

Trabajo práctico N°3: Mezcladores

Paez Alemañy Ernesto, Gariboglio Andrés, Biava José, Argüello Emanuel

*Ingeniería Electrónica
Universidad Tecnológica Nacional
Córdoba, Argentina*

I. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de las estaciones de comunicación radioeléctricas se utiliza algún tipo de dispositivo para realizar una conversión de frecuencias. Esto permite que la información enviada sea recuperada eficazmente. El encargado de realizar esta tarea es el circuito mezclador. Un circuito de este tipo es capaz de mezclar dos señales de entrada con frecuencias diferentes, produciendo a su salida una combinación lineal de estas.

Los mezcladores, al igual que los amplificadores y osciladores, constituyen elementos indispensables de los sistemas de comunicaciones. Se emplean tanto en transmisores como en receptores cuando es necesario trasladar las señales en banda base a una de banda de paso (modulación) o de una banda de paso a otra banda de paso (conversión).

Un mezclador es un dispositivo no lineal al que se aplican dos señales de entrada de anchos de banda diferentes, y produce una señal de salida de otro ancho de banda, generalmente en dos bandas o más, una igual a la suma y otra a la diferencia de los anchos de banda de las señales de entrada. Esto es cierto a medias y válido sólo si a la salida del mezclador se utilizan filtros adecuados, ya que un mezclador produce por lo general, un número de señales de salida que se designan como espurias, que es necesario eliminar.

El símbolo habitual del mezclador se ilustra en la figura 1.

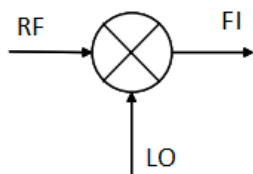


Fig.1 Símbolo del mezclador.

II. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Un mezclador tiene dos puertos de entrada y uno de salida. En una de las entradas se aplica, por lo general, la señal de un oscilador local y en la otra, la señal que se desea trasladar en el espectro de frecuencia y que puede ser o bien una señal en banda base o una señal modulada de radiofrecuencia.

Una forma simple de interpretar el comportamiento de un mezclador es como un multiplicador, en que la señal de salida es el producto de las dos señales de entrada. Los mezcladores se emplean para trasladar señales en una banda del espectro a

otra banda. Si la señal de entrada es una señal en banda base, el mezclador es, esencialmente, el modulador.

Aunque los mezcladores son igualmente importantes en los transmisores y en los receptores, la terminología tradicionalmente utilizada se refiere más a los receptores, ya que fue en estos equipos en que se comenzaron a utilizar extensamente en los inicios de la radio con la invención del receptor superheterodino. Así a la señal modulada de entrada se le designa como RF y la otra señal de entrada, de frecuencia fija, utilizada para trasladar el espectro de frecuencia de la señal de RF a otra banda, se la designa como portadora local y es generada por un oscilador local (LO). La salida del mezclador se designa como frecuencia intermedia (FI).

La tarea fundamental de un mezclador, como se dijo anteriormente, es la de realizar conversiones en frecuencia. El espectro a la salida debería ser idéntico al de la señal de entrada sin distorsión e independientemente de la modulación utilizada, pero desplazado a la frecuencia deseada. Sin embargo como se exponía anteriormente, debido a que el dispositivo no es lineal la señal de salida puede verse deteriorada debido a los denominados productos de intermodulación que son armónicos no deseados que aparecen como consecuencia de la utilización de elementos no ideales. Dichos productos afectan negativamente en la señal deseada por lo que habrá que evitarlos en la medida de lo posible. Para ello se utilizan filtros selectores en frecuencia que rechazan estos armónicos y mezcladores que por su modo de funcionar eliminan una parte importante de estos productos.

Una de las aplicaciones más importante de un mezclador es formar parte del receptor heterodino. El mezclador se coloca tras un amplificador de bajo ruido como se puede observar en la figura 2. Su función será convertir la señal recibida a la frecuencia RF a una frecuencia intermedia para así poder emplearse filtros con ancho de bandas menores y a continuación poder emplear amplificadores para efectuar la detección a alto nivel.

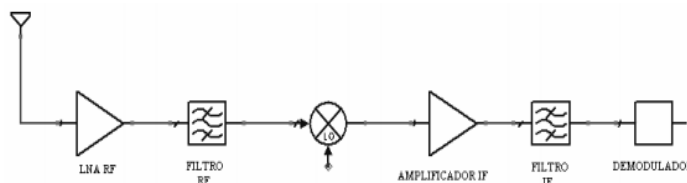


Fig.2 Receptor heterodino.

III. PROBLEMAS INHERENTES A UN MEZCLADOR

El mezclado genera ciertos problemas que son debidas a la naturaleza del propio proceso. A parte de los productos de intermodulación pueden surgir otros problemas que deterioren la señal a la salida. Los inconvenientes más destacados se enumeran a continuación:

- Productos de intermodulación debidos a las señales de entrada expresados de la forma $|mf_{LO} \pm nf_{FI}|$ donde m y n determinan el orden. Los productos cuyas frecuencias están alejadas de la señal de interés se eliminan mediante filtros, pero si se encuentran cerca habrá que eliminarlos. Los mezcladores balanceados eliminan una parte de estos.
- Señales de frecuencia f_i distinta de la señal FI pero que genera productos de intermodulación cerca de la frecuencia de radiofrecuencia $|mf_{LO} \pm nf_i| = f_{RF}$. La solución más común es colocar un filtro antes del mezclador que elimine estas señales.
- Frecuencia imagen: se sitúa a: $2f_{LO} \pm f_{FI}$ y es idéntica a la señal deseada pero desplazada en frecuencia. Esta frecuencia puede situarse cerca de la señal de información por lo que será necesario eliminarla. Para ello se puede eliminar con un filtro adecuado o eligiendo la frecuencia del oscilador local de forma que dicha frecuencia quede lo suficientemente alejada de la señal de interés.

IV. PARÁMETROS BÁSICOS DE LOS MEZCLADORES

A continuación se describirán las características más destacables en un mezclador:

A. Pérdidas de conversión

El grado en que la señal de salida desplazada en frecuencia, se amplifica o atenúa, es una propiedad importante de los mezcladores y se designa como ganancia de conversión, si la señal es amplificada o pérdida de conversión, si es atenuada en el proceso de mezcla.

La pérdida de conversión se define como la diferencia entre la potencia de RF de entrada y la potencia de FI de salida. En la figura 3 se observa estas pérdidas y se expresan de la siguiente manera:

$$CL = P_{RF} - P_{FI}$$

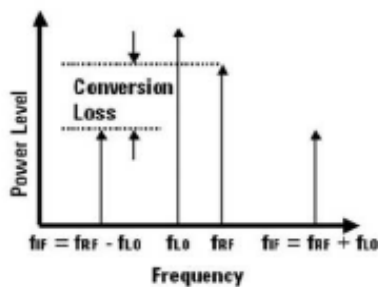


Fig.3 Pérdidas de conversión.

B. Figura de ruido

Salvo casos excepcionales de diodos muy ruidosos, la figura de ruido de un mezclador es aproximadamente igual que la pérdida de conversión. Cuando se eligen mezcladores para aplicaciones de pequeña señal, como el caso de un receptor sin amplificador de RF, es conveniente seleccionar un mezclador con una pérdida de conversión tan baja como sea posible. Se puede demostrar esto desde la definición de figura de ruido. Se sabe que la figura de ruido de un sistema es la razón entre la relación señal-ruido en la entrada y la relación señal-ruido a la salida.

$$F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o}$$

si $\frac{N_o}{N_i} = 1$ es decir, que el ruido a la salida es igual al que ingresa, la figura de ruido es igual a la pérdida de conversión (en veces):

$$F \approx \frac{S_i}{S_o}$$

o sino en dB:

$$F \approx S_i - S_o = P_{RF} - P_{FI}$$

esto siempre y cuando el mezclador no sea muy ruidoso. Es decir, que los diodos o los filtro utilizados no inyecten ruido adicional.

C. Pérdidas de aislación

La aislación es una medida de la cantidad de potencia que se fuga o filtra de un puerto a otro del mezclador. La aislación se obtiene por balanceo del mezclador, tanto de los elementos lineales como de los no lineales, o por el uso de dispositivos unilaterales. Desafortunadamente siempre existen algunas pequeñas pérdidas de potencia entre los puertos de RF, LO, FI.

La aislación es la diferencia de potencia entre la entrada de señal de un puerto y la potencia de la misma frecuencia fugada a otro puerto.

D. Pérdidas de compresión

En condiciones de funcionamiento normal, las pérdidas de conversión del mezclador serán constantes, independientemente de la potencia de entrada RF. Si la potencia de entrada de RF se incrementa en 1 db, entonces la salida de potencia de FI también se incrementará 1 db (la diferencia entre estas es la pérdida de conversión). Sin embargo cuando la potencia de RF se vuelve muy grande esa regla no se cumple. El punto de 1 db de compresión es una medida de la linealidad del mezclador y se define como la entrada de potencia de RF necesaria para aumentar la pérdida de conversión en 1db del valor ideal. Lo mencionado anteriormente se puede observar en la figura 4.

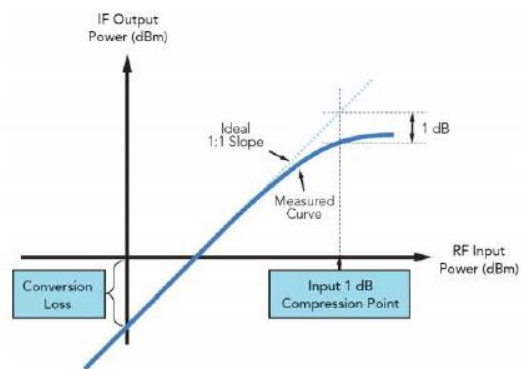


Fig.4 Pérdidas de compresión.

En condiciones de funcionamiento lineal, la potencia de LO es mucho más grande que la potencia de RF por lo que la acción de conmutación de los diodos esta totalmente dominada por LO. Sin embargo en la compresión, la potencia de RF se asemeja a la potencia de LO por lo que la acción de conmutación de los diodos se ve comprometida.

Un funcionamiento del mezclador en condiciones de compresión incrementa los niveles de distorsión por intermodulación y aumenta la perdida de conversión.

V. TIPOS DE MEZCLADORES

Los mezcladores se pueden clasificar en función de la ganancia o de su estructura. Si se toma su ganancia como referencia, los mezcladores se dividen en pasivos y activos. Pero si se considera su estructura se pueden clasificar en mezcladores de terminación única, simples y balanceados.

A. Mezcladores pasivos

Son aquellos mezcladores que presentan una ganancia de conversión en dB menor que cero. En este caso se dice que tienen pérdidas de conversión. Dentro de este grupo se engloba a todos los mezcladores a diodos y algunos mezcladores con FETs.

B. Mezcladores activos

Son mezcladores donde la ganancia de conversión en dB es mayor que cero. Dentro de este grupo se engloban la mayoría de mezcladores diseñados con transistores tanto BJTs como FETs.

C. Mezcladores simples

Se caracterizan porque utilizan un único componente de mezcla. Aunque estos mezcladores tienen varias limitaciones serias, son usados en muchos sistemas (especialmente en microondas y rango de frecuencias de ondas milimétricas) por su simplicidad de diseño. La teoría desarrollada para mezcladores de un solo componente es directamente aplicable a este tipo de mezclador y forma la base para entender el funcionamiento de los otros tipos. Una de las mayores desventajas es la dificultad de aislar la señal de LO del resto de las señales haciendo necesario el uso de filtros selectivos.

D. Mezcladores balanceados

Los mezcladores balanceados superan los problemas de los mezcladores simples y ofrecen algunas ventajas adicionales. Tienen una mejor capacidad de operar con potencia e incrementan la supresión del ruido LO y las señales espurias. Sin embargo, tienen un diseño más complejo y tienden a producir mayores pérdidas de conversión y una figura de ruido más alta. Dentro de este grupo se tienen dos tipos: los mezcladores simplemente balanceados y los doblemente balanceados. Para aplicaciones de comunicación donde las pérdidas de conversión no es la especificación más importante y lo son el coste y el tamaño, los mezcladores balanceados son la opción más elegida.

VI. DESARROLLO

Para cumplir con los objetivos del presente trabajo practico, se utilizaran mezcladores para una configuración de un receptor superheterodino de FM (88-108 MHz, IF: 10,7 MHz) con una potencia de LO: 8 dB y de RF: -10 dB. Se podrá observar que en la construcción de los mezcladores existen 2 filtros pasa banda de tercer orden del tipo Chevyshev. Uno en la parte de IF para poder recuperar la componente espectral de 10,7 MHz y otro en la entrada de RF el cual tiene como objetivo dejar pasar el canal de FM y no así armónicos indeseables.

A continuación se analizara el funcionamiento a través de simulaciones de los siguientes 4 mezcladores:

- Mezcladores de terminación única
- Mezcladores de balanceo simple
- Mezcladores de balanceo doble
- Mezcladores de determinación única con BJT

A. Mezcladores de terminación única

Son aquellos mezcladores que usan un único dispositivo alineal, que puede ser un diodo o un transistor. Al tener un solo dispositivo no hay simetrías que permitan eliminar frecuencias no deseadas en alguno de los terminales. Sin embargo en aplicaciones no muy comprometidas con la supresión de señales indeseadas, la aplicación de esta configuración es totalmente aceptable.

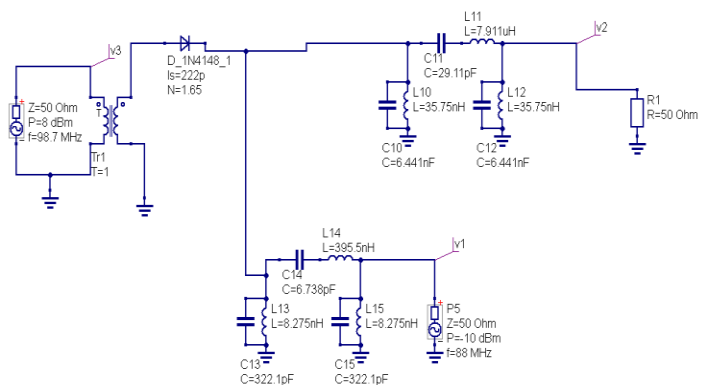


Fig.5 Circuito mezclador de terminación única

En la figura 5 se muestra un circuito de terminación única. La característica no lineal del diodo es la que origina nuevas componentes de frecuencias y por ende en la salida de FI, que es lo que necesitamos. Se eligió una frecuencia de RF de 88 MHz, por lo que LO es de 98,7 MHz. El diodo será el encargado de generar el producto de intermodulación de estas dos frecuencias, y con el filtro poder recuperar la componente espectral de interés que será la resta de las mismas.

$$f_{FI} = f_{LO} - f_{RF} = 10,7 \text{ Mhz}$$

A continuación se expondrán las imágenes obtenidas tras simular en Qucs el circuito anterior y así poder realizar las mediciones necesarias:

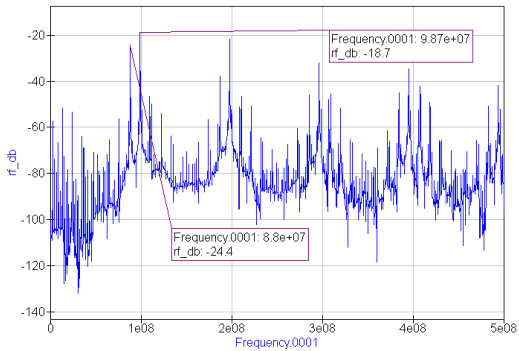


Fig.6 Ganancia en dBm de RF

Se puede distinguir en la figura 6 que aparece la componente espectral de LO en RF, esto se debe a que no hay una buena aislación entre puertos. Al tener LO más potencia que la RF, la componente de LO en RF será de mayor amplitud que la RF misma. Este es uno de los defectos más importantes de esta configuración.

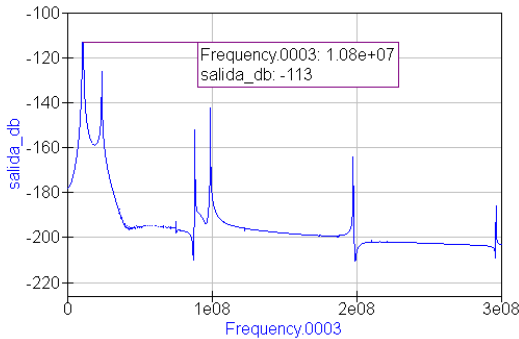


Fig.7 Ganancia en dBm de FI

Si observamos la figura 7, FI tiene muy poca potencia, por lo que se deberá utilizar un amplificador o varios para lograr una buena ganancia.

Con la obtención de los espectros se procedió a realizar las mediciones requeridas por el práctico, las cuales se muestran en la tabla 1 y en la figura 8 se muestra un barrido en

RF en función de IF para poder así calcular el punto de compresión del mezclador.

Perdidas de conversión	103dBm
Perdidas de aislación	
P _{LO-RF}	64,9 dBm
P _{RF-LO}	56 dBm
P _{LO-FI}	134 dBm
P _{FI-LO}	-32,9 dBm
P _{RF-IF}	142 dBm
P _{IF-RF}	-17,5 dBm
Perdidas de compresión	11 dBm
Figura de ruido	103 dBm

Tabla 1

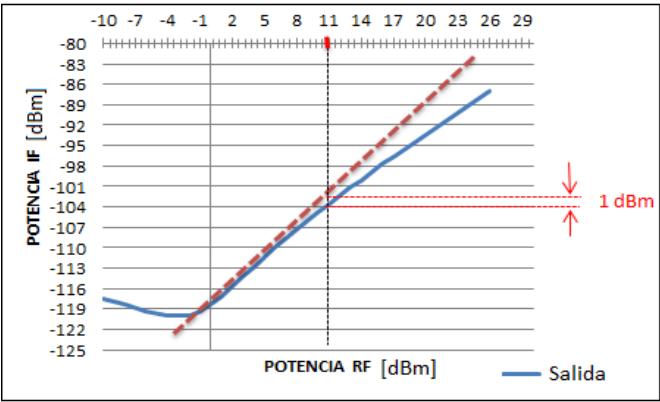


Fig.8 Perdidas de compresión

B. Mezcladores de balanceo simple

Este tipo de mezclador posee un par de dispositivos alineales, normalmente diodos o FETs, dispuestos en forma equilibrada de tal manera que el terminal de entrada quede aislado de los otros dos terminales. En el circuito de la figura 9 se observa que el terminal aislado es el de LO. En este caso se utilizó una frecuencia de RF de 98 MHz por lo LO tendrá que tener una frecuencia de 108,7 MHz.

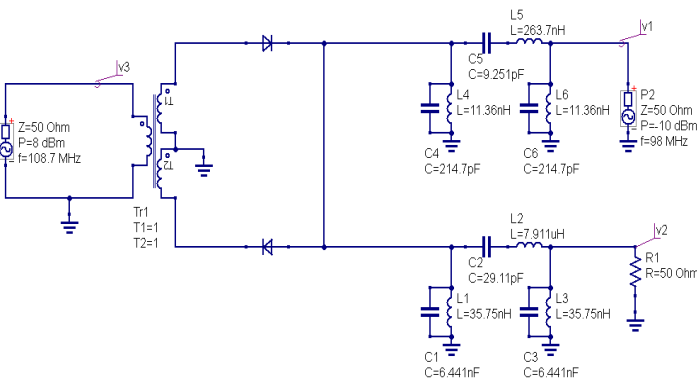


Fig.9 Circuito mezclador de balanceo simple

Una vez realizada la simulación del circuito anterior se extraerán las imágenes necesarias para realizar el cálculo de las pérdidas del mezclador.

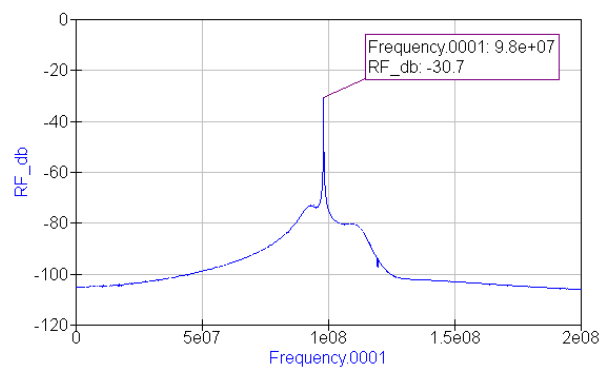


Fig.10 Ganancia en dBm de RF

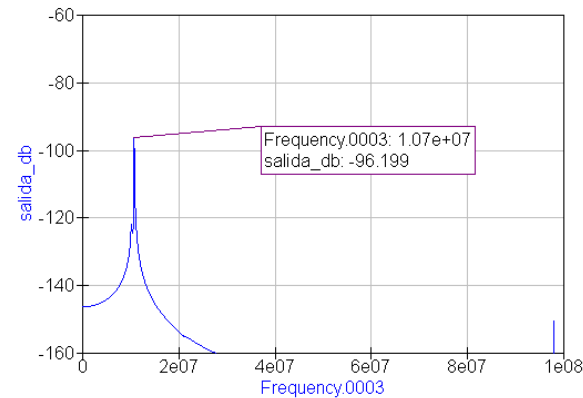


Fig.11 Ganancia en dBm de FI

La potencia de IF en este caso es mayor en comparación con el mezclador de terminación única. Esta es una ventaja de esta configuración por sobre la de un solo diodo. También se puede analizar que LO aparece con menor amplitud en RF debido al efecto de la aislación. Esta configuración también posee un filtro en el puerto de IF que dejará pasar la componente de frecuencia intermedia requerida.

Se procede a realizar las mediciones solicitadas por el práctico las cuales se muestran en la tabla 2. En la figura 12 se muestra un barrido en RF en función de IF para poder así calcular el punto de compresión del mezclador.

Perdidas de conversión	86,2dBm
Perdidas de aislación	
P _{LO-RF}	88,5 dBm
P _{RF-LO}	55,2 dBm
P _{LO-FI}	186 dBm
P _{FI-LO}	0,4 dBm
P _{RF-IF}	141 dBm
P _{IF-RF}	8,8 dBm
Perdidas de compresión	8 dBm
Figura de ruido	86,2 dBm

Tabla 2

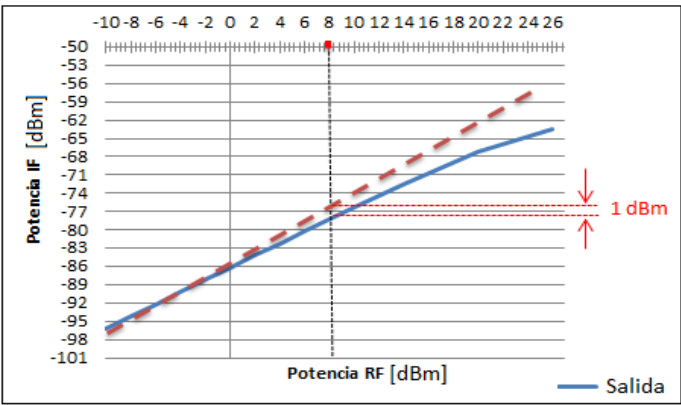


Fig.12 Perdidas de compresión.

C. Mezcladores de balanceo doble

Un mezclador de este tipo se muestra en la figura 13. Todos los terminales están aislados entre sí, por lo que las frecuencias de las señales de entrada no aparecen a la salida. Los dos transformadores proveen aislación a todos los puertos, de esta forma se evita que las componentes de LO aparezcan en otros puertos o mejor dicho se vea reducida. Es necesario que la implementación de este puente sea equilibrado para así obtener un perfecto bloqueo de la señal. Para la prueba de esta configuración se eligió una RF de 108 MHz, para así abarcar con las 3 configuraciones todo el rango de FM, por lo tanto al ser un receptor superheterodino LO será de 118,7 MHz obteniendo así una IF de 10,7 MHz.

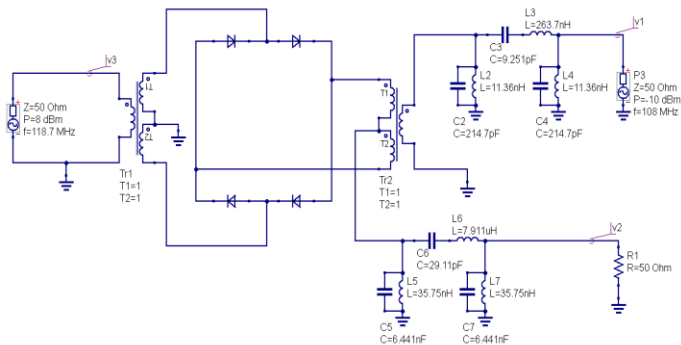


Fig.13 Circuito mezclador de balanceo doble

De la simulación del circuito anterior se obtendrán los datos requeridos por el trabajo práctico los cuales se extraerán de las siguientes imágenes:

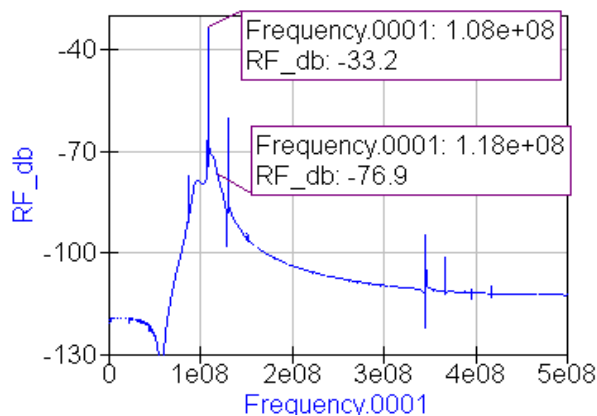


Fig.14 Ganancia en dBm de RF

La amplitud de la componente de LO es despreciable, esto se debe a que con el puente de diodos equilibrado y ambos transformadores no es posible que una componente de un puerto se acople en otro. En la figura 14 se observa el espectro en frecuencia en dB, el cual muestra que la potencia de la componente de LO es del mismo orden que el ruido por lo tanto es inapreciable en comparación a RF.

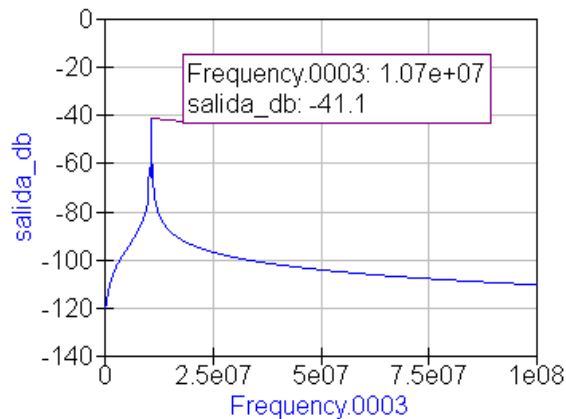


Fig.15 Ganancia en dBm de FI

Si observamos la figura 15 se aprecia una mejora en la potencia de IF respecto a los dos modelos de mezcladores ya mencionados, esta es la gran ventaja del doble balanceo junto con la aislación entre puertos.

Se procede a realizar las mediciones solicitadas por el práctico las cuales se muestran en la tabla 3. En la figura 16 se muestra un barrido en RF en función de IF para poder así calcular el punto de compresión del mezclador.

Perdidas de conversión	31 dBm
Perdidas de aislación	
P_{LO-RF}	85 dBm
P_{RF-LO}	58 dBm
P_{LO-FI}	120 dBm
P_{FI-LO}	50 dBm
P_{RF-IF}	31 dBm

P_{IF-RF}	78 dBm
Perdidas de compresión	4 dBm
Figura de ruido	31 dBm

Tabla 3

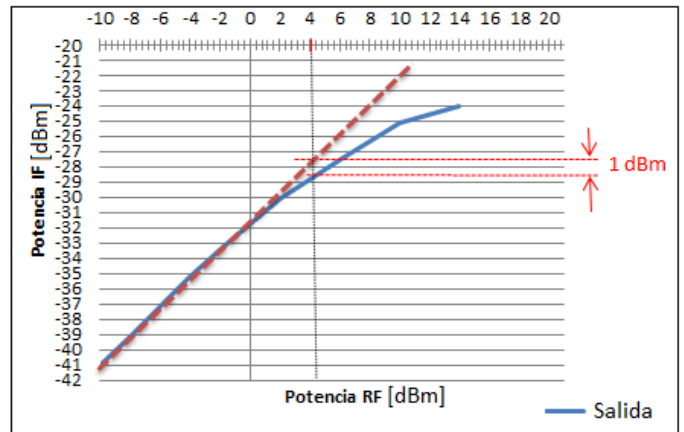


Fig.16 Perdidas de compresión.

D. Mezcladores determinación única con BJT

El mezclador es, por lo general, la etapa más ruidosa en el extremo frontal del receptor, mirado desde la antena. Si esta etapa introduce también una pérdida de conversión, como con los mezcladores a diodo, el ruido generado en la primera etapa de FI puede también contribuir a la cifra de ruido global. Por consiguiente, resultan convenientes los mezcladores de BJT que tienen una ganancia de conversión del orden de 20 dB. El requerimiento de potencia LO con BJT es menor que con FET, aunque la distorsión de intermodulación es más alta, en virtud de la característica de transferencia exponencial. Aunque los mezcladores a FET poseen una ganancia de conversión menor, se prefieren a menudo porque su característica de transferencia de ley cuadrática da una distorsión de intermodulación baja y puede tolerarse un rango mayor de señales de entrada.

Los transistores, tanto bipolares como de efecto de campo, tienen no linealidades. Las no linealidades son deseables si se requiere un mezclador. Un transistor bipolar o uno de efecto de campo pueden operarse de manera que la entrada cause que el dispositivo entre a regiones no lineales. El transistor de efecto de campo es el más conveniente para utilizarlo como mezclador debido a que la forma parabólica de su curva de transconductancia le da aproximadamente una respuesta de ley cuadrática. El transistor bipolar producirá más frecuencias espurias en su salida, frecuencias que con seguridad tendrán que ser eliminadas con filtrado. Sin embargo, ambos tipos de transistor son de uso común en circuitos mezcladores.

Un mezclador de terminación única con BJT es el que se muestra en la figura 17.

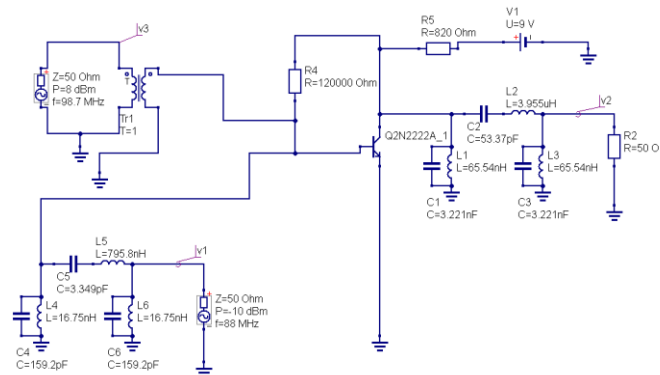


Fig.17 Circuito mezclador con BJT

A continuación se presentaran las imágenes obtenidas de la simulación del circuito anterior:

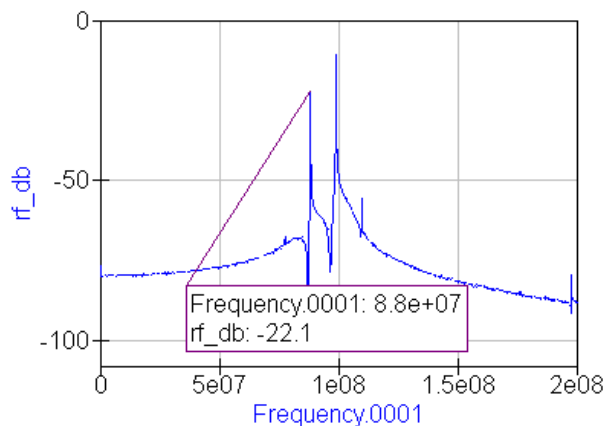


Fig.18 Ganancia en dBm de RF

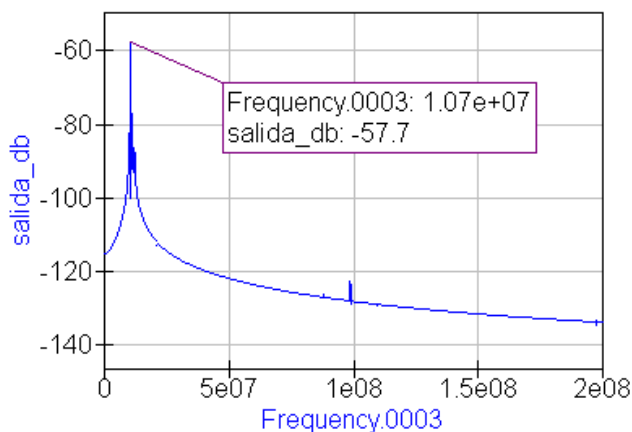


Fig.19 Ganancia en dBm de FI

En la figura 18 se observa el espectro en frecuencias del puerto RF. En la figura 19 se aprecia que la potencia de FI es menor a la que se espera obtener al usar un elemento activo como el transistor. Esto puede ser causado por una incorrecta polarización del BJT que hace que la señal de FI no sea amplificada correctamente.

VII. CONCLUSIONES

Uno de los aspectos o tareas más difíciles que se presentaron en la realización del presente práctico fue haber realizado el barrido de potencia de RF para obtener el punto de compresión de 1 dB, ya que al no conocer técnicas para realizar automáticamente el barrido se tuvo que tipear una a una las distintas potencias llevando esta labor demasiado tiempo para su ejecución.

En los 3 primeros casos presentados se obtuvo una potencia de salida baja, esto se lo puede atribuir a la utilización de filtros con anchos de bandas muy estrechos, lo que produce una atenuación de la amplitud de la banda de paso. Analizando los gráficos y las medidas realizadas se observa que concuerdan con lo que predice la teoría. A medidas que se fue utilizando un mezclador más sofisticado o dicho de otra manera, una topología más compleja, la figura de ruido y las pérdidas de conversión se vieron disminuidas como así también el punto de compresión de 1 dB y la aislación entre puertos se vieron favorecidas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H. L. Krauss & C. W. Bostian, "Estado Solido en Ingeniería de Radiocomunicación"
- [2] Marki Microwave Mixer Basics de Ferenc y Christopher Marki, 2010