

# Capítulo-5: Dispositivos y Circuitos Activos de Microondas

---

De la amplia variedad de dispositivos activos de microondas, vamos a enfatizar los dos más comunes: el diodo de estado sólido y el transistor de efecto campo. Vamos a revisar sus características operacionales, explicando más tarde la importancia de la puesta a tierra en este tipo de circuitos.

## 1 Introducción

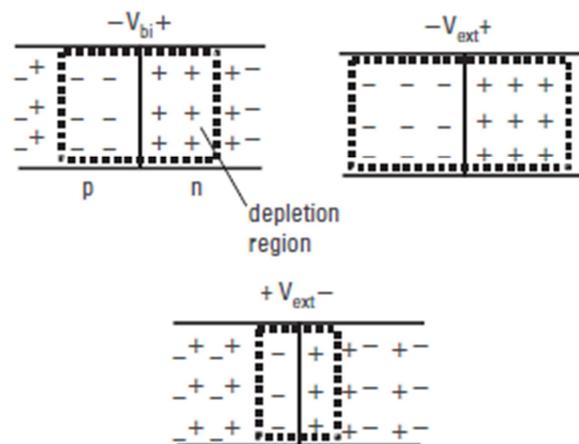
Las fuentes de señal de los circuitos pasivos vistos hasta el momento, no son más que circuitos activos de microondas. Un dispositivo activo de microondas se encuentra normalmente embebido en un circuito pasivo adaptado, para optimizar su realización y proporcionar el camino de tierra requerido por el dispositivo. La combinación de un dispositivo activo de microondas junto a su circuito pasivo se llama circuito activo de microondas. Para alcanzar el comportamiento deseado en estos circuitos necesitamos tener un camino de tierra de baja impedancia. Los dos dispositivos más populares son el diodo de estado sólido, dispositivo de dos puertas, y el transistor de efecto campo (FET), dispositivo de tres puertas.

## 2 Diodos de Microondas

Un diodo es un dispositivo no lineal que conduce la corriente con baja impedancia cuando un potencial positivo es aplicado a través de sus terminales. Cuando aplicamos un potencial negativo, el diodo se comporta como un condensador de capacidad variable. Algunas aplicaciones para los diodos son: limitadores, conmutadores, detectores, elementos de sintonización reactivos, multiplicadores de frecuencia, y mezcladores.

### 2.1 Modo de Operación del Diodo

Fundamentalmente todos los diodos operan como una unión *pn* como la que podemos observar en la siguiente figura:



**Ilustración 1: Unión PN en Diferentes Estados**

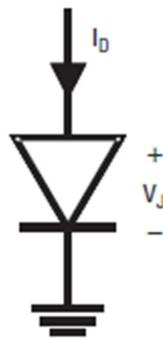
Como vimos en el capítulo 2, el balance entre las fuerzas de difusión y las electrostáticas establecen un potencial negativo a través de la unión que debe ser vencido para que una corriente pueda fluir. Este potencial se establece en un área entre ambas caras de la unión que llamamos región de depleción, en la que no existen cargas libres. La capacitancia de la región de depleción bloquea el flujo de corriente a través de la unión.

Si sometemos al diodo a un potencial externo negativo, reforzamos el potencial creado

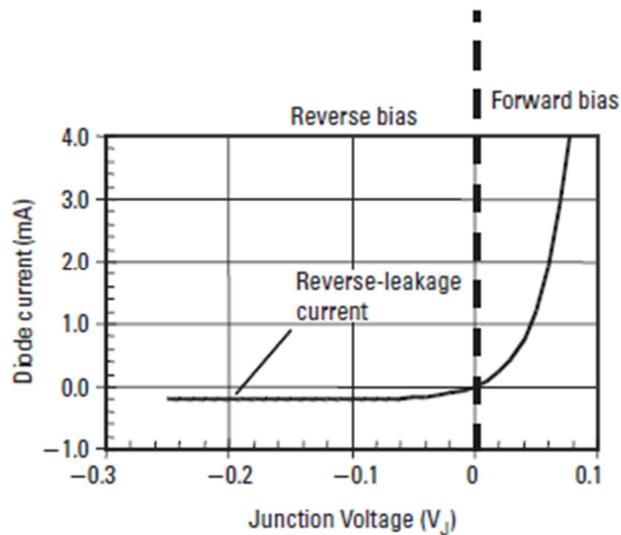
en la unión, haciendo por ello más ancha la región de deplexión, aumentando la capacitancia de la unión.

Solo una pequeña cantidad de corriente, la corriente inversa, recorrerá la unión en este estado. La capacitancia de la unión crecerá conforme aumentemos el potencial negativo hasta que llegemos a la tensión de ruptura inversa. A esta tensión, la corriente fluirá en avalancha.

Si aplicamos un potencial positivo al diodo, reduciremos la región de deplexión y la capacitancia de la unión. Una vez que el potencial aplicado supera la tensión umbral (menos de un voltio para diodos de microondas), la corriente fluirá a través del diodo aumentando exponencialmente con la tensión aplicada entre sus terminales.



**Ilustración 2: Diodo de Microondas**



**Ilustración 3: Característica Estática**

La ecuación ideal de un diodo relaciona la corriente con la tensión de la siguiente manera:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{V_j}{V_T}} - 1 \right)$$

Donde  $I$  es la corriente del diodo en inversa, y  $V_j$  es la tensión de la unión. La intensidad de la unión se puede desarrollar siguiendo una ley cuadrática, expandiendo la anterior expresión en una serie de potencias, quedando de la siguiente manera:

Si  $V_j$  es una señal de microondas con una dependencia sinusoidal de la forma  $V_j = V_m \cos(\omega t)$ , la anterior expresión produce que la corriente del diodo tenga componentes con frecuencias en armónicos de la frecuencia fundamental,  $\omega, 2\omega, 3\omega, \dots$ :

$$I = I_0 \left( e^{\frac{V_m \cos(\omega t)}{V_T}} - 1 \right)$$

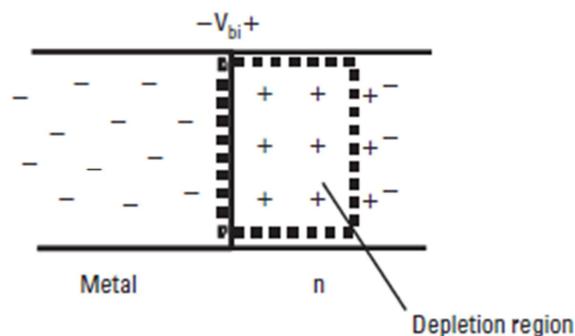
Donde hemos asumido por simplicidad que los coeficientes de los términos mayores de tercer orden son cero. Los armónicos de segundo y tercer orden son la base de la multiplicación de frecuencia. La presencia del término de continua significa que el

diodo puede ser usado para convertir un voltaje de RF a una corriente de DC (la esencia de la detección).

Podemos demostrar la habilidad del diodo como mezclador en frecuencia si combinamos la señal de un oscilador local y la señal de frecuencia intermedia (IF):

. Si sustituimos esta expresión en la expansión en serie de potencias vista anteriormente de la corriente de un diodo, tendremos la base de la mezcla.

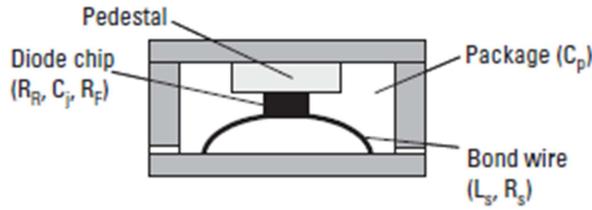
El diodo de unión *pn* tiene una relativa alta capacitancia, por lo que responderá con lentitud a las señales de microondas. Por ello, a veces se usa el diodo Schottky. A diferencia de la unión *pn*, la unión del diodo Schottky solo se compone de un semiconductor de tipo *n* junto a un metal.



**Ilustración 4: Unión Diodo Schottky**

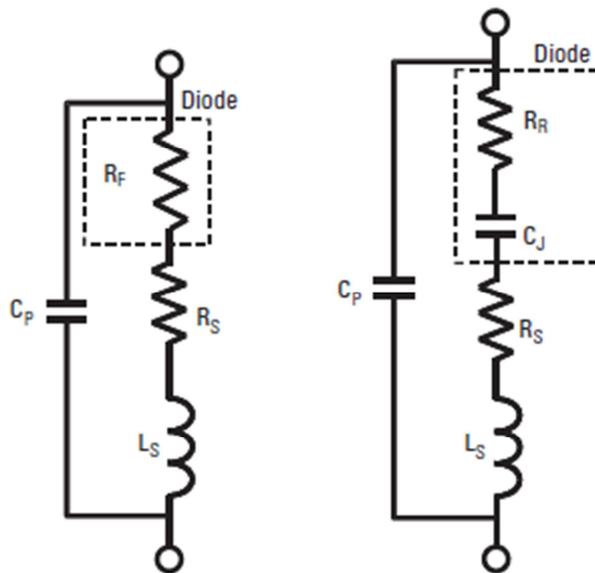
Ya que la concentración de electrones libres en un metal es órdenes de magnitud superior a la del semiconductor, la región de depleción se extiende casi por completo en el semiconductor. La capacidad de la unión es baja, y con solo los electrones como portadores de carga, el diodo Schottky es capaz de operar a más alta frecuencia que una unión *pn*.

La región activa de un diodo (material conductor y semiconductor) es extremadamente pequeña y frágil. Por ello, éstos son encapsulados para su uso en circuitos de microondas.



**Ilustración 5: Empaquetado del Diodo**

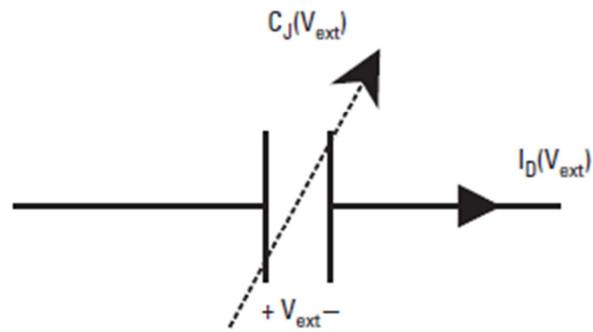
El cátodo está vinculado a un pedestal, además de usar una cinta de oro para pegar el ánodo al otro extremo de la chapa de la carcasa. El encapsulado puede ser representado en términos de circuitos de parámetros concentrados. Los elementos del circuito equivalente son:  $C_P$ , capacidad de la carcasa,  $L_S$ , inductancia de la cinta de oro, junto a su resistencia,  $R_S$ . A continuación se muestra el equivalente circuital del diodo en inversa y en directa:



**Ilustración 6: Equivalente Circuital del Diodo. Izquierda en Directa; Derecha en Inversa**

## 2.2 Varactores

Un varactor es un diodo en inversa usado como condensador de capacidad variable. Se representa como podemos ver en la siguiente figura:



**Ilustración 7: Varactor**

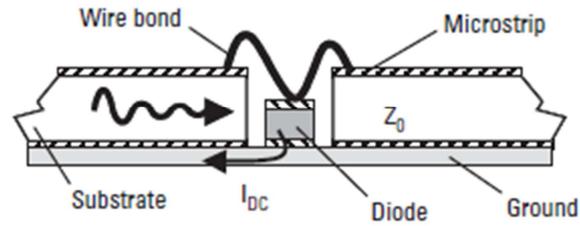
Los varactores se usan para sintonizar otros dispositivos, como los osciladores. La capacidad del varactor puede ser ajustada mediante el potencial negativo. A una cierta frecuencia particular, , la reactancia del diodo es igual a menos la reactancia del resto del circuito embebido, incluyendo el varactor: .

Si se da esta condición, el dispositivo oscilará. El oscilador estará controlado por tensión si podemos variar la frecuencia de oscilación cambiando la tensión negativa del varactor.

La puesta a tierra de los varactores es muy importante, ya que si existe alguna inductancia entre el varactor y tierra, ésta cambiará su reactancia a lo largo del rango de frecuencias del oscilador.

### 2.3 Limitadores y Conmutadores Basados en Diodos

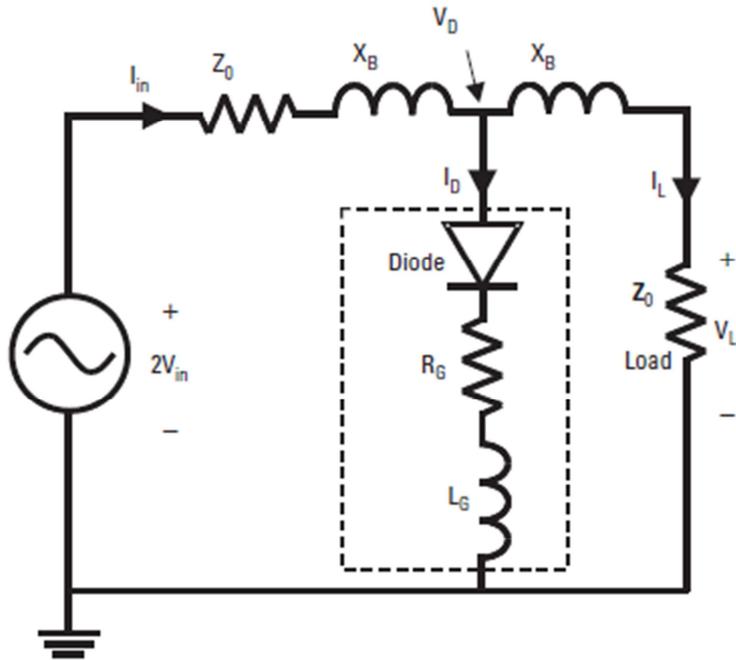
A diferencia de un varactor, un conmutador de microondas usa los dos estados del diodo, inversa y directa. Una configuración común es la que se puede apreciar en la siguiente figura:



**Ilustración 8: Conmutador**

Cuando el diodo está en inversa actúa como un circuito abierto, y la línea de transmisión propagará la energía con bajas pérdidas. Pero si el diodo está en directa, actuará como un cortocircuito reflejando las ondas incidentes en la línea. Si el diodo no está actuado mediante tensiones externas, se comportará como un limitador de potencia.

Las pérdidas de inserción y el aislamiento son idealmente cero e infinito, pero en realidad estarán limitadas por las características del diodo, incluyendo la capacidad del diodo en inversa, la resistencia del diodo en directa, y los elementos parásitos de la carcasa. Se crean una inductancia y resistencia adicional ( , ) en el montaje del diodo en el circuito. Todas estas inductancias y resistencias contribuyen a la impedancia del camino de tierra, degradando la operación del diodo como conmutador. Vamos a analizar a continuación el equivalente circuital del diodo en la línea de transmisión anterior:



**Ilustración 9: Equivalente Circuital Línea + Interruptor**

Las pérdidas de inserción serán:

Donde  $\alpha$  . La corriente de entrada vendrá dada por:

$$I_{in} = \frac{2V_{in}}{Z_0 + Z_D + Z_L}$$

Donde  $Z_D$  es la impedancia del diodo más la impedancia de tierra,  $V_D$  . La tensión del diodo vendrá dada por:

$$V_D = \frac{2V_{in} Z_L}{Z_0 + Z_D + Z_L}$$

Resolviendo la anterior ecuación para la tensión del diodo, obtenemos:

---

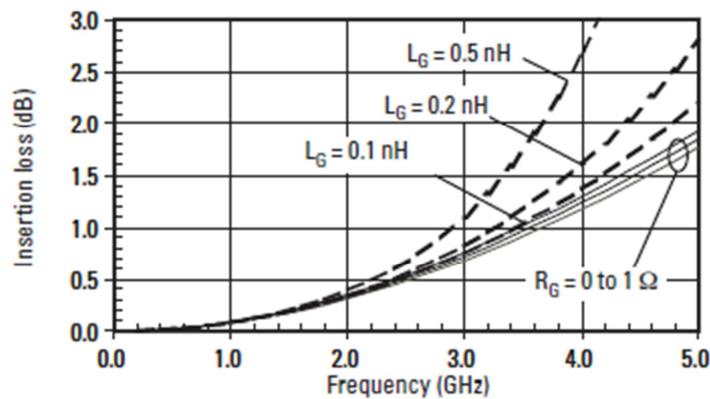
Vamos a obtener ahora una ecuación para la tensión de la carga:

---

Con lo que finalmente, las pérdidas de inserción serán:

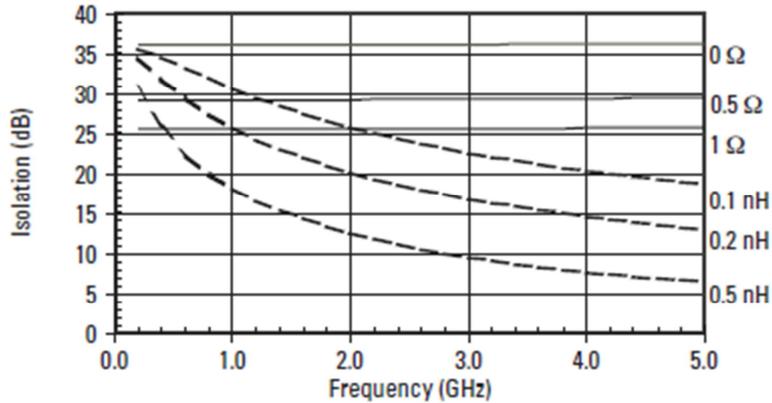
---

A partir de esta expresión podemos estudiar los efectos de la puesta a tierra en la realización del conmutador. Mientras que la resistencia de tierra tiene un pequeño efecto en las pérdidas de inserción, la inductancia de tierra incrementa significativamente las pérdidas de inserción, particularmente a altas frecuencias, como podemos ver en la siguiente gráfica:



**Ilustración 10: Pérdidas de Inserción en Función de la Frecuencia**

La siguiente figura representa el aislamiento del conmutador en estado de off:



**Ilustración 11: Aislamiento**

Ya que el aislamiento depende de la actuación del diodo como cortocircuito, tanto la resistencia de tierra como la inductancia pueden hacer decrecer el aislamiento seriamente.

## 2.4 Mezcladores Basados en Diodos

Si excitamos un diodo con dos señales de diferente frecuencia (LO e IF), aparecerán una variedad de señales en el puerto RF, a frecuencias de las diferentes combinaciones de las frecuencias de LO e IF. Un mezclador bien diseñado tiene filtros en los puertos de LO, IF, y RF, los cuales permitirán hacer aparecer en el puerto RF las señales deseadas. Además, los diodos en mezcladores, necesitan generalmente una conexión DC a tierra, ya que el proceso de mezcla genera usualmente corrientes de continua. Esta misma tierra debe ser referencia para las señales de microondas también.

Si los diodos están perfectamente adaptados a sus características eléctricas, no debería circular ninguna corriente de continua. En la práctica algo de corriente fluirá, por lo que necesitaremos un camino de tierra. En el mezclador, las perforaciones del filtro de LO proporcionarán la conexión al plano de tierra. Ya que estas perforaciones afectan al comportamiento del mezclador desde DC hasta RF y frecuencias más altas, es muy importante que posean una muy baja inductancia.



### 3 Transistores de Microondas

Los transistores han llegado a ser omnipresentes en los módulos y sistemas de microondas, debido a su pequeño tamaño, bajo coste, y compatibilidad con líneas de transmisión planares como la microstrip. Existen dos grupos de transistores: los bipolares (BJTs), y los de efecto campo (FET) que operan a más altas frecuencias que los BJTs y encuentran aplicaciones en circuitos de microondas planares.

Los circuitos planares se construyen de dos formas: circuitos híbridos o circuitos integrados de microondas (MIC), que incluyen uno o más componentes discretos a lo largo del circuito, como líneas de transmisión, inductores, capacidades, o resistencias. Estos componentes se interconectan mediante cables y cintas metálicas, o soldaduras. Aunque los MESFET son bastante pequeños, los otros componentes son generalmente grandes. Cuando necesitamos grandes volúmenes de producción, los circuitos planares se realizan como circuitos integrados monolíticos de microondas (MMIC). Una única pieza de semiconductor que a veces incluye todos los componentes requeridos en un circuito de microondas.

#### 3.1 Fundamentos Operacionales

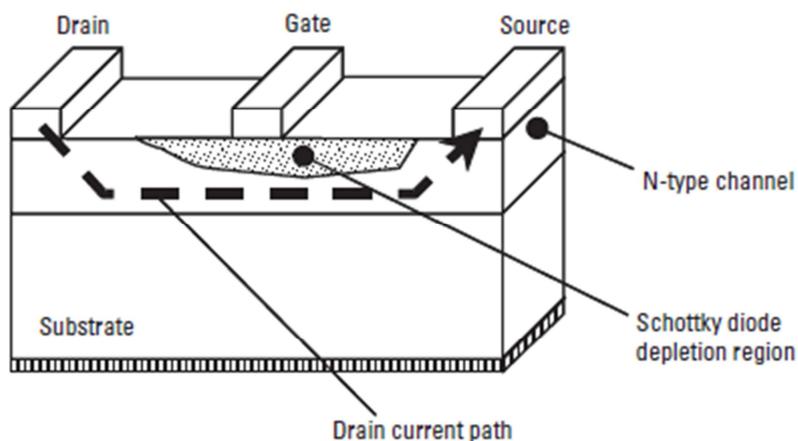
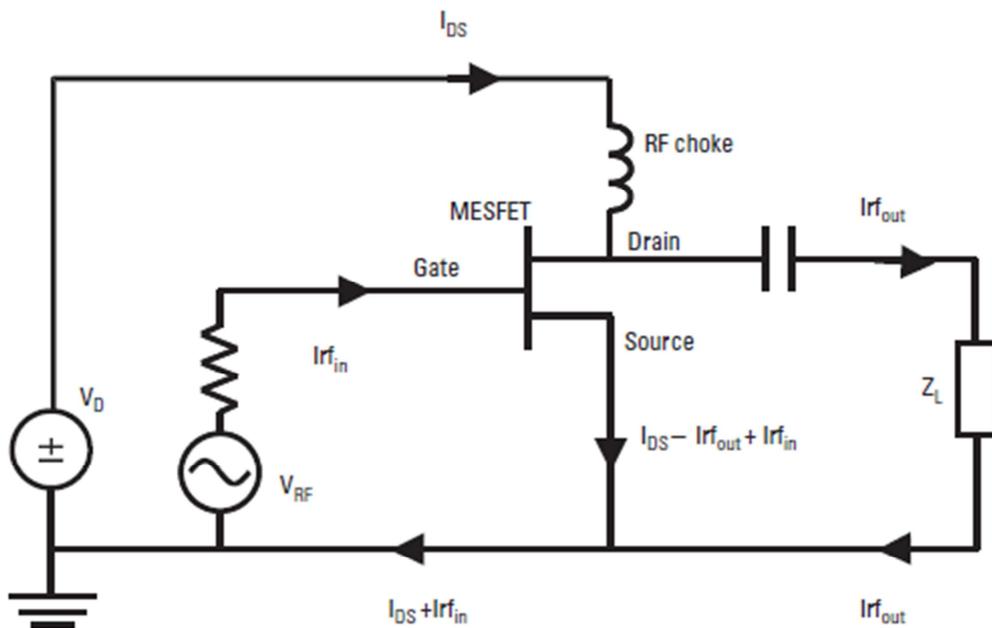


Ilustración 12: MESFET

El MESFET mostrado en la anterior figura es una fuente de tensión controlada de tres terminales. La corriente fluye entre fuente y drenador a través de una capa de

semiconductor llamada canal. Frecuentemente el drenador está puesto a un potencial en DC, y la fuente se pone a tierra, por lo que la corriente es conducida de drenador a fuente. La puerta forma una unión Schottky con el canal semiconductor. El voltaje aplicado en la puerta regulará la cantidad de corriente que circula por el drenador. Muchos MESFET están diseñados para que circule la máxima corriente cuando el potencial de la puerta es cercano a cero voltios, y el ancho de la zona de deplexión tenga ancho mínimo. Conforme el potencial de la puerta se va haciendo negativo, la zona de deplexión estrechará el canal hasta cortarlo, por lo que no circulará ninguna corriente.

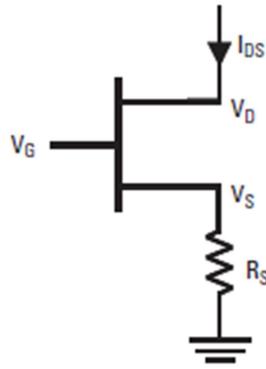
Los MESFETs son frecuentemente usados como amplificador de microondas en circuitos como receptores de bajo ruido, transmisores de alta potencia, etc. En la siguiente figura podemos ver un esquema de un amplificador monoetapa:



**Ilustración 13: Amplificador Monoetapa**

### 3.2 Resistencia de Fuente y Puesta a Tierra DC

Para muchos amplificadores, la fuente del transistor proporciona la referencia de tierra para el dispositivo. Una pobre puesta a tierra de la fuente podría llevarnos a serios problemas en el funcionamiento del amplificador.



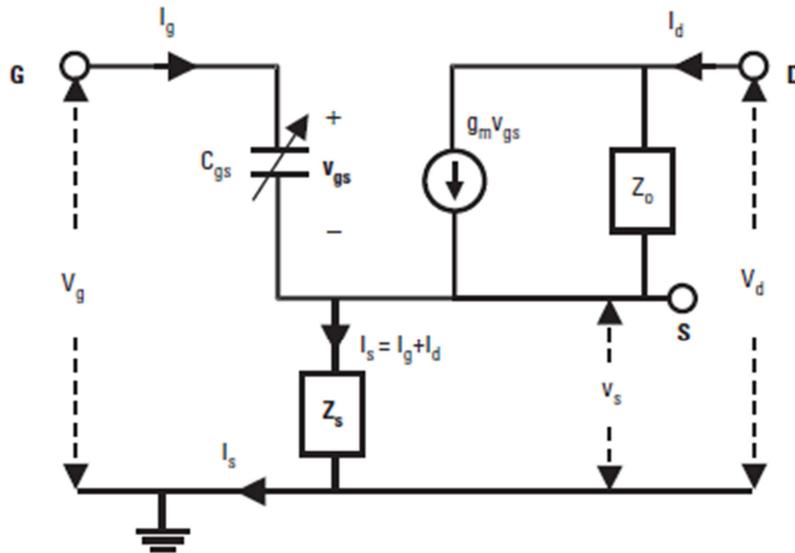
**Ilustración 14: Transistor MESFET**

Ya que  $V_G$  está normalmente fija, la corriente de drenador a través de la resistencia de la fuente incrementa el voltaje de la fuente, con lo que  $V_{GS}$  se reduce. Para una resistencia cero en la fuente, la amplitud de señal AC oscila entre  $V_{GS}$  y  $V_{GS} - V_{GS0}$ . Si existe resistencia de fuente, el voltaje oscilará entre  $V_{GS}$  y  $V_{GS} - V_{GS0} - I_{DS} R_S$ . Por esta razón, los dispositivos de alta potencia requieren una extrema baja resistencia en la puesta a tierra.

Por todo ello, una reducción en la tensión  $V_{GS}$  puede comprimir el rango sobre el cual la entrada de señal de microondas puede variar. Además puede resultar un decrecimiento de la ganancia, potencia de salida y eficiencia. Una simple manera de compensar la resistencia de fuente es aumentar la tensión fija de drenador en la tensión que cae entre drenador y fuente, con lo que nos haría falta un regulador de tensión. Pero tal regulador debe tener suficiente rango como para compensar todas las posibles desviaciones (principal limitación).

### 3.3 Inductancia de Fuente, Realimentación, y Puesta a Tierra RF

La inductancia a tierra en el terminal de fuente puede acarrear más problemas que la resistencia estudiada en el apartado anterior, ya que podría volver a un amplificador incondicionalmente estable en un oscilador incontrolable, que podría incluso quemar el dispositivo. Vamos a estudiar el caso mediante el siguiente equivalente circuital:



**Ilustración 15: Equivalente Circuital Amplificador Monoetapa**

La corriente  $I_g$  fluye en la unión de la puerta (a la izquierda). La unión está en inversa en estado normal, por lo que es representada por un condensador de capacidad variable teniendo un voltaje  $V_{gs}$ . La corriente de drenador, que depende de la tensión de la puerta, se representa por  $I_d$ , magnitud relacionada con la ganancia del dispositivo.  $Z_o$  es la impedancia compleja de salida del MESFET. La impedancia  $Z_s$  incluirá cierta impedancia de la conexión de la fuente a tierra. Si  $Z_s$  es cero y la fuente está puesta a tierra, por lo que la corriente de la puerta y el drenador serán puntos únicos puestos a tierra.

Por otra parte, si  $Z_s$  no es cero,  $S$  no está puesta a tierra, por lo que tendremos una puesta a tierra multipunto de  $G$  e  $D$ . Ambas corrientes usarán como camino de tierra común el camino a través de  $Z_s$ . El voltaje  $V_s$  será dependiente de la corriente de drenador, causando que el voltaje de entrada  $V_g$  sea dependiente de la corriente de drenador también. De este modo vemos que una impedancia distinta de cero en la fuente acopla la entrada del transistor con su salida, fenómeno conocido como realimentación. La realimentación desintonizará al amplificador, acarreado que oscile.

También podemos analizar el circuito anterior como un dispositivo de dos puertas, donde la puerta es la entrada referida al terminal de tierra, y la salida es el drenador referido a tierra también. Para el MESFET,  $I_d$  representa las pérdidas por retorno a la

entrada con la puerta adaptada,  $S_{22}$  representa las pérdidas por retorno a la salida con la ésta adaptada,  $S_{21}$  es la ganancia en tensión, y  $S_{12}$  es el aislamiento inverso. Si la impedancia de fuente es cero,  $S_{12}$  será cero. Analizando este circuito en admitancias, podemos llegar a una expresión para  $S_{12}$ :

$$S_{12} = \frac{-2Y_{12}}{(Y_{11}+1)(Y_{22}+1)-Y_{12}Y_{21}}$$

Si  $Z_s = R_s + j\omega L_s = 0$ ,  $Y_{12}$  será igual a cero, por lo que  $S_{12}$  será cero, y no existirá realimentación.

Un amplificador inestable oscila, por lo que será un amplificador condicionalmente estable (el cual tendrá cierta impedancia en su entrada y/o en su salida). Un amplificador normalmente es diseñado para ser incondicionalmente estable, significando que no puede oscilar sin importar la impedancia en la que terminen sus puertos. La condición para que un amplificador sea incondicionalmente estable es:

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

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

Ya que  $|S_{21}|$  puede ser mayor que uno, para tener una alta ganancia del amplificador, es importante mantener  $S_{12}$  pequeño para satisfacer las condiciones anteriores.

Junto a la inestabilidad, la inductancia de fuente degrada la ganancia del amplificador (a veces varios dB). La siguiente expresión nos da la máxima ganancia disponible por un MESFET:

$$G_{max} = \frac{(f_T/f)^2}{\frac{4}{R_0}(R_s + \pi f_T L_s)}$$

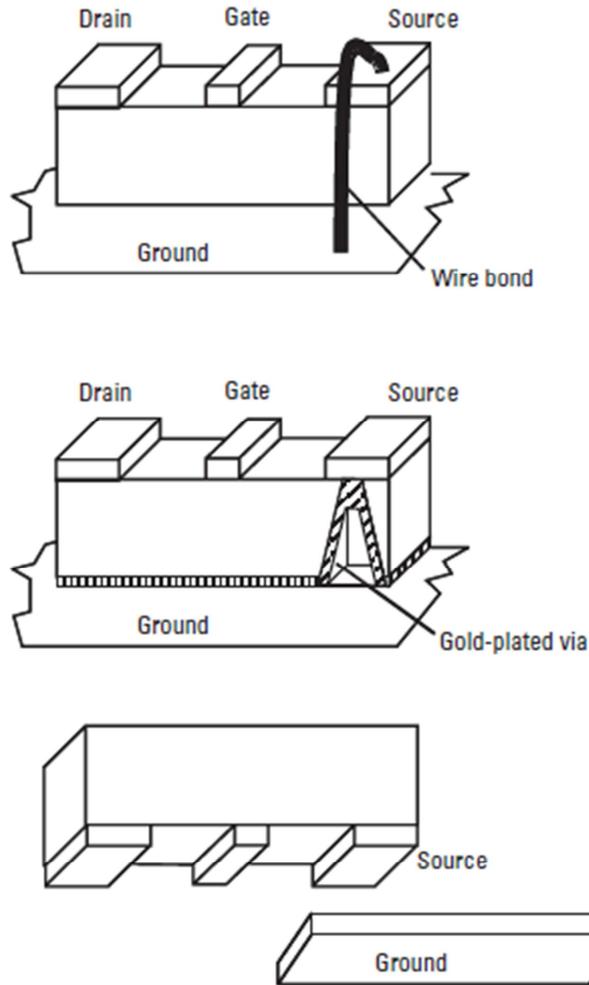
Donde  $f_T = \frac{g_m}{2\pi C_g}$ ,  $R_0$  es la parte resistiva de  $Z_0$ , y  $L_s$  compone  $Z_s$ . La ecuación anterior asume al dispositivo incondicionalmente estable. Para amplificadores de bajo ruido, la inductancia de fuente se incrementa con el ruido también.

## 4 Métodos de Puesta a Tierra en Dispositivos de Semiconductor

### 4.1 Puesta a Tierra en MMIC no Encapsulados

Usamos MMICs no encapsulados para alcanzar un funcionamiento en frecuencias muy altas (alrededor de los 18 GHz). Para tales aplicaciones, la degradación causada por los elementos parásitos de la carcasa se antoja inaceptable. El típico MMIC es una pieza de semiconductor de un espesor muy fino teniendo la circuitería activa en su capa más alta. Podemos referir la tierra a cualquiera de las superficies, bien la más alta o bien la del fondo del MMIC. El MMIC se pega en una carcasa conductiva o plano de tierra mediante soldadura o adhesivo conductor, continuando de esta manera el camino de tierra, la carcasa, o el plano de tierra para las corrientes DC o RF del sistema. La propia puesta a tierra de dispositivos activos de MMIC implica minimizar la longitud del camino de tierra con su inductancia y resistencia.

Sabemos que para los amplificadores, la reducción de la inductancia de tierra es crucial para su correcto funcionamiento. En las figuras siguientes se van mostrar distintas maneras para poner a tierra un MMIC en una placa:

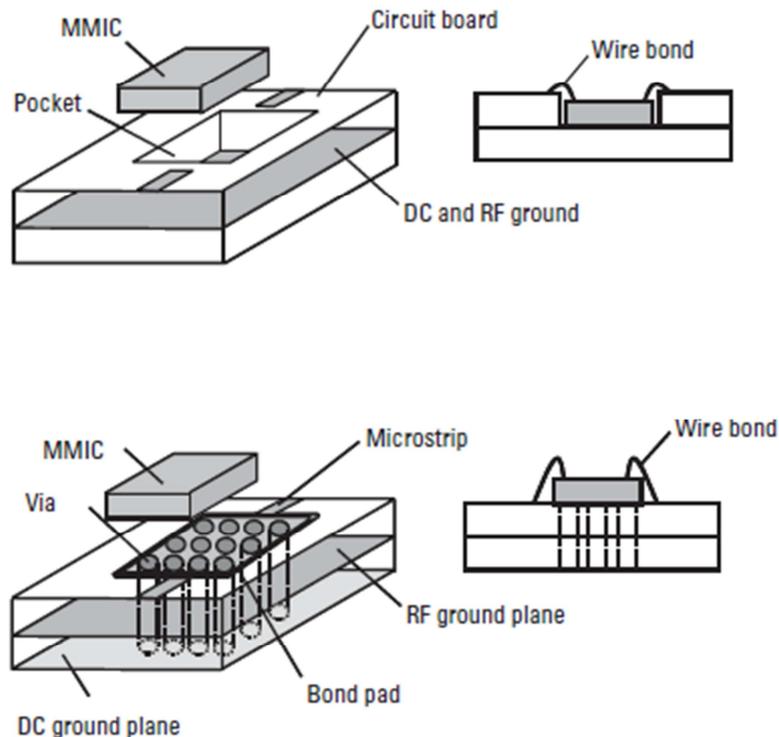


**Ilustración 16: Detalle de Diferentes Métodos de Puesta a Tierra**

Una primera aproximación es pegar un cable desde la fuente situada en la superficie más alta del circuito al plano de tierra, como se observa en la primera figura. Necesitaremos tres o cuatro cables para reducir suficientemente la inductancia, estabilizando de esta manera el amplificador de alta ganancia. Un método más efectivo de puesta a tierra es el que podemos ver en la siguiente figura, mediante el uso de perforaciones a través del MMIC. Otra aproximación, para la consecución de una baja inductancia de fuente, es la que se observa en la última figura. Se trata de dar la vuelta al MMIC (*flip-chip mounting*). Así, la cara activa del circuito queda mirando hacia la placa. La longitud del camino de tierra es muy corto incluso comparado con el segundo caso.

En la siguiente figura podemos ver varios métodos para poner a tierra MMICs

mediante el uso de perforaciones en la placa de circuito:



**Ilustración 17: Detalle de Diferentes Métodos de Puesta a Tierra Mediante Via Holes**

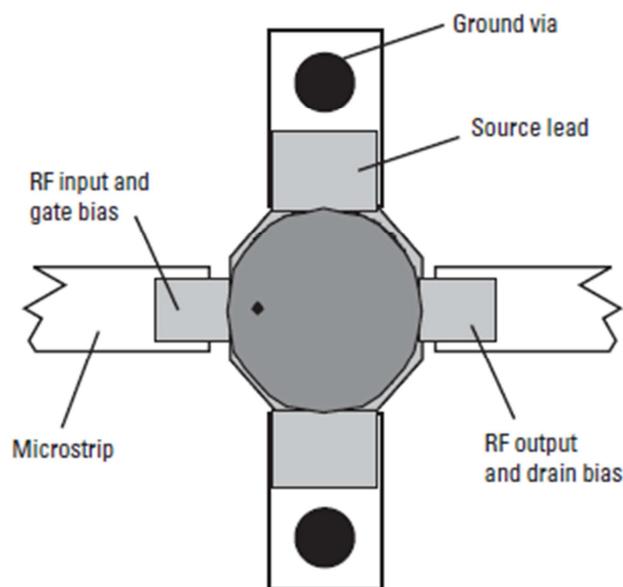
Para placas de circuitos relativamente finas, se puede grabar en ellas una especie de bolsillo como se muestra en el primer caso. El circuito MMIC se pega con epoxy o soldadura directamente al suelo de la carcasa, o directamente al plano de tierra. Usando este método de puesta a tierra, añadiremos una pequeña cantidad de inductancia al camino de tierra. Este primer método proporciona una excelente evacuación del calor. Las conexiones DC y RF entre el MMIC y la placa se realizan mediante cables, como podemos ver en la figura.

La siguiente figura nos muestra un segundo método para pegar y poner a tierra un MMIC a una placa de circuito. Creamos una capa metalizada de puesta a tierra en la parte superior de la placa, la capa que incluye las líneas de transmisión. Se taladra una fila de perforaciones bajo la plataforma, conectándolas al plano de tierra RF. El circuito

MMIC se pega a la plataforma. La cantidad, espacio, y tamaño de las perforaciones determinan la inductancia de tierra además de la resistencia térmica para la evacuación del calor.

#### 4.2 Puesta a Tierra de MMICs Encapsulados

Estos dispositivos encapsulados se usan en aplicaciones comerciales y militares de baja frecuencia (menos de 6 GHz), aplicaciones que demandan bajo coste en vez de altas prestaciones. Los MMICs encapsulados se manejan fácilmente y pueden ser fijados a las placas de circuitos junto a resistencias, bobinas, condensadores, etc. A diferencia de los no encapsulados, éstos no necesitan cables para las interconexiones (los cables los tienen dentro de la carcasa). En la siguiente figura se muestra un ejemplo de estos dispositivos:



**Ilustración 18: Detalle Empaquetado MESFET**

La entrada RF y la tensión de alimentación DC llegan al circuito por una única pata. Una segunda pata trae la corriente DC de drenador al MMIC, y le permite salir del paquete mediante la salida RF. La pata de fuente está conectada a la placa mediante perforaciones puestas a tierra. Además de la inductancia de fuente del circuito MMIC, las patas del encapsulado contribuyen en parte a aumentar la inductancia hacia la

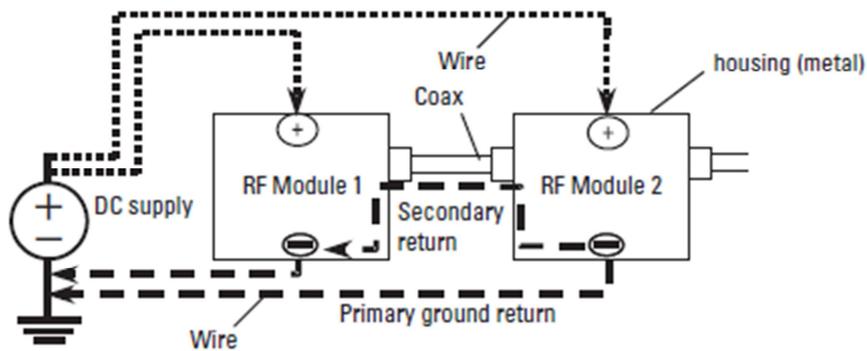
tierra. La inductancia de una pata puede ser tan grande como para dominar la inductancia total del camino, efecto que no se tiene en cuenta en las especificaciones del MMIC aislado.

## 5 Puesta a Tierra de Subsistemas de Microondas

En esta sección, vamos a estudiar la puesta a tierra de subsistemas de microondas que tienen más de un componente activo.

### 5.1 Puesta a Tierra de Módulos de Microondas

Cuando necesitamos poner a tierra más de un componente activo de microondas, particularmente módulos con interconexiones de coaxial o guía de ondas, casi siempre tenemos que hacer frente a la puesta a tierra con múltiples caminos de tierra, como podemos ver en la siguiente figura:



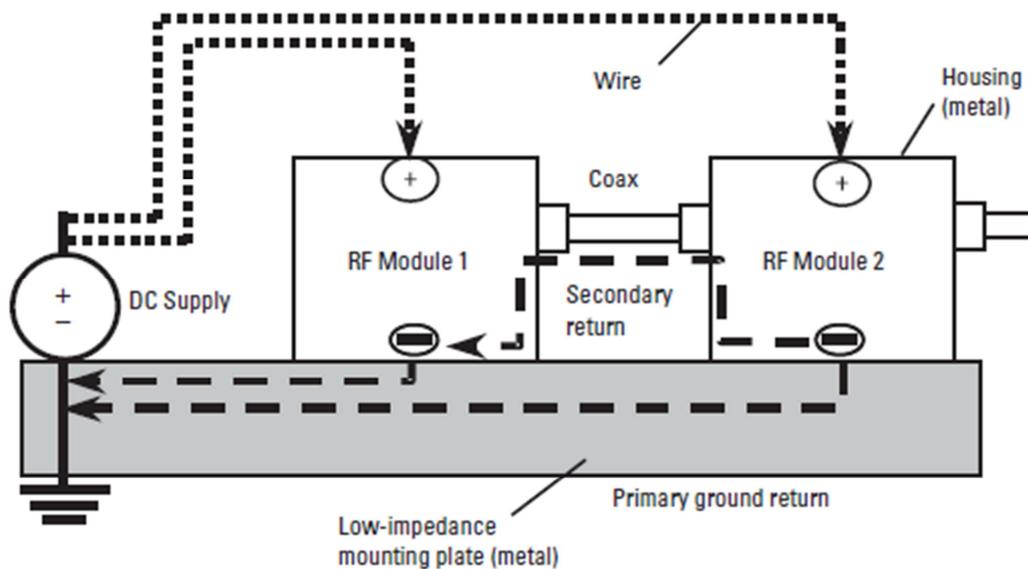
**Ilustración 19: Puesta a Tierra Monopunto de Dos Módulos en Serie**

En este ejemplo, dos módulos activos reciben alimentación DC de la misma fuente de tensión. Un cable lleva la tensión partiendo del terminal positivo de la fuente, al terminal positivo de cada módulo. Similarmente, un único cable es la principal vuelta para cada terminal negativo de cada módulo, al terminal negativo de la fuente. Si ambos módulos no estuvieran conectados con un cable coaxial, esto sería un problema de puesta a tierra simple, donde los dos caminos de tierra estarían completamente aislados. Pero, como podemos ver en la figura, el conductor de tierra del coaxial proporciona un segundo camino de tierra para la corriente de tierra del módulo 2. Ya que las impedancias de ambos caminos para el módulo 2 no son cero, una parte de la corriente irá por un camino, y otra irá por otro. En efecto, los módulos están puestos a tierra mediante un esquema multipunto, por lo que las corrientes de ambos módulos

estarán acopladas.

El cable coaxial, que tiene más área de conductor, tendrá una menor resistencia que los cables de tierra. Cuando calculamos la porción de corriente que circula por cada camino del módulo 2, llegamos al resultado de que los dos tercios del total circulan por el coaxial. Esta corriente provoca que el potencial del terminal negativo del módulo 1 se eleva a casi 0.7 v, reduciendo la tensión entre drenador y fuente, haciendo decrecer su potencia de salida y su ganancia.

Una solución bastante satisfactoria a este problema es conectar los módulos a una plataforma de metal de baja impedancia, como es el suelo de una carcasa que se observa en la siguiente figura:

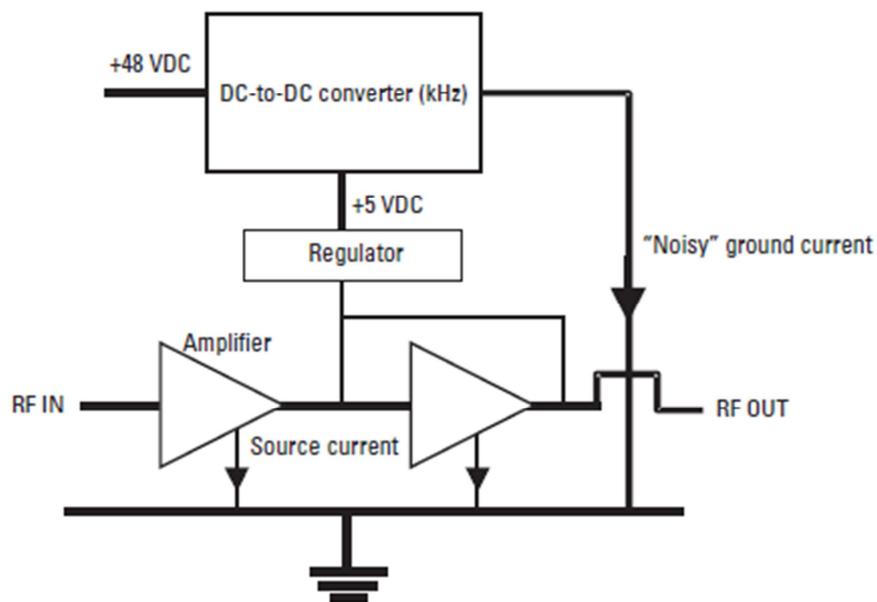


**Ilustración 20: Plataforma de Puesta a Tierra**

La plataforma de metal tendrá una resistencia muy inferior a la de los cables, además de tener una baja inductancia, por lo que se comportará como un magnífico camino de tierra para las señales de DC, digitales, y RF. Ahora casi toda la corriente de vuelta del módulo 2 circula por la plataforma metálica hasta la fuente de tensión.

## 5.2 Puesta a Tierra en Dispositivos Activos en PCBs con Señales Mezcladas

Como vimos en capítulos anteriores, la puesta a tierra se hace muy importante cuando tenemos en una misma placa dispositivos que manejan señales dispares. Algunos serán de DC, otros de RF, y otros manejarán señales digitales. Sabiendo que todos los componentes de montaje superficial se montan en la capa superior, deberemos encaminar hacia todos los planos de tierra siguiendo el camino más corto. Para minimizar la inductancia, deberíamos usar múltiples perforaciones para los componentes de RF. Los amplificadores de potencia de montaje superficial requieren múltiples perforaciones a la tierra para conseguir una buena disipación del calor. Se debe evitar el uso de condensadores de desacoplo compartiendo perforaciones, ya que se crea un camino de tierra común que probablemente acople señales, que en principio deberían estar aisladas.

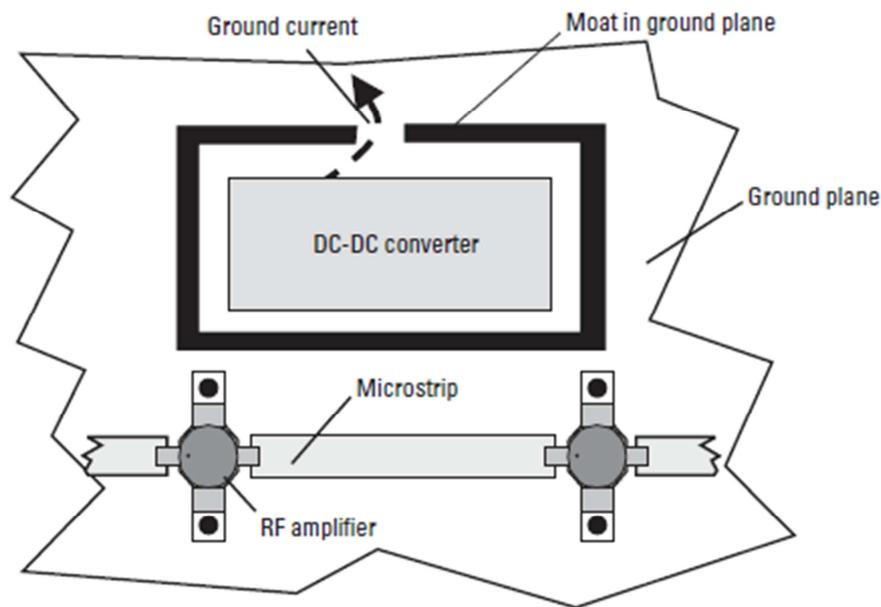


**Ilustración 21: Puesta a Tierra Multipunto**

En la figura anterior, los dos amplificadores y su convertidor de corriente DC a DC usan el mismo camino de tierra. La corriente de tierra está acoplada a la corriente de la fuente de ambos amplificadores a través de un camino común de tierra que es posible que exista en la placa de circuito impreso. Existirá alguna impedancia en el camino de tierra, desarrollando un voltaje que estará modulado con la frecuencia del convertidor.

Esta modulación provocará la aparición de otra modulación en la salida RF de los amplificadores. Para muchos sistemas, esta salida modulada degradará sus prestaciones.

El acoplamiento que aparece entre corrientes puede ser suprimido si los caminos de tierra pueden ser aislados. Un método es crear un foso alrededor del plano de tierra bajo el convertidor, y de esta manera, forzar a la corriente de tierra del convertidor tomar un camino de vuelta alejado de la cadena de amplificadores.

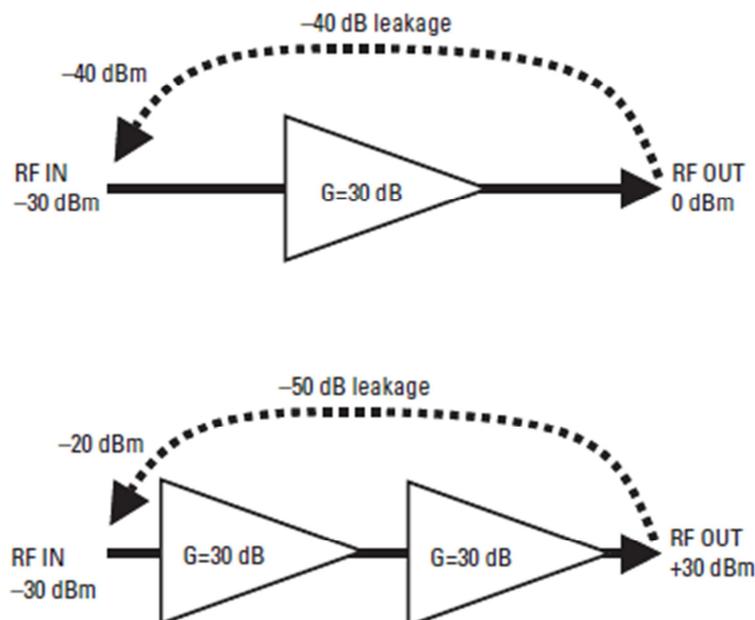


**Ilustración 22: Detalle Solución Puesta a Tierra**

Como se ha analizado en puntos anteriores, los VCOs son particularmente susceptibles a una pobre puesta a tierra. El ruido de fase del VCO es muy sensible al ruido en sus terminales de DC y fuentes de tensión, los cuales pueden acoplar la salida RF del VCO a través de su camino de tierra. Cuando montamos un VCO en una placa de circuito impreso, la fuente de DC del transistor, la fuente de tensión variable, y los pines de tierra del VCO deben estar conectados al plano de tierra DC de la placa de circuito impreso. Si el VCO no tiene pines, debemos montar una plataforma metálica con múltiples perforaciones hasta el plano de tierra de la placa. Además, debemos insertar condensadores de desacoplo a altas frecuencias entre el regulador de tensión y la tierra.

### 5.3 Puesta a Tierra de Cadenas de Amplificadores

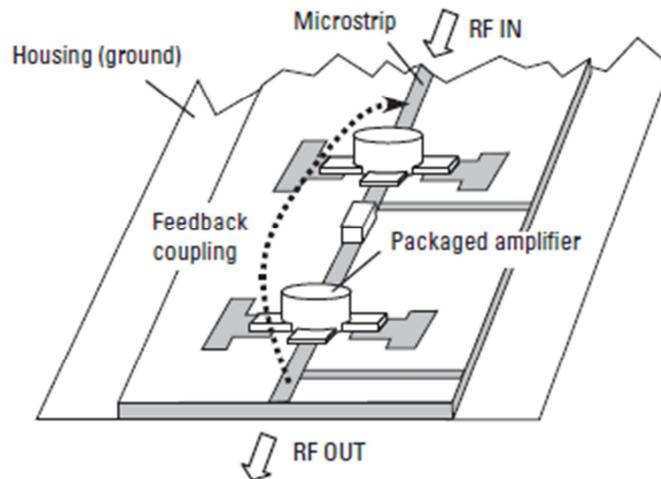
Sabemos de puntos anteriores que la inductancia en la fuente puede hacer oscilar un amplificador estable. Cuando los amplificadores están en cascada incluso la mejor puesta a tierra de la fuente podría no ser adecuada. Las líneas de transmisión planares, como la microstrip (comúnmente usada en circuitos de microondas), tienden a radiar cerca de las discontinuidades tales como las patas del transistor o las conexiones cableadas de los circuitos MMIC. La energía radiada se dispersa en todas las direcciones. Esta radiación puede acoplar la salida de un amplificador con su entrada, como podemos ver en la siguiente figura:



**Ilustración 23: Leakage en Cadena de Amplificadores**

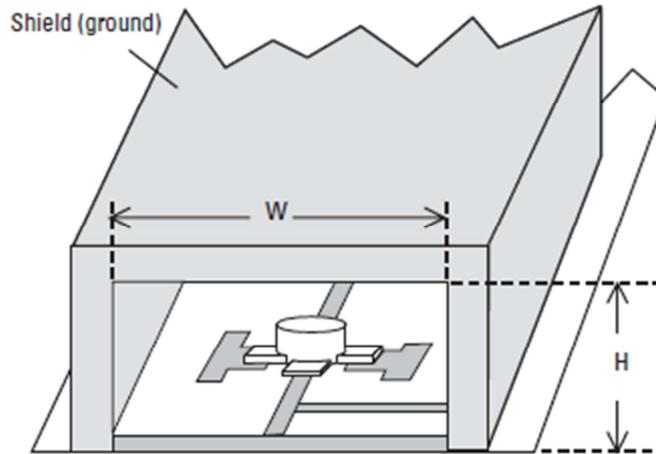
Un amplificador de microondas puede tener una alta ganancia, y tener su entrada y salida tan solo separadas por 2.5 mm, por lo que el acoplo por radiación será más que posible. En el ejemplo de la figura, el amplificador tiene una ganancia de 30 dB (asumimos que trabaja en zona lineal y que es incondicionalmente estable). Si introducimos una entrada de  $-30\text{ dBm}$ , la salida será  $0\text{ dBm}$ . Si el acoplamiento entre salida y entrada es de  $-40\text{ dB}$ , el nivel de potencia de salida realimentado a la entrada es de  $-40\text{ dBm}$ , que está 10 dB por debajo de la potencia de entrada. De igual forma,

podemos calcular la ganancia del bucle como  $30\text{ dB} - 40\text{ dB} = -10\text{ dB}$ , la cual es menor que  $0\text{ dB}$ . Por consecuencia, el nivel de salida acoplado no excede el nivel de potencia introducido, por lo que el amplificador permanecerá estable. Analicemos el segundo ejemplo de la figura 84:



**Ilustración 24: Cadena de Amplificadores Sobre PCB**

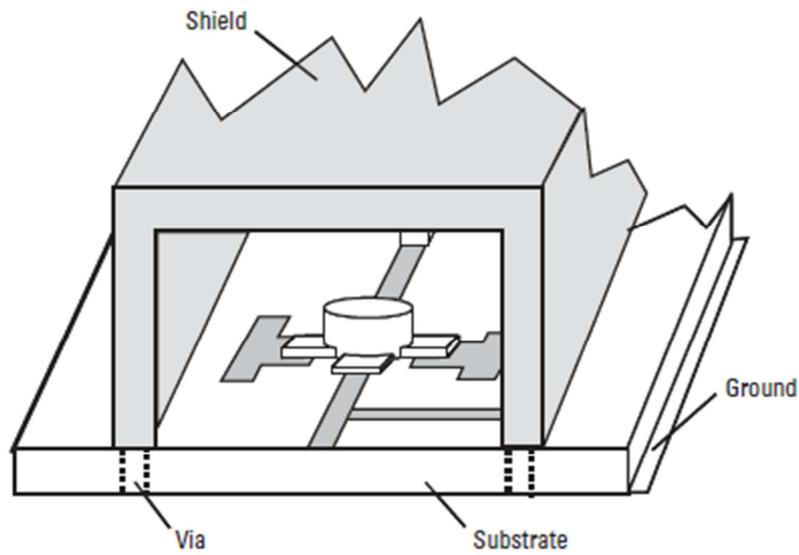
En el ejemplo anterior tenemos dos amplificadores de  $30\text{ dB}$  de ganancia cada uno en cascada. El nivel de salida acoplado a la entrada es de  $-50\text{ dB}$ , por lo que la ganancia del bucle será:  $30\text{ dB} + 30\text{ dB} - 50\text{ dB} = 10\text{ dB}$ . Dado que la ganancia del bucle es positiva, el par de amplificadores en cascada oscilará. Podemos reducir esta ganancia a  $0\text{ dB}$  si añadimos  $10\text{ dB}$  de atenuación a la señal de salida radiada. Pero ésta no es una solución deseable, y más si necesitamos una alta ganancia total. Una alternativa es la de aumentar el aislamiento entre la salida de la cascada y la entrada del primer amplificador, aumentando la separación entre amplificadores. Pero el espacio en los circuitos es limitado, y el aislamiento no aumenta todo lo rápido que nosotros deseáramos. Una técnica común para estabilizar cadenas de amplificadores, es canalizar los amplificadores como se muestra en la figura 85 y en la siguiente figura:



**Ilustración 25: Uso de Carcasa**

En la figura 86 hemos cubierto los dos amplificadores con una carcasa de metal, que contiene el plano de tierra de la placa de circuito, y que forma un canal en forma de una guía de ondas rectangular. Si existe alguna radiación dentro de la carcasa tomará la forma de un modo. Si seleccionamos las dimensiones de la carcasa de tal forma que todos los modos estén cortados, el aislamiento entre salida y entrada de la cadena de amplificadores se incrementa muchísimo sin incrementar su longitud. Para que una carcasa sea efectiva, debe comenzar antes de la entrada del primer amplificador y extenderse pasada la salida del último amplificador. Dicho de otro modo, es muy conveniente hacer esto ya que alguna energía radiada fuera de la carcasa podría atravesar la carcasa por su parte externa y acoplarse a su entrada. Además, la carcasa debe hacer contacto con el plano de tierra de la placa de circuito impreso.

La solución de la carcasa requiere que cortemos un hueco en la placa para que las paredes de la carcasa hagan contacto con el plano de tierra. Sin embargo, para placas de circuito multicapas necesitamos dejar intacta la placa. Podemos construir la carcasa como vemos en la siguiente figura:



**Ilustración 26: Carcasa Puesta a Tierra**

La carcasa se pega a unas pistas metálicas en la superficie más alta del sustrato. Las perforaciones conectarán las pistas con el plano de tierra. Este método de canalización nos proporciona menos aislamiento que el anterior, ya que existe un hueco entre el sustrato y el plano de tierra, siendo éstos propensos a radiar.