

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Estudio de mezcladores ante variaciones de puertos de  
entrada y de niveles de señal.**

Proyecto de Investigación

**Luis Steven Luzcando Erazo**

**Ingeniería Electrónica**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Electrónico

Quito, 6 de diciembre de 2018

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO POLITECNICO

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Estudio de mezcladores ante variaciones de puertos de entrada y niveles de  
señal**

**Luis Steven Luzcando Erazo**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Santiago Navarro, Ph.D.

Firma del profesor

---

Quito, 6 de diciembre de 2018

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

---

Nombres y apellidos:

Luis Steven Luzcando Erazo

Código:

00107027

Cédula de Identidad:

1716260094

Lugar y fecha:

Quito, 6 de diciembre de 2018

## RESUMEN

En este proyecto se diseña y estudia mezcladores transistorizados cuya salida sea una frecuencia intermedia IF de 1MHz. El método utilizado para esto consiste en el diseño e implementación de dos topologías usadas con un solo transistor y otra topología conocida como mezclador Gilbert. Las que fueron analizadas mediante la variación de sus parámetros de entrada utilizando simulaciones de Multisim y PSpice. Estos modelos teóricos se comprobaron con la construcción de los tres mezcladores y el diseño y construcción de un oscilador colpitts funcionando a 10Mhz para ser utilizado como oscilador local LO en las pruebas.

Palabras clave: mezcladores, célula Gilbert, oscilador colpitts, mezclador BJT, filtro resonante, dispositivos no lineales.

## **ABSTRACT**

In this project, transistorized mixers whose output is an intermediate frequency IF of 1MHz are designed and studied. The method used for this consists in the design and implementation of two topologies used with a single transistor and another topology known as the Gilbert mixer. Those were analyzed by varying their input parameters using Multisim and PSpice simulations. These theoretical models were verified with the construction of the three mixers and the design and construction of a colpitts oscillator running at 10Mhz to be used as a local LO oscillator in the tests.

*Key words:* mixers, Gilbert cell, colpitts oscillator, BJT mixer, resonant filter, nonlinear devices.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Introducción</b> .....	<b>10</b>
<b>Desarrollo del Tema</b> .....	<b>11</b>
<b>Oscilador Colpitts</b> .....	<b>11</b>
Construcción y Pruebas .....	15
<b>Mezcladores</b> .....	<b>18</b>
<b>Mezclador BJT con Oscilador Local en el Emisor</b> .....	<b>20</b>
Prueba de variación de Frecuencia en el Oscilador Local .....	<b>23</b>
Prueba de variación de Amplitud en el Oscilador Local .....	<b>24</b>
Construcción .....	25
<b>Mezclador BJT con Oscilador Local y Radio Frecuencia en la Base</b> .....	<b>27</b>
Prueba de variación de Frecuencia en el Oscilador Local .....	<b>29</b>
Prueba de variación de Amplitud en el Oscilador Local .....	<b>30</b>
Construcción .....	30
<b>Mezclador Celula Gilbert</b> .....	<b>32</b>
Mezclador Gilbert con Transistores Pareados .....	<b>36</b>
Mezclador Gilbert con Transistores no Pareados .....	<b>38</b>
Mezclador Gilbert con Divisores de Voltaje .....	<b>40</b>
Construcción .....	41
<b>Conclusiones</b> .....	<b>44</b>
<b>Referencias bibliográficas</b> .....	<b>46</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: (a) Esquema Oscilador Colpitts, (b) Modelo Ac oscilador colpitts.....	11
Figura 2: Esquema Oscilador Colpitts a 10 MHz .....	13
Figura 3: Simulacion oscilador Colpitts .....	13
Figura 4: FFT de Oscilador Colpitts a 10 MHz .....	14
Figura 5: Oscilador Colpitts con buffer de alta impedancia .....	14
Figura 6: FFT de Oscilador Colpitts con buffer de alta impedancia .....	15
Figura 7: Simulacion oscilador Colpitts con buffer de alta impedancia .....	15
Figura 8: Parte Frontal de la placa Oscilador Colpitts a 10 MHz .....	16
Figura 9: Parte Trasera de placa Oscilador Colpitts a 10 MHz.....	16
Figura 10: Resultado Oscilador Colpitts a 9.87 MHz.....	17
Figura 11: Resultado Oscilador Colpitts corregido a 10 MHz .....	17
Figura 12: Dispositivo no lineal usado como mezclador .....	18
Figura 13: Producto de la mezcla donde la frecuencia RF, $f_1$ es mezclada con frecuencia del oscilador local .....	29
Figura 14: Conversor de Frecuencia .....	20
Figura 15: Espectro de señales que podrían encontrarse en la salida de un mezclador .....	20
Figura 16: Componentes de Salida de un Mezclador .....	21
Figura 17: Mezclador BJT con Oscilador Local por el Emisor.....	22
Figura 18: Simulación en función del tiempo de Mezclador BJT.....	22
Figura 19: FFT de la respuesta de mezclador con Oscilador Local en Emisor .....	23
Figura 20: Simulación en función del tiempo de mezclador BJT con Oscilador Local en el emisor ante una variación de 100 Hz en OL .....	23
Figura 21: Simulación en función del tiempo de mezclador BJT con Oscilador Local en el emisor ante una variación de 500 KHz en OL .....	24

Figura 22: FFT de mezclador BJT con Oscilador Local en el emisor ante una variación de 500 KHz en OL .....	24
Figura 23: Simulación en función del tiempo de mezclador BJT con Oscilador Local en el emisor ante una variación de amplitud de 10 Voltios en OL.....	25
Figura 24: FFT de mezclador BJT con Oscilador Local en el emisor ante una variación de amplitud de 10 Voltios en OL.....	25
Figura 25: Parte Delantera de la Placa de Mezclador con Oscilador local por el emisor y radio frecuencia en la base .....	26
Figura 26: Parte Trasera de la Placa de Mezclador con Oscilador local por el emisor y radio frecuencia en la base .....	26
Figura 27: Resultado de Mezclador con Oscilador local por el emisor y radio frecuencia en la base.....	27
Figura 28: Mezclador BJT con LO y RF entrando en la Base .....	27
Figura 29: Simulación en función del tiempo de Mezclador BJT con LO y Rf en la Base.....	28
Figura 30: Simulación en función del tiempo de Mezclador BJT con LO y Rf en la Base.....	28
Figura 31: FFT de la respuesta de mezclador con LO y RF entrando en la Base.....	28
Figura 32: Simulación en función del tiempo de mezclador BJT con Oscilador Local y Radio frecuencia en la base ante una variación de 50 KHz en OL .....	29
Figura 33: Simulación en función del tiempo de mezclador BJT con Oscilador Local y Radio frecuencia en la base ante una variación de 400 KHz en OL .....	29
Figura 34: Simulación en función del tiempo de mezclador BJT con Oscilador Local y Radio Frecuencia la base del transistor ante una variación de amplitud de 10 Voltios en OL .....	30
Figura 35: Parte delantera de la placa de Mezclador con Oscilador local y radio frecuencia en la base .....	31
Figura 36: Parte trasera de la placa de Mezclador con Oscilador local y radio frecuencia en la base .....	31
Figura 37: Resultado de Mezclador con Oscilador local y radio frecuencia en la base.....	32

Figura 38: Esquema de Célula Gilbert.....	33
Figura 39: Esquema Espejo de Corriente .....	35
Figura 40: Esquema Mezclador Gilbert con frecuencia intermedia de 1 MHz usando transistores pareados .....	36
Figura 41: Simulación en función del tiempo de Mezclador Gilbert con frecuencia intermedia de 1 MHz usando transistores pareados .....	36
Figura 42: FFT de Mezclador Gilbert con frecuencia intermedia de 1 MHz usando transistores pareados .....	37
Figura 43: Esquema Mezclador Gilbert con frecuencia intermedia de 1 MHz usando transistores no pareados .....	38
Figura 44: Transistores con $\beta$ editado de Mezclador Gilbert no pareado.....	38
Figura 45: Simulación en función del tiempo de Mezclador Gilbert con frecuencia intermedia de 1 MHz usando transistores no pareados .....	39
Figura 46: FFT de Mezclador Gilbert con frecuencia intermedia de 1 MHz usando transistores no pareados .....	39
Figura 47: Esquema mezclador Gilbert con divisores de voltaje.....	40
Figura 48: Simulación en Dominio del tiempo de mezclador Gilbert con divisor de voltaje ..	40
Figura 49: FFT de mezclador Gilbert con divisor de voltaje.....	41
Figura 50: Parte Delantera de la placa Mezclador Gilbert.....	42
Figura 51: Parte Trasera de la placa Mezclador Gilbert .....	42
Figura 52: Resultado experimental mezclador Gilbert .....	43

# INTRODUCCIÓN

Los mezcladores son dispositivos esenciales en los sistemas de comunicaciones. el ingeniero debe elegir entre distintas topologías y ajustar los niveles de señal para su correcto funcionamiento. Detalles importantes como evitar interacción no deseada entre las etapas de RF y la del oscilador local, no aparecen claramente tratadas en los textos.

Los mezcladores son realizados aprovechando la no linealidad de los dispositivos por este motivo cualquier dispositivo no lineal con la ayuda de un filtro pasa banda adecuado puede funcionar como un mezclador. Existen dos tipos de mezcladores los pasivos y los activos. Los pasivos son mezcladores que presentan una ganancia en dB menor que cero, podríamos decir que tienen pérdidas de conversión aquí tenemos a los mezcladores con diodos y algunos con FETs. Los mezcladores activos son aquellos cuya ganancia de conversión en dB es mayor a cero, aquí tenemos a mezcladores diseñados tanto con transistores BJTs como FETs. Los mezcladores también pueden ser clasificados por su estructura obteniendo dos grandes grupos: mezcladores simples y mezcladores balanceados.

En este proyecto se van a construir tres mezcladores activos, dos simples y un mezclador balanceado, así como también un oscilador Colpitts diseñado a 10 MHz que cumplirá con la función de Oscilador local. De esta manera los mezcladores van a funcionar con una señal de radiofrecuencia de 11 MHz y una de oscilador local de 10 MHz teniendo de esta manera como objetivo la obtención de una frecuencia intermedia de 1 MHz.

El objetivo de este proyecto es determinar el correcto funcionamiento y diferencias en distorsión, estabilidad y ganancia entre varias topologías de mezcladores. Para esto se diseñó dos mezcladores simples con BJTs en el primero se va a inyectar la señal de radiofrecuencia y oscilador local por la base del transistor. En el segundo vamos a poner la señal de radio frecuencia por la base del transistor y la señal del oscilador local por el emisor del transistor. Finalmente se diseña un mezclador Gilbert también conocido como "Gilbert cell" el cual tiene un arreglo de transistores balanceados que utiliza la multiplicación en dominio del tiempo de esta manera obtenemos la variación de frecuencias y con la ayuda de un filtro la frecuencia intermedia deseada, para este mezclador y particular se realizaran pruebas con transistores pareados como con transistores diferentes.

Para el diseño de estos mezcladores se utilizarán dos softwares de simulación los cuales son PSpice y Multisim, en estos se realizarán pruebas con la variación de sus componentes y condiciones de simulación. Para la verificación de estos circuitos se procederá a la construcción de estos y verificación en el laboratorio.

## DESARROLLO DEL TEMA

### Oscilador Colpitts

Los osciladores LC transistorizados funcionan mediante la sintonización de la parte LC que es la que permite elegir una frecuencia de oscilación adecuada para este trabajo, pero también se deben tomar en cuenta las características intrínsecas de los transistores siendo estas la capacitancia base emisor o la capacitancia base colector. (Boylestad & Nashelsky, 2013)

El oscilador colpitts que se utilizara en esta práctica está configurado en colector común, que funciona mediante un divisor voltaje capacitivo formado por C1 y C2 que está en resonancia con el inductor L.

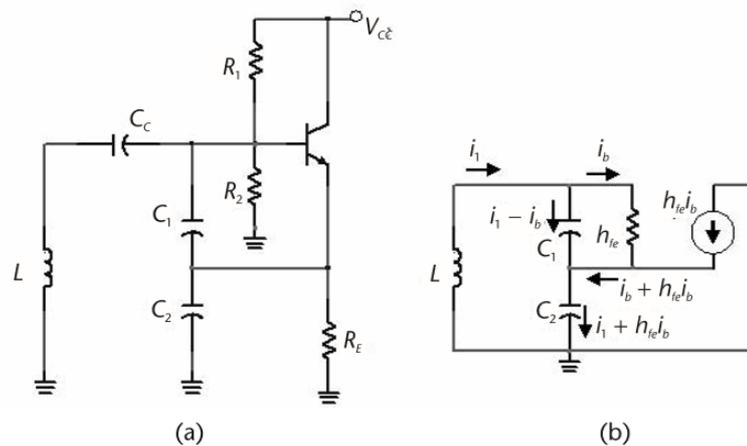


Figura 1: (a) Esquema Oscilador Colpitts, (b) Modelo Ac oscilador colpitts

La primera parte en el diseño de este oscilador consiste en la polarización del transistor al punto de trabajo deseado. Con base en la hoja de datos del transistor 2N2222A se procede a polarizarlo con  $V_{CE} = 8 \text{ V}$  y  $I_C = 10 \text{ mA}$ .

$$R_E = \frac{7}{1 \times 10^{-2}} = 700 \Omega$$

$$R_1 = \frac{15 - 7.7}{1 \times 10^{-3}} = 7.3 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{7 + 0.7}{1 \times 10^{-3}} = 7.7 \text{ k}\Omega$$

$$g_m = \frac{1 \times 10^{-2}}{25 \times 10^{-3}} = 400 \text{ mS}$$

Elegimos el capacitor de acoplamiento a un valor en el que su reactancia no sea un problema para el inductor que está siendo colocado en el circuito tanque. Con el transistor polarizado en el punto de operación adecuado se procede a determinar las componentes de capacitancia e inductancia necesarias para producir una oscilación a los 10 MHz requeridos.

Se deben cumplir varias condiciones de diseño para que el circuito funcione de manera adecuada.

$$R_E \gg \frac{1}{\omega C_2}$$

$$C_1 \gg C_{be}$$

Debemos tener en cuenta que la resistencia de entrada debe ser alta para no cargar al circuito resonante. Del modelo AC presentado en la figura 1(b) podemos obtener las ecuaciones necesarias para los cálculos.

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1}$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2}$$

$$Z_3 = j\omega L$$

$$0 = i_1(Z_1 + Z_2 + Z_3) + i_b(h_{fe}Z_2 - Z_1)$$

$$0 = i_1(Z_1) - i_b(h_{ie} + Z_1)$$

La oscilación ocurrirá cuando estas dos ecuaciones son igualadas a cero obteniendo. De la parte imaginaria se obtiene la frecuencia de oscilación.

$$-\frac{1}{\omega_o C_1} - \frac{1}{\omega_o C_2} + \omega_o L = 0$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC_T}}$$

Donde:

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

De la parte real vamos a obtener la relación de los capacitores para que se dé una oscilación.

$$h_{fe} > \frac{C_2}{C_1}$$

De los cálculos anteriores obtenemos el siguiente oscilador:

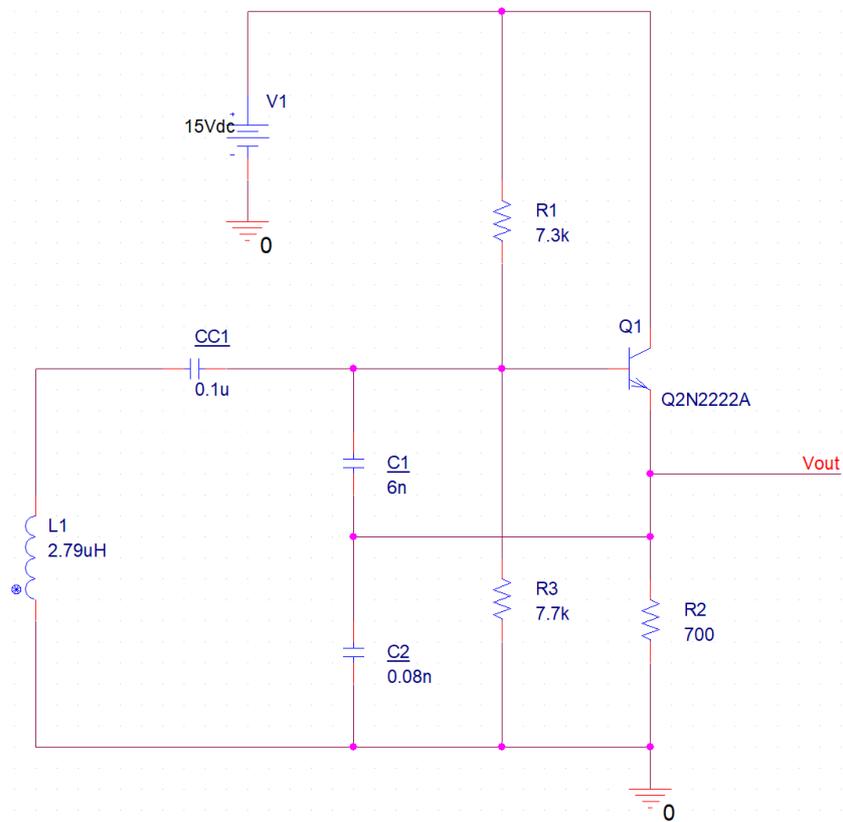


Figura 2: Esquema oscilador Colpitts a 10 MHz.

Simulando este circuito obtenemos una onda senoidal oscilando a una frecuencia de 10 MHz.



Figura 3: Simulación oscilador Colpitts

En la figura 3 es apreciable como la onda de oscilación no se ve saturada en su lugar funciona de manera simétrica por lo que el oscilador está funcionando correctamente.



Figura 4: FFT de Simulación Oscilador Colpitts a 10MHz.

En la figura 4 se puede observar como la respuesta en frecuencia esta sobre los 10 MHz siendo esta la frecuencia de oscilación diseñada.

El uso que se le va a dar a este oscilador es como una señal de entrada u oscilador local a los mezcladores diseñados por este motivo va a tener la presencia de otras frecuencias. Es necesario añadir una etapa de buffer que será realizada con amplificador seguidor de emisor. Este amplificador será polarizado de igual manera que el circuito de oscilación y simplemente se añadirán más capacitores de acoplamiento para el correcto funcionamiento de este.

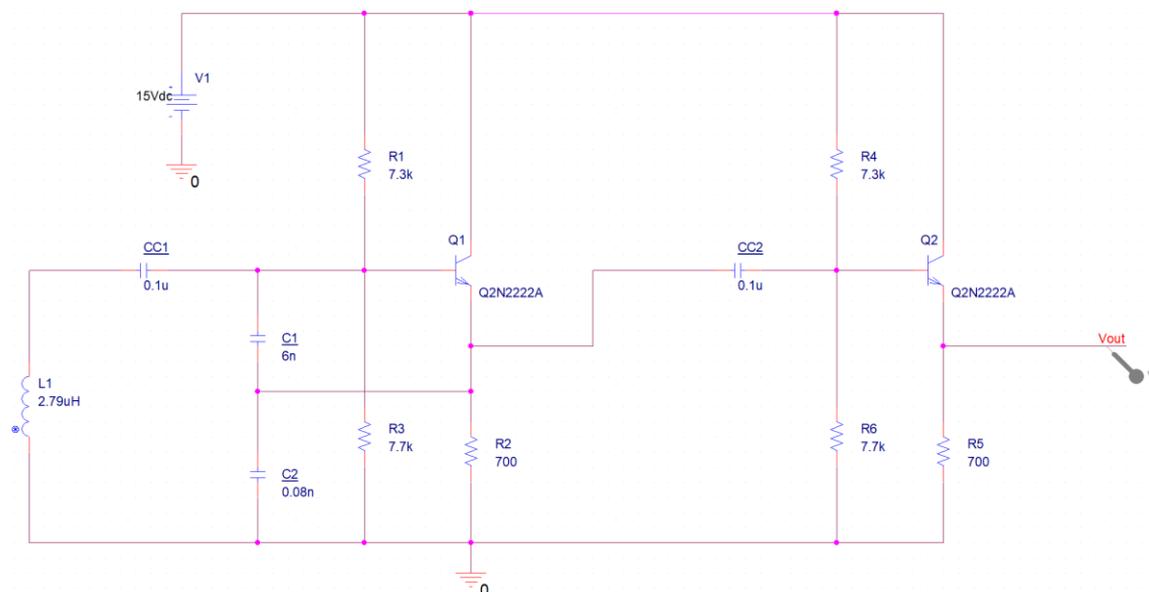


Figura 5: Oscilador Colpitts con buffer de alta impedancia

Como podemos observar en el grafico anterior ya está implementado el seguidor de emisor que genera una alta impedancia la que protege al oscilador de cambios en la carga o etapas posteriores. En la figura 6 podemos observar que la frecuencia de oscilación es igual a 10 MHz. Esto nos indica que la oscilación está en la frecuencia requerida.

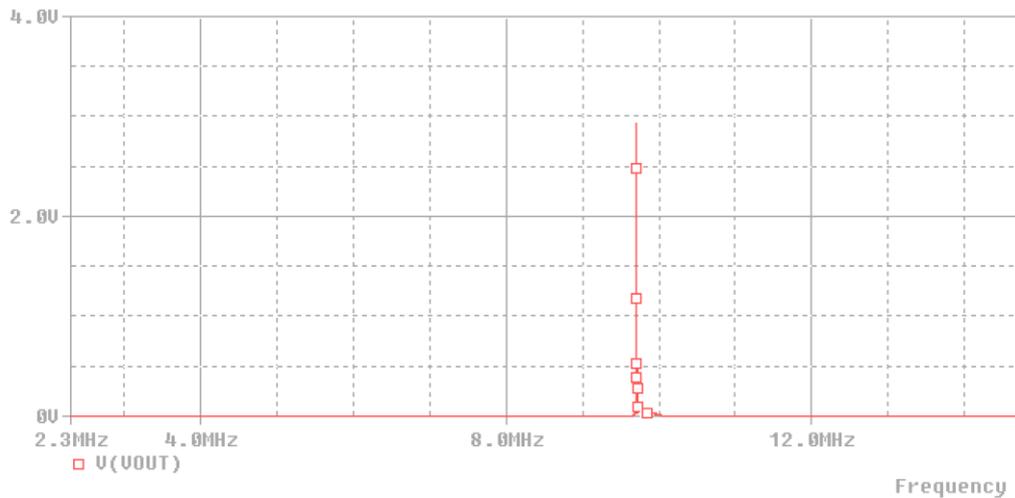


Figura 6: FFT de Oscilador Colpitts con buffer de alta impedancia



Figura 7: Simulación oscilador Colpitts con buffer de alta impedancia.

En la figura 7 podemos observar que en la simulación la onda de oscilación no se ve distorsionada y tiene un voltaje pico a pico bastante amplio.

### Construcción y Pruebas

La construcción de este oscilador se realizó con el diseño de los caminos por un software de diseño y se procedió a ajustar los componentes a valores comerciales. En los que no fue posible como las resistencias se utilizó potenciómetros de precisión que fueron ajustados al valor requerido antes de ser soldados. Para el inductor se utilizaron dos inductores de 2.1 y de 1 uH. Los valores de los capacitores son valores comerciales que pudieron ser usados normalmente. En el circuito tanque se decidió utilizar un capacitor variable esto con el objetivo de ajustar y tener una mayor precisión en la frecuencia de oscilación y ganancia del oscilador.

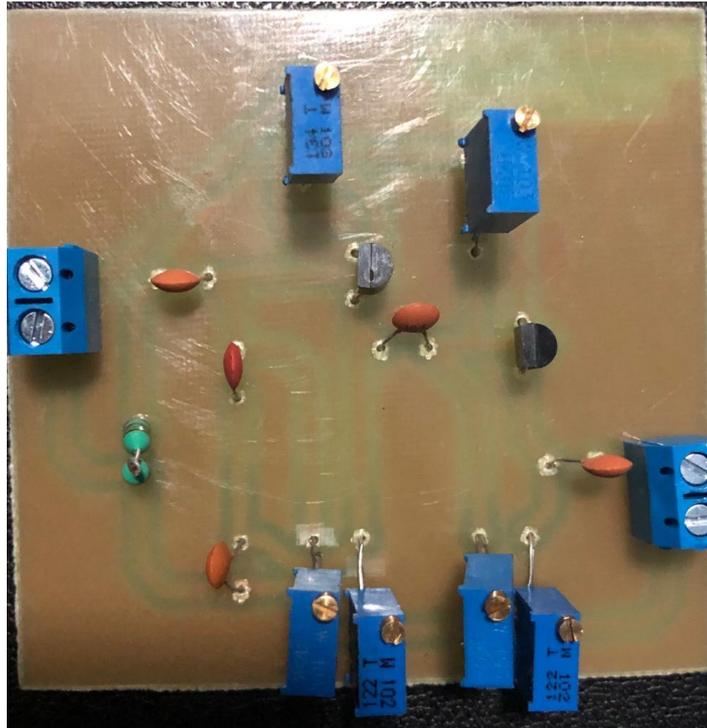


Figura 8: Parte Frontal de la placa Oscilador Colpitts a 10 MHz

Como podemos observar en la figura 8 las borneras fueron usadas para realizar las conexiones de polarización del circuito y la señal de salida del oscilador local que va a ser conectada a la entrada de los mezcladores.

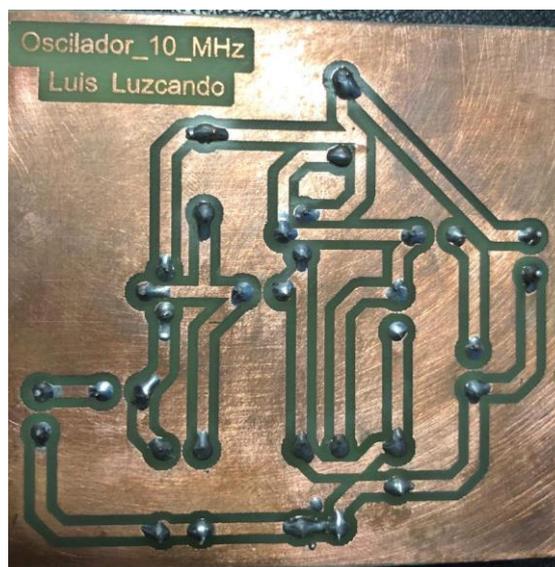


Figura 9: Parte Trasera de placa Oscilador Colpitts a 10 MHz

Los cables utilizados para realizar las conexiones y para tomar la salida que posteriormente será entra en el mezclador se utilizan cables más gruesos y cortos, esto como medida de precaución para evitar la influencia de este inductor extra en el circuito.

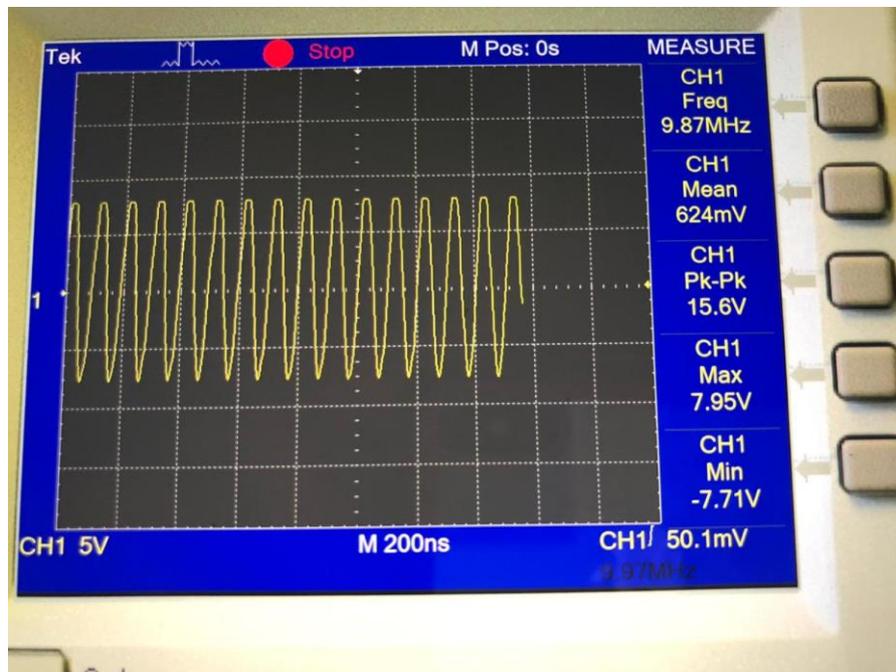


Figura 10: Resultado Oscilador Colpitts a 9.87 MHz

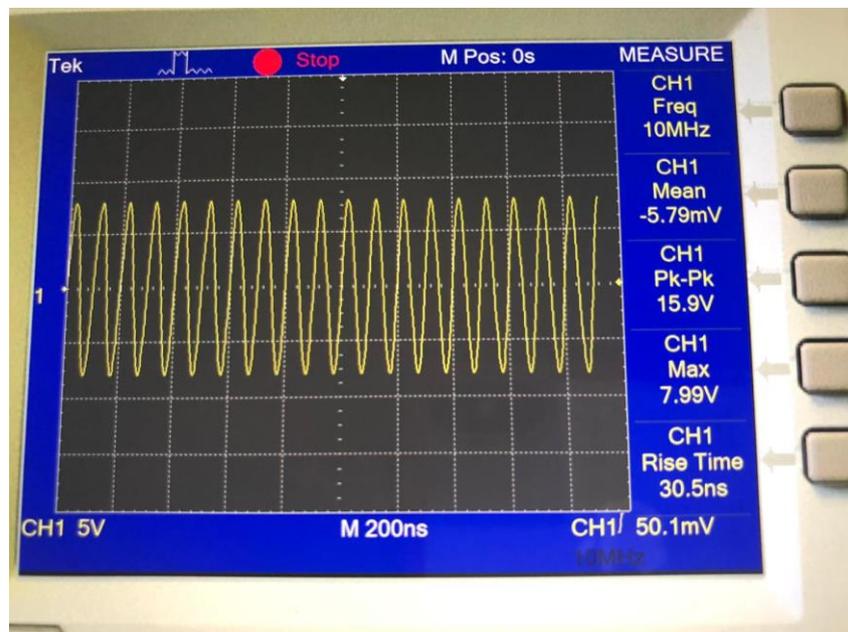


Figura 11: Resultado Oscilador Colpitts corregido a 10 MHz

Podemos observar que el oscilador se encuentra oscilando a 9.87 MHz sin embargo esto va a ser corregido con el capacitor variable.

## Mezcladores

Los mezcladores son dispositivos de vital importancia en sistemas de telecomunicación ya que permiten el desplazamiento en frecuencia de una señal de radio frecuencia a una señal intermedia sintonizada con el uso de un filtro de radio frecuencia. Para este proceso es necesario el uso de dispositivos no lineales ya que esta no linealidad permite obtener frecuencias no presentes en la entrada del circuito.

Estos circuitos por lo tanto pueden ser construidos utilizando diodos, BJTs, FETs o aun reactores saturables. Las elecciones de diseño giran sobre consideraciones de ganancia o pérdida, cifra de ruido, estabilidad, rango dinámico y la posible generación de frecuencias indeseables que produzcan intermodulación y distorsión. (Krauss & Bostian, 1980).

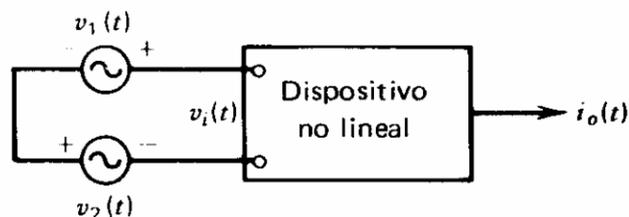


Figura 12: Dispositivo no lineal usado como mezclador

La figura 12 nos muestra un mezclador conformado por dos voltajes de entrada a dos frecuencias diferentes. Si este dispositivo no tuviera la no linealidad, el voltaje o corriente en la salida de este dispositivo contendría solo las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ .

La relación entre las entradas y salidas de un mezclador generalmente puede ser expresada utilizando una serie de Taylor.

$$i_o(t) = I_o + av_i(t) + b[v_i(t)^2] + c[v_i(t)^3] + \dots$$

En la ecuación anterior podemos ver que  $I_o$  representa a la corriente de salida en reposo y  $v_i(t)$  es la suma de los efectos de todas las señales de entrada. Si nuestra entrada fuera con una sola frecuencia entonces el circuito va a generar armónicas de esta frecuencia, sin embargo, si las entradas son de diferentes frecuencias entonces el mezclador va a generar frecuencias de suma y diferencia que son generadas por el término cuadrático, mismas que son llamadas productos de intermodulación de segundo orden.

El proceso de multiplicación dentro del dispositivo se da de la siguiente forma, supongamos que la característica de transferencia de un circuito es la siguiente:

$$i_o(t) = av_i(t) + b[v_i(t)^2]$$

La entrada de este dispositivo es:

$$v_i(t) = V_1 \cos(w_1 t) + V_2 \cos(w_2 t)$$

Si colocamos nuestros voltajes de entrada en la segunda ecuación obtenemos:

$$i_o(t) = a V_1 \cos(w_1 t) + a V_2 \cos(w_2 t) + b V_1^2 \cos^2 w_1 t + b V_2^2 \cos^2 w_2 t + 2b V_1 V_2 \cos(w_1 t) \cos(w_2 t)$$

Las dos primeras partes de esta ecuación no son de interés en este caso en particular para el análisis teórico del mezclador, sin embargo, es muy importante tener en cuenta que el circuito practico estas frecuencias se encuentran presentes por lo que es completamente necesario realizar un filtrado.

$$b V_1^2 \cos^2 w_1 t = b/2x V_1^2 (1 + \cos 2w_1 t)$$

$$2V_1 V_2 \cos(w_1 t) \cos(w_2 t) = b V_1 V_2 [\cos(w_1 - w_2)t + \cos(w_1 + w_2)t]$$

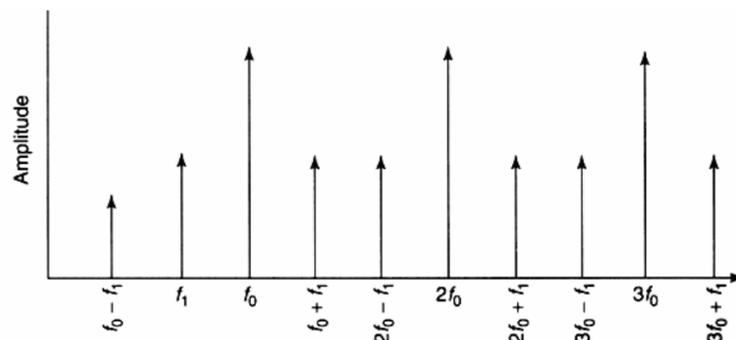


Figura 13: Producto de la mezcla donde la frecuencia RF,  $f_1$  es mezclada con frecuencia del oscilador local,  $f_0$ .

Como se puede observar la tarea fundamental de un mezclador es la de realizar conversiones en frecuencia sin distorsión. Como se mencionó anteriormente este mezclador dará una salida con armónicos por lo que es necesario el filtro.

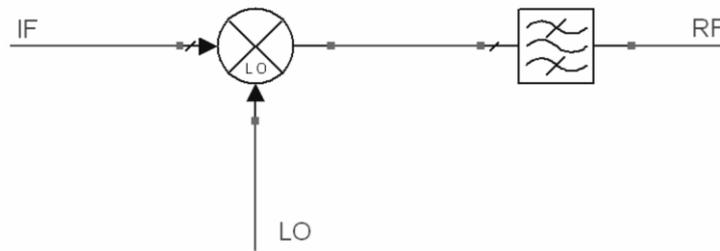


Figura 14: Conversor de Frecuencia

### Mezclador BJT con Oscilador Local en el Emisor

Los mezcladores realizados con BJTs tienen una ganancia aproximada de 20 dB y la potencia requerida del oscilador local es menor en BJTs que en FETs sin embargo la distorsión de intermodulación es mayor en mezcladores realizados con BJTs. La pureza de la sinusoidal de la frecuencia intermedia es complicada de obtener es por este motivo que usualmente se requiere que la entrada de radio frecuencia este separada de la entrada del oscilador local y que las señales de RF, LO, y IF estén sintonizadas a diferentes frecuencias.

En el siguiente grafico podemos apreciar un espectro de las señales que se podrían encontrar en la salida de un mezclador.

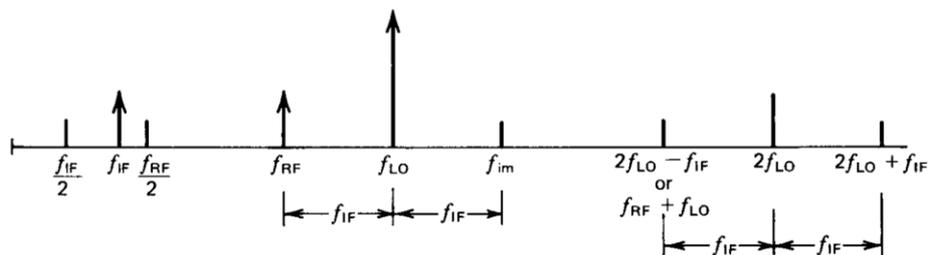


Figura 15: Espectro de señales que podrían encontrarse en la salida de un mezclador.

A pesar de que los mezcladores realizados con BJTs tienen una alta ganancia en la conversión y una baja figura de ruido tienden a producir una intermodulación de tercer orden (IMD) bastante grande y tiene un rango dinámico pequeño. Esto significa que debemos de alguna forma controlar la ganancia para de esta manera tener un mayor rango de RF que puede ser tratado por este mezclador.

El siguiente análisis permite observar como la distorsión de tercer orden es calculada en un mezclador con BJTs. Asumimos que dos señales de entrada tienen la forma:

$$v_1(t) = V_1 \cos(\omega_1 t)$$

$$v_2(t) = V_2 \cos(\omega_2 t)$$

$$v_i(t) = V_1 \cos(\omega_1 t) + V_2 \cos(\omega_2 t)$$

La función de transferencia va a tomar la siguiente forma:

$$i_o(t) = I_o + av_i(t) + b[v_i(t)^2] + c[v_i(t)^3]$$

Los resultados obtenidos de esta ecuación se encuentran resumidos en el siguiente grafico donde podemos apreciar que en la parte  $b[v_i(t)^2]$  se encuentran los términos en las frecuencias de  $f_1 \pm f_2$ . El termino  $c[v_i(t)^3]$  contiene las frecuencias  $f_1, f_2, 3f_1, 3f_2, 2f_1 \pm f_2$  y  $2f_2 \pm f_1$ .

$$i_o = av_i + bv_i^2 + cv_i^3$$

and with inputs: **Case A** –  $v_i = V_1 \cos \omega_1 t$   
**Case B** –  $v_i = V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t$

First-Order $av_i$	Second-Order $bv_i^2$	Third-Order $cv_i^3$
CASE A		
$aV_1 \cos \omega_1 t$	$\frac{b}{2} V_1^2$ $+ \frac{b}{2} V_1^2 \cos 2\omega_1 t$	$+\frac{3c}{4} V_1^3 \cos \omega_1 t$ $+ \frac{c}{4} V_1^3 \cos 3\omega_1 t$
CASE B		
$aV_1 \cos \omega_1 t$ $+ aV_2 \cos \omega_2 t$	$\frac{b}{2} (V_1^2 + V_2^2)$ $+ \frac{b}{2} V_1^2 \cos 2\omega_1 t$ $+ \frac{b}{2} V_2^2 \cos 2\omega_2 t$ $+ bV_1 V_2 \cos (\omega_1 + \omega_2)t$ $+ bV_1 V_2 \cos (\omega_1 - \omega_2)t$	$\left( +\frac{3c}{4} V_1^3 + \frac{3c}{2} V_1 V_2^2 \right) \cos \omega_1 t +$ $\left( +\frac{3c}{4} V_2^3 + \frac{3c}{2} V_1^2 V_2 \right) \cos \omega_2 t$ $+ \frac{c}{4} V_1^3 \cos 3\omega_1 t + \frac{c}{4} V_2^3 \cos 3\omega_2 t$ $+ \frac{3c}{4} V_1^2 V_2 [\cos (2\omega_1 + \omega_2)t$ $+ \cos (2\omega_1 - \omega_2)t]$ $+ \frac{3c}{4} V_1 V_2^2 [\cos (2\omega_2 + \omega_1)t$ $+ \cos (2\omega_2 - \omega_1)t]$

Figura 16: Componentes de Salida de un Mezclador

Para el diseño de este primer mezclador debemos tener en cuenta el punto de trabajo en el que queremos poner al transistor para esto se realizará la misma polarización utilizada en el oscilador y utilizando la hoja de datos del transistor 2N2222A.

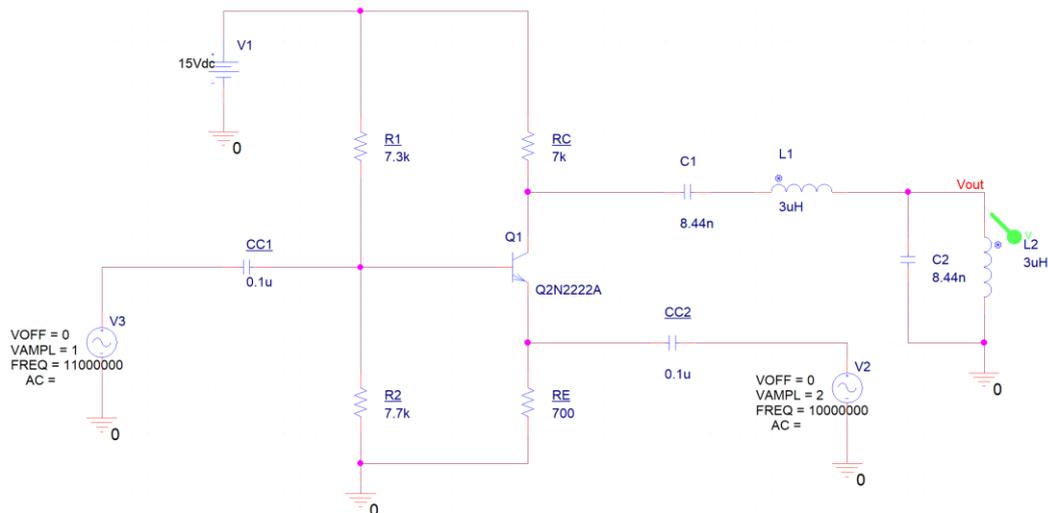


Figura 17: Mezclador BJT con Oscilador Local por el Emisor

Como se puede apreciar en la figura 17 la polarización del transistor está dada de igual manera que en el oscilador por lo que el procedimiento es similar. La entrada de Radio Frecuencia se encuentra representada con la fuente V3 y la del Oscilador local se encuentra representada con la fuente V2. En esta topología de mezclador no es necesario colocar circuitos de sintonización en la entrada de RF y OL debido a que estas ingresan por diferentes partes del transistor. Como se mencionó anteriormente este tipo de mezcladores requiere de una etapa de filtrado sintonizado a una frecuencia intermedia deseada en este caso la frecuencia intermedia (IF) deseada es de 1 MHz por lo que se procede a diseñar un filtro en serie y paralelo para controlar y filtrar todas las partes de la frecuencia intermedia.

El filtro fue calculado con la siguiente ecuación:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

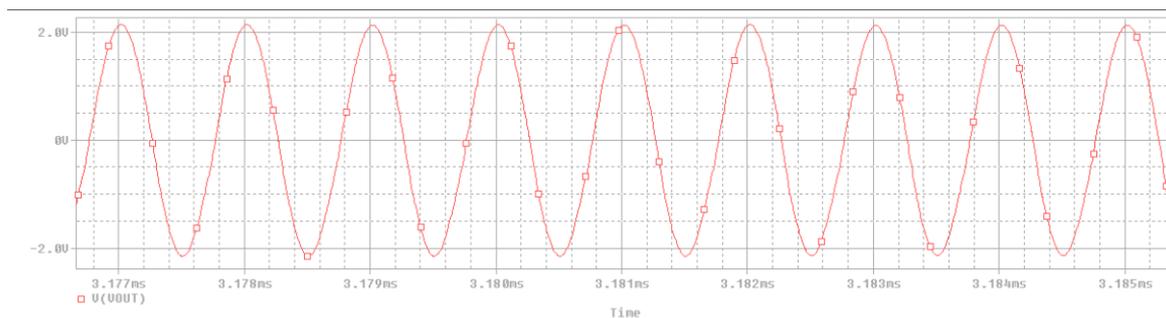


Figura 18: Simulación en función del tiempo de Mezclador BJT con Oscilador Local en el Emisor

En la figura 18 podemos observar que la onda obtenida de nuestro mezclador tiene un Voltaje pico – pico de 4.22 Voltios lo que nos da una buena ganancia a su vez vemos que

el filtrado a funcionado perfectamente al no ver ningún tipo de distorsión en la onda resultante.

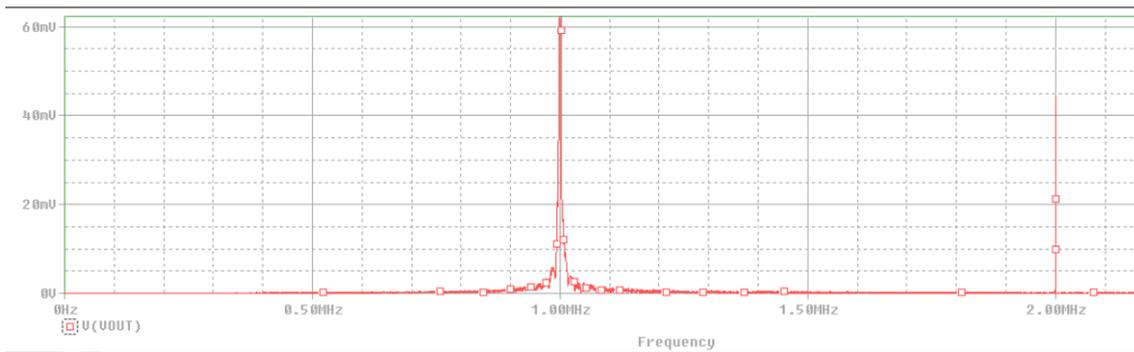


Figura 19: FFT de la respuesta de mezclador con Oscilador Local en el Emisor

En la figura 19 con la ayuda de la FFT se puede apreciar claramente que la frecuencia predominante en nuestro circuito se encuentra en 1 MHz que es la frecuencia para la que fue diseñado, apreciando también que se obtuvo un funcionamiento adecuado en las salidas es decir una estabilidad en la frecuencia intermedia. Esto se debe a que estamos utilizando diferentes ingresos tanto para OL como para RF.

### Prueba de variación de Frecuencia en el Oscilador Local

En la siguiente parte de este proyecto se efectuarán pruebas para verificar el comportamiento del circuito ante una variación en la frecuencia y amplitud.

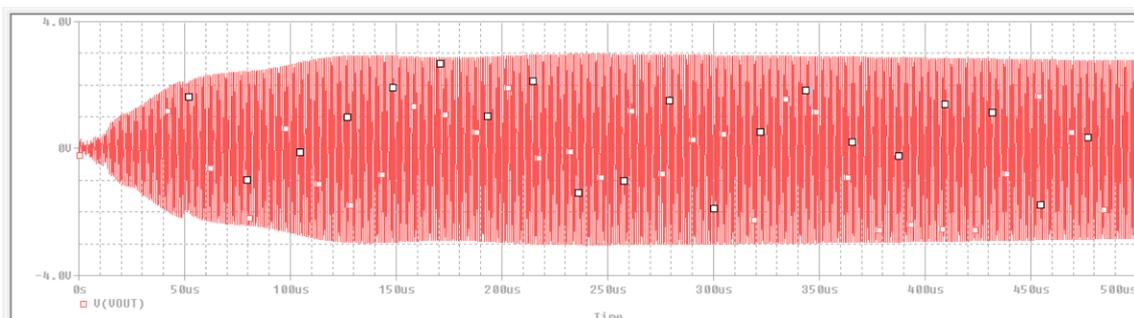


Figura 20: Simulación en función del tiempo de mezclador BJT con Oscilador Local en el emisor ante una variación de 100 Hz en OL.

En la figura 20 podemos observar que al tener una variación relativamente pequeña en la frecuencia del Oscilador Local se da una distorsión y pequeño efecto de modulación en la salida del mezclador. Esto se debe principalmente a que todos los mezcladores son diseñados con filtros o circuitos de sintonización, que son diseñados a para cumplir objetivos específicos, tales como seleccionar solo señales de frecuencias específicas.

Esta distorsión va a hacer mayor y notoria conforme la diferencia entre las frecuencias se vuelva más distante al 1 MHz para la que el circuito fue diseñado



Figura 21: Simulación en función del tiempo de mezclador BJT con Oscilador Local en el emisor ante una variación de 500 KHz en OL.

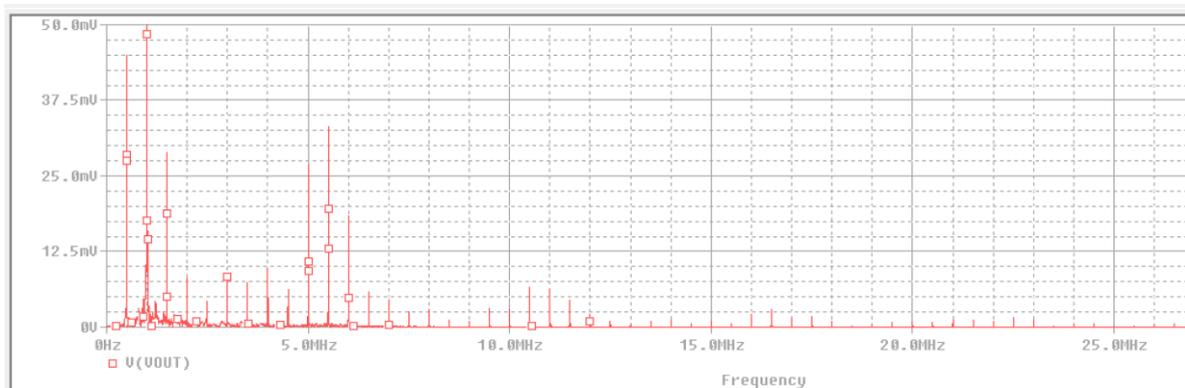


Figura 22: FFT de mezclador BJT con Oscilador Local en el emisor ante una variación de 500 KHz en OL.

En la figura 21 y figura 22 se puede apreciar lo dicho anteriormente conforme la diferencia entre frecuencias aumenta el funcionamiento del mezclador se ve gravemente afectado la señal resultante de la simulación está completamente distorsionada y en la figura 22 se puede observar que el circuito está funcionando con varias frecuencias dominantes.

### Prueba de variación de Amplitud en el Oscilador Local

En amplitud el circuito es bastante estable dentro de un rango de 1 a 8 Voltios. Al subir la amplitud del oscilador local más de este nivel el circuito comienza a distorsionarse y funcionar de manera incorrecta.

Simulación en función del tiempo de mezclador BJT con Oscilador Local en el emisor ante una variación de amplitud de 10 Voltios en OL.

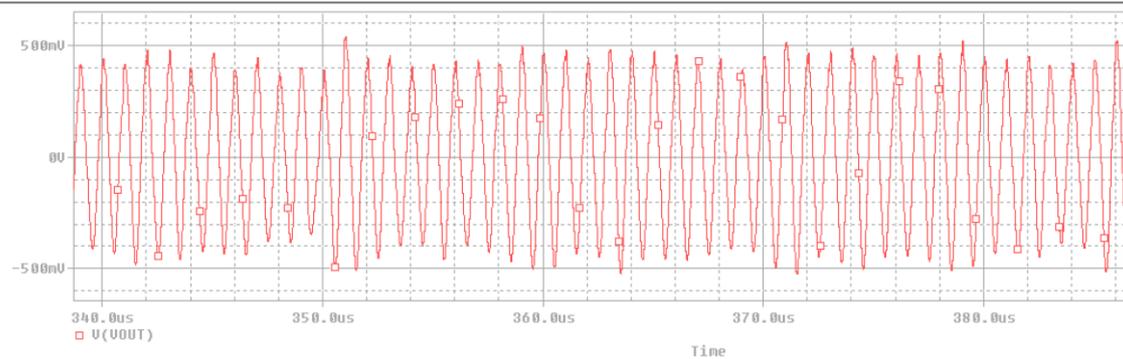


Figura 23: Simulación en función del tiempo de mezclador BJT con Oscilador Local en el emisor ante una variación de amplitud de 10 Voltios en OL.

En la figura 23 se puede apreciar la distorsión ocasionada por una amplitud en el oscilador local de 10 voltios.

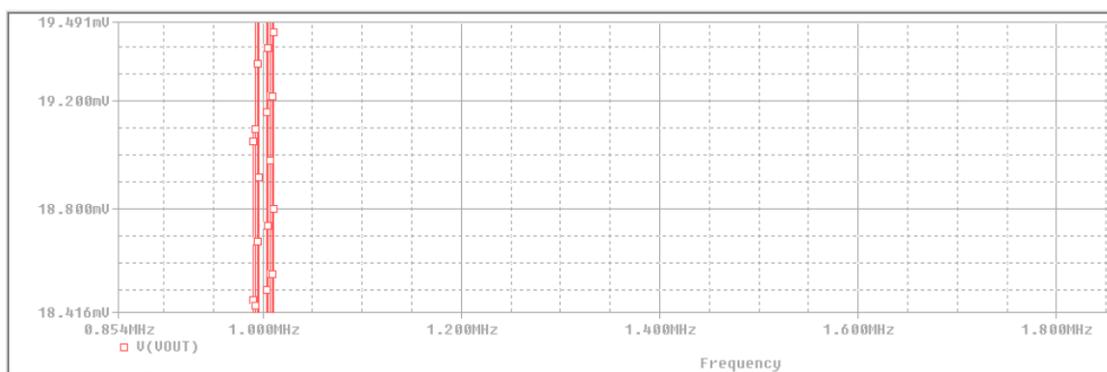


Figura 24: FFT de mezclador BJT con Oscilador Local en el emisor ante una variación de amplitud de 10 Voltios en OL.

La figura 24 deja apreciar que el oscilador está a 10 voltios funcionando con falta de estabilidad al funcionar a varias frecuencias alrededor de 1Mhz como en el caso anterior podemos determinar los parámetros de funcionamiento tanto en amplitud como en frecuencia de un mezclador BJT con radio frecuencia en la base y oscilador local en el emisor del transistor.

### Construcción

El siguiente mezclador fue construido con el uso de borneras para la polarización y las entradas de las señales de Radio frecuencia y Oscilador local. Al igual que en el caso anterior

se utilizaron potenciómetros para las resistencias de polarización del transistor. Los filtros resonantes LC fueron realizados con los mismos inductores que en el oscilador y solo se recalculo las capacitancias para obtener el filtro adecuado.



Figura 25: Parte Delantera de la Placa de Mezclador con Oscilador local por el emisor y radio frecuencia en la base.



Figura 26: Parte Trasera de la Placa de Mezclador con Oscilador local por el emisor y radio frecuencia en la base.

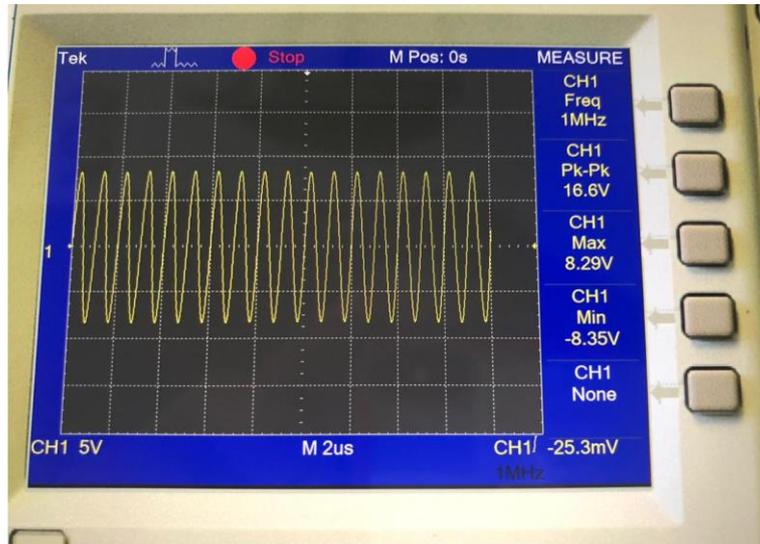


Figura 27: Resultado de Mezclador con Oscilador local por el emisor y radio frecuencia en la base

En el resultado podemos apreciar que el mezclador funciona correctamente entregando una frecuencia intermedia de 1 MHz con bastante estabilidad.

### Mezclador BJT con Oscilador Local y Radio Frecuencia en la Base

En esta topología de mezclador se conoce por la teoría que es muy difícil lograr una estabilidad en la salida esto debido a que las señales de OL y RF se están mezclando y sumando en la base del transistor, esto genera un grave problema de estabilidad en el voltaje pico – pico de la onda de frecuencia intermedia.

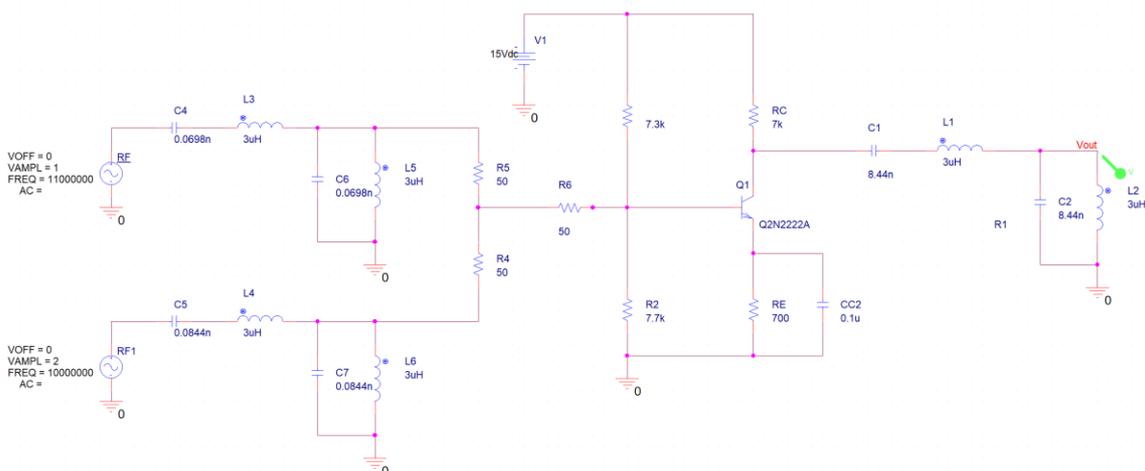


Figura 28: Mezclador BJT con LO y RF entrando en la Base

En la figura 28 se puede apreciar que una de las formas de corregir esta falta de estabilidad es colocando altas impedancias en este caso filtros sintonizados a la frecuencia de RF y de oscilador local de este modo logramos de una manera estabilizar la respuesta de nuestro circuito y evitar que cualquiera de las señales pueda afectar o distorsionar la otra

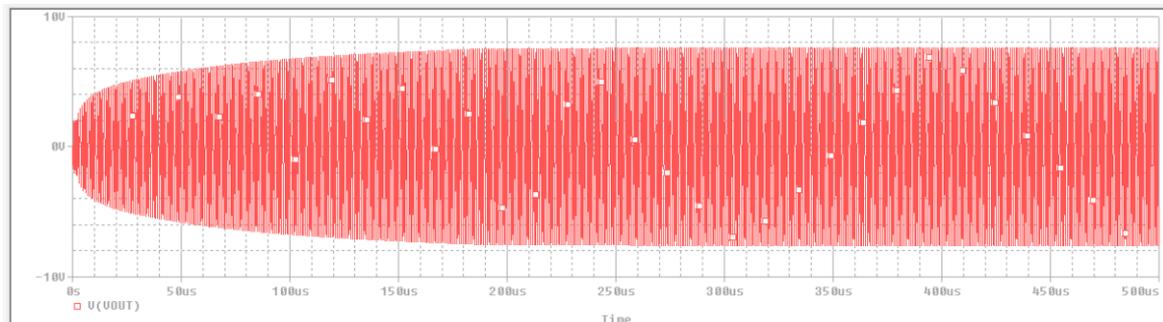


Figura 29: Simulación en función del tiempo de Mezclador BJT con LO y Rf en la Base

En la figura 29 podemos observar que los filtros han funcionado de manera correcta, permitiendo obtener una onda estable sin picos o modulaciones externas.

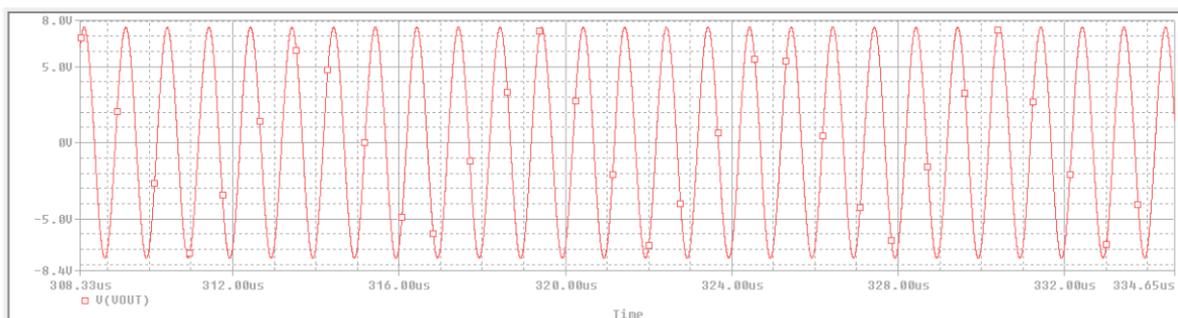


Figura 30: Simulación en función del tiempo de Mezclador BJT con LO y Rf en la Base.

En un tiempo de muestreo más corto podemos apreciar en la figura 30 que las ondas no son distorsionadas o recortadas por lo que el mezclador está funcionando correctamente en el punto adecuado. Es importante mencionar que el voltaje pico a pico de este mezclador es de 15.9 Voltios lo cual es tres veces más grande que en el mezclador anterior. Este hecho también es comprobable con la teoría ya que al ingresar las dos señales por un mismo punto las estamos sumando y el mezclador actúa como un multiplicador.

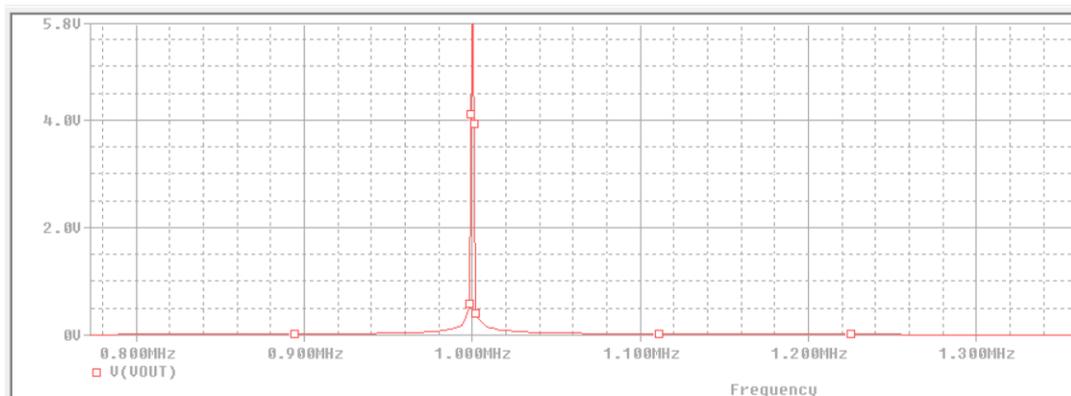


Figura 31: FFT de la respuesta de mezclador con LO y RF entrando en la Base.

Finalmente, la figura 31 nos permite observar que la frecuencia del mezclador es mucho más estable que el anterior ya que no se evidencia la producción de armónicos en el gráfico de FFT.

### Prueba de variación de Frecuencia en el Oscilador Local

Como en el caso anterior se realizarán pequeñas y grandes variaciones de frecuencia para determinar los parámetros de funcionamiento de este circuito. A diferencia que el circuito anterior este tiene una tolerancia más alta ante variaciones de frecuencia. Ante una variación de 100 Hz el circuito continuo completamente estable en su funcionamiento.

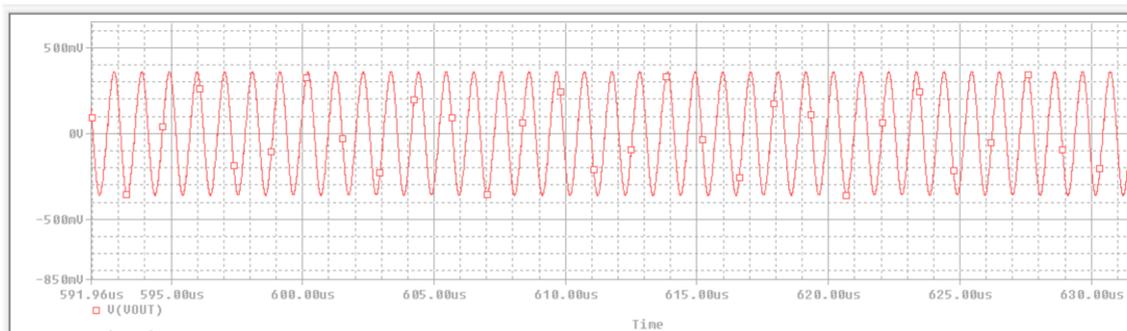


Figura 32: Simulación en función del tiempo de mezclador BJT con Oscilador Local y Radio frecuencia en la base ante una variación de 50 KHz en OL.

En la figura 32 podemos apreciar que los efectos del cambio de frecuencia es un aumento o disminución en el voltaje pico a pico siendo este voltaje máximo cuando el oscilador local funciona a 10MHz que es para lo que el circuito está diseñado.

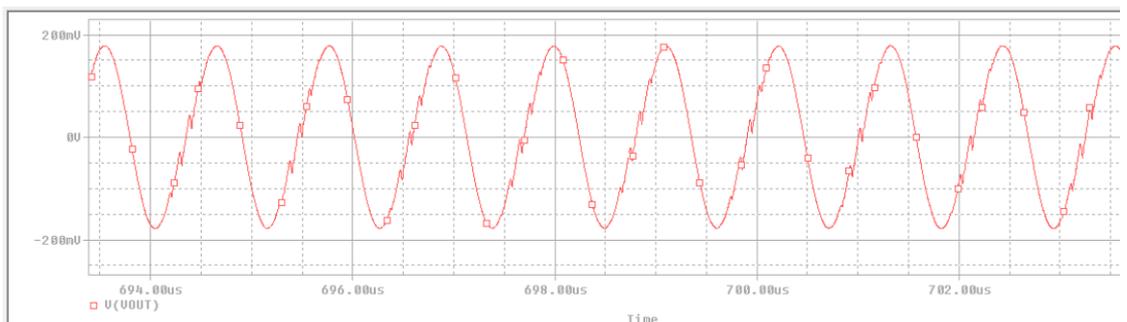


Figura 33: Simulación en función del tiempo de mezclador BJT con Oscilador Local y Radio frecuencia en la base ante una variación de 400 KHz en OL.

En la figura 33 podemos observar que la onda ya se encuentra distorsionada, sin embargo, continúa funcionando a 1 MHz y sin la presencia de oscilaciones externas o ningún tipo de modulación.

### Prueba de variación de Amplitud en el Oscilador Local

Se determinarán los límites de funcionamiento en función de la amplitud del oscilador local siendo estos desde 1 hasta 4 voltios de amplitud. Se produce el mismo efecto que al variar la frecuencia es decir la amplitud de la onda intermedia se reduce y agrande conforme varía el voltaje del oscilador local.



Figura 34: Simulación en función del tiempo de mezclador BJT con Oscilador Local y Radio Frecuencia la base del transistor ante una variación de amplitud de 10 Voltios en OL.

La figura 34 al igual que en mezclador anterior permite evidenciar que la onda queda distorsionada y sin estabilidad al usar un voltaje de 10 Voltios, sin embargo, una distorsión se puede evidenciar desde que el voltaje del oscilador local está en 5 voltios, por lo que el nivel de tolerancia ante una variación en su amplitud es menor a la de un mezclador BJT con Oscilador Local en el Emisor.

### Construcción

Para la construcción del siguiente circuito con el uso de borneras para la polarización y las entradas de las señales de Radio frecuencia y Oscilador local. Al igual que en el caso anterior se utilizaron potenciómetros para las resistencias de polarización del transistor. Los filtros resonantes LC fueron realizados con los mismos inductores que en el oscilador y solo se recalculo las capacitancias para obtener el filtro adecuado. Es necesario colocar estos filtros en las entradas de oscilador local y radio frecuencia esto con el objetivo de evitar que la suma de señales en la base del transistor afecte a su funcionamiento.



Figura 35: Parte delantera de la placa de Mezclador con Oscilador local y radio frecuencia en la base



Figura 36: Parte trasera de la placa de Mezclador con Oscilador local y radio frecuencia en la base

Resultado de Mezclador con Oscilador local y radio frecuencia en la base

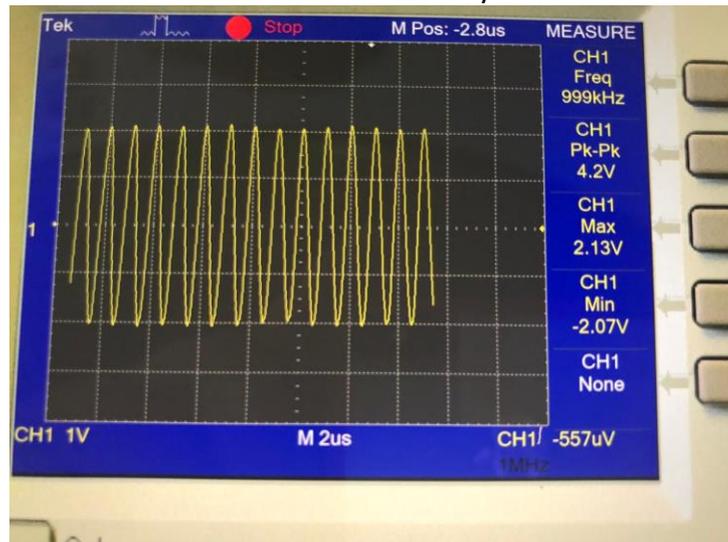


Figura 37: Resultado de Mezclador con Oscilador local y radio frecuencia en la base

En el experimento practico podemos observar que se ha obtenido el mismo resultado que en la simulación. Es visible que una frecuencia baja está envolviendo la frecuencia intermedia resultante.

## Mezclador Gilbert Cell

El mezclador Gilbert Cell utiliza un circuito lineal variante en el tiempo para obtener una multiplicación en el dominio del tiempo y por efecto un cambio en la frecuencia. El funcionamiento de una célula Gilbert es de multiplicar en el dominio del tiempo la entrada RF por una onda cuadrada con un valor de +1 o -1 a la frecuencia del Oscilador Local. El mezclador Gilbert utiliza el concepto del par diferencial para aumentar la estabilidad del circuito, sin embargo, este mezclador necesita ser construido con transistores pareados para funcionar de una manera adecuada. Lo que conlleva a un problema de costos de fabricación es por ese motivo que el objetivo es diseñar 3 mezcladores Gilbert el primero va a ser diseñado con transistores pareados, el segundo va a ser diseñado con transistores variados su beta y finalmente se propondrá un circuito con el cual se busca corregir esta disparidad de fabricación de los transistores.

Empezaremos realizando un análisis de las ecuaciones presentes en una célula Gilbert:

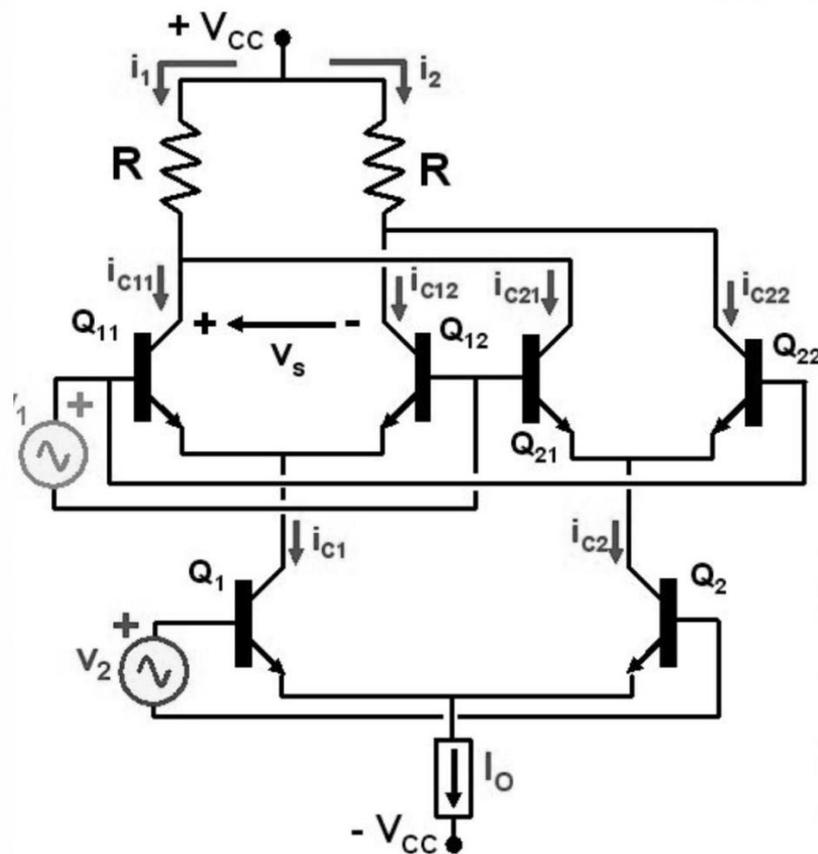


Figura 38: Esquema de Célula Gilbert

Voltaje de salida de la Célula Gilbert en función de corrientes

:

$$V_s = (i_2 - i_1)R = (i_{c12} + i_{c22} - i_{c11} - i_{c21})R$$

Corrientes de nodos Célula Gilbert:

$$i_{c11} \approx \alpha \frac{i_{c1}}{2} + 0.25 \alpha i_{c1} \frac{V_1}{V_t}$$

$$i_{c12} \approx \alpha \frac{i_{c1}}{2} - 0.25 \alpha i_{c1} \frac{V_1}{V_t}$$

$$i_{c21} \approx \alpha \frac{i_{c2}}{2} - 0.25 \alpha i_{c2} \frac{V_1}{V_t}$$

$$i_{C22} \approx \alpha \frac{i_{C2}}{2} + 0.25 \alpha i_{C2} \frac{V_1}{V_t}$$

$$i_{C1} \approx \alpha \frac{I_o}{2} + 0.25 \alpha I_o \frac{V_2}{V_t}$$

$$i_{C2} \approx \alpha \frac{I_o}{2} - 0.25 \alpha I_o \frac{V_2}{V_t}$$

$$i_{C12} - i_{C11} \approx -0.5 \alpha i_{C1} \frac{V_1}{V_t} = -0.25 \alpha^2 I_o \frac{V_1}{V_t} - 0.125 \alpha^2 I_o V_1 \frac{V_2}{V_t^2}$$

$$i_{C22} - i_{C21} \approx 0.5 \alpha i_{C2} \frac{V_1}{V_t} = 0.25 \alpha^2 I_o \frac{V_1}{V_t} - 0.125 \alpha^2 I_o V_1 \frac{V_2}{V_t^2}$$

Voltaje de Salida de la Celda Gilbert viene siendo entonces:

$$V_s \approx -0.25 \alpha^2 R I_o V_1 \frac{V_2}{V_t^2}$$

Para ser utilizado como un mezclador la celda Gilbert debe recibir dos voltajes de entrada  $V_1$  y  $V_2$  correspondientes a las señales de radio frecuencia y oscilador local respectivamente, por eso motivo se realizará el análisis colocando estas señales:

$$V_1 = V_1 \cos w_1 t$$

$$V_2 = V_2 \cos w_2 t$$

Entonces tenemos que:

$$V_s = -0.25 \alpha^2 R I_o (V_1 \cos w_1 t)(V_2 \cos w_2 t) \frac{1}{V_t^2}$$

De esta ecuación podemos obtener las componentes de frecuencia tanto de diferencia en  $f_1$  y  $f_2$  como de suma de las frecuencias en el caso específico de este proyecto buscamos la ecuación de diferencia entre radio frecuencia y oscilador local.

$$V_s = -0.25 \alpha^2 R I_o \frac{1}{V_t^2} V_1 V_2 \cos(w_1 - w_2)t$$

Para mejorar la estabilidad del mezclador Gilbert se utilizará como fuente de corriente polarización un espejo de corriente que será construido de la siguiente forma:

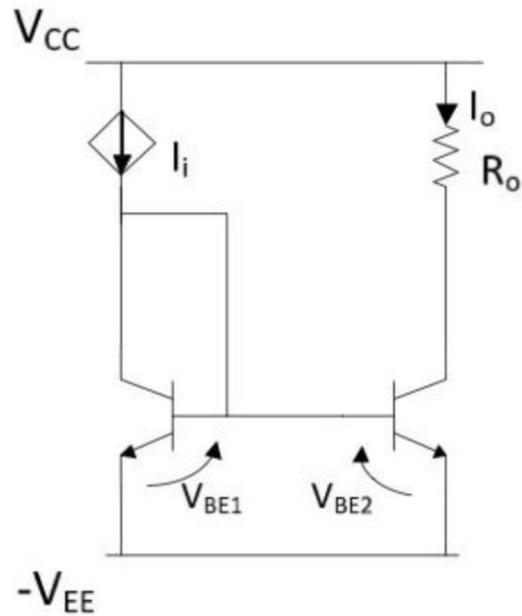


Figura 39: Esquema Espejo de Corriente

$$I_C = I_{SAT} e^{\frac{V_{be}}{V_{th}}} \left( 1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right)$$

$$I_i = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_{C1} + I_{B2} \approx I_{C1}$$

$$I_i = I_{C1} = \beta \frac{I_B}{2} = I_{C2} = I_o$$

Las ecuaciones anteriores se cumplirán a la perfección si los transistores son completamente iguales al no serlo se debe tomar en cuenta las diferencias del  $V_{CE}$

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{\left( 1 + \frac{V_{CE2}}{V_A} \right)}{\left( 1 + \frac{V_{CE1}}{V_A} \right)}$$

## Mezclador Gilbert con Transistores Pareados

El mezclador Gilbert funciona mucho mejor cuando se lo utiliza con transistores pareados, es por eso que usualmente son construidos con dentro de circuitos integrados donde esta pariedad es mas facil de conseguir.

Para el siguiente circuito se utilizo una simulacion en la cual los transistores son completamente iguales por lo que se esta evitando el problema usual de su construccion fuera de un integrado

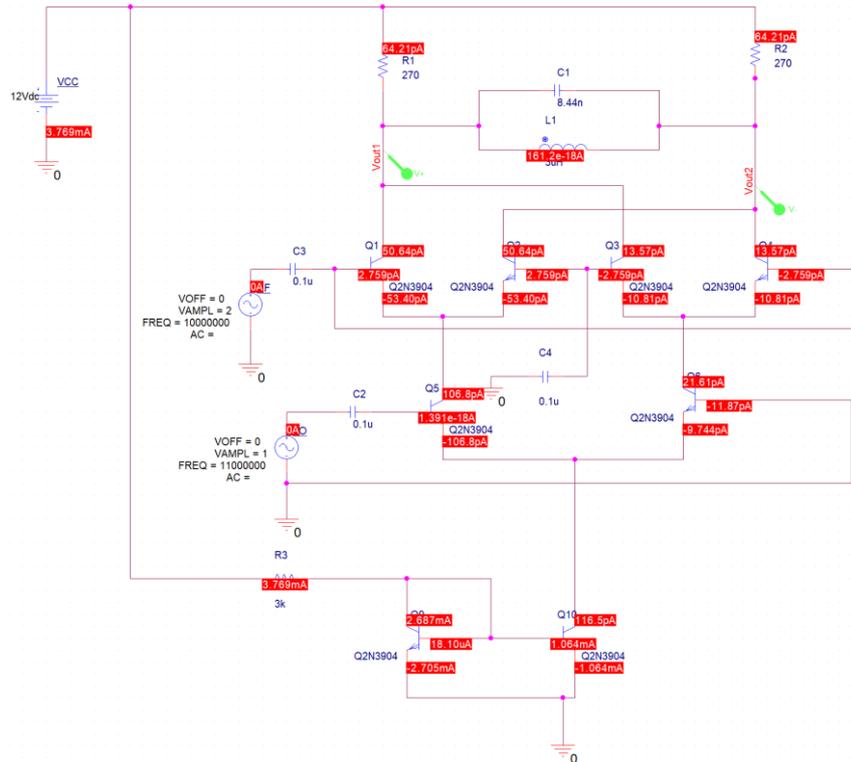


Figura 40: Esquema Mezclador Gilbert con frecuencia intermedia de 1 MHz usando transistores pareados

En la figura 40 podemos ver como todos los nodos del mezclador se encuentran a un mismo nivel de corriente y los que están unidos se encuentra al mismo nivel de voltaje esto evita que se dé una distorsión se observara en el siguiente circuito.

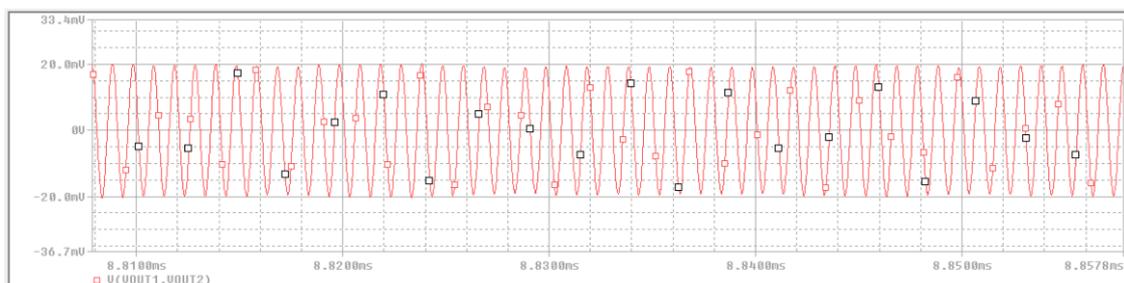


Figura 41: Simulación en función del tiempo de Mezclador Gilbert con frecuencia intermedia de 1 MHz usando transistores pareados

De la figura 41 se puede apreciar que la amplitud del mezclador es de 20 mV con una forma constante y no se ve ninguna onda más grande o pequeña que otra todas se encuentran a la misma distancia lo que demuestra que la paridad en los transistores no produce esta clase de interferencias.

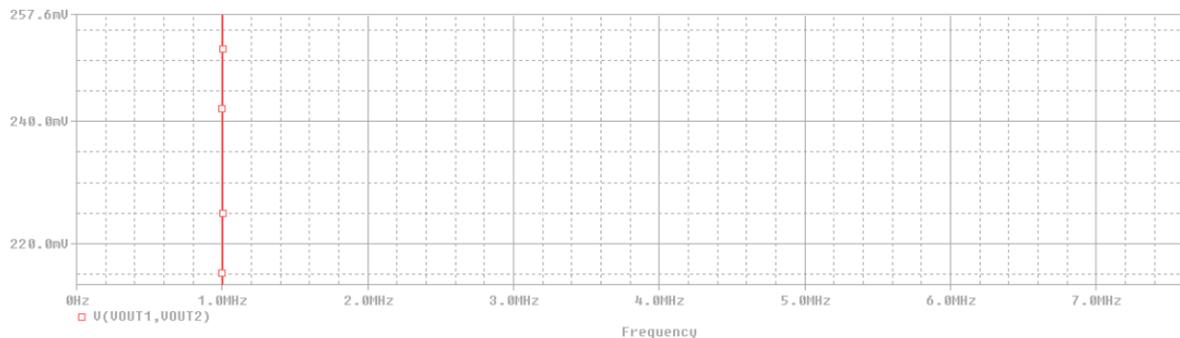


Figura 42: FFT de Mezclador Gilbert con frecuencia intermedia de 1 MHz usando transistores pareados

Finalmente, en la figura 42 con la ayuda de la FFT tenemos la frecuencia de trabajo del circuito en esta podemos observar que el circuito se encuentra oscilando a 1 MHz la cual es la frecuencia para la que fue diseñado.

Como en los circuitos precedentes se procedió a buscar parámetros de funcionamiento del circuito. El circuito se puede soportar una gran variación de frecuencias en el oscilador local siendo la frecuencia intermedia afectada solamente cuando la variación supera los 50 KHz. Al superar este rango obtenemos una onda completamente distorsionada como en el caso de los circuitos precedentes.

En el caso de la amplitud tiene un funcionamiento desde 1 Voltio hasta 9 Voltios antes de distorsionar y funcionar de manera incorrecta.

### Mezclador Gilbert con Transistores no Pareados

El mezclador gilbert al tener un funcionamiento muy parecido a un amplificador diferencial necesita que su nivel de pariedad sea muy bueno para evitar variaciones en el  $V_{CE}$ . Esto es casi imposible de conseguir cuando se lo construye con transistores comerciales ya que estos no son construidos pareados y para obtener ese tipo de transistores el costo es elevado.

Con el afan de observar lo que produce esta dispariedad se procedera al modificar los componentes del circuito anterior. La edicion sera principalmente en el  $\beta$  de los transistores. Estos transistores editados pueden ser apreciados en la figura 44.

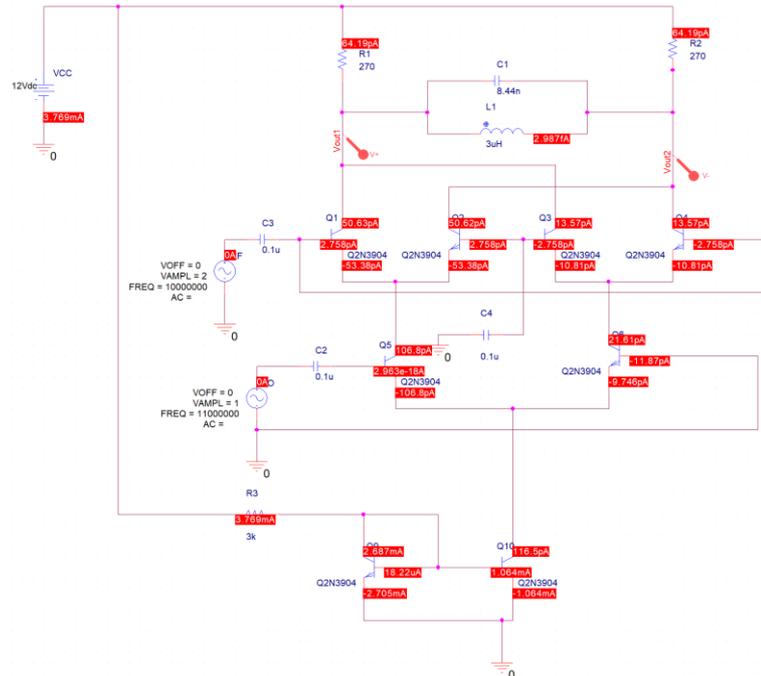


Figura 43: Esquema Mezclador Gilbert con frecuencia intermedia de 1 MHz usando transistores no pareados

En la figura 43 se puede observar como esta dispariedad en los  $\beta$  comienza a afectar la polarizacion de los transistores y a mover su punto de trabajo para el que estaban disenados, aunque la variacion no es grande en la siguiente figura podemos ver lo que provoca en el funcionamiento del mezclador.

	Q2N3904C	Q2N3904E	Q2N3904D	Q2N3904B
LEVEL	1	1	1	1
IS	6.734000E-15	6.734000E-15	6.734000E-15	6.734000E-15
BF	410	415	405	408
NF	1	1	1	1
VAF	74.03	74.03	74.03	74.03
IKF	.06678	.06678	.06678	.06678
ISE	6.734000E-15	6.734000E-15	6.734000E-15	6.734000E-15
NE	1.259	1.259	1.259	1.259
BR	.7371	.7371	.7371	.7371
NR	1	1	1	1
ISS	0	0	0	0
RE	10	10	10	10
RC	1	1	1	1
CJE	4.493000E-12	4.493000E-12	4.493000E-12	4.493000E-12
VJE	.75	.75	.75	.75
MJE	.2593	.2593	.2593	.2593
CJC	3.638000E-12	3.638000E-12	3.638000E-12	3.638000E-12
VJC	.75	.75	.75	.75
MJC	.3085	.3085	.3085	.3085
KCJC	1	1	1	1
CJS	0	0	0	0
VJS	.75	.75	.75	.75
TF	301.200000E-12	301.200000E-12	301.200000E-12	301.200000E-12
XTF	2	2	2	2
VTF	4	4	4	4
ITF	4	4	4	4
TR	239.500000E-09	239.500000E-09	239.500000E-09	239.500000E-09

Figura 44: Transistores con  $\beta$  editado de Mezclador Gilbert no pareado

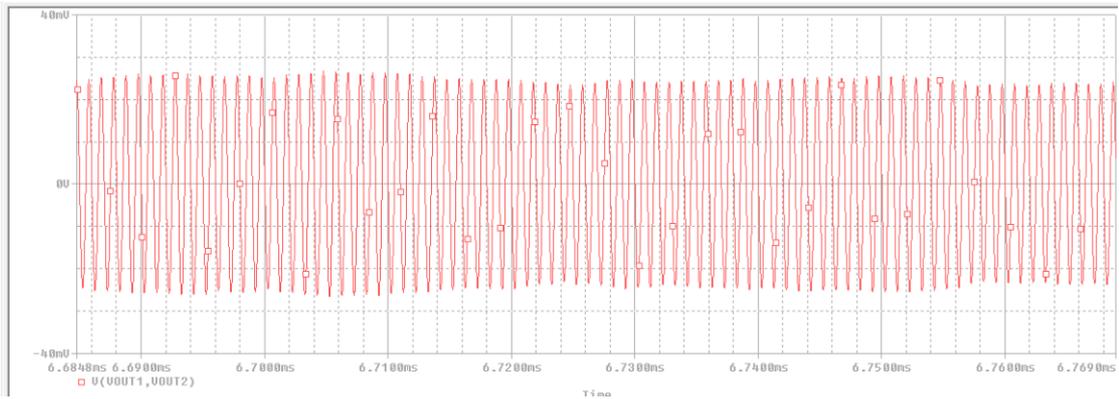


Figura 45: Simulación en función del tiempo de Mezclador Gilbert con frecuencia intermedia de 1 MHz usando transistores no pareados

En el grafico 45 se observa la pequeña frecuencia que envuelve a la frecuencia intermedia generada por el mezclador. Este es el principal problema de utiliza transistores no pareados esa diferencia de polarización generada por los diferentes  $\beta$  provoca variaciones en la ganancia del circuito y esto genera que unas ondas sean más grandes que otras.

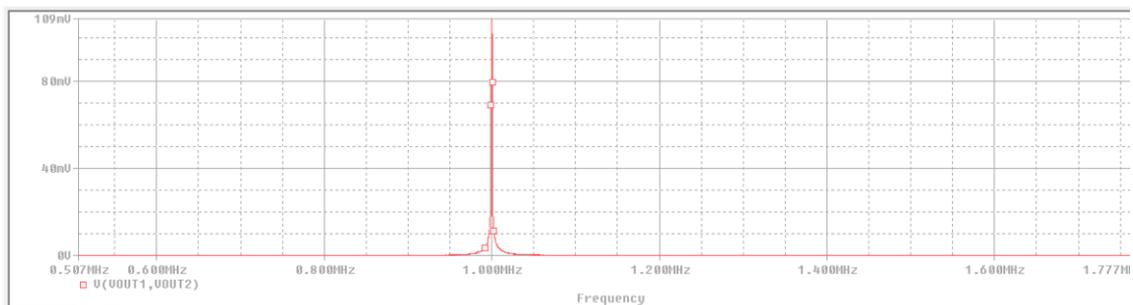


Figura 46: FFT de Mezclador Gilbert con frecuencia intermedia de 1 MHz usando transistores no pareados

Si se observa la figura 46 logramos apreciar como existen más frecuencias dentro del grafico de FFT esto se da a que al tener estos altos y bajos la onda de frecuencia intermedia esta se encuentra rodeada por una muy baja frecuencia que está por encima en el grafico 45.

Los parámetros de funcionamiento son similares al mezclador Gilbert con transistores pareados con la diferencia de que se puede apreciar la modulación generada por la disparidad.

### Mezclador Gilbert con Divisores de Voltaje.

Con la finalidad de mejorar el funcionamiento de un mezclador Gilbert construido con transistores comerciales se utilizan divisores de voltaje para polarizar cada punto de las uniones de los transistores, de esta manera se busca equilibrar y corregir la variación generada por los  $\beta$  diferentes de cada transistor. El objetivo de este circuito es la obtención de una frecuencia intermedia a 1 MHz sin la pequeña frecuencia envolvente en los puntos máximos y mínimos de la onda.

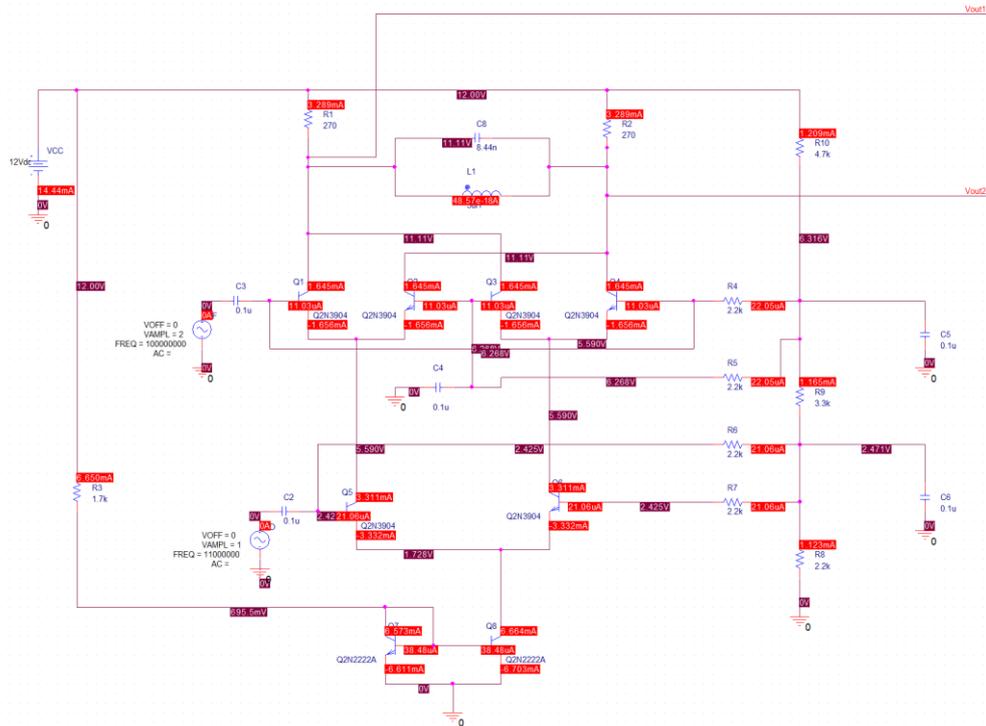


Figura 47: Esquema mezclador Gilbert con divisores de voltaje

En el esquema del circuito mezclador Gilbert con divisor de voltaje se puede apreciar como los voltajes en los nodos están igualados, esto ayuda a mantener la estabilidad del circuito y con esto se puede conseguir evitar la frecuencia envolvente que se tenía en los mezcladores previos.



Figura 48: Simulación en Dominio del tiempo de mezclador Gilbert con divisor de voltaje

En la figura 48 se puede ver que el problema generado por las diferencias en los transistores ha logrado ser controlado, obteniendo ondas sin ningún tipo de frecuencia

envolvente. Como en todo mezclador es necesario el uso de un filtro de sintonización, sin embargo, en este caso en particular se utilizaron un filtro resonante serie y un filtro resonante paralelo conectados al primer filtro resonante paralelo. Esto ayudo a filtrar de mejor manera la frecuencia intermedia y a obtener una salida limpia.

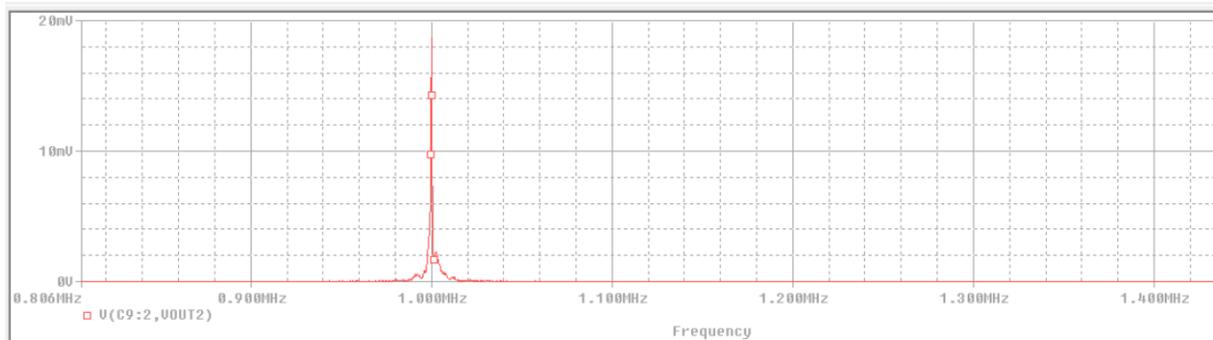


Figura 49: FFT de mezclador Gilbert con divisor de voltaje

En la figura 49 nos deja ver que el circuito está funcionando a la frecuencia de 1 MHz por lo que la diferencia entre Radio frecuencia y Oscilador local está siendo calculada correctamente.

### Construcción

La construcción del mezclador Gilbert tuvo un inconveniente en el diseño de caminos debido a que eran necesarias muchas conexiones para usar la serie de resistencias diseñadas para estabilizar el circuito. Fue necesario el uso de dos cables para unir la base de los transistores, se tomó en cuenta que debido a la frecuencia de trabajo a la que se encuentra el circuito estos inductores extra no afectan al funcionamiento general del mezclador, por este motivo no fue necesario el uso de cables más anchos. El filtro resonante utilizado esta sintonizado al igual que en los mezcladores anteriores a 1 MHz por lo que se utilizó el mismo filtro que en los demás mezcladores.

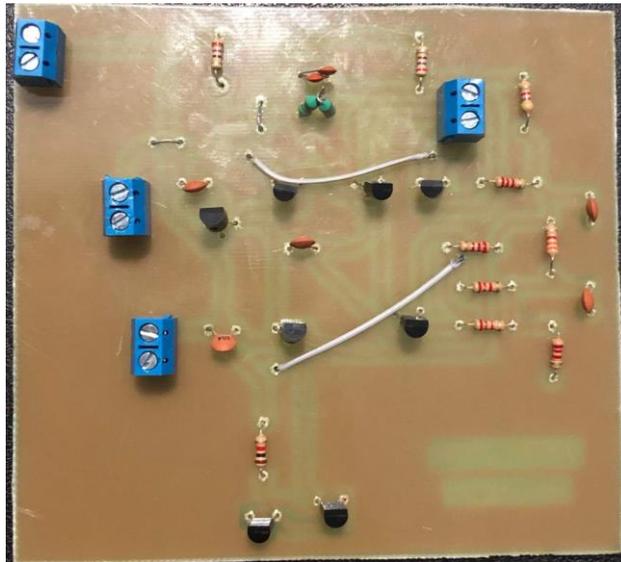


Figura 50: Parte Delantera de la placa Mezclador Gilbert

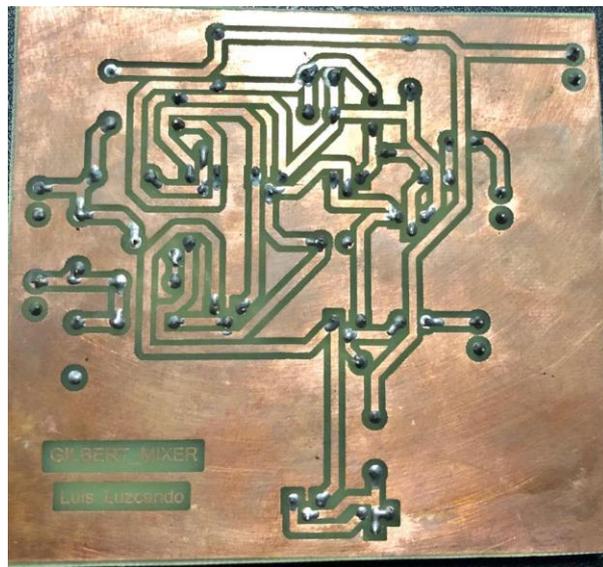


Figura 51: Parte Trasera de la placa Mezclador Gilbert

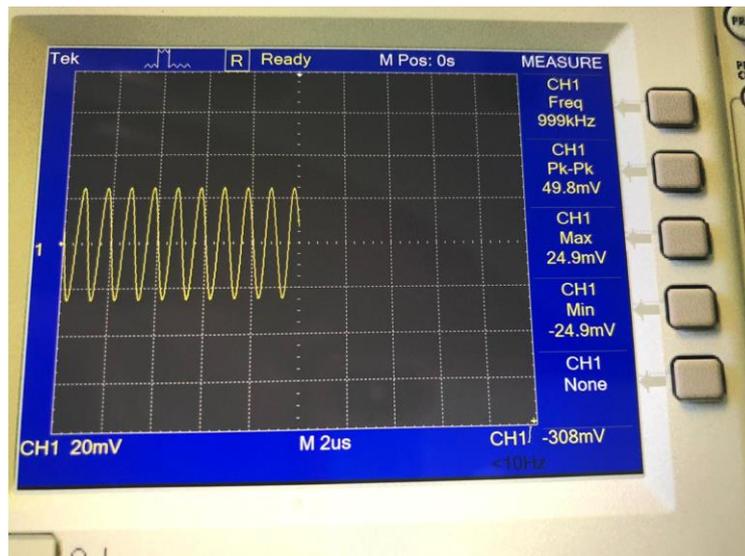


Figura 52: Resultado experimental mezclador Gilbert

En la figura 52 podemos observar el correcto funcionamiento del mezclador Gilbert que al ser polarizado con la ayuda de resistencias se logró mantener una frecuencia de 1 MHz, así como regular el voltaje mínimo y máximo de la onda.

## CONCLUSIONES

Los circuitos mezcladores son de vital importancia en los dispositivos de telecomunicación. Sin embargo, detalles importantes de su diseño y funcionamiento no aparecen claramente en los textos. En este proyecto se encontraron métodos de diseño que ayudan a que los mezcladores tengan un mejor funcionamiento y precisión al momento de ser diseñados por un ingeniero.

En el caso del oscilador local se utilizó un oscilador colpitts el cual fue implementado con un seguidor de emisor que tiene como objetivo proteger la señal de salida del oscilador local. De esta manera se está evitando que se mezclen las señales de frecuencia intermedia o radio frecuencia. De esta manera se evita que en un sistema de comunicación la señal del oscilador local ingrese a la antena que esta recibiendo la señal de radio frecuencia. Se debe tomar muy en cuenta la relación del divisor de voltaje capacitivo ya que esta permite controlar la amplitud de salida. También es necesario cumplir con las reglas de diseño para evitar que la oscilación se detenga después de un determinado tiempo.

Los mezcladores no balanceados fueron implementados con el uso del transistor Q2N2222A. Estos mezcladores necesitan por sus características de no linealidad el uso de filtros resonantes en serie y paralelo sintonizados a la frecuencia intermedia requerida. Esto se debe a la naturaleza del proceso y a que aparte de los productos de intermodulación pueden existir más problemas de deterioro de la señal. Uno de estos problemas es la frecuencia imagen que es igual a  $2f_{LO} + f_{IF}$  y es muy similar a la onda deseada, pero con un desplazamiento en frecuencia. Este tipo de problemas son solucionables con el uso de filtros.

En el caso del segundo mezclador en el que la señal de radio frecuencia y oscilador local se encontraban ingresando por la base se generó frecuencias intermedias que provocaban productos de intermodulación cerca de la radio frecuencia  $|mf_{LO} \pm nf_i| = f_{RF}$ . para solucionar este problema se colocaron filtros resonantes en serie y paralelo a la entrada de estas señales.

El mezclador Gilbert por otro lado al ser un dispositivo balanceado tiene la ventaja de eliminar una parte de estos productos de intermodulación. Pero tiene la desventaja de que no es fácil de construir utilizando transistores comerciales. Mediante el diseño y simulación de mezcladores Gilbert pareados y no pareados se pudo determinar el efecto de estos transistores en la señal de frecuencia intermedia obtenida. Dando como resultando en el circuito no pareado una inestabilidad en la señal de salida generando que una frecuencia más pequeña recubra la señal con la frecuencia deseada. Para solucionar este problema se utilizó un mezclador Gilbert polarizado con divisores de voltaje de esta manera se logró controlar un

poco mas esta disparidad y para eliminar completamente la frecuencia envolvente se utilizaron tres filtros resonantes diseñados a la frecuencia intermedia deseada.

Finalmente se procedió a construir los cuatro circuitos diseñados con el uso de software de diseño para PCB. Se comprobó que los circuitos funcionan de manera correcta y las respuestas obtenidas fueron satisfactorias comparadas a la teoría, teniendo siempre en cuenta las pérdidas generadas en las placas. En la construcción del mezclador Gilbert por la cantidad de elementos fue necesario el uso de conexiones externas, mismas que son inductores en el circuito, pero debido a la frecuencia a la que se trabajó estos no influyeron en el funcionamiento general de la placa. Para el oscilador colpitts se utilizaron capacitores variables con el objetivo de ajusta la frecuencia de oscilación a deseada.

En conclusión, se pudo estudiar los circuitos mezcladores y su señal de frecuencia intermedia resultante ante la variación de sus puertos de entrada y tres topologías. Por otro lado, se logró utilizar un mezclador Gilbert con transistores no pareados que no se vea afectado en gran medida por esta desventaja. Sin embargo, se utilizó más filtros y dispositivos que en un mezclador Gilbert pareado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gonzalez, G. (2006). Foundations of Oscillator Circuit Design. Massachusetts: Artech House, Inc.
- Krauss, H., & Bostian, C. (1980). Solid State Radio Engineering. U.S.: John Wiley & Sons, Inc.
- Grebennikov, A. (2007). RF and Microwave Transistor Oscillator Design. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.
- Clarke, K., & Hess, D. (1978). Communication Circuits Analysis and Design. U.S.: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Maas, S. A. (n.d.). Computer-Aided Design of RF and Microwave Mixers. Applied Wave Research, Inc, 1-8.
- Boylestad, R., & Nashelsky, L. (2013). Electronic Devices and Circuit Theory. U.S.: Pearson Education, Inc.
- Pozar, D. (2012). Microwave Engineering. U.S.: John Wiley & Sons, Inc.
- Niknejad, A. M. (2005). BJT/FET Mixers/Mixer Noise. Integrates Circuits for Communication (pp. 1-35). Berkeley: University of California.