



Departamento de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile
EL4005 - Principios de Comunicaciones

Diseño e implementación de un transmisor FM a 98.00 MHz

Alejandro Veragua Albornoz

Apollinaire Lecocq

Prof. Cesar Azurdia, Auxiliares¹, y Ayudantes²

¹Elias Valenzuela, Vicente Matus

²Alexis Sanchez, Cristian Torres, Lerko Araya, Nicolas Gonzalez

1. Introducción

Los sistemas de telecomunicaciones transmiten sus datos en bandas de frecuencias no solapadas entre sí (entre 30 Hz y 300GHz) para no generar interferencia ³, en donde la radioemisión es una pequeña fracción del espectro radioeléctrico disponible (entre 93MHz y 108 MHz) .

Existen tres sistemas básicos de modulación para transmitir señales en los sistemas de telecomunicación que dan pie a otras técnicas, estas son: **(i)** Modulación de amplitud (AM⁴), **(ii)** Modulación de fase (PM⁵), y **(iii)** Modulación en frecuencia (FM⁶). Este último será objeto de estudio, aplicado a sistema de transmisión FM, en particular se desea diseñar, caracterizar e implementar un transmisor FM.

Se utilizan básicamente dos formas de enviar información en sistemas comerciales de radioemisión: **(i)** Radio AM y **(ii)** Radio FM . El primero de estos tiene tres inconvenientes, la banda útil disponible técnicamente es muy acotada , son muy sensibles al ruido y requieren de mucha potencia para ser transmitidos (al modular, se disipa potencia en el proceso).

En el siguiente reporte se diseñará e implementará un transmisor FM a una frecuencia de sintonización 108 [MHz], posteriormente se modificará para sintonizar a 98.00 MHz. Para observar la modulación se mostrará su serie de tiempo y el diagrama de Bode para observar la respuesta en frecuencia. Sin embargo la prueba mas efectiva, es escuchar la transmisión utilizando el receptor FM de un smartphone.

³En Chile son reguladas por la Subsecretaria de Telecomunicaciones (SUBTEL)

⁴Amplitude modulation (modulación de amplitud)

⁵Phase modulation (modulación de fase)

⁶Frequency Modulation (modulación en frecuencia)

2. Marco Teórico

Los sistemas de telecomunicaciones deben transportar información, esto se realiza típicamente utilizando como referencia una señal sinusoidal. A este proceso le llamamos *modulación*, y como se mencionó existen: Modulación de amplitud, fase y frecuencia. Sin embargo no se realizaron comparaciones con la modulación de fase, y se considera un caso análogo al FM.

El proceso de modulación contiene tres señales importantes: Señal moduladora, portadora (o carrier) y señal modulada. En la modulación AM la señal se modula en la envolvente de una señal sinusoidal de frecuencia constante, mientras que en una modulación FM la información esta contenida en la frecuencia de la señal (ver (1a)).

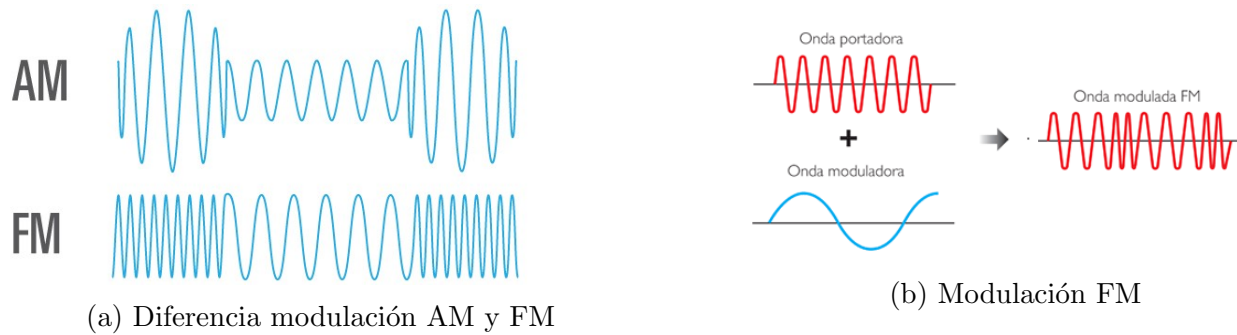


Figura 1: Modulación FM y AM.

Una señal de un canal y variante en el tiempo, con amplitud A , frecuencia $\omega = 2\pi f$ y fase $\theta(t)$ puede ser modelada como, y frecuencia instantánea:

$$S_m(t) = A \cos(\omega t + \theta(t)) \quad (2.1)$$

$$\omega_i = \frac{d}{dt}(\omega t + \theta(t)) = \omega + \theta'(t) \quad (2.2)$$

$$\theta'(t) = k_f s(\tau) \quad (2.3)$$

La variación en fase es importante porque será la responsable de la modulación. Además se ha impuesto, que la derivada de la fase es el mensaje o señal moduladora ($s(\tau)$).

De este modo, la fase instantánea ϕ_i vendrá dado por la integral de la ecuación (2.3), produciendo la modulación como:

$$S_m(t) = A \cos(\omega t + k_f \int_{-\infty}^t s(\tau) d\tau) \quad (2.4)$$

Lo mas importante de la ecuación (2.4) es que como $s(\tau)$ es una serie de tiempo, se generará una señal S_m con una frecuencia en ese valor en un instante de tiempo fijo. Al variar este último, genera la modulación de la figura 1

La integral sirve en esta formulación, porque para recuperar el mensaje (demodulación) solo hace falta derivar la señal modulada, así por medio de la regla de la cadena saldrá la derivada de la frecuencia que corresponde al mensaje.

3. Diseño

Un transmisor FM consta básicamente de cinco bloques principales. Aunque dependiendo de la implementación y el contexto algunos de ellos no son necesarios. Por ejemplo no es necesario un amplificador de potencia para aumentar el alcance de la señal, o generar independientemente la señal de carrier,

1. **Amplificador de Audio:** La señal recibida por micrófonos es del orden de los mV, de modo que es necesaria una etapa de amplificación.
2. **Modulador:** Esta etapa es la mas importante pues es aquí donde se realiza la modulación. Es posible generar una señal con frecuencia que varié proporcionalmente al mensaje, así se tendría una señal centrada en la frecuencia de carrier pero con una componente adicional correspondiente al mensaje. Se propone implementar este último método por facilidad.
3. **Amplificador RF⁷:** El alcance de la señal modulada depende de la potencia en la antena. Por lo que el uso de un amplificador que aumente la corriente provocará un patrón de radiación mas grande, llegando mas lejos la señal. Con la potencia del circuito es suficiente para obtener algunos metros, de modo que esto no se implementará.
4. **Antena:** El circuito entrega una señal eléctrica modulada, sin embargo esta debe transmitirse al exterior viajando por el aire. Esto se realiza por un transductor llamado *antena*, y la frecuencia que podamos emitir dependerá de su largo.

⁷Radio Frecuencia

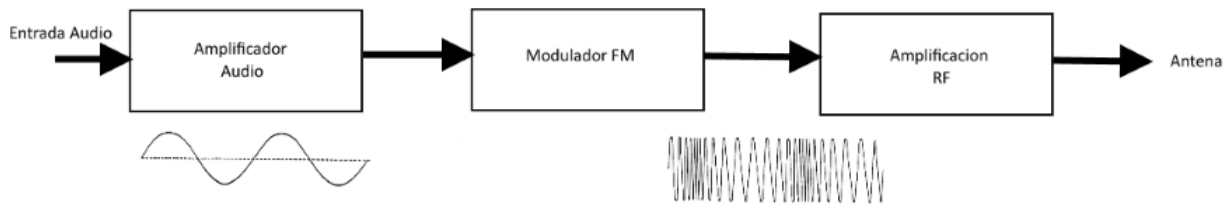


Figura 2: Diagrama de bloques modulación FM

No se aumentará el alcance de la señal, por lo que el bloque de amplificación RF no será implementado. Así, el circuito que se propone solo consta de tres etapas: Amplificación, modulación y antena.

A continuación se propone una topología que satisface los requerimientos del circuito:

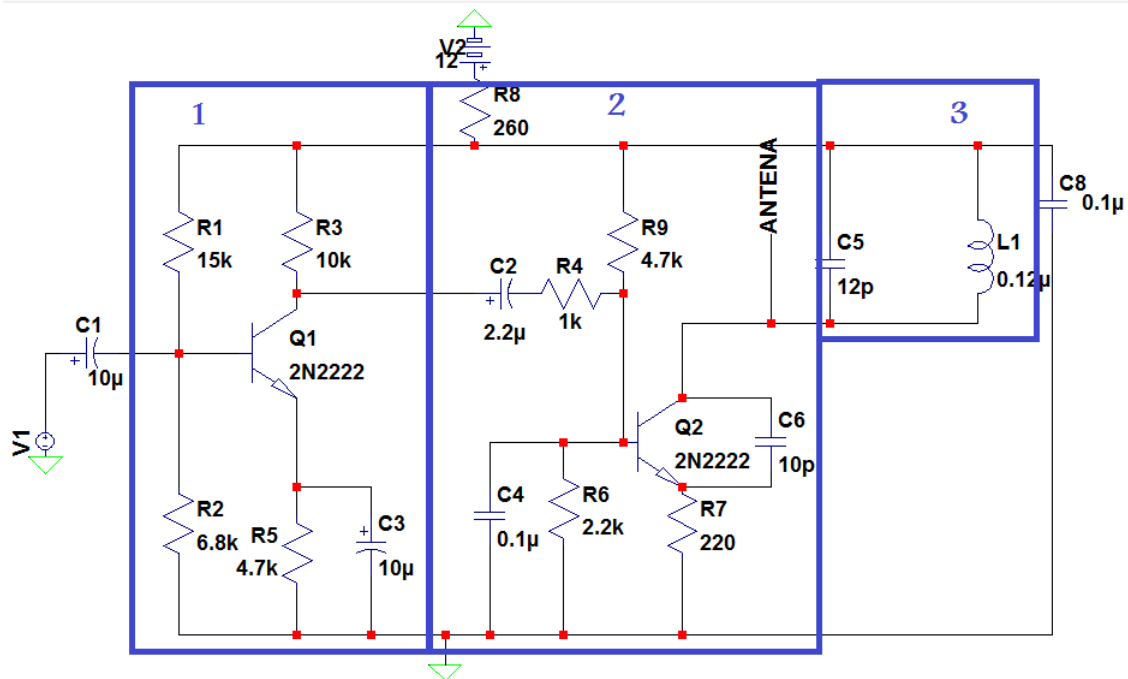


Figura 3: Topología escogida

En la figure 3, se ve que (1) corresponde a un amplificador no inversor de una etapa y polarización del transistor. El bloque (3) corresponde a un oscilador LC que resuena a la frecuencia de carrier, el transistor observa este voltaje y realimenta a través del condensador de acople. El

transistor del bloque (2) es el encargado directo de realizar la modulación, este bloque si funcionara de forma aislada provocaría una acumulación de la señal de entrada, al incluir el oscilador LC provoca que el transistor resuene a una frecuencia de carrier mas la señal de entrada acumulada. Provocando la modulación, esta señal sale directamente por la antena.

La ventaja del bloque 3 y 2, llamado *oscilador de Colpitts* es que puede resonar a mayor frecuencia que uno tradicional, cerca de los 100MHz. Ideal para la transmisión de radio frecuencia FM.

Primera etapa: Etapa de amplificación, se encuentra formada por un amplificador con polarización por un divisor de voltaje. Cabe destacar que $C_3 = 10[\mu F]$ corresponde a un condensador de *bypass*.

Se utiliza el transistor npn 2N2222, y los siguientes componentes pasivos comerciales:

- $C_3 = 10[\mu F]$ (electrolítico)
- $R_1 = 15[k\Omega]$; $R_2 = 6,8k\Omega$; $R_3 = 10k\Omega$; $R_5 = 4,7\Omega$

Etapla Moduladora: Esta etapa es donde se efectúa la modulación, el oscilador LC hace resonar la señal que tiene el transistor Q_2 (señal de entrada amplificada) a una frecuencia específica (con cierto ancho de banda), produciéndose la modulación FM. Dicho de otro modo, si el voltaje en la base de Q_2 fuese constante, entonces se observaría una oscilación constante en frecuencia, pero como el voltaje varia de acuerdo a la información de la fuente (micrófono) entonces la frecuencia también lo hace.

Para obtener la frecuencia a la que se sintonizará el transmisor FM, se tiene la siguiente ecuación de diseño:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

De este modo, para una frecuencia de sintonización $f = 108[MHz]$ y $L = 0,12\mu H$ se obtiene $C_5 = 12[pF]$. Los otros componentes pasivos son:

- Q_2 Transistor npn 2N2222
- $R_4 = 1[k\Omega]$; $R_6 = 2,2[k\Omega]$; $R_7 = 220\Omega$;
- $C_2 = 2,2[\mu F]$ (electrolítico); $C_4 = 0,1[\mu F]$ (cerámico); $C_6 = 10[pF]$ (cerámico)

Antena: La antena corresponde a un cable de cobre de longitud l_{antena} , esta debe ser al menos la cuarta parte de la longitud de onda de la señal a enviar. De física de onda sabemos que:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.2)$$

Con v la velocidad de propagación de la onda ($3 \cdot 10^8 [m/s]$) y f la frecuencia de la onda (108 [MHz]). De este modo se obtiene que $\lambda = 2,78 [m]$ y con ello la longitud de la antena debe ser $l_{antena} = 69,45 [cm]$.

4. Simulación:

La simulación se efectuó en LtSpice, implementando el circuito de la figura 3.

Primero se efectúa una simulación de análisis transiente, para una entrada $V_{in} = \sin(2\pi 1 [kHz])$. La señal modulada sale por la antena, de modo que ese es el nodo de medición.

En la figura 4 se observa un armónico en la antena correspondiente a la señal de entrada.

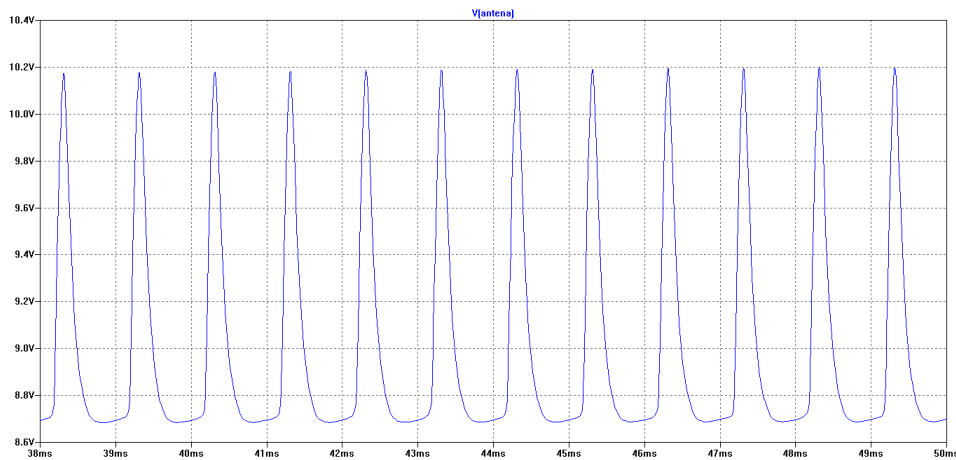


Figura 4: Señal modulada - Salida en la antena

Para verificar con mas claridad que el circuito funciona se observa la respuesta en frecuencia (diagrama de Bode) para ver en que punto se puede efectuar transmisión con la máxima ganancia posible. Esta, según el diseño propuesto debería estar cercano a los 108 [MHz] y es lo que se puede observar en la figura 5.

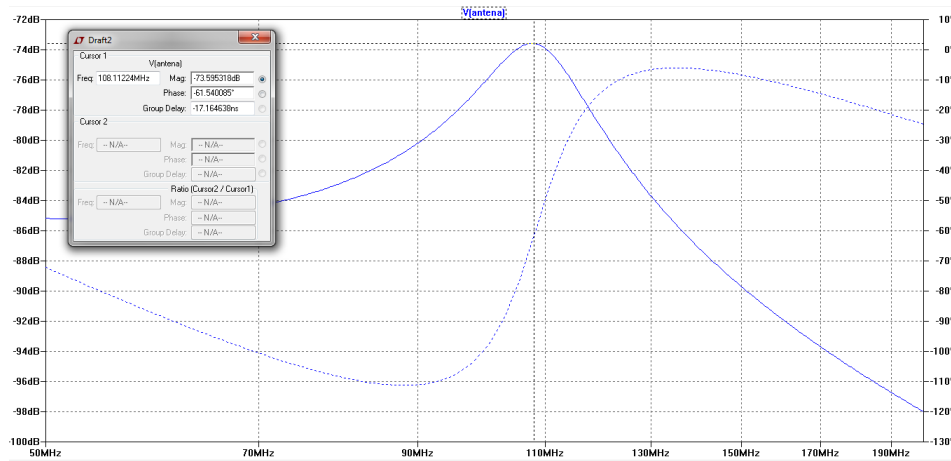


Figura 5: Diagrama de Bode (respuesta en frecuencia) del transmisor

5. Pruebas de laboratorio

Se implementa el diseño del transmisor FM propuesto. Este funcionó adecuadamente según lo diseñado, teniendo un alcance máximo de unos 40 mts a la redonda (desde el laboratorio hasta el primer piso del DIE ⁸).

Debido a que en el laboratorio no se disponían de todos elementos pasivos de diseño, se utilizaron configuraciones en serie y paralelo para alcanzar los valores. Finalmente, se hicieron las siguientes modificaciones:

- C_3 : Dos condensadores en paralelo de $4,7\mu F$
- C_4 : Dos condensadores en paralelo de $56nF$
- C_8 : Idéntico a C_4
- R_1 : Dos resistencias en paralelo de $10k\Omega$ y $5k\Omega$
- R_8 : Resistencia de 220Ω

El diseño contemplaba una transmisión a 108 MHz (justo el límite de la radio comercial. Por lo que fue necesario mover la capacitancia variable C_5 para transmitir a 98 MHz. Lo anterior se realizó utilizando el osciloscopio y el smartphone.

⁸Departamento de Ingeniería Eléctrica

En la figura 6 se puede observar la señal modulada, y que se encuentra en 98 MHz. La señal era audible desde los 97.5 a 98.5 MHz, por lo que se tiene un ancho de banda de 500 KHz.

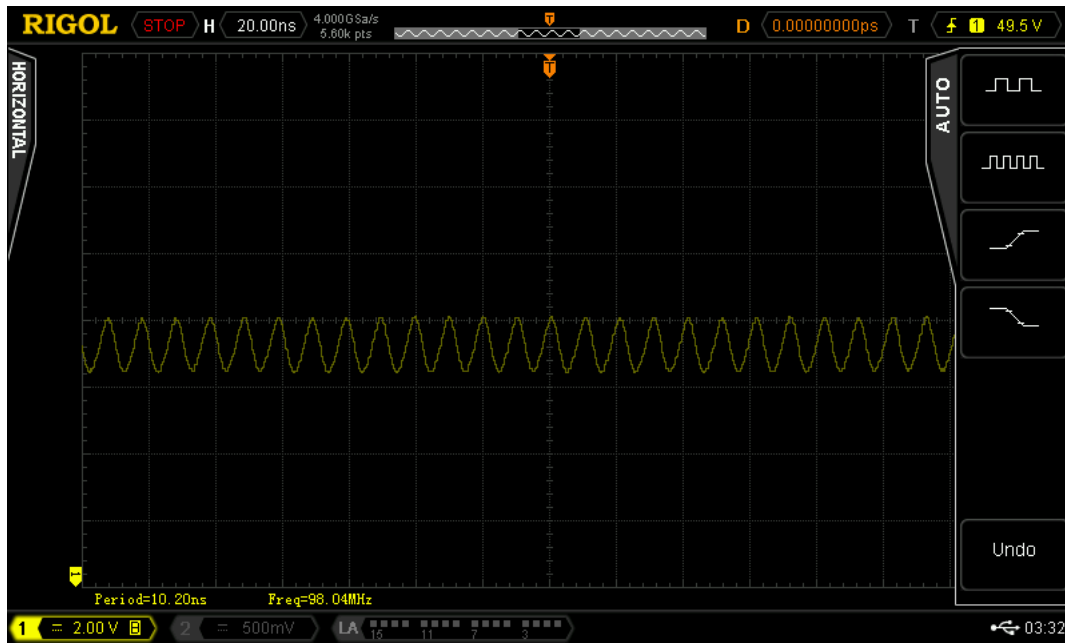


Figura 6: Señal modulada con carrier en 98 MHz

Se hicieron pruebas para caracterizar la transmisión utilizando una señal cuadrada de 1 kHz 7 y una señal sinuoidal de la misma frecuencia 8, ambas de 5 V de amplitud. Se observó que además de transmitir la señal modulada, también se transmite un armónico correspondiente a la señal de entrada. Esto es característico del oscilador utilizado.

En la figura 7 se observa la señal cuadrada un poco distorsionada por la resonancia del oscilador. Se observa que la envolvente es el mensaje, pero en la amplitud máxima se encuentra la señal modulada en 98.5 Mhz, y al ir bajando a la parte nula del escalón la frecuencia va disminuyendo hasta llegar a 97.5 MHz. De aquí se infiere que el ancho de banda es de 500 KHz (dos veces el ancho de banda comercial permitido).

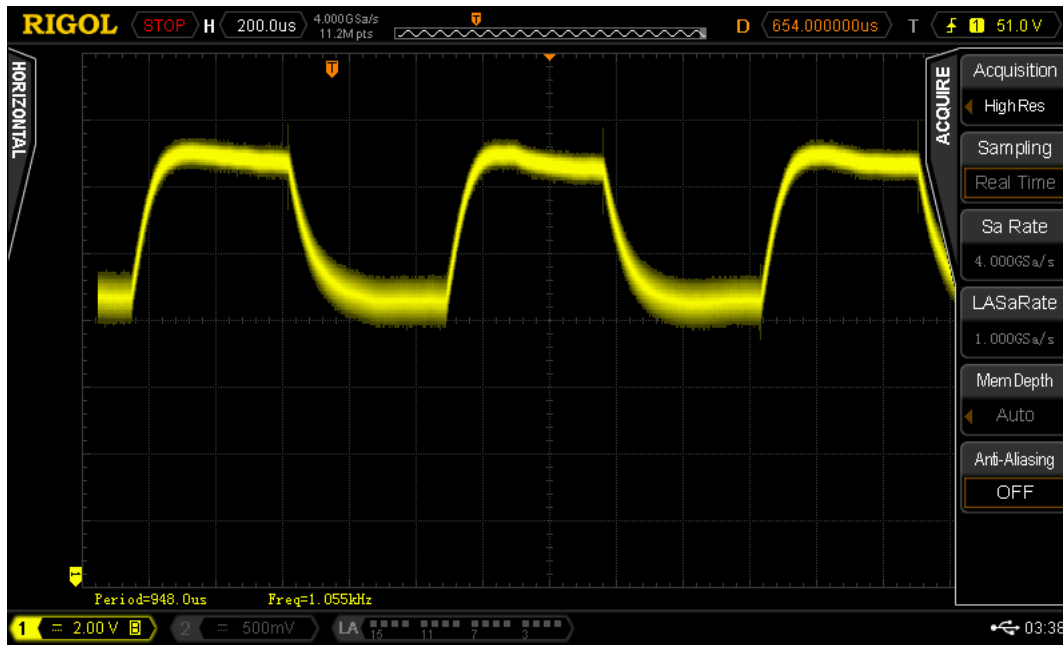


Figura 7: Armónico de la señal cuadrada

Situación similar a la de la onda cuadrada se observa en la figura 8, en donde el armónico tiene una envolvente igual al mensaje pero con frecuencia que varía entre 98.5 y 97.5 Mhz entre *peak-to-peak*.

De lo anterior, utilizando la regla de Carson para un ancho de banda de 500 KHz, frecuencia de 1KHz para la señal moduladora se obtiene un índice de modulación $\beta = 249$.

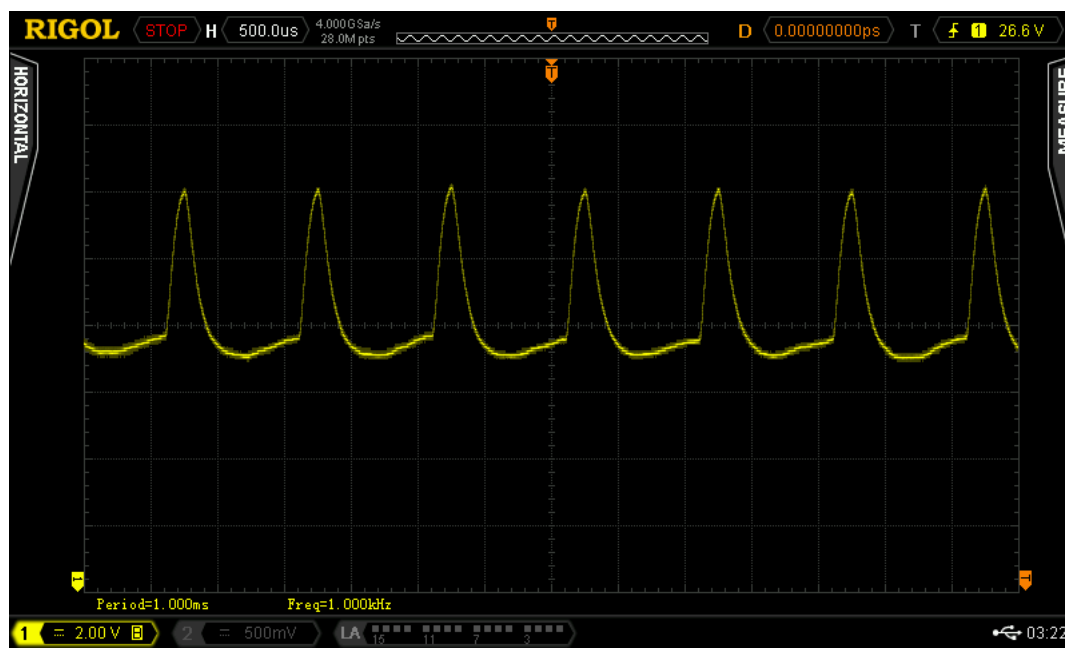


Figura 8: Armónico de la señal sinusoidal

6. Conclusiones

La primera prueba de laboratorio corrobora que la implementación del transmisor FM corresponde a lo re-diseñado (98 MHz).

En aplicaciones comerciales la transmisión de un armónico correspondiente a la señal del mensaje puede causar problemas. Por esta razón se propone un filtro pasabanda antes de la antena para eliminar esta señal.

Si bien para la modulación FM suele ser más complicado entender el funcionamiento, y como el oscilador influye en la modulación. Este es de sencilla implementación al tratarse de dos transistores, y elementos pasivo. Esto se complementa con la robustez del diseño, al cambiar levemente los elementos necesitados el sistema sigue funcionando perfectamente.

Es clave para un correcto funcionamiento que los valores para L y C en el oscilador sean los apropiados para una frecuencia de transmisión a 98 [MHz]. Para esto se recomienda un condensador variable, así se tiene holgura de diseño y se puede fijar correctamente la frecuencia de transmisión. Obteniendo una transmisión bastante precisa.

No se estudio la impedancia de entrada y salida del circuito, de modo que pueda ser necesario añadir etapas de adaptación de impedancia (para dispositivos de sonido).

En el laboratorio se observó que frente a una señal de entrada del orden de 3-12 V la señal se puede escuchar en un radio de 40 mts (primer piso del departamento de eléctrica). Si se desea mayor alcance se propone una etapa amplificadora del tipo Darlington.

Referencias

- [1] Diapositivas de clases, Principios de Comunicaciones *Profesor Cesar Azurdia*
- [2] B. P. Lathi, Communication Systems, *John Wiley and Sons*
- [3] http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/escobar_a_g/capitulo2.pdf
- [4] Diseño e Implementación de un transmisor FM a 106.5 MHz, *Carlos Campoverde, Ronald Pineda*.