero de funciones son comunes en este tipo de simulación, y ofrecen técnicas robustas de solución de circuitos lineales y no lineales.

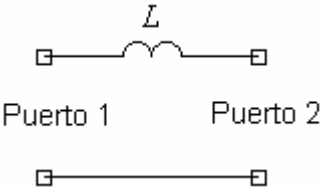
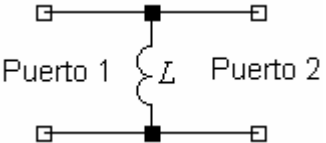
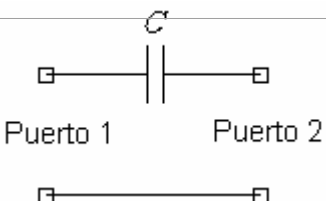
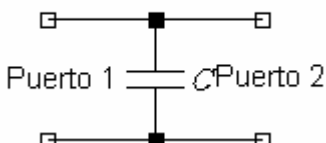
Redes multipuerto caracterizadas con parámetros de dispersión, con los cuales es posible simular circuitos de microondas

Obtener los parámetros ABCD de cada una de las redes.

Multiplicar las matrices ABCD de las redes en el orden en que aparecen en el circuito para encontrar la matriz ABCD del circuito equivalente.

Se encuentran los parámetros S, a partir de los ABCD del circuito equivalente

Diseño y Simulación de Amplificadores de Ganancia Variable

Componente	Red de dos puertos	Matriz ABCD
Inductor en serie		$\begin{bmatrix} 1 & j\omega L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Inductor en paralelo		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/j\omega L & 1 \end{bmatrix}$
Capacitor en serie		$\begin{bmatrix} 1 & 1/j\omega C \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Capacitor en paralelo		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C & 1 \end{bmatrix}$



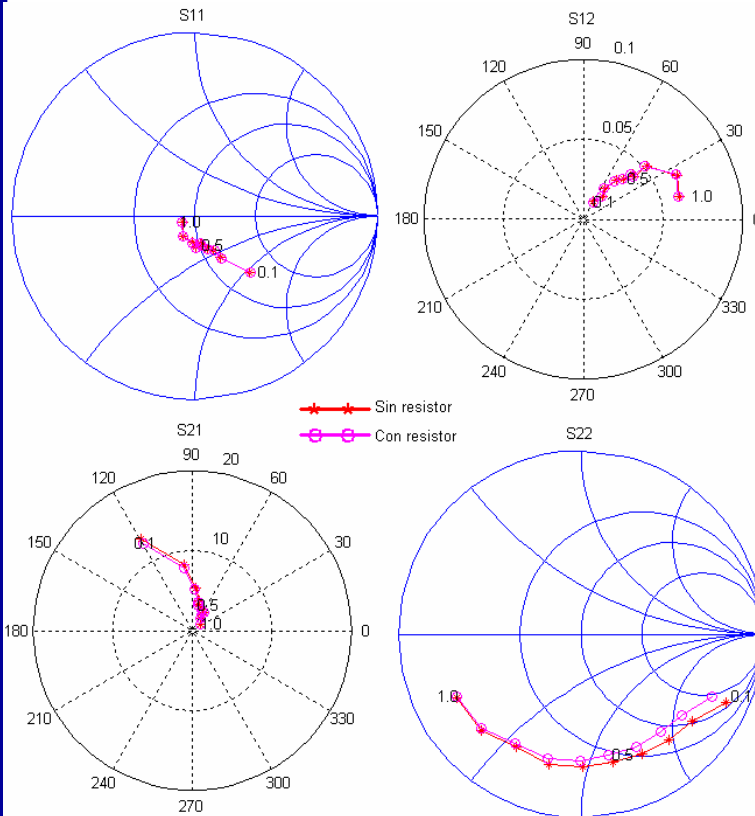
Diseño y Simulación de Amplificadores de Ganancia Variable

El programa *vga*

1. Permite mantener una base de datos de transistores y sus parámetros de dispersión.
2. Permite la selección del transistor a utilizar a partir de un menú.
3. Permite utilizar la configuración cascode para el transistor elegido.
4. Permite agregar resistores en la entrada y en la salida del transistor o de la configuración cascode.
5. Calcula las redes de adaptación de ganancia variable en la entrada y la salida.
6. Determina y presenta las ganancias mínima y máxima.
7. Grafica la variación de ganancia como función de una variable de control.
8. Simula el circuito en una banda de frecuencia.
9. Grafica la ganancia de transducción y el coeficiente de reflexión de entrada como función de la frecuencia teniendo como parámetro una variable de control.

Estudio de casos

La frecuencia de diseño de 0.8 GHz; y, la relación de capacitancia o inductancia máxima a mínima de 8



Intervalo de frecuencia: 0.1 GHz a 6.0 GHz

Frecuencia de diseño (GHz): 0.8

Seleccionar transistor...

Transistor: 2N6304

Parámetros de dispersión a la frecuencia de diseño:

$S(1,1) = 0.146_{-94.0^\circ}$, $S(1,2) = 0.052_{40.0^\circ}$

$S(2,1) = 1.850_{55.0^\circ}$, $S(2,2) = 0.713_{-120.0^\circ}$

Transistor bilateral

Transistor inherentemente estable en la frecuencia de diseño

Error máximo para GT es 0.2dB

Transistor potencialmente inestable en alguna frecuencia dentro del intervalo

Resistencia en paralelo en la salida

Dar valor de resistor (ohms): 1000

Parámetros de dispersión a la frecuencia de diseño:

$S(1,1) = 0.148_{-93.8^\circ}$, $S(1,2) = 0.051_{40.9^\circ}$

$S(2,1) = 1.820_{55.9^\circ}$, $S(2,2) = 0.697_{-120.9^\circ}$

Transistor bilateral

Transistor inherentemente estable en la frecuencia de diseño

Error máximo para GT es 0.2dB

Transistor inherentemente estable en toda la banda de frecuencia

Iniciando diseño...

Dar relación de variación de capacitancia/inductancia máxima a la mínima: 8

Resultados del diseño:

Entrada inductor variable: $C = 25.3 \text{ pF}$, $L_a = 2.8 \text{ nH}$, $L_b = 22.2 \text{ nH}$

Ganancia mínima = -5.5 dB, Ganancia máxima = 0.1 dB

Salida inductor variable: $C = 5.6 \text{ pF}$, $L_a = 0.6 \text{ nH}$, $L_b = 4.9 \text{ nH}$

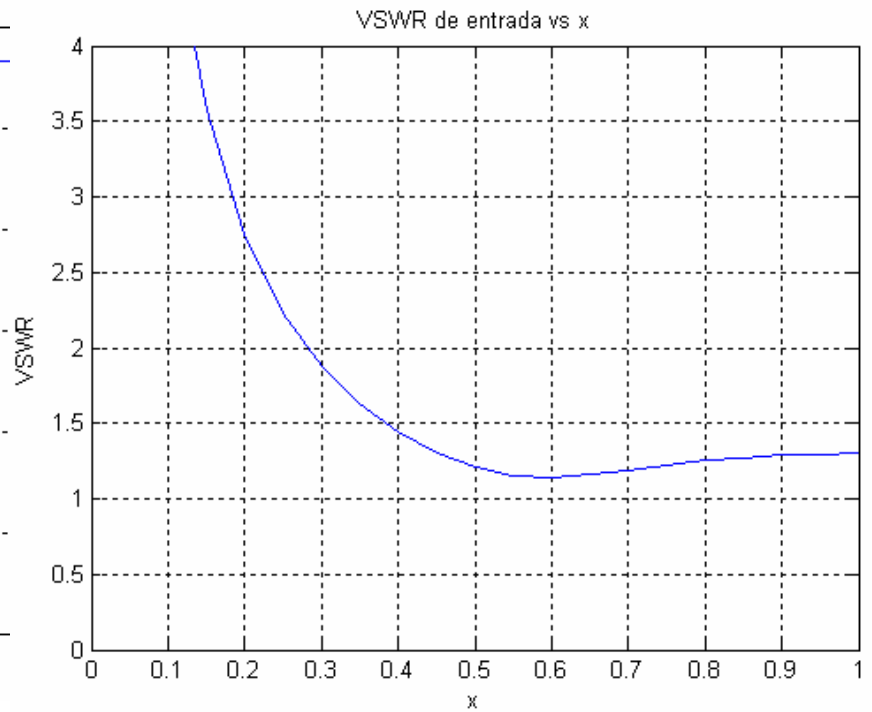
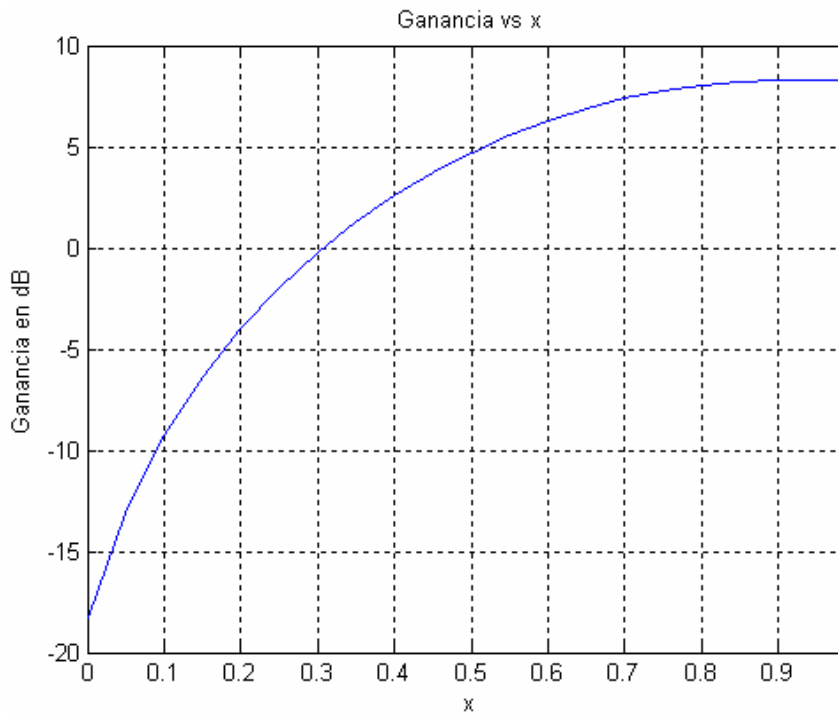
Iniciando simulación...

Variación de ganancia y VSWR de entrada respecto a x...

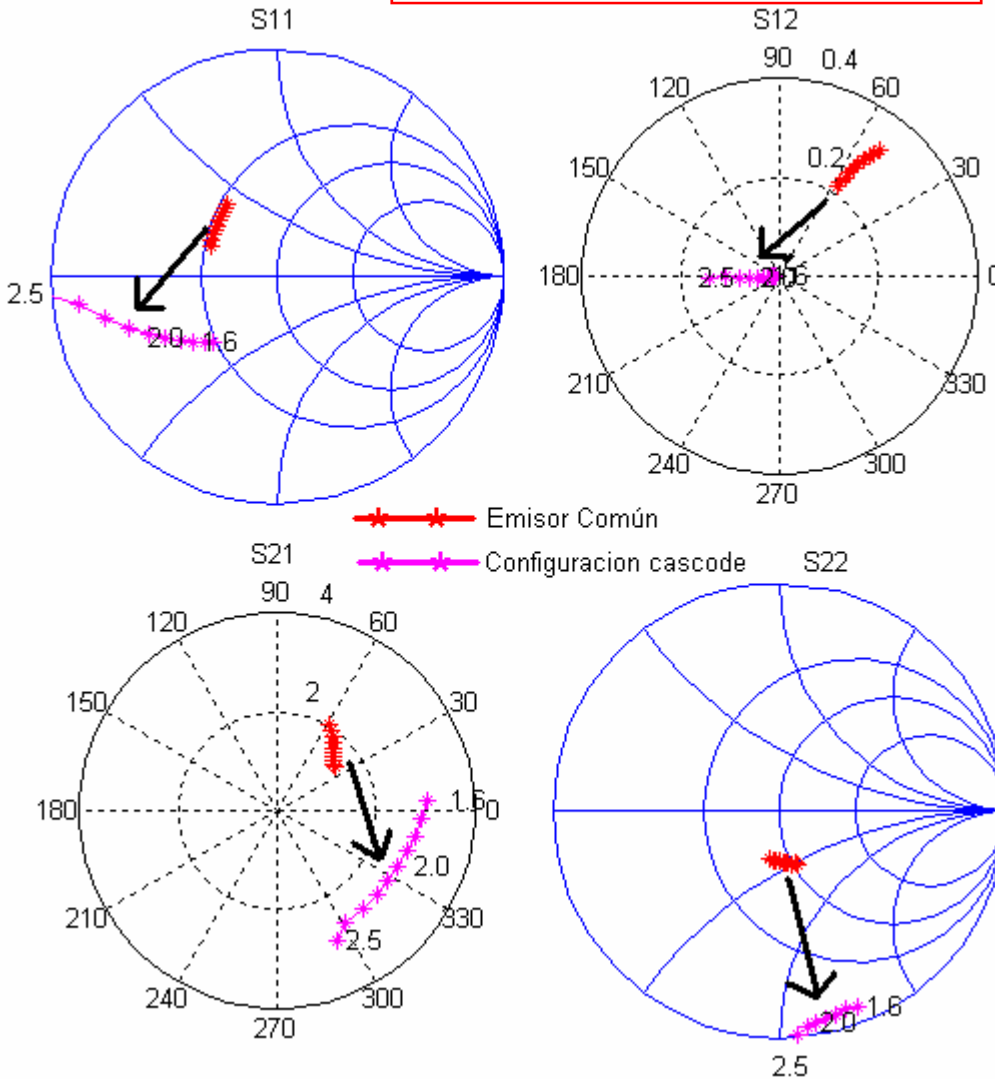
Respuesta de frecuencia...

Fin de la simulación...

Estudio de casos



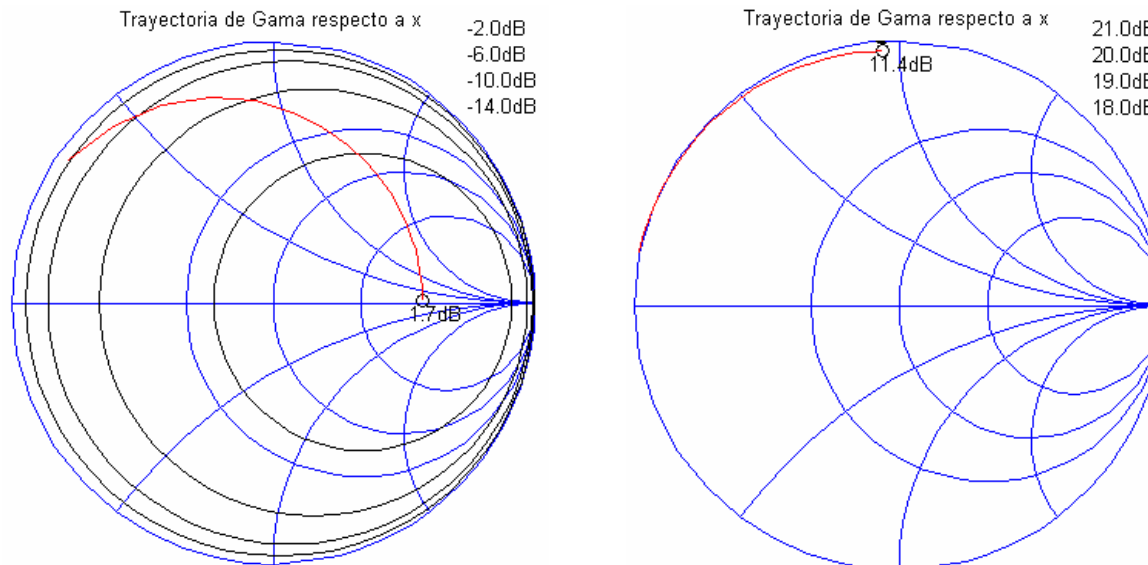
Estudio de casos



Se indica mediante una flecha el efecto que tiene el uso de la configuración cascode sobre cada parámetro en toda la banda de frecuencia. En general, se puede decir que, aparte del los efectos en el ángulo, la magnitud de los parámetros S_{11} , S_{22} y S_{21} aumentan (éste último de forma moderada), Mientras que la magnitud del parámetro S_{12} disminuye (más unilateral).

Estudio de casos

La variación de ganancia más alta que se obtuvo es de 55 dB que corresponde a un diseño a 2.4 GHz en el cual se incorporó un resistor de estabilización serie en la salida de 180Ω. También este caso proporciona la variación de ganancia más grande (16.5 dB) cuando se mantiene el VSWR limitado a 2



La variación de ganancia está muy relacionado con la ubicación de los puntos S_{11}^* y S_{22}^* que corresponden a los coeficientes de fuente y carga para máxima ganancia de las redes de adaptación de entrada y salida, en un amplificador unilateral



Conclusiones

Con el propósito de determinar el dominio colectivo sobre el tema, se presentó el análisis de una serie de principios que han sido utilizados anteriormente para el diseño de amplificadores de ganancia variable. Se descubrió que **la mayoría de estas técnicas se basa en la modificación del punto de trabajo de algún transistor o diodo que se encuentra como elemento principal de amplificación, en alguna red de realimentación o también en redes atenuadoras variables.** Se identificaron los parámetros más significativos de estos circuitos y se realizó un análisis comparativo de los mismos, observando un incremento en la frecuencia de operación, un aumento en el intervalo de control de ganancia y el uso nuevas tecnologías de implantación, tal como los circuitos integrados de microondas monolíticos

Se descubrió que los circuitos que más intervalo de control de ganancia tienen son aquellos en donde los transistores tienen coeficientes de reflexión con magnitud relativamente grande y que permiten un mayor desplazamiento en su representación sobre la carta de Smith. Se obtuvieron casos en donde el intervalo de control de ganancia es superior a los 50 dB con un solo transistor, lo cual demuestra la potencialidad del uso de este circuito en casos donde se requiere grandes variaciones de ganancia



Trabajos futuros

- *Determinación de los límites teóricos para amplificadores de ganancia variable basado en redes de adaptación ajustables.*
- *Tecnologías de implantación*
- *Circuitos de cancelación de VSWR de entrada y salida*
- *Ampliación de la teoría para abarcar más de una etapa de amplificación, o el uso de diversas arquitecturas de amplificación*
- *Aplicaciones en redes formadoras de haz para arreglos de antenas*