

# Trabajo Final

## Sincronismo y Multiplexación

Juan Camilo Chaparro Castellanos

[juan.chaparro@udea.edu.co](mailto:juan.chaparro@udea.edu.co)

Harrison Andrés Henao Franco

[harrison.henao@udea.edu.co](mailto:harrison.henao@udea.edu.co)

David Alexander Sánchez García

[david.sanchezg@udea.edu.co](mailto:david.sanchezg@udea.edu.co)

**Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones**

**Universidad de Antioquía**

### RESUMEN

Este trabajo genera la simulación de un sistema de comunicaciones, la transmisión, el paso por canal y recepción de un mensaje como trama de bits utilizando modulación de desplazamiento de frecuencia.

Este procedimiento se genera por medio de la herramienta de simulación Simulink y Matlab. Se hace uso de sincronismo de portadora, reloj, filtros entre otras funciones para generar la codificación y decodificación de información para generar un sistema de comunicaciones lo más real posible.

### PALABRAS CLAVES

codificación, Haming, sincronismo de trama, sincronismo de reloj, ruido, atenuación, retraso, FSK, filtros, detección, multiplexación y corrección de errores, etc.

### OBJETIVOS

Se tiene como objetivo simular un sistema de comunicación digital por medio de un canal radiado, que permita la transmisión de un texto asignado que cumpla con las siguientes especificaciones:

- Modulación FSK
- Rata de bits
- Temperatura efectiva
- Longitud
- Probabilidad de error
- ganancia de antena transmisora y antena receptora
- frecuencia
- sincronismo de portadora  $N=1$  y especificaciones de componentes del PLL (VCO Y PD)
- Sincronismo de reloj de la compuerta Early\_late
- Sincronismo de trama con la palabra de Barker de longitud de 10 o mas
- Demodulación con filtro acoplado
- Ancho de banda mínimo necesario
- Codificación de canal con código Haming <7,4>
- Multiplexación
- Texto asignado:

*Cambio mi vida por lámparas viejas  
o por los dados con los que se jugó la  
túnica inconsútil;  
por lo más anodino, por lo más obvio,  
por lo más fútil;  
por los colgajos que se guinda en las  
orejas  
la simiesca mulata,  
la terracota nubia;*

la pálida morena, la amarilla oriental,  
o la hiperbórea rubia;  
cambio mi vida por una anilla de  
hojalata  
o por la espada de Sigmundo,  
o por el mundo  
que tenía en los dedos Carlomagno:  
-para echar a rodar la bola...

## INTRODUCCIÓN

El sistema realizado se basa en una modulación FSK (**Frequency Shift Keying**) técnica de modulación por desplazamiento de frecuencia, que consiste en modular la señal de información por medio de la variación de frecuencia de la señal portadora sinusoidal, para transmitir por un canal, en nuestro caso se tiene dos símbolos por lo cual se emplean dos frecuencias diferentes como se ilustra en la figura 1.

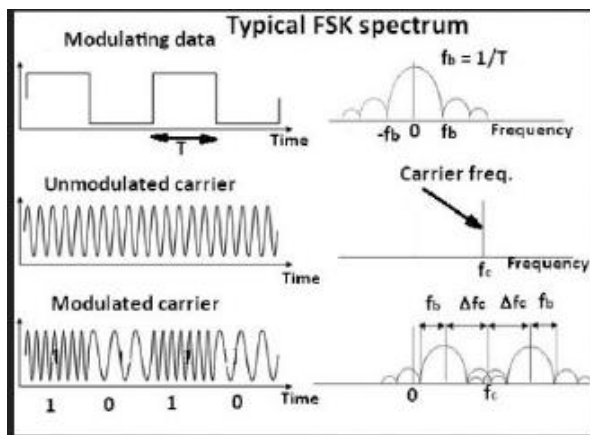


Figura #1

En la siguiente ilustración se realiza un ejemplo empleando diferentes frecuencias donde las frecuencias altas son usadas para un símbolo "0", y las frecuencias bajas para el otro símbolo, el "1".

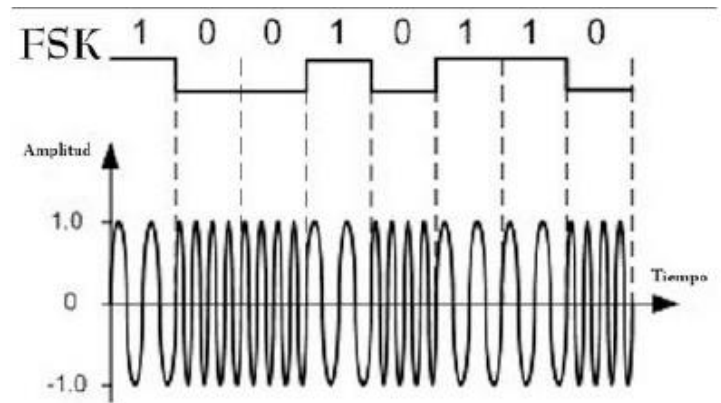


Figura #2

Existe una relación directa que es necesario saber al momento de implementar este tipo de modulación: Si la desviación de frecuencia (la diferencia entre las dos frecuencias) es pequeña, el ancho de banda a usar también será pequeño y por lo tanto el índice de modulación también será bajo. En la siguiente figura se muestran los diferentes anchos de banda para los diferentes tipos de modulación: bajo, medio y alto (figura#3). Además, en la implementación de este método el receptor debe ser capaz de extraer la información de manera sincrónica, deduciendo la frecuencia de la portadora y el reloj, para esto debe implementar los PLL's como se detalla a continuación:

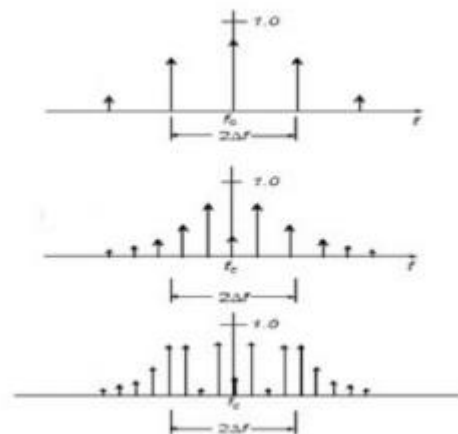
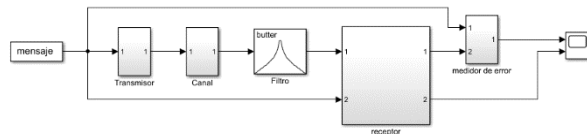


Figura #3

Donde:  $K_p$ ,  $K_f$ ,  $K_v$  y  $K_n$  son los parámetros que controlaran a los filtros, el VCO, y demás etapas del sistema

## DISEÑO DEL SISTEMA COMPLETO



**Figura #4. Diagrama del sistema de comunicación**

Como se muestra en la figura anterior se desea transmitir un mensaje y/o información de forma radiada desde una antena transmisora hacia una receptora utilizando como medio el aire, durante el proceso el mensaje será afectado por diferentes procedimientos como lo son la modulación, codificación, filtrado, amplificado, retrasado, demodulado entre muchos otros, que serán enunciados posteriormente

### a. Transmisión

Para poder transmitir el mensaje asignado se debe realizar una conversión de este a código binario; cada símbolo y/o letra del mensaje descrito con los siguientes parámetros:

- **Bits de símbolo**

Cada símbolo es descrito por 4 bits

- **Bits de paridad**

Estos bits son utilizados para detectar y corregir errores de símbolos, utilizando el código hamming, en la cual describiremos y se enunciará un ejemplo para mejor entendimiento a continuación

### Codificación Hamming.

Estos códigos se utilizan para la detección y corrección de errores, en nuestro caso el código <7,4> detecta hasta 2 errores de bits o corregir errores de hasta un bit;

Para nuestro caso se implementa añadiendo a la información 3 bits de paridad por cada 4 bits de información, posicionadas en un orden determinado

Un ejemplo es el siguiente

Datos= 0110.

Posición	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111
	1	2	3	4	5	6	7
	P1	P2	D1	P3	D2	D3	D4
Datos			0		1	1	0
P1	1		0		1		0
P2		1	0			1	0
P3				0	1	1	0
H<7,4>	1	1	0	0	1	1	0

El código Hamming obtenido es 1100110, donde los bits resaltados son los bits de paridad.

Suponiendo un error en el 3er dato, es decir 1100100, se muestra a continuación la decodificación:

Posición	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	Dec	Cod	Error
	1	2	3	4	5	6	7			
	P1	P2	D1	P3	D2	D3	D4			
Datos			0		1	0	0			
P1	1		0		1		0	1	1	0
P2		0	0			0	0	0	1	1
P3				1	1	0	0	1	0	1

Acá vemos que se detectó un error en la posición 110 = 6, es decir que al código 1100100 en la posición 6 cambiamos de bit, por lo que quedaría, 1100110 y los datos de información serían 0110.

Al realizar estas operaciones nos encontramos con secuencias de 7 bits respectivamente

- **Bits baker y/o bandera**

Luego de tener la representación de 7 bits de cada símbolo del mensaje se agregarán una bandera de bits el cual tiene como objetivo generar un sincronismo de trama

durante la comunicación del transmisor y receptor

- **Modulación**

Para realizar la modulación FSK implementada en la señal de información se generan portadoras con 2 frecuencias cercanas que representaran un bit respectivamente por medio de un generador de frecuencias que se controla por voltaje VCO. Las frecuencias deben tener una separación mínima que para nuestro caso será  $\frac{R_b}{2}$ , es decir, de 62.5 Kbps

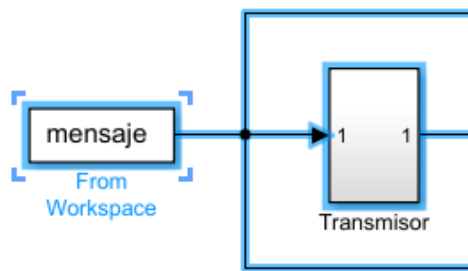


Figura #5. Diagrama externo del transmisor

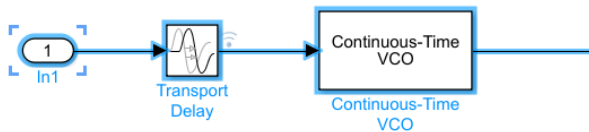


Figura #6. Diagrama interno del transmisor

## b. Canal

En Simulink se tendrán 3 parámetros con los cuales se representan los principales factores que afectan a una señal cuando se envía por un canal

- Atenuación
- Ruido
- Retraso

Para nuestro caso se dispuso de una distancia entre antenas de 20km

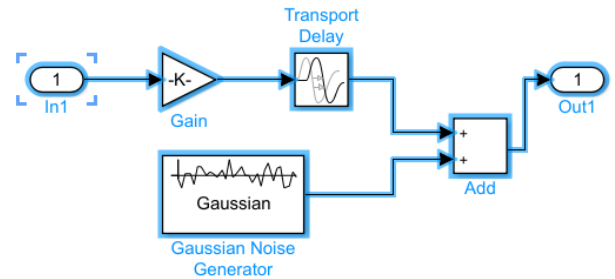


Figura #7. Diagrama del canal de comunicaciones

## Atenuación

La atenuación que afecta a la transmisión del mensaje por un canal radiado este dado por:

$$Att = 22 + 20 \log_{10} \left( \frac{longitud}{\lambda} \right) - G_t - G_r$$

$$\lambda = \frac{V_p}{f} = \frac{3 * 10^8 m/s}{2.5 * 10^6 Hz} = 120 m$$

$$longitud = 20000 m$$

$$G_t = 4$$

$$G_r = 4$$

$$Att = 58.43 dB$$

luego

$$Att = 10^{\frac{58.43 dB}{10}} = 697.74 * 10^3 [W]$$

## Ruido:

para realizar una simulación que se aproxime a la vida real el sistema se encuentra sometido a un ruido blanco gaussiano aditivo en todo el ancho de banda de la señal modulada



Figura #8

- **Probabilidad de error**

el sistema manejara una probabilidad de error descrita por

$$P_e = 4 * 10^{-3} = \frac{1}{250}$$

**Figura #10. Diagrama interno del filtro transversal**

Se describen los retardos anexados para dejar pasar la frecuencia que deseamos

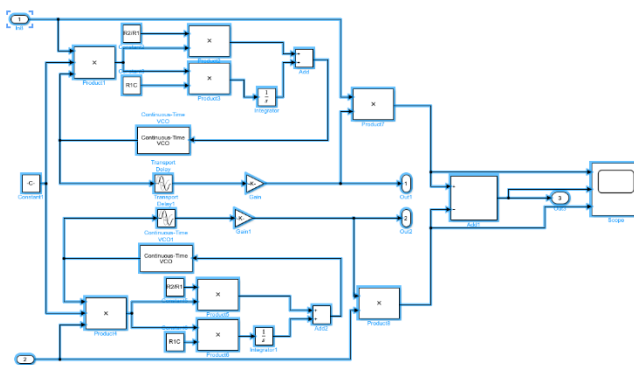
Time delay:	Time delay:
0.5/Frec2	0.5/Frec1

- **Sincronismo de portadora**

Para poder realizar un sincronismo de portadora se implementa un PLL para cada una de las señales obtenidas por el filtro.

El PLL tiene como objetivo recuperar la señal portadora de la señal original

Ya que cada símbolo se recupera de forma separada, se requieren dos PLLs, seguidores de fase. El funcionamiento principal del PLL es seguir la frecuencia de la señal para poder reconstruir la portadora usando un detector de fase que multiplica la señal por una portadora aproximada entregada por un VCO (oscilador controlado por nivel de voltaje).



**Figura #11. Diagrama interno del sincronismo de portadora**

Para el correcto funcionamiento del PLL se debe tener en cuenta la atenuación del canal, por lo cual al realizar el producto con el VCO se debe tener en consideración un desfase para poder así reconocer las señales sinusoidales, por lo cual se implementa un desfase de  $\pi / 2$

En los 2 PLLs, cada uno tiene una frecuencia diferente, luego en cada salida

del PLL se multiplica por la señal de entrada del filtro transversal y luego se restan cuyo resultado será la señal de la salida del sincronismo de portadora

A continuación, se describen los parámetros implementados como las resistencias, capacitancias, sensibilidad del detector de fase, coeficiente de amortiguamiento, frecuencia natural, etc., donde algunos fueron asumidos

$$R_1 = \frac{K_v R_p}{C W_n^2} \quad [\Omega]$$

$$R_1 = \frac{2\xi}{C W_n} \quad [\Omega]$$

donde

$C = 1nF$ , "capacitancia"

$\xi = 0.9$ , "coef. De amortiguamiento"

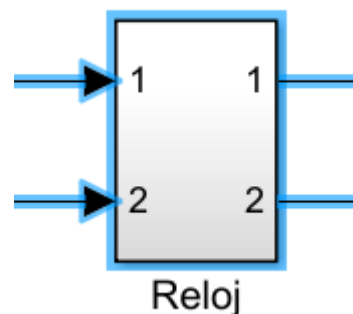
$$W_n = \frac{7}{0.5Tb} = \frac{7}{\frac{0.5}{Rb}} = 1.75 * 10^6$$

, "frecuencia natural"

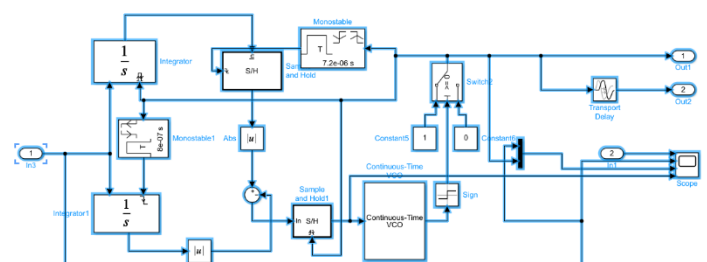
$$K_p = 0.5$$

$$K_v = 0.1 * 2\pi Rb, \text{ "sensibilidad del detector de fase"}$$

- **Sincronismo de reloj**



**Figura #12. Diagrama del sincronismo de reloj**



**Figura #13. Diagrama interno del sincronismo de reloj.**

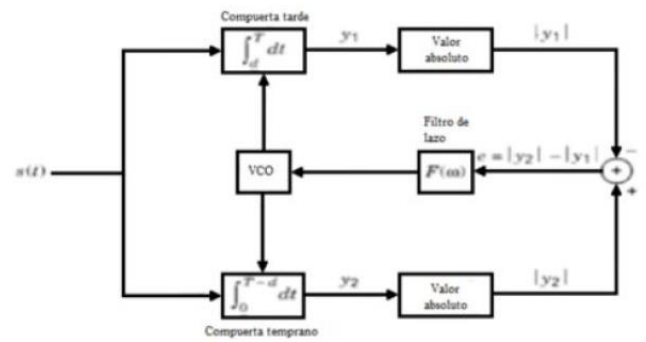
La compuerta Early - Late Gate es uno de los sincronizadores más popular de lazo cerrado, en el cual se usan medidas comparativas entre una señal de entrada y una señal de reloj local, con el fin de sincronizar la transición de datos con la señal de reloj.

Para el sincronismo de reloj se usa las compuertas Early late, para generar dos señales pulsadas; cada una tendrá un tiempo de duración de bit diferente.

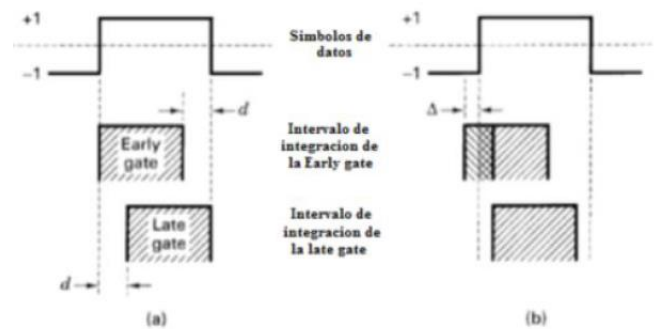
- **Early:**  
Denominada compuerta temprana genera las bandas de bajada y subida de la señal por medio de la integración de un periodo de símbolo hasta  $(T-d)$  segundos
- **Late:**  
Denominada compuerta tardía integra con un retardo igual que la compuerta temprana hasta el final de un periodo de símbolo

Posteriormente generando una resta entre el valor absolutos de los valores identificados, mostrara el error de temporización de símbolo siendo la señal de reloj para que PLL y VCO determine respecto a un voltaje si se avanzara o retrasara el temporizador y garantizar la alineación de la señal

Por último, cambiamos la polaridad de la señal de unipolar a polar para determinar cada símbolo



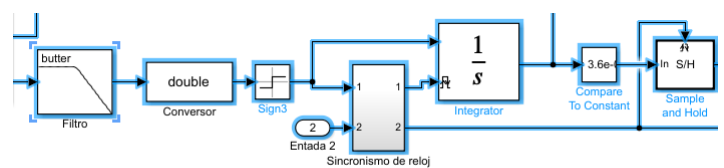
**Figura #14.**



a) Temporización de receptor correcta, b) Temporización adelantada

**Figura #15.**

### • Filtro de detección y de acople

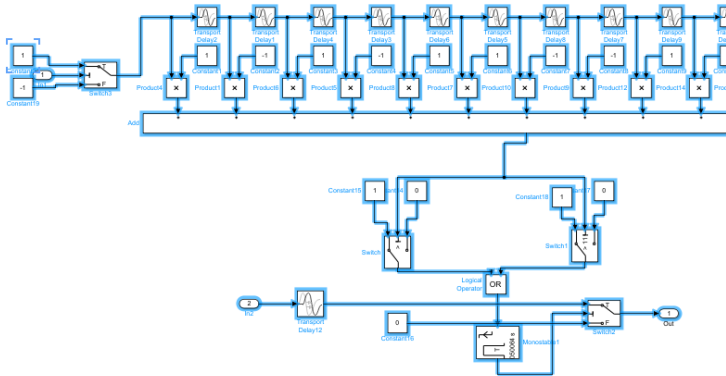


**Figura #16. Diagrama del filtro de detección y de acople**

Al tener una señal que describa el reloj del sistema, esta se implementara en un integrador junto con la señal de la salida del sincronismo de portadora.

En esta etapa se evaluará las bandas de subida y bajada de la señal, y el resultado será la función que describirá la comparación y muestreo para poder reconstruir la señal del mensaje

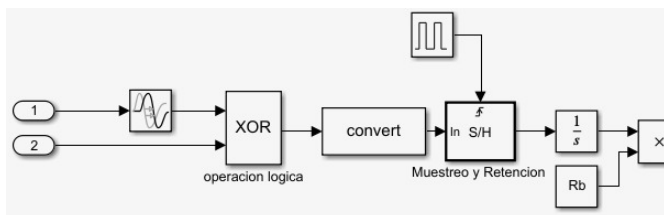
- **Sincronismo de trama**



**Figura #17. Diagrama del sincronismo de trama**

En este esquema se utiliza un filtro de autocorrelación, switches y operación lógica XOR para poder comparar la señal que ingresa junto con la secuencia de denominamos bandera, es decir, se compara el símbolo con la tira de bits bandera, y así poder identificar los 1' y los 0' de la trama de información para posteriormente convertirlos debidamente a su representación en el código ASCII

#### d. Medidor de error



**Figura 18. Diagrama del bloque donde se guardan los datos del receptor**

Esta última etapa compara los resultados de todo el proceso, realizando comparación entre el mensaje recibido y el mensaje transmitido por medio del operador XOR, pero sin antes implementar un retraso al mensaje inicial para poder recrear sincronismo y poder comparar de la mejor manera por último se continua con un muestreo y retención de los datos

Este proceso tendría como resultados de 0' o 1', estos determinaran si existen

discrepancias entre las señales, donde 0 expresa que no hubo cambios mientras que 1' es que si se generó lectura errónea de algún símbolo

En nuestro caso realizamos un retraso de  $27.774e-6$  al mensaje original para poder realizar la comparación con la salida del receptor

## Multiplexación

Es la técnica de combinar dos o más señales y transmitir las por un solo medio de transmisión. Una de las principales ventajas que posee es que permite las comunicaciones de forma simultánea, ya que emplea un dispositivo llamado multiplexor.

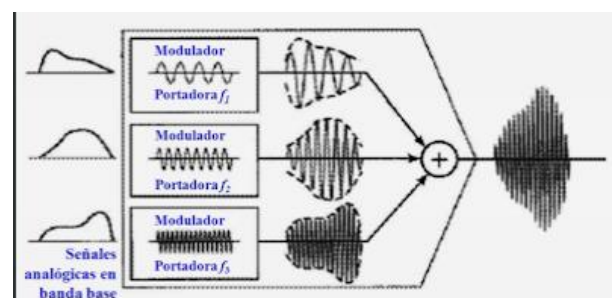
Esta técnica consiste en utilizar de manera más eficiente el ancho de banda

Para nuestro caso, se realizará la implementación de la multiplexación por división de frecuencia (FDM).

## FDM

Es una técnica analógica que se puede aplicar cuando el BW de un enlace es mayor que los BW combinados de las señales a transmitir.

Cada fuente genera una señal con un rango de frecuencia similar. Dentro del MUX, estas señales similares se modulan sobre distintas frecuencias portadoras ( $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$ , etc.).



**Figura #19.**



El proceso de multiplexar DEMUX usa filtros para descomponer la señal multiplexada en las señales componentes que la constituyen. Las señales individuales se pasan después a un demodulador que las separa de sus portadoras y las pasa a líneas de salida.

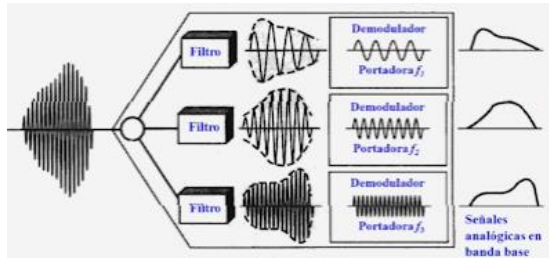


Figura # 20.

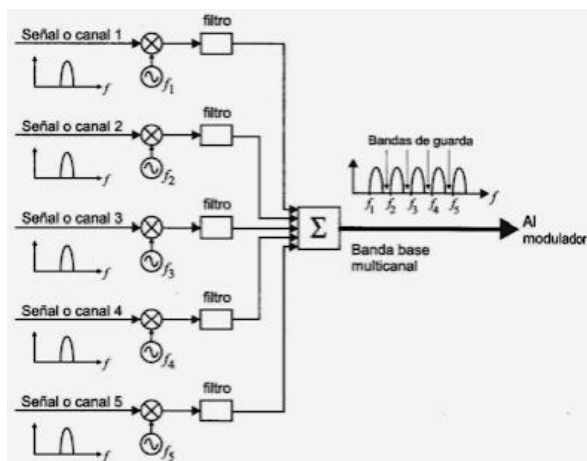


Figura #21. FDM en el dominio de la frecuencia

Se puede considerar a FDM como una técnica de multiplexación analógica; pero también se puede implementar para enviar señales digitales.

## DISEÑO DEL SISTEMA COMPLETO

A continuación se realiza un sistema de multiplexación FDM, con un ancho de banda de 6MHz para la transmisión de dos mensajes, utilizando el mismo procedimiento que se ha presentado previamente, donde se implementa:

- Transmisor
- multiplexador
- Canal
- Demultiplexador

- Receptor
- Medición de error

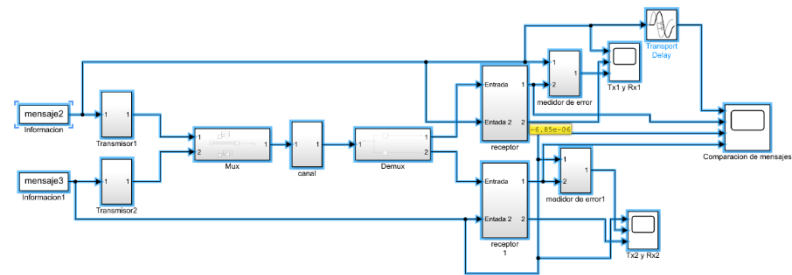


Figura 22. Diagrama del sistema de multiplexación FDM.

## • Transmisor

En esta etapa implementamos un transmisor como el de la figura #6 para dos mensajes diferentes en los cuales se modulan en 2 frecuencias distintas, el primer mensaje se modula a una frecuencia de 2.5MHz, mientras que el segundo mensaje a 5MHz como se muestra en la figura #23



```
info2='hola mundo, mi nombre es pedro pablo.. ';
```

```
info3='Tratamiento de señales II!';
```

Figura #23

## • Multiplexación

Esta etapa consiste al tener los mensajes modulados en frecuencias diferentes, se realiza la suma de estas en una sola señal de salida para atravesar el canal ya que estas comparten un ancho de banda

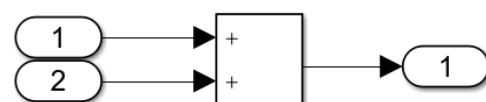


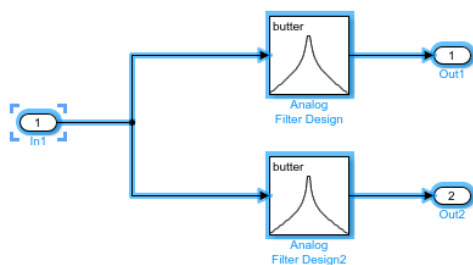
Figura #24

- **Canal**

para este caso se implementa el canal descrito en la figura #7 previamente donde se utiliza una atenuación y un ruido gaussiano para simular un caso real lo mejor posible

- **Demultiplexación**

Para la etapa de demultiplexación se realiza un filtrado de doble canal de la señal de entrada, es decir, se implemente 2 filtros pasa bandas para que determinan las diferentes frecuencias de cada mensaje como se muestra en las siguientes figuras



**Figura #25**

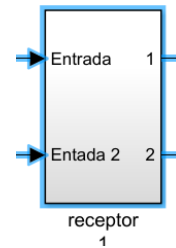
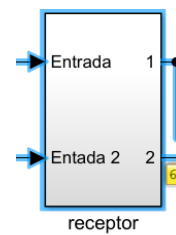
Parameters	
Design method:	Butterworth
Filter type:	Bandpass
Filter order:	5
Lower passband edge frequency (rad/s):	$2\pi \cdot (\text{Frec2} - \text{Rb})$
Upper passband edge frequency (rad/s):	$2\pi \cdot (\text{Frec1} + \text{Rb})$

**Figura #26**

Parameters	
Design method:	Butterworth
Filter type:	Bandpass
Filter order:	5
Lower passband edge frequency (rad/s):	$2\pi \cdot (\text{Frec4} - \text{Rb})$
Upper passband edge frequency (rad/s):	$2\pi \cdot (\text{Frec3} + \text{Rb})$

**Figura #27**

- **Receptor**

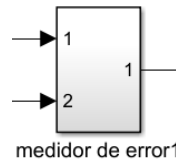
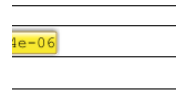
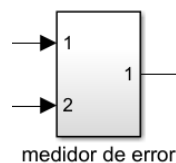


**Figura #28**

Al tener ya las señales separadas previamente, se procede a la interpretación de la información donde el receptor genera filtrado, sincronización de portadora, sincronismo de reloj, muestreo y retención y finalmente sincronismo de trama de la señal recibida

- **Medición de error**

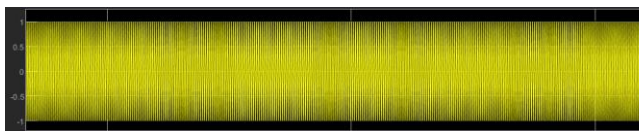
Se procede a realizar la comparación entra de los mensajes transmitidos y la salida de cada receptor para observar si se presentaron errores durante la transmisión o interpretación, como se muestra en la figura #29



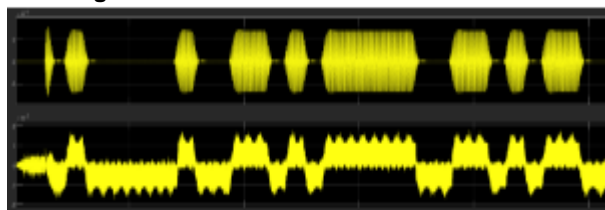
**Figura #29**

## RESULTADOS OBTENIDOS

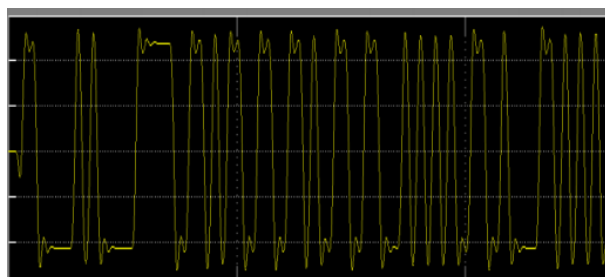
Se procede a realizar la respectiva simulación en Matlab y Simulink que se muestra en la siguiente figura, donde de implementan todos los parámetros descritos anteriormente



**Figura #30. Datos modulados en FSK**

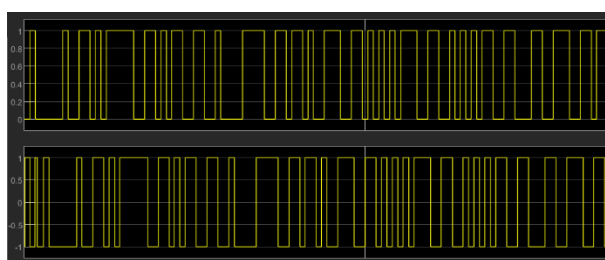


**Figura #31. Señal de salida del filtro transversal**

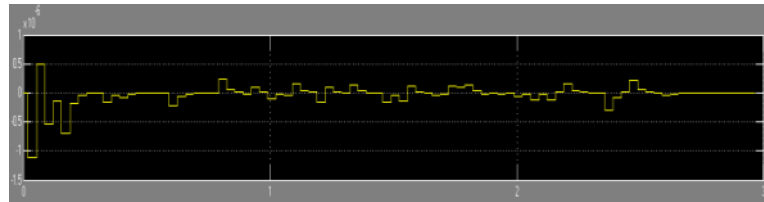


**Figura # 32. Señal del sincronismo de portadora filtrada.**

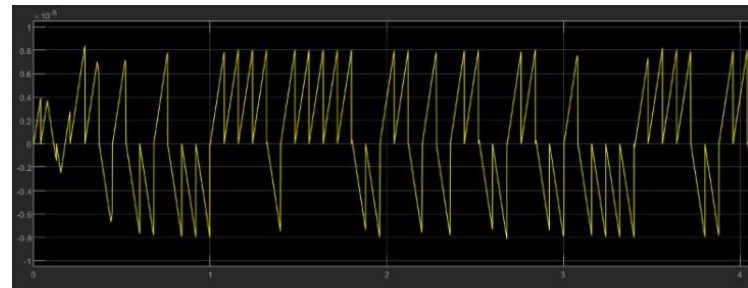
Se observa que a la salida del filtro se pueden apreciar la diferencia entre un bit de 1' y un bit de un 0', para eliminar el aliasing y/o rizado generado por el ruido se debe aumentar el orden del filtro, tasa de muestreo, etc.



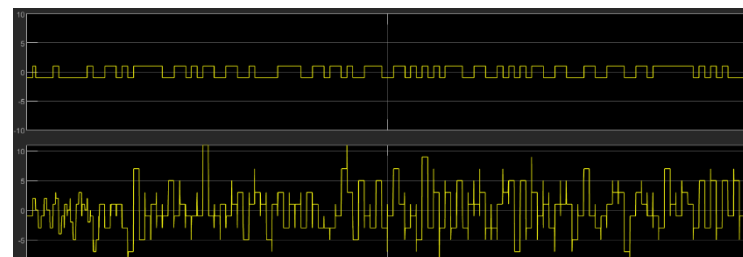
**Figura #33 Datos de Entrada y Salida**



**Figura # 34. Sincronismo de reloj.**



**Figura # 35. Salida del filtro.**



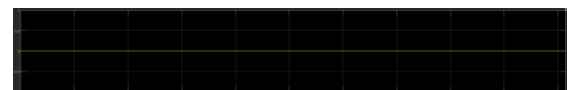
**Figura # 36. Sincronismo de trama.**

Mensaje Recibido: Cambio mi vida por lámparas viejas o por los dados con los que se jugó la túnica inconsútil; por lo más anodino, por lo más obvio, por lo más fútil; por los colgajos que se quinda en las orejas la simiesca mulata, la terracota nubia; la pálida morena, la amarilla oriental, o la hiperbórea rubia; cambio mi vida por una anilla de hojalata o por la espada de Sigmundo, o por el mundo que tenía en los dedos Carlomagno: -para echar a rodar la bola..

>>

**Figura # 37. Lectura del mensaje recibido**

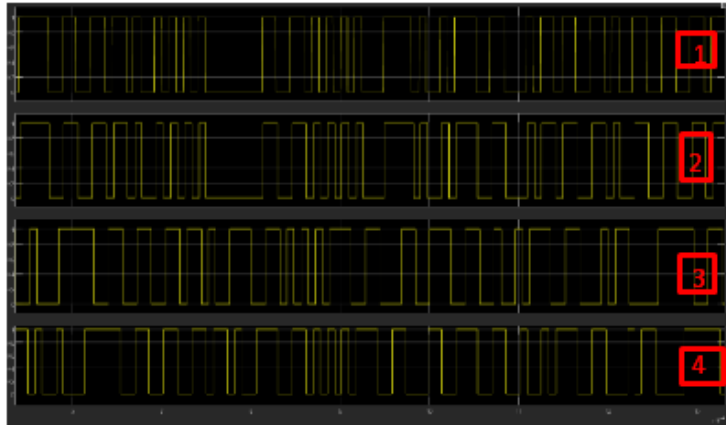
En la figura #30 se evidencia a la recepción del mensaje en cual presenta una perfecta lectura por la cual no se presentaron problemas de sincronización entre el transmisor y el receptor



**Figura #38, medidor de error**

en la figura previa se muestra la salida del medidor de error, en cual realiza la comparación entre la señal original y la señal que interpreto el receptor, en cual presenta valores de 0', lo que evidencia que presenta similitud entre las señales

este resultado también es el mismo de los medidores de error durante la multiplexación FDM



**Figura #39**

**Resultados obtenidos en la multiplexación.**

En la figura #39 se muestra las señales de transmisión, podemos ver que el primer mensaje (1) llega de forma correcta al mirar su receptor (2), ya que en este aplicamos un retraso respecto a la señal original para realizar una comparación.

En el segundo mensaje (3), también llega de forma correcta pero su receptor (4) podemos observar que tiene un retraso respecto al mensaje original.

## CONCLUSIONES

- Para realizar la comparación de errores entre la señal de entrada y la de salida, es muy importante que las señales estén sincronizadas, para ello es importante calcular bien el debido retraso al hacer el delta de las dos señales (transmisión y recepción)
- Para la codificación mediante hamming (7,4), tenemos que este es el que nos permite corregir un error y detectar 2, lo cual hace que el

sistema pueda recuperar los datos de una forma más eficiente. Pero cómo se describió anteriormente el problema radica cuando ocurren 2 errores en la trama de 7, a partir de aquí es que no se puede recuperar la señal, por eso para el sistema fue necesario agregar datos basura, los cuales se colocan al principio, tal que mientras se está sincronizando sistema no afecte los bits de información.

- Se evidencia que en el receptor se debe de implementar correctamente una sincronización tanto de trama como de tiempo para tener una debida interpretación de los bits recibidos por el transmisor, en caso contrario se perdería completamente la información
- Se observo que al utilizar la multiplexación FDM se optimizo el uso del ancho de banda para la transmisión de diferentes tipos de datos por un mismo canal.
- Se demuestra que la herramienta de Matlab Simulink es perfecta para simular un sistema de comunicaciones de manera muy cercana a una situación real donde se pudo tener en cuenta retraso, atenuaciones, distorsiones, etc.,

## BIBLIOGRAFÍA

- <https://teoriadelatelecomunicaciones.files.wordpress.com/2011/11/multiplexacion.pdf>
- <https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1Su1dp0EwZpSHuD728sit9980FVciSNa>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n\\_por\\_divisi%C3%B3n\\_de\\_frecuencia](https://es.wikipedia.org/wiki/Multiplexaci%C3%B3n_por_divisi%C3%B3n_de_frecuencia)
- [https://www.youtube.com/watch?v=mDR4eU\\_rrJ8&ab\\_channel=UniversitatPolit%C3%A8cnicaVal%C3%A8ncia-UPV](https://www.youtube.com/watch?v=mDR4eU_rrJ8&ab_channel=UniversitatPolit%C3%A8cnicaVal%C3%A8ncia-UPV)
- [https://www.youtube.com/watch?v=2UO1ooBRrH0&ab\\_channel=CarlosZepitav](https://www.youtube.com/watch?v=2UO1ooBRrH0&ab_channel=CarlosZepitav)
- <http://www.tsc.uc3m.es/~mlazaro/Docencia/GIT-TC/GIT-TC-Tab01-Tabla-Q.pdf>