

**Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua - Managua**  
**(UNAN - Managua)**



**Facultad de Ciencias e Ingenierías – Departamento de Tecnología**  
**Maestría en Telecomunicaciones y Redes Teleinformáticas**

Modulación por Vectorización Variable para la optimización de la  
modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK).

**Tesis para optar al título de Master en Telecomunicaciones y Redes  
Teleinformáticas**

Autor: **Ing. Juan Carlos Lanuza Lazo**

Tutor de Tesis: **MSc. Adriana Suazo González**

Asesor: **Lic. Dayvi López**

10 de noviembre del 2022



## Índice de Contenido

Dedicatoria .....	I
Agradecimientos.....	II
Carta Aval del Tutor .....	III
Resumen.....	IV
I. Introducción .....	1
II. Planteamiento del problema.....	3
III. Antecedentes.....	4
IV. Justificación .....	5
V. Objetivos.....	6
5.1 Objetivo General .....	6
5.1.1 Objetivos Específicos.....	6
Capítulo I.....	7
1. 1 Marco Teórico .....	7
1.1.1 Modulación.....	7
1.1. 2 Transmisor .....	7
1.1.3 Factores de evaluación de los medios de transmisión.....	8
1.1.4 Medio de Transmisión .....	8
1.1. 5 Técnicas de Modulación.....	9
1.1.6 Tipos de Modulación .....	9
1.1.7 Radio Propagación en HF por rebote ionosférico .....	10
1.2 Marco legal.....	11
Capitulo II .....	13
2.1 Hipótesis o preguntas directrices. ....	13
2.2 Diseño Metodológico.....	14

2.2.1 Tipo de investigación .....	14
2.2.2 Universo.....	14
2.2.4 Definición y operacionalización de la variable .....	15
2.2.5 Fuentes de información .....	17
2.2.6 Instrumentos para la recopilación de información.....	17
2.2.7 Procesamiento y análisis de la información .....	17
Capítulo III .....	18
3.1 Resultados .....	18
3.1.1 Evaluación de las diferentes modulaciones digitales en las categorías de eficiencia energética, inmunidad al ruido y simpleza del modulador para seleccionar cuál de ellas cumple con los estándares de una modulación base robusta. ....	18
3.1.1.2 PSK (Modulación por desplazamiento de Fase).....	26
3.1.1.3 FSK (Modulación por desplazamiento de Frecuencia). ....	31
3.1.1.4 MSK (Desplazamiento Mínimo de Frecuencia).....	34
3.1.1.5 Modulación GMSK (Desplazamiento de Frecuencia Mínimo Gaussiano). ....	39
Capítulo IV.....	44
4. Análisis y discusión de los resultados .....	44
4.1. Selección de la modulación según las características .....	44
4.2 Diseño de una nueva variante de modulación basado en FSK para el transporte asíncrono de información y de baja velocidad .....	47
4.2.1 Modulación VFSK (Variable Vectorization Frequency Shift Keying) .....	47
4.2.2 Modulación y Demodulación .....	47
4.2.3 Descripción Matemática de VFSK.....	48
4.2.4 Función de Amortiguación Logarítmica .....	49

4.2.4. Función de Amortiguación Lineal .....	50
4.2.5 Función de Amortiguación Exponencial .....	51
4.2.6 Demostración de las funciones de amortiguación .....	52
4.2.7 Métodos de Codificación y Mapeo de Bits .....	55
4.2.8 Multi Portadora Paralela.....	56
4.3 Funcionamiento teórico de la nueva modalidad de modulación basada en FSK, para demostrar sus nuevas propiedades .....	63
4.3.1 Aplicación del Vector de Rampa o función de amortiguación .....	66
4.3.2 Análisis en el analizador de espectro de la señal transmitida por RF .....	71
4.3.3 Mediciones del Espectro RF .....	74
V. Conclusiones.....	79
VI. Recomendaciones.....	81
VII. Bibliografía.....	82
VIII. Anexos .....	84
Anexo A. Hoja técnica del radio Yaesu FT-897 (Transmisor Primario) .....	84
Anexo B. Hoja Técnica del ICOM IC-706MKIIG (Radio de Monitoreo Secundario) .....	85
Anexo C. Características del transmisor .....	86
Anexo D. Características del Receptor. ....	87
Anexo E. Hoja de Datos del Acoplador de antena MFJ-949E.....	88
Anexo F. Hoja de Datos técnicos del RTL-SDR Stick USB (Analizador de RF). 92	

## Índice de Figuras

Figura No. 1 Familia de Modulaciones según su portadora. ....	19
Figura No. 2. Patrón de Modulación en AM, grafico operacional lineal. ....	20
Figura No. 3 Modulación por desplazamiento de amplitud, modulación digital con portadora analógica.....	21
Figura No. 4 Análisis de la probabilidad de error por símbolo en ASK según su índice de modulación donde $P_e(s)$ es la probabilidad de error de bit o (BER) y $E_b/N_0$ es la energía de señal por bit sobre densidad de ruido por bit.....	24
Figura No. 5 Ejemplo del mapeo de los datos binarios según la onda portadora en cambio de su fase, nótese que siempre mantiene una amplitud y frecuencia constante.....	26
Figura No. 6 Fldigi programa para la codificación y decodificación de RTTY en tiempo real.....	28
Figura No. 7. Curvas de tasas de error de bit para la modulación BPSK, QPSK, 8-PSK y 16-PSK, en un canal con ruido blanco aditivo gaussiano.....	28
Figura No. 8. Funcionamiento simplificado del transmisor FSK simple, de dos estados compuestos también llamado BFSK (FSK Binario).....	31
Figura No. 9.Ejemplo de FSK analizado en un plano de tiempo, Modulación BFSK. ....	33
Figura No. 10. MSK modulando datos digitales usando el desplazamiento mínimo de frecuencia.....	34
Figura No. 11 Señales FT8 decodificadas en el programa WSJT en 28.074MHZ USB.....	35
Figura No. 12. Señales de FT8 vistas en el espectrograma de la señal centrada en 28.074MHZ en Banda lateral Superior. ....	36
Figura No. 13 Mapa del registro de las señales recibidas según su QRZ (indicativo), la banda utilizada es 10m en 28. 07MHZ.Propagacion Diurna.....	37
Figura No. 14 Curvatura de probabilidades de error por bit (BER) en FSK coherente. ....	38
Figura No. 15. Representación en el plano cartesiano de un filtro Gaussiano. ....	40
Figura No. 16 Modulación GMSK vs MSK comparada en su forma de onda. ....	40

Figura No. 17 Comparación de firmas espectrales de potencia en QPSK, MSK y GMSK.....	41
Figura No. 18. GMSK en uso de un VCO y un filtro gaussiano. ....	42
Figura No. 19. GMSK aplicando un integrador antes de pasar al modulador en cuadratura. ....	42
Figura No. 20 Grafica de puntaje según atributos de la modulación base. ....	44
Figura No. 21 Función de énfasis amortiguada por una función logarítmica con un factor de ataque 1.8 sobre la función lineal. La función se estabiliza según la amplitud máxima declarada.....	52
Figura No. 22 Función de énfasis amortiguada por una función exponencial con índice de ataque de curvatura 1.64. ....	53
Figura No. 23 Función de énfasis amortiguada por una función lineal con índice de ataque de curvatura 1.64.....	54
Figura No. 24 Probabilidad de error de bit por densidad de energía de bit según la densidad de ruido de bit del ecosistema. ....	62
Figura No. 25. Plugin nativo en FL Studio 3x OSC. oscilador. ....	63
Figura No. 26 Parámetros del oscilador primario, en amplitud media y sin fases. ....	64
Figura No. 27. Pulsaciones en representación de los símbolos en combinaciones de 4-VMFSK, el primer tono largo es sincronización y que el receptor ajusta sus filtros. A este proceso se le llama demarcación espectral. ....	65
Figura No. 28 Función de Envelope o función envolvente. ....	66
Figura No. 29 Espectrograma de la emisión usando un simple MFSK, FSK con multiportadora, sin ningún tipo de control de espurias, filtros, mecanismo de transición o amortiguamiento. Esto describe FSK sin las funciones de amortiguación (VFSK).....	67
Figura No. 30 Espectrograma de la emisión usando VFSK y las funciones de rampas de amortiguación para la supresión de las espurias generadas en los lóbulos laterales sin la necesidad de MSK o GMFSK (filtro gaussiano). Es posible tener el mismo resultado. ....	68
Figura No. 31 Análisis espectral de un archivo de audio de MFSK puro, sin ningún tipo de variante.....	69

Figura No. 32 Análisis espectral de un archivo de audio modulando en VMFSK con funciones de rampas exponenciales basado en 4-VMFSK. ....	70
Figura No. 33 . Equipo de pruebas experimental transceptor multibanda HF-50MHZ, VHF y UHF. Potencia máxima de transmisión a 100W. ....	71
Figura No. 34 RIGblaster P&P, interfaz de conexión CAT/USB para equipos de radio. ....	71
Figura No. 35 Acoplador de antena MFJ-949E, con selector de antena, opción de bypass y carga fantasma incorporada.....	72
Figura No. 36 Equipo receptor con un analizador SDR remoto, visualizado vía escritorio remoto (RDP), corriendo en Windows server 2019 y ejecutando SDRSharp para la visualización del espectro radioeléctrico .....	73
Figura No. 37 Análisis espectral de la transmisión de FSK simple, sin las mejora o sub variantes. ....	74
Figura No. 38 Análisis espectral de la transmisión de 2-VFSK, esto no incluye mejoras derivadas de sistemas tipo MSK o GFSK. ....	75
Figura No. 39 Análisis espectral de la transmisión en 4-MFSK (multiportadora), esto no incluye mejoras derivadas de sistemas tipo MSK o GFSK (GMFSK), aquí no se usa VMFSK. ....	76
Figura No. 40 Análisis espectral de la transmisión en 4-VMFSK (multiportadora), esto no incluye mejoras derivadas de sistemas tipo MSK o GFSK (GMFSK), Función de amortiguación exponencial de tensión inversa. ....	77



## Índice de Tablas.

Tabla No. 1 Tasa de error por bit, según su nivel de BER y su tiempo de incidencia .....	25
Tabla No. 2. Mapa Binario en 4-VFSK (tipo lineal).....	55
Tabla No. 3 Mapa binario en 4-VMFSK (tipo multi portadora/paralela).....	56
Tabla No. 4. Estándares de modulación tanto en VFSK como VMFSK, la velocidad de transmisión de los datos esta expresada en baudio.....	58
Tabla No. 5 Tasas de bits según modalidad en entornos ideales, para transmisión de una sola vía (Half-Duplex).....	60
Tabla No. 6 Probabilidad de error según el índice de modulación en VFSK lineal. .....	61

## Dedicatoria

*En la memoria de mi querido y amado hermano Marcos, una mente brillante, de entre todos los hermanos el más imponente intelectualmente, he decidido hacer algo de tu nivel intelectual.*

*“Nada en la vida es para ser temido, es sólo para ser comprendido. Ahora es el momento de entender más, de modo que podamos temer menos” – Marie Curie*

## **Agradecimientos**

“Al ver el resultado logrado con este ambicioso proyecto, solamente se me ocurre una palabra: ¡Gracias!

Todo el trabajo realizado fue posible gracias al apoyo incondicional de la profesora y master Adriana, que estuvo muy de cerca con el avance de la investigación y poniendo un ojo atento a todos los detalles, muy agradecido con su labor.

Gracias, también, a mi padre y a madre, que me dieron todo lo que necesité, y a mis amigos maestrante que estuvieron cada día en las clases viendo el progreso y dando ánimos, unas grandes gracias para el grupo selecto.

Nada de esto hubiera sido posible sin ustedes. Este trabajo es el resultado de un sinfín de acontecimientos que poco tuvieron que ver con lo académico, sino más bien, con el acompañamiento sentimental que pusieron en mí.

Gracias infinitas a ustedes y, por supuesto, a Dios, por ponerlos en mi camino.”

Una vez más logro superar las barreras y alcanzar nuevos niveles, y seguiremos así hasta alcanzar lo imposible y llegar donde pocos han llegado.

## Carta Aval del Tutor



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN - MANAGUA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA  
MAESTRÍA DE TELECOMUNICACIONES Y REDES TELEINFORMÁTICA

2022: "Vamos por mas victorias educativas"  
Managua 03 de agosto del 2022

**MSc. Harry Ali Martínez (Tutor)**  
**MSc. Adriana Suazo (Asesora metodológica)**  
Docentes de departamento de tecnología  
**Sus Manos**

**Estimados maestros:**

Me dirijo a ustedes muy cordialmente en calidad de coordinador de maestría, solicito sus buenos oficios, para que ocupen el rol de tutores en el trabajo de postgrado titulado: **"Modulación por Vectorización Variable para radiocomunicaciones por HF, transmisión de telemetría de sistemas desatendidos y descentralizados"** dicho trabajo lo está realizando el **Maestrando, Lanuza Lazo Juan Carlos**, alumno activo de la Maestría de telecomunicaciones y Redes Teleinformática (PMTRT).

Sin más que hacer referencia, me suscribo.

MSc. LUIS ARMANDO SALINAS ESPINOZA  
COORDINADOR  
PROGRAMA MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES Y  
REDES TELEINFORMÁTICAS



LASE/rache  
Cc. **Harry Ali Martínez (Autor)**  
Cc. **Adriana Suazo (Asesora metodológica)**  
Cc. **MSc. Marlon Díaz Zuniga (Decano)**  
cc: Archivo

*¡A LA LIBERTAD POR LA UNIVERSIDAD!*

## Resumen

Esta investigación detalla con precisión una nueva modalidad que optimice la modulación base FSK en las bandas de HF(3-30MHz) para transmisión de baja latencia, con la capacidad de densificación sin crecimiento exponencial del ancho de banda espectral.

Para el cumplimiento de los objetivos, se hicieron pruebas sobre el tipo de emisión, su ancho de banda, comportamiento frente a todo tipo de interferencias.

Como herramientas fundamentales para el análisis de todas las simulaciones y pruebas prácticas de transmisión y calidad de recepción, se utilizaron como herramienta de diseño de sistema base de radio, GNU Radio y generador de datos FL Studio para los tonos de componentes. Como analizadores en tiempo real, se utilizaron SDRs como **HackRF** y **AirSpy HF+ Discovery**.

Como sistemas de transmisión de potencia se utilizaron dos radios multibanda **ICOM 706MKIIG (HF + 6m – 2m/70cm)** y el **Yaesu FT-897D**. Como detalle, las pruebas fueron desarrolladas usando una carga fantasma de 50 Ohm puramente resistivo MFJ-260C.

La conclusión final da como resultados que la nueva modalidad VFSK y VMFSK en su modalidad multi portadora es capaz de modular datos de forma lineal y utilizando multi portadora, aumentando significativamente el ancho de banda de velocidad en VMFSK y reduciendo la firma espectral que se produce por las señales espurias en los lóbulos laterales.

La modulación VFSK demuestra que es capaz de empaquetar los datos enviados por cualquier codificador fuente hacia su secuencia de mapeo de bits antes de ser transmitidos, su reducido ancho de banda lo hace útil para la agrupación de sondas múltiples, y su base en FSK fortalece su condición en su simpleza y efectividad.

## I. Introducción

Las telecomunicaciones modernas han sido capaces de explotar en gran medida la forma más óptima de enviar grandes cantidades de información de un punto a otro, se han creado grandes autopistas digitales donde la información transita sin mayor problema haciendo capaces de enviar imágenes de gran nitidez en tiempo real con mínima pérdida y poco retraso. Estos medios de comunicación se llevan a cabo mediante cables de fibra óptica u otros medios completamente eléctricos, la evolución del transporte de datos se ha venido a propagar de igual forma en el medio inalámbrico, donde se ha aprovechado al máximo la capacidad de integración de servicios usando los medios aún más eficientes para el transporte y modulación de las señales y su correspondiente información digital.

Las nuevas tecnologías como “El Internet de las Cosas”, o por sus siglas en inglés (IoT), han hecho más que simplemente integrar un mecanismo de comunicación por internet a todo tipo de dispositivos que se usan a diario de forma que se pueda conectarlas y controlarlas remotamente, ya sea para un registro de forma constate de la forma en cómo se usan hasta el control total del dispositivo, estos tiempos modernos nos lleva a querer tener un control total sobre todos los dispositivos cercanos a nosotros y en algunas otras ocasiones, controlarlos para sentirlos más cerca de nosotros. Obviamente se ha centrado en comunicar a los sistemas del día a día usando redes muy cercanas como el WIFI o incluso redes 3G o 4G, donde las condiciones están dadas, energía, disponibilidad tecnológica y atención de soporte humana en caso de problemas técnicos que son fácilmente reparables.

Esta investigación estará enfocada en resolver los problemas de comunicación de dispositivos de bajo consumo mediante la creación de una nueva modalidad de modulación basada en FSK que mejore las características de modulación y resistencia al ruido, además de la optimización de FSK en consumo de ancho de banda y supresión de lóbulos laterales.

Nicaragua es un país donde los efectos de los desastres naturales son evidentes año con año, azotando a la población con huracanes o temblores de leve o alta magnitud, y donde la única forma de salvar vidas de estos fenómenos es sin dudarlos, información temprana, predictiva o en tiempo real para dar respuesta antes que estos sucedan, por ese motivo porque no dotar a los sensores que analizan la atmosfera, el subsuelo de este mecanismo para la transmisión de los datos del clima y otras variables del ecosistema que lo rodee, sea donde se ponga la sonda, se estará siendo capaz de recibir esa información de forma segura e integra. Esta nueva modulación podrá ser empleada para el control remoto de grandes sistemas desatendidos y que requiera sincronización o control periódico, las aplicaciones son inmensas y difícil de enumerar

Finalmente, este documento está estructurado en Cuatro capítulos bien definidos:

El capítulo I, incluye la teoría necesaria los para realizar esta investigación iniciando con los conceptos básico de telecomunicaciones, modulaciones, radio propagación y otros términos simples. Además, incluye un poco del marco legal con respecto al uso del espectro y otras disposiciones de ley.

En el Capítulo II, se describe la hipótesis y preguntas directrices, diseño de la metodología de la investigación y la recopilación y procesamiento de la información.

En el capítulo III, se encuentra todo el análisis de las modulaciones con sus características y análisis técnicos para su consecuente elección para modulador base de referencia y como complemento de la investigación.

Finalmente, en el capítulo IV se realiza el análisis de los resultados de la investigación y es donde se tienen los resultados de los objetivos propuesto que permiten desarrollar el diseño matemático de la nueva modulación optimizando FSK y sus respectivas pruebas de funcionamiento. Posterior a este capítulo se encuentra las conclusiones finales y las recomendaciones.

## **II. Planteamiento del problema**

Existen métodos de modulación que permiten transportar gran cantidad de información como es FSK y sus diferentes variantes que optimizan el uso del ancho de banda, no obstante estas variantes suelen agregar complejidad al modulador y es necesario tener el mismo rendimiento utilizando métodos mas eficientes y simples con el mínimo costo necesario de fabricación o complejidad para la reducción del ancho de banda en la firma espectral.

El problema radica en identificar un candidato óptimo para la modulación de esa transmisión, y una vez identificado, poder optimizarlo para que cumpla los requerimientos de una excelente eficiencia espectral, simpleza y con bajos costos de fabricación o adquisición, excelente resistencia frente al ruido y una gran capacidad de portabilidad entre sistemas.



### III. Antecedentes

No hay reseñas de investigaciones previas de universidades de Centroamérica ni alguna otra universidad en la que se haya publicado investigaciones similares a la modulación vectorial donde los factores de amortiguación de las componentes de frecuencias se pongan como factor de diferencia con respecto a lo que existe actualmente. Existen un informe sobre el protocolo y modos FT8/FT4 donde expresa una subida de potencia progresiva en rampa al inicio de la trama entera, pero no aplica a la modulación (Franke, Taylor, & Somerville, 2020).

Existe una investigación poco relacionada con la modulación vectorial, que sería la Modulación Angular. Esta es una combinación relacionada con FM (Frecuencia Modulada) y PM (Modulación por Fase). Pero ninguna asocia los elementos de la vectorización de énfasis en FSK para la reducción del ancho de banda utilizando por FSK.

A como lo expresa, el proceso de modulación consiste en variar algunos de los parámetros de una portadora, generalmente senoidal, de acuerdo a una señal de información o señal moduladora. En el caso de modulación angular, se hace variar la frecuencia o la fase de la portadora. Así la modulación angular tiene dos variantes: modulación de frecuencia (FM) y modulación de fase (PM). (Vega, 2008)

En ambos casos, la amplitud de la portadora se mantiene constante. Por esta razón a estos tipos de modulación se les designa también como de envolvente constante, en tanto que a la modulación de amplitud se le designa como de envolvente variable. A veces a la modulación angular se le designa también como modulación exponencial.

En la modulación GMSK tanto como en MSK y CPFSK nunca se aborda el tema del incremento progresivo de la potencia en funciones progresivas de las ondas portadoras al inicio de cada secuencia de transmisión, ya que como máximo se aplican filtros gaussianos para suavizar las transiciones discontinuas entre las fases del portador (McGuiggan, 2004).

## **IV. Justificación**

El desarrollo de un nuevo método de modulación deberá ser capaz de transportar datos de forma digital e implementable en sistemas actuales ya preexistentes, su sencillez y robustez tienen que ir de la mano con su eficiencia espectral y su bajo consumo energético para transmitir la señal vía radio, esto mejorando el concepto de descentralización de la transmisión garantizando alta fiabilidad de los datos y comunicación en todo momento.

El estudio será comprobado gracias al uso de herramientas científicas y equipos de radio que utilice una variante de FSK con un bajo ancho de banda reducido y con un nivel de supresión de espurias y componentes de Fourier.

Durante las pruebas experimentales tendrá que demostrar su alta inmunidad al ruido y su fácil despliegue, su aplicabilidad no solo será para comunicaciones de emergencia o telemetría de información, sino también para efectos comerciales de comunicación. Esta nueva tecnología podrá seguir expandiéndose por décadas siendo mejorada y perfeccionada sin tocar el concepto de la modulación subyacente.

## V. **Objetivos**

### **5.1 Objetivo General**

Diseñar una modulación por vectorización variable para la optimización de la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK).

#### **5.1.1 Objetivos Específicos**

- Evaluar diferentes modulaciones digitales en las categorías de eficiencia energética, inmunidad al ruido y simpleza del modulador para seleccionar cuál de ellas cumple con los estándares de una modulación base robusta.
- Diseñar una nueva variante de modulación basado en FSK para su optimización asíncrono de información y de baja velocidad.
- Demostrar el funcionamiento teórico de la nueva modalidad de modulación basada en FSK, para demostrar sus nuevas propiedades.

# Capítulo I

## 1. 1 Marco Teórico

El paradigma de los sistemas de comunicación modernos se basa en la capacidad de cómo modular la información antes de ser transmitida. De esta forma se consigue transportar información de un extremo a otro de forma alámbrica e inalámbrica.

Algunos parámetros que se necesita conocer de manera conceptual sobre un sistema de comunicación son los siguientes:

### 1.1.1 Modulación

Modulación es el conjunto de técnicas que se usan para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda sinusoidal. (Martin, 2006)

Estas técnicas permiten un mejor aprovechamiento del canal de comunicación lo que posibilita transmitir más información de forma simultánea además de mejorar la resistencia contra posibles ruidos e interferencias. También la modulación es el proceso, o el resultado del proceso, de variar una característica de una onda portadora de acuerdo con una señal que transporta información. El propósito de la modulación es sobreponer señales en las ondas portadoras. (Martin, 2006)

### 1.1. 2 Transmisor

El transmisor como su nombre lo indica es el dispositivo que se encarga de transmitir la información que se desea transmitir.

El transmisor electrónico de RF es un dispositivo que transmite información en forma de ondas electromagnéticas a grandes distancias a través de la atmósfera ya sea por presencia de línea de vista o por rebotes en la ionosfera u otros objetos naturales, estas ondas son electromagnéticas y son transmitidas en el nivel de la radiofrecuencia es decir sólo se transmiten ondas electromagnéticas cuyas frecuencias entran en el rango de entre 3Hz y 300GHz. (Rivas, 2016).

### 1.1.3 Factores de evaluación de los medios de transmisión

Los factores que influyen en la selección del medio de transmisión son los siguientes:

- **Ancho de banda:** es el espectro de frecuencia que el medio puede transmitir.
- **Longitud:** Cada arquitectura y tipo de cable tiene definida las distancias máximas utilizables.
- **Fiabilidad:** Determina la calidad de la transmisión. Se evalúa en porcentaje de errores por número de bits transmitidos.
- **Aplicación:** Tipo de instalación para el que es más adecuado, así como la distancia que puede cubrir con facilidad.
- **Restricciones:** Las condiciones en que se ha de evitar el medio.
- **Topología:** Las topologías que usan el cable.
- **Vulnerabilidad de la red:** Posibilidad de interferencias.
- **Coste del medio:** Facilidad y costes de la instalación, puede exceder al del costo del cable.
- **Seguridad:** Grado de dificultad con que se las señales transportadas pueden ser intervenidas.

### 1.1.4 Medio de Transmisión

El medio de transmisión es el camino físico entre el transmisor y el receptor. Cualquier medio físico que pueda transportar información en forma de señales electromagnéticas se puede utilizar en las redes de datos como un medio de transmisión. El medio físico puede condicionar la distancia, velocidad de transferencia, topología y el método de acceso. (Barcell, 2019)

Los principales medios de transmisión pueden ser:

Guiados, cuando las ondas se transmiten confinándolas a lo largo de un camino (medio) físico como por ejemplo un cable.

Los principales medios guiados emplean cobre y fibra óptica, ejemplos son:

- El par trenzado
- El cable coaxial
- El cable de fibra óptica

No guiados (inalámbricos):

- Ondas de Sonido
- Ondas Electromagnéticas
- Ondas de Presión Acústicas/Agua

### **1.1. 5 Técnicas de Modulación**

Uno de los objetivos de las comunicaciones es utilizar una frecuencia portadora como frecuencia básica de una comunicación, pero modificándola siguiendo un proceso denominado modulación para codificar la información en la onda portadora. (Huertas, 2012)

Las formas básicas de Modulación son:

#### **a) Amplitud**

- Modulación en Amplitud - Doble banda lateral con portadora - AM
- Doble banda lateral sin portadora - DBL-SP
- Banda lateral única - BLU

#### **b) Angular**

- Modulación en Frecuencia - FM
- Modulación en Fase - PM

### **1.1.6 Tipos de Modulación**

Dependiendo del parámetro o característica de la onda portadora el cual su parámetro sea modificado y donde exista una portadora analógica, se listan los siguientes:

- Modulación en doble banda lateral (DSB o DBL)
- Modulación de amplitud (AM)
- Modulación de fase (PM)

- Modulación de frecuencia (FM)
- Modulación banda lateral única (SSB o BLU)
- Modulación de banda lateral vestigial (VSB, VSB-AM, o BLV)
- Modulación de amplitud en cuadratura (QAM)
- Modulación por división ortogonal de frecuencia (OFDM)
- Modulación de Espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS)
- Modulación por división ortogonal de frecuencia codificada (COFDM).

También se emplean técnicas de modulación por impulsos, estas modulaciones son puramente digital y no poseen una señal portadora:

- Modulación por impulsos codificados (PCM)
- Modulación por anchura de pulsos (PWM)
- Modulación por amplitud de pulsos (PAM)
- Modulación por posición de pulsos (PPM)

Si la señal de transmisión corresponde a cambios de estado de encendido y apagado de muy baja velocidad como CW (Código Morse), Radioteletipo (RTTY), se les conoce como modulaciones por desplazamiento de parámetros.

- Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK)
- Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)
- Modulación por desplazamiento de fase (PSK)
- Modulación por desplazamiento de amplitud y fase (APSK o APK)
- Modulación por desplazamiento de estados on/off (OOK)

### **1.1.7 Radio Propagación en HF por rebote ionosférico**

La propagación de la señal de las ondas de radio de HF depende mucho de la potencia y la frecuencia del transmisor, de las condiciones de las capas ionosféricas, el disturbio de éstas ocasionado por la actividad solar de la cual se deriva el flujo solar, la radiación ultravioleta, las emisiones de rayos X que provienen de las explosiones solares, y las manchas solares, etc. Así mismo, la propagación de las señales está en dependencia de las capas de la ionosfera y su aparición a ciertas alturas.

La ionosfera, es la causante de la reflexión de las ondas electromagnéticas por debajo de los 30MHz, en algunos casos según las condiciones del clima espacial y regional de la zona donde se reciba o transmite, se pueden producir posibles reflexiones entre los 30MHz hasta los 300MHz, esto solamente por periodos muy cortos de tiempo. ((ITU), 1990).

## **1.2 Marco legal**

Actualmente las telecomunicaciones en Nicaragua son regidas enteramente por el ente regulador de telecomunicaciones de Nicaragua, Instituto Nicaragüense de Telecomunicaciones y Correos (TELCOR), a través de la ley número 200, aprobada por la asamblea de Nicaragua el 21 de Julio de 1995 publicado públicamente en La Gaceta, Diario Oficial N.º 154 de 18 de agosto de 1995.

En esta ley están la base sobre el funcionamiento y marco jurídico que deberá normalizar el Instituto de Telecomunicaciones y Correos de Nicaragua, como ente para regular las telecomunicaciones con objeto de la regulación de los servicios de telecomunicaciones y servicios postales, y establecer los derechos y deberes de los usuarios y de las operadoras, en condiciones de calidad, equidad, seguridad, y el desarrollo planificado y sostenido de las telecomunicaciones y servicios postales. Ya que la corriente tesis expresa el uso del espectro de las telecomunicaciones, se tiene que tomar en todo momento que el espectro radioeléctrico en orden y supervisión de TELCOR, la misma deberá asignar o proporcionar licencia de uso en caso de un uso comercial, para garantizar el espacio y la no interrupción o sobre modulación de otros servicios en la banda asignada según licencia.

Por lo tanto, según el Artículo 20 de la Ley General de Telecomunicaciones y Servicios postales expresa: *“Se requerirá un permiso de TELCOR para el establecimiento de instalaciones que requieran de la asignación de frecuencias radioeléctricas, y que no hayan sido específicamente autorizadas en las concesiones y licencias, así como las de los operadores de redes privadas. TELCOR determinará mediante disposiciones de carácter general los equipos de*



*radiocomunicación que, por su baja potencia, y no causen interferencias perjudiciales a otros equipos, puedan operar sin permiso previo”*

En base al artículo 21 de la presente Ley, se dice lo siguiente: *“TELCOR podrá otorgar autorizaciones temporales, de emergencia o experimentales, para aquellas operaciones limitadas técnica, económica o geográficamente, que a su juicio no califican para obtener una concesión, licencia o permiso de manera permanente”.*

Gracias al artículo 21 de la ley se puede proceder a la adquisición de una licencia u autorización temporal para efectos de experimentación y así no necesitar hacer un trámite de licenciamiento del espectro, el cual conllevaría a costos extras y retrasos debido al tiempo que el organismo estatal requiera para otorgar la licencia. Ya que el investigador a cargo de esta tesis posee actualmente la licencia de radioaficionado con el indicativo YN1ZJL de número de licencia HAM 010/2022, y en base al artículo 23 de la presente ley se dice que: *“El servicio de radioaficionado tiene solamente propósitos de intercomunicación, entretenimiento, experimentación e investigación con vocación de servicio y ayuda social sin fines de lucro. Este servicio es llevado a cabo por personas debidamente autorizadas en bandas de frecuencias acordadas en la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). El Reglamento que al efecto se dicte regulará esta materia.”*

Por lo tanto, como el investigador de esta tesis posee una licencia de radioaficionado autorizada y vigente hasta la fecha, se pueden realizar las respectivas pruebas experimentales en las bandas de frecuencias normadas por TELCOR, esto respetando las potencias máximas de emisión y la señalización de las mismas pruebas al inicio y finalización de cada transmisión. En el caso del uso comercial de dispositivos de transmisión por radio, será necesario tramitar una licencia para el uso con fines de explotación comercial o científica, ya que no se deberá usar en ningún momento con fines comerciales las bandas de radioaficionados.

## Capítulo II

### **2.1 Hipótesis o preguntas directrices.**

En la transmisión de datos por FSK existe una regla fundamental que explica lo siguiente; para diferenciar entre los diferentes valores lógicos y combinaciones de datos, es necesario variar la frecuencia de la señal portadora para de esta forma generar datos binarios, y conjunto de datos binarios.

El detalle de esta variación de las frecuencias es que produce saltos no sincronizados y abruptos entre los cambios de frecuencias, por este motivo se plantea la pregunta, ¿Es posible suavizar las transiciones usando rampas ascendentes de geometría variable?

## **2.2 Diseño Metodológico**

### **2.2.1 Tipo de investigación**

De acuerdo al enfoque se considera un enfoque mixto y cuantitativo ya que se desarrollará la experimentación de la modulación por vectorización variable y para ello se requieren variables de tipo experimental en las funciones que estarán intrínsecamente cambiando los patrones de potencia y su función en cada trama inicial y final de transmisión. Se considera cualitativo ya que se identificará de manera analítica los posibles escenarios en los cuales se puede desplegar y utilizar la modulación y que tan fiable y robusto es frente a los fenómenos radioeléctricos y atmosféricos.

### **2.2.2 Universo**

Se tomo muestras de tramas de un máximo de 1200 bits de longitud con valores aleatorios para cada una de las variantes de modulación en FSK, cada una de ellas en comparación con los resultados espectrales de la nueva modulación. Los datos se comparan tanto su firma espectral como la tasa de errores no en decodificación, si no en legibilidad de la data según la firma espectral del analizador virtual y físico.

#### **2.2.3.1 Muestra**

Durante el periodo de experimentación se utilizó un fragmento de 120 bits de longitud para la transmisión de datos, todos los datos son medibles para su análisis de calidad de señal y transmisión.

Para el análisis de prueba de error se utiliza un generador de números aleatorios utilizando como referencia el ruido del ambiente radioeléctrico, estos datos serán primero registrados en un archivo y luego transmitidos para su comparación con la información original, lo ideal es poder generar datos de 1MB de tamaño para su posterior transmisión, mencionar que de ser utilizado compresores de datos y mecanismos de corrección de errores de redundancia cíclica, cada prueba deberá ser independiente, según el método empleado para el tratamiento de los datos en ambos extremos tanto a nivel de corrección de errores como a nivel de compresión de datos.

## 2.2.4 Definición y operacionalización de la variable

Objetivos específicos	Variable conceptual	Subvariable y dimensiones	Variable operativa o indicador	Técnica de recolección de datos de información
<p>Evaluar diferentes modulaciones digitales en las categorías de eficiencia energética, inmunidad al ruido y simpleza del modulador para seleccionar cuál de ellas cumple con los estándares de una modulación base robusta.</p>	<p>Modulaciones digitales en las categorías de eficiencia energética, inmunidad al ruido y simpleza del modulador para seleccionar cuál de ellas cumple con los estándares de una modulación base robusta.</p>	<p>Análisis y selección sobre los tipos de modulación para determinar la más robusta y que cumpla con los estándares para la variante.</p>	<p>Investigaciones realizadas.  Tipos de modulaciones  Ventajas y desventajas de las modulaciones existentes.</p>	<p>Bibliografía existente  Investigaciones realizadas  Análisis Previas y Conferencias Científicas</p>

<p>Diseñar una nueva variante de modulación basado en FSK para el transporte asíncrono de información y de baja velocidad.</p>	<p>Variante de modulación basado en FSK para el transporte asíncrono de información y de baja velocidad.</p>	<p>Análisis de Matemática de las funciones vectoriales de Rampa para la optimización de FSK</p>	<p>Ecuaciones para las funciones de énfasis y pre énfasis Gráficas de rampa de énfasis y sus diferentes parámetros de modificación Espectrometría de Audio de las funciones aplicadas en FSK</p>	<p>Uso de Wolfram Mathematica como herramienta de graficado y automatización de experimentos matemáticos numéricos. Uso de GNURADIO para la experimentación científica en la modulación del modulador</p>
<p>Demostrar el funcionamiento teórico de la nueva modalidad de modulación basada en FSK, para demostrar sus nuevas propiedades.</p>	<p>Funcionamiento teórico de la nueva modalidad de modulación basada en FSK, para demostrar sus nuevas propiedades.</p>	<p>Análisis Espectral sobre una muestra en AFSK de las funciones vectoriales</p>	<p>Modulación y sus diferentes funciones aplicables en el énfasis Espectrometría del ancho de banda utilizado en 4-VFSK</p>	<p>Uso de SDR, analizador espectral de Speck para el archivo de audio resultante, y el analizador de FL Studio para la visualización en AFSK.</p>

### **2.2.5 Fuentes de información**

Se realizó una revisión bibliográfica selectiva sobre el tema objeto de estudio. La consulta se realizará en dos niveles: primero, desde la perspectiva matemática en general y segundo, dirigida particularmente al ámbito de las telecomunicaciones. Así, se obtendrá una gran cantidad de documentos generales y específicos que permitieron ubicar y comprender mejor al objeto de estudio particular: Modulaciones y sus características para la optimización de FSK y la creación de una nueva modulación. La búsqueda se ejecutará con los términos: "FSK" y "Gaussian" en idioma español e inglés en buscadores como Google, Yahoo, Duck&Go, entre otros. La literatura recuperada es de una tipología variada, y muy extensa en términos matemáticos, lo cual facilita de forma extensa el análisis y la comprensión de los fenómenos físicos.

### **2.2.6 Instrumentos para la recopilación de información**

Durante el proceso de modulación y transmisión de los datos, es posible contabilizar cada una de las interacciones resultantes del proceso de modulación, es por tanto que los instrumentos de medición fueron creados como funciones apartes que no interactúen con las muestras y que no disminuyan el rendimiento por ser un proceso extra, cualquier dato puede ser muestreado y contabilizado según el criterio que sea necesario dando como resultado un 99.9% de éxito en el muestreo de cada bit transmitido, la diferencia para lograr un 100% de la información restante se deben a los posibles bit nulos o errores en la transmisión que son endógenos en el sistema e inherentes a las condiciones externas del mismo.

### **2.2.7 Procesamiento y análisis de la información**

Estos datos son cuantizados en su totalidad con precisión, los datos serán analizados en tiempo real, usando analizadores numéricos como Wolfram para generar los gráficos y SDRs para el seguimiento de las señales una vez transmitidas vía radio.

## Capítulo III

### 3.1 Resultados

#### 3.1.1 Evaluación de las diferentes modulaciones digitales en las categorías de eficiencia energética, inmunidad al ruido y simpleza del modulador para seleccionar cuál de ellas cumple con los estándares de una modulación base robusta.

Para el análisis se realizará un enfoque en tres moduladores básicos digitales, pero con portadoras analógicas como ASK, FSK y PSK, no se incluirá QAM o QPSK ya que representan modulaciones en cuadratura.

Estas tres serán el pilar fundamental y básico, de cómo modular información digital de una forma muy básica sin la variación de dos o más propiedades o características de la señal portadora.

Se realizará una exploración rápida a las modulaciones con el objetivo de encontrar uno de los mecanismos más efectivos para garantizar tres cosas fundamentales, el desarrollo de la modulación:

- **Eficiencia Energética**

El modulador tiene que tener una eficiencia energética, el cual la mayor parte de la información modulada, sea transmitida usando cada vatio de energía posible.

- **Inmunidad al ruido radioeléctrico**

En los casos donde existan ambientes donde el SNR (Relación Señal-Ruido) sea muy alto, exista la capacidad de poder analizar la transmisión con el mínimo de señal requerida, manteniendo un nivel de error por bit relativamente aceptable.

- **Simpleza del modulador base**

El nuevo modo de modulación tendrá como base una forma muy simple y flexible para el modo de transmisión y su complejidad sólo podrá aumentar en el caso que se usen los mismos pilares básicos fundamentales de FSK para su propio

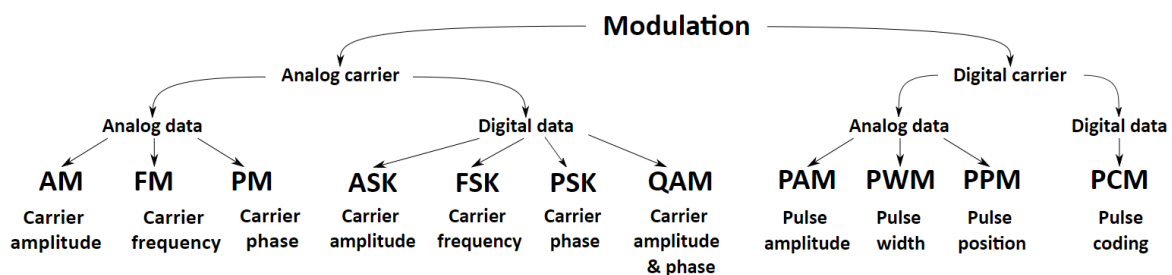
crecimiento, esto con el objetivo de mantener la estandarización, facilidad de portabilidad entre sistemas y una fabricación relativamente barata con respecto a las otras modulaciones.

### 3.1.1.1 ASK (Modulación por desplazamiento de Amplitud).

Según las modulaciones mencionadas anteriormente, de estas tres filosofías de modulación se pueden derivar múltiples más que son prácticamente la unión de dos de estas por desplazamientos de algunas de sus propiedades o ya de plano unir las como cuadratura, el cual aumenta la densidad de datos que pueden ser enviados, pero limita su rango de acción. (Huertas, 2012)

En este caso analizaremos al modulador base ASK para comprobar si cumple los requisitos de proporcionar el envío de información de forma robusta entre diferentes estaciones. Ver nuevamente la Figura 1 como referencia de las familias de modulación según sus portadoras características. Pero repasando, ¿Por qué hacer uso de ASK?, una gran interrogante se cierne sobre esta investigación, ya que existen multitud de variantes y métodos de modulación de información que ya se ha probado su fiabilidad, robustez e incluso velocidad frente a la aplastante simpleza y diseño de ASK en conjuntos con sus diferentes variantes.

Figura No. 1 Familia de Modulaciones según su portadora.

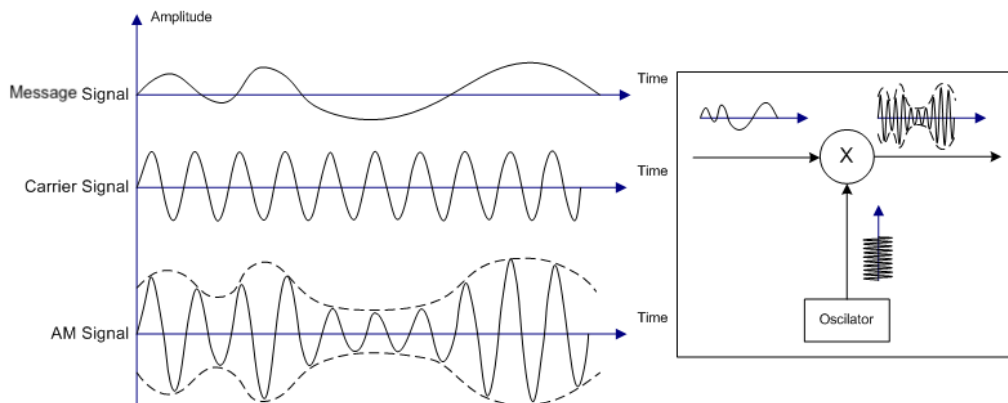


Nota. Árbol de Modulaciones, derivaciones según su portadora. Digital y Analógicas (Wikipedia, 2012)



ASK es parte de las modulaciones donde la portadora es puramente analógica, pero los datos modulados son concretamente digitales, es decir el constante cambio o desplazamiento de la amplitud, diferencia el conjunto de datos binarios a transmitir, y este paradigma aplica para el resto, para FSK se desplaza como frecuencia, en PSK, la fase y finalmente a algo que le llamó hibridación, la cual sería la modulación basada en cuadratura (QAM). El desplazamiento por amplitud, tiene sus raíces en AM en el cual, para poder enviar la información, las variaciones de los sonidos o en los datos digitales, se necesita modificar la amplitud con respecto a la información enviada ver el ejemplo en la Figura 2. Esto es un problema, ya que se usa la propiedad de la amplitud, algo muy sensible en términos de la relación señal-ruido, esto pasa ya que los objetos artificiales como motores, líneas eléctricas o maquinaria industrial, producen arcos eléctricos o frecuencias con componentes de Fourier que pueden modificar completamente la propiedad de la amplitud.

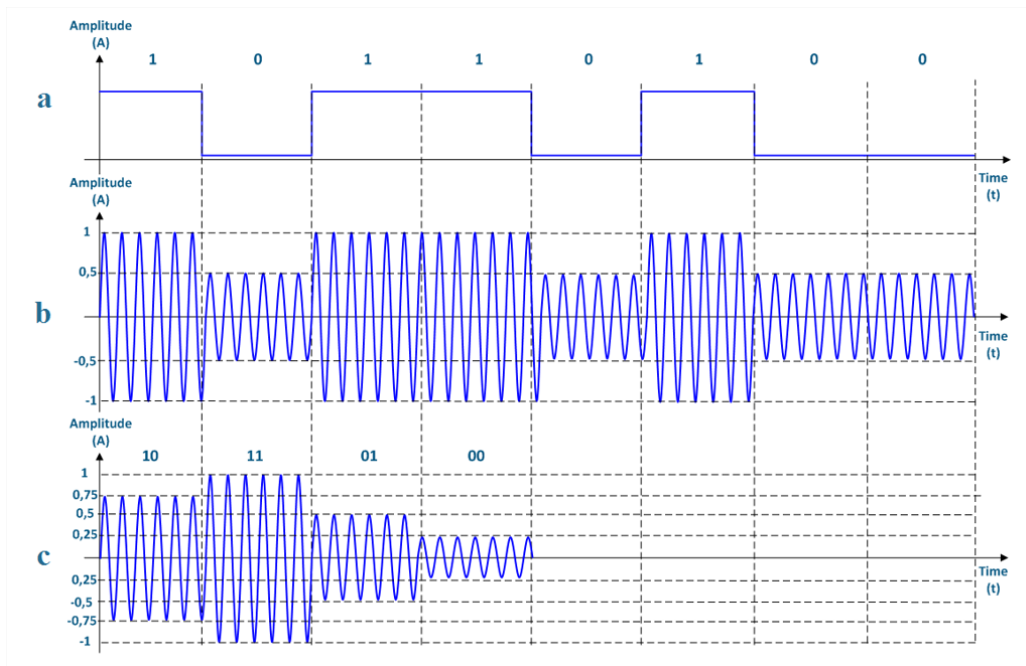
**Figura No. 2. Patrón de Modulación en AM, grafico operacional lineal.**



*Nota. Funcionamiento de la Modulación por AM en su operación más simple de forma lineal donde su modulación de salida es del 50-70%.*

Ya que una señal modulada por su propiedad en la amplitud es fácilmente susceptible al ruido eléctrico, ya que las señales se suman sobre la original, creando valores de tensión en sus puntos máximos que podría expresar otros valores o tonalidades si es que se transporta voz u otro sonido. Este mismo efecto es heredado a ASK. (QAM como modulador en cuadratura lo hereda)

**Figura No. 3** Modulación por desplazamiento de amplitud, modulación digital con portadora analógica.



*Nota. Ejemplo de la modulación de información digital usando Modulación por desplazamiento de Amplitud (ASK) en un plano de análisis de señales en paralelo con otras señales comparadas en el mismo tiempo.*

En el conmutador de desplazamiento de amplitud, la amplitud de una señal portadora de alta frecuencia se alterna entre dos valores en respuesta a un código PCM, ver referencia de esto en la Figura 3.

En el caso binario, la elección habitual es el conmutador de encendido-apagado, la onda de amplitud resultante consiste en pulsos de RF, llamado marcas, que representa el binario 1, y espacios que representan al binario 0. La modulación en ASK no es otra cosa que una variante de la modulación en AM que se adapta perfectamente a las condiciones de los sistemas digitales, además de que les permite trabajar sobre una sola frecuencia de transmisión en vez de tener que lidiar con pulsos cuadrados que contienen componentes en todas las frecuencias del espectro. (Benítez & González Sánchez, 2018)

Cuando una emisión de RF con una considerable cantidad de energía es emitida hacia el espacio y su emisión espectral se sitúa justo en la misma frecuencia de

emisión de una emisión en ASK, puede provocar dos cosas, si la señal es lo suficientemente fuerte, es capaz de tapar por completo a la señal original, causando una interferencia total, esto es equivalente a que estés hablando con alguien y casualmente entre un tercero en tu mismo canal de comunicación y le empieza a gritar al oído a tu receptor, tu señal sólo será opacada por el inmenso poder de la nueva señal (Interferencia Total).

El caso anterior raramente se da, ya que cada estación transmite en su frecuencia asignada por los entes reguladores de cada país, puede suceder, pero esto es solucionable aplicando multas y regulando bien el espectro, esto puede suceder también a pesar de tener a cada estación en su frecuencia asignada, ya que muchas de las estaciones legalmente situadas en su frecuencia y banda pueden estar muy cerca de otros receptores y por motivos de espurias pueden tener otras emisiones resonantes y casualmente tener una componente reflejada sobre tu canal de transmisión, para solucionar este detalle las estaciones normalmente usando sistemas de filtros muy efectivos que logran reducir las espurias sin tener que molestar a los vecinos próximos.

Un ejemplo de esto podrían ser los sistemas de repetidores convencionales, los cuales usan una misma antena para transmitir y recibir, para esto se usan diplexores que filtran las señales entrantes y salientes.

El curioso detalle de lo anteriormente mencionado, es que son muy pocos los casos que se registran debido a esos efectos de espurias y componentes de Fourier por estaciones cercanas, en contraparte hay un elemento que es aún más destructivo, ya que en ocasiones no es controlable y es completamente impredecible, las interferencias por objetos electrónicos de nuestro día a día. Ejemplos de esto, todas las fuentes conmutadas de muy baja calidad que se usa a diario en todas las partes del mundo, ambientes industriales con motores trifásicos con escobillas y/o carbones y los famosos alternadores de los vehículos, entre otros más. Estos dispositivos generan arcos eléctricos, lo cual generan una gran cantidad de componentes de Fourier las cuales son propagadas en el espacio con una gran

cantidad de tensión, y cuando entran en fase con la emisión en ASK, modifican la amplitud de los datos, resultando en una pérdida significativa de los datos transmitidos, debido a cambios en la amplitud de los símbolos transmitidos. Uno podría tener una señal el cual 10mV significa unos cero lógicos y tener otra señal de 50 mV el cual sería un uno lógico (SRM Institute of Science and Technology, 2018). Si en el proceso de transmisión de los datos se montará una emisión por interferencia de varios voltios sobre el mismo canal, sería capaz de destruir completamente la información, es tan así que simplemente estar muy debajo de las líneas de alta tensión y distribución de energía eléctrica internacional, es capaz de crear una zona completa de interferencia destructiva.

Este caso se puede apreciar en cómo las radiodifusiones en AM tienen un nivel de ruido intenso, son extremadamente susceptibles a cualquier interferencia de radio en el ambiente del receptor, en los casos como el audio de las Radio en AM aún con niveles de ruido extremos, somos capaz de diferenciar la voz humana y encontrar sentido a las palabras, pero para un transmisor usando ASK, es muy complicado entender flujos de datos que constantemente son intervenidas y modificadas por niveles de tensión superior incluso a los límites propuestos por el orden de la modulación misma, un ejemplo sería 4-ASK donde se tendrían 4 valores de voltaje por señal para poder enviar un conjunto de datos, en el cual 120mV sería el voltaje mínimo y 450mV la tensión umbral máxima que diferencia el último conjunto de datos, solo intente imaginar si una emisión con varios voltios de amplitud se situarán sobre una emisión en el cual su umbral máximo son 450mV, esto provocaría la destrucción total de los datos entrantes en el receptor, utilizando el canal de escucha por completo.

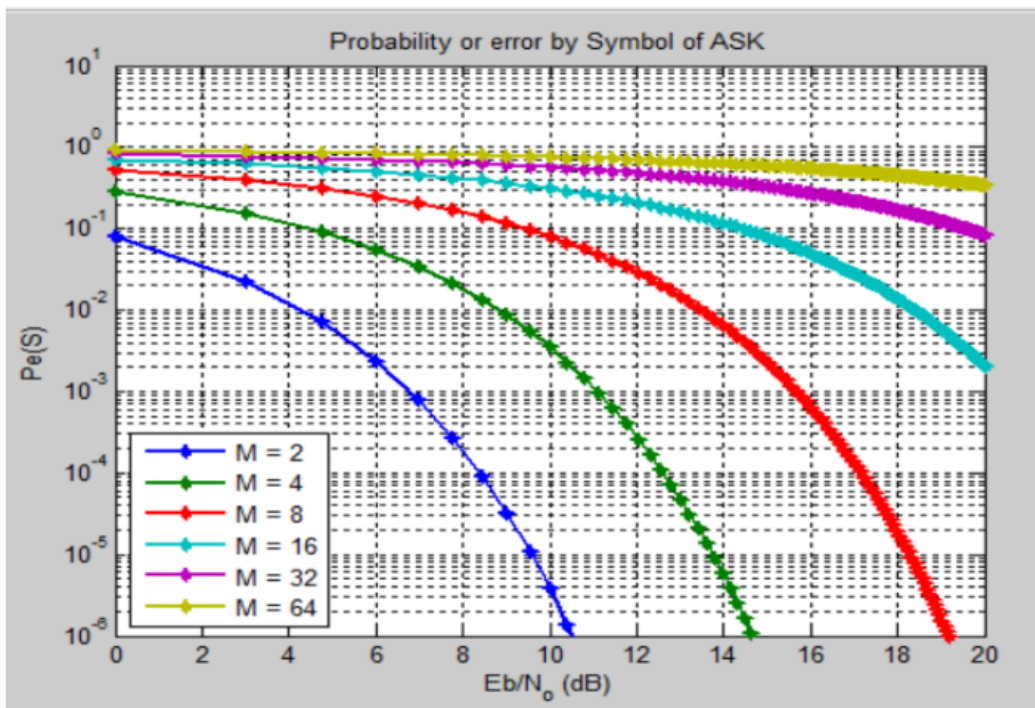
Para mayores niveles o índices de modulación en ASK los efectos anteriormente comentados son aún más notorios, ya que los diferentes niveles de amplitud tendrían mayor difusión en el área de recepción con respecto al ruido de fondo, esto es difuminar la existencia de niveles de amplitud por si grado de división de coherencia.

Para poder calcular el grado de probabilidad de error se utiliza la siguiente ecuación que determina un gráfico en dependencia del nivel de ruido con respecto a la señal.

$$P_{se} = \frac{(M-1)}{M} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{(3 \log_2 M) E_b}{(M^2-1) N_0}} \right) \quad P_{be} = \frac{P_{se, MASK}}{\log_2 M} = \frac{P_{se, MASK}}{k}$$

Donde  $k = \log_2 M$ , es bits/símbolo.  $MASK$ , es el índice de multinivel en ASK. Ecuaciones para determinar los errores por símbolo para modulaciones en ASK con  $M$  cantidad de multiniveles y errores por bit (BER). (www.atlantarf.com, 2013)

Figura No. 4 Análisis de la probabilidad de error por símbolo en ASK según su índice de modulación donde  $P_e(s)$  es la probabilidad de error de bit o (BER) y  $E_b/N_0$  es la energía de señal por bit sobre densidad de ruido por bit.



Nota: Estudio comparativo de modulaciones digital básico, análisis de tasas de error según el incremento de orden de modulación. Fuente: (NGAKAWA , ABENA, Vournone, Mibaile, & Yonwa, 2020) International Journal of Scientific & Engineering Research Volume.

**Tabla No. 1 Tasa de error por bit, según su nivel de BER y su tiempo de incidencia**

BER	Frecuencia de Errores	Incidencia de Errores
1.00E-12	1 en 1 Trillón de bits	1 error cada 6.94 Horas
1.00E-11	1 en 100 Billones de bits	1 error cada 41.67 min
1.00E-10	1 en 10 Billones de bits	1 error cada 4.167 min
1.00E-09	1 en 1 Billones de bits	1 error cada 25 segundos
1.00E-08	1 en 100 Millones de bits	1 error cada 2.5 segundos
1.00E-07	1 en 10 Millones de bits	4 errores por segundos
1.00E-06	1 en 1 Millones de bits	40 errores por segundo
1.00E-05	1 en 100 Miles de bits	400 errores por segundo
1.00E-04	1 en 10 Miles de bits	4000 errores por segundo
1.00E-03	1 en 1 Mil de bits	40000 errores por segundo

*Nota: La tabla refleja en nivel de BER que se recibe el receptor con respecto a la señal transmitida, su frecuencia de errores y el estimado teórico de cada cuanto el error podría presentarse según la tasa de error percibida. Estos valores son generales e independientes de la modulación empleada.*

Como se puede observar en la figura 4, las curvaturas para las tasas de error por bit (observar la concurrencia de errores según la tabla 1), si se aumenta el nivel de modulación usando más niveles de división de amplitud en la señal portadora, se vuelven muy pronunciada a medida que avanza ligeramente el nivel de ruido y estas sufren un fuerte aumento de la curvatura. Por este motivo, ASK no es un fuerte candidato para el uso del modulador base, esto es una lástima ya que ASK es muy sencillo de implementar y sus circuitos de modulación extremadamente baratos de fabricar, pero como dice una frase; “Para ganar algo hay que perder algo”, o en palabras de físicos, “todo es relativo”. Algo barato y que sea sencillo de construir, tendrá una debilidad tan fuerte como su fortaleza, y ahí la razón para rechazar rotundamente las aplicaciones de ASK como vía a la densificación de un nuevo modo.

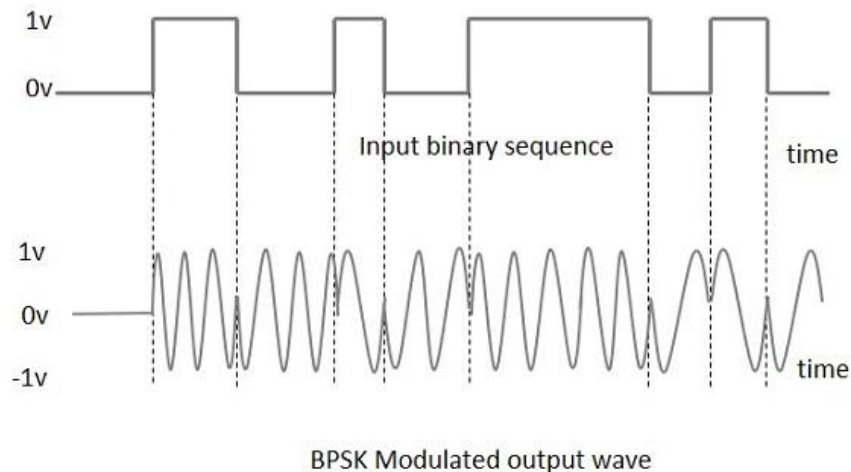
### 3.1.1.2 PSK (Modulación por desplazamiento de Fase).

Un fuerte candidato para la modulación base de telemetría sería PSK donde una de las características variables de la onda portadora es la fase, esto quiere decir que para una función:

$$s(t)_0 = A \cos(\omega_c t + \theta_0) ; s(t)_1 = A \cos(\omega_c t + \theta_1)$$

Donde los valores de  $\theta_n$  son los valores del desfase dentro de una onda de función coseno, cada valor o diferencia de las fases dentro de las funciones representaran los diferentes estados de combinación binaria para representar la información, entre mayor índice del modulador M-PSK mayor será el tamaño de la constelación observable en un vectorscopio. En la figura No. 5 se puede apreciar, un PSK no coherente, ya que los cambios de fase se realizan de forma abrupta y sin control de las caídas, provocando discontinuidades de la onda entre los cambios.

**Figura No. 5** Ejemplo del mapeo de los datos binarios según la onda portadora en cambio de su fase, nótese que siempre mantiene una amplitud y frecuencia constante.



*Nota: Como se puede apreciar, en este ejemplo se puede notar un PSK no coherente, ya que los cambios de fase se realizan de forma abrupta y sin control de las caídas, provocando discontinuidades de la onda entre los cambios.*

La anterior ecuación solo representa la modulación BPSK (Binary PSK), donde solo existen dos estados representables en binarios por fase, un ejemplo de esto se podría decir que es el modo RTTY (Radioteletipo), para otros índices como podría ser 4-PSK donde se necesitan más fases se utiliza la cuadratura en PSK (QPSK) o PSK Cuaternaria, donde se pueden interpretar como dos sistemas BPSK en fase de cuadratura usando los canales I y Q, para cada sistema y los diferentes estados de estos sistemas se denotan de la siguiente manera:

$$S_{QPSK}(t) = \left\{ \begin{array}{l} S_1(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \theta_1) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + \pi/4)t ; \text{estado binario } 11 \\ S_2(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \theta_2) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + 3\pi/4)t ; \text{estado binario } 01 \\ S_3(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \theta_3) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + 5\pi/4)t ; \text{estado binario } 00 \\ S_4(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \theta_4) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + 7\pi/4)t ; \text{estado binario } 10 \end{array} \right.$$

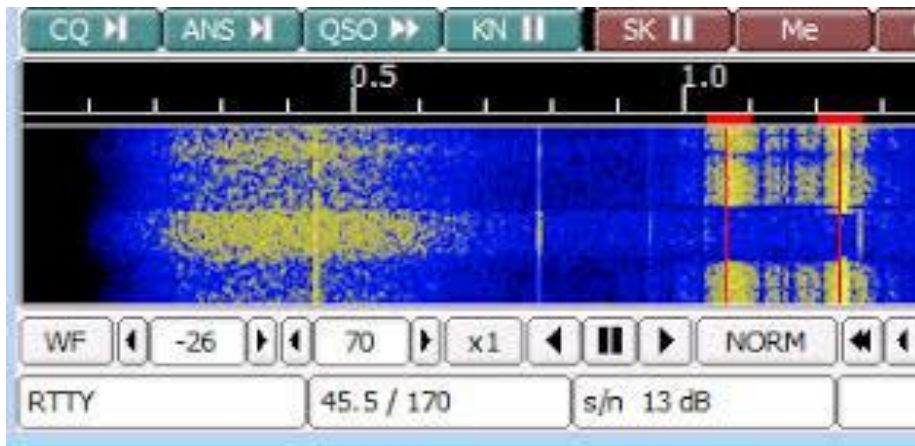
Cada estado que está representado por un desfase en específico con una suma al final de la función de onda que representa cada desfase, A mayor número de posibles fases, mayor es la cantidad de información que se puede transmitir utilizando el mismo ancho de banda, pero mayor es también su sensibilidad frente a ruidos e interferencias. (Couch, 2016)

Las modulaciones BPSK y QPSK, derivadas de la modulación por desplazamiento de fase, son óptimas desde el punto de vista de protección frente a errores. En esencia, la diferencia entre distintos símbolos asociados a cada fase es máxima para la potencia y ancho de banda utilizados. No pasa lo mismo con otras variantes tales como la PSK de 8 niveles (8-PSK), la de 16 (16-PSK) o superiores, para las cuales existen otros esquemas de modulación digital más eficientes. (Tomasi, 2013)

La gran ventaja de las modulaciones PSK es que la potencia de todos los símbolos es la misma, por lo que se simplifica el diseño de los amplificadores y etapas receptoras lo que significa reducción de costos, dado que la potencia de la fuente es constante.

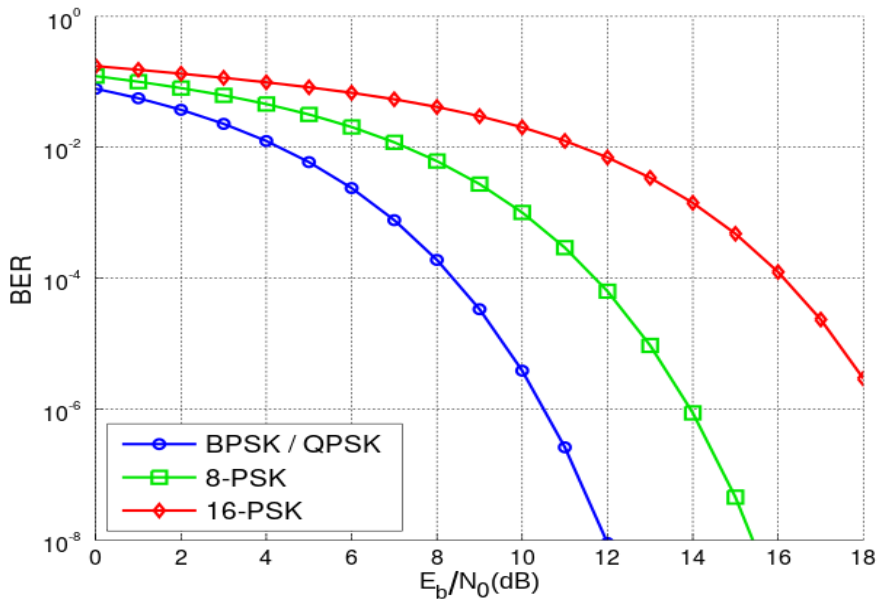


Figura No. 6 Fldigi programa para la codificación y decodificación de RTTY en tiempo real.



Nota: Fue seleccionado el modo RTTY y en la parte derecha del analizador de espectro en disposición de cascada, se ve la firma espectral de RTTY.

Figura No. 7. Curvas de tasas de error de bit para la modulación BPSK, QPSK, 8-PSK y 16-PSK, en un canal con ruido blanco aditivo gaussiano.



Nota: Curvas de tasa de bits erróneos para modulación por desplazamiento de fase: BPSK, QPSK, 8-PSK y 16-PSK. Graficado en MATLAB. Fuente: Archivo: PSK BER curves.svg - <https://es.wikipedia.org>.

El gran problema con respecto a PSK es que, en el caso que se necesite mayor cantidad de información para ser transmitida, es necesario elevar el orden de la modulación y esto significa en el aumento de la probabilidad de las tasas de error, y este factor se incrementa significativamente de 8-PSK en adelante de forma drástica, observar la figura 7, que detalla las curvas de probabilidad de errores según el índice de modulación. Esto podría quedar desestimado, ya que solo es necesario usar índices de modulación bajos como BPSK para transmitir la información de forma segura a bajas tasas de velocidad.

Otro inconveniente es su facilidad de los errores introducidos por su característica del desfase para la señalización de los símbolos o bits, esto significa que si de alguna forma una señal que fue transmitida desde un lugar A es recibida de diferentes formas ya sea por multi trayecto o por dispersión de algún medio natural, eventualmente su fase se ve afectada.

Si una onda incide a un objeto, este cambiara su trayectoria, afectara a su potencia nominal en tránsito y puede generar interferencias a partir del cambio de fase, ya que esa onda viaja por otro trayecto, por lo tanto, múltiples trayectorias entran al receptor en diferentes tiempos causando un desfase por tiempo de llegada, esto interpretando a fondo el principio de Fresnel – Huygens. (Rappaport, 2002) Este efecto tiene una alta probabilidad de suceder, cuando los transmisores de las radiosondas sean emplazados en zonas montañosas, cerca de ríos o lagos, o incluso cerca del mar, donde el agua genera dispersión y funciona como un excelente espejo, este efecto es algo muy claro de porque no es muy conveniente PSK como modulador base.

PSK entre sus desventajas tiene una probabilidad de error elevada según el incremento del orden de modulación, en algunos casos peor que FSK y siempre mayores a ASK, además que ocupa el mismo ancho de banda que ASK, lo cual no aporta una mejora evolutiva con respecto a la modulación anteriormente estudiada.

Dentro de sus ventajas, la potencia dentro de cada símbolo transmitido siempre es la misma, por lo cual, habrá un consumo concurrente durante todo el periodo de transmisión de los datos.

Esto significa un constante consumo, y la imposibilidad de poder efectuar modificaciones a la misma para su optimización, ya que de la misma forma es necesario un mayor nivel de potencia para mantener probabilidades bajas de errores, hay un mayor consumo, y se necesita que el modulador sea lo más eficiente posible.

La simpleza de su construcción es un tema aparte, ya que variar la fase de una señal se logra a base de filtros y si se ocupan transmisores SDRs, se vuelve más sencillo, pero tendría un costo eléctrico extremadamente elevado por el uso de computadoras abordo para el control de la señal. Eventualmente construir transmisores que hagan uso de PSK es increíblemente más costoso que ASK y FSK, sin comparar sus diferentes variantes, ya que en casos muy puntuales suele ser más complejo y costoso según su aplicación.

PSK al igual que ASK no tiene la cualidad por su naturaleza de poder optimizar el rendimiento y características de ambas a través de modificaciones, esto lo vuelve un poco tosco ya que no es posible realmente mejorar para de las desventajas que acarrea consigo misma. Por esta razón y otras más, PSK queda relegada como una modulación no apta para el trabajo de envío de telemetría, es posible que resuelva y que realice el trabajo, pero las condiciones en la cual el modulador se someterá será un poco extremo y es conveniente tener fiabilidad en todo momento, más si los transmisores estarán alejados, ocuparan la ionosfera como medio de propagación y se necesita eficiencia eléctrica.

PSK ofrece un excelente uso espectral del ancho de banda, pero no su complejidad como modulador agrega peligros de fallos extras, y según la ley de Murphy, lo peor que puede pasar en algún momento pasara, es mejor tener menos funciones que

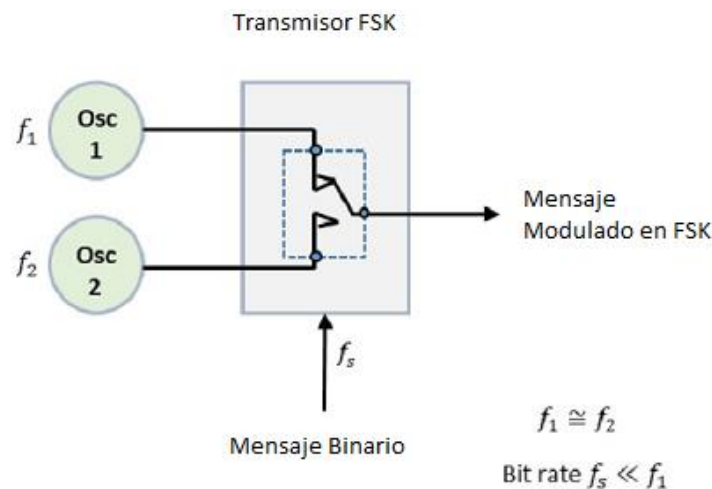
puedan causar problemas, lejos de un sistema desatendido y a largas distancias, fiabilidad, ante todo, lo sencillo y eficaz supera a lo complejo.

### 3.1.1.3 FSK (Modulación por desplazamiento de Frecuencia).

Se ha llegado al último candidato de la serie de moduladores digitales con portadora analógica y uno de los favoritos, en este modulador un perfil que cumple con los requisitos necesarios para un sistema robusto y fiable.

La modulación por desplazamiento de frecuencia no es nada más que la variación de la frecuencia de la onda portadora para la identificación de los símbolos o bits al momento de su transmisión y posteriormente su transmisión, tiene la bondad que se pueden usar ondas de sonido como forma de encapsular la señal y luego ser transmitida usando otro modulador como medio de portación secundaria, un ejemplo de esto podría ser usar A-FSK (Audio FSK) bajo modos tipo FT8 o FT4 y ser transmitido vía SSB (Banda Laterales Superiores o Inferiores) y tener el mismo efecto si fuese un modulador embebido, es decir tener osciladores para la modulación en FSK, pero esto solo se hace en aplicaciones muy específicas.

Figura No. 8. Funcionamiento simplificado del transmisor FSK simple, de dos estados compuestos también llamado BFSK (FSK Binario).



*Nota: Este esquema de modulador BFSK es la versión más básica y no optimizada de FSK. Los valores discretos son seleccionados por multiplexor.*

BFSK puede ser expresado matemáticamente de la siguiente forma:

$$S_{BFSK} = \left\{ \begin{array}{l} S_H(t) = A_c \cos(2\pi f_1 t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + 2\pi \Delta f) t \\ S_L(t) = A_c \cos(2\pi f_2 t) = \sqrt{\frac{2E_b}{b}} \cos(2\pi f_c t - 2\pi \Delta f) t \end{array} \right\}$$

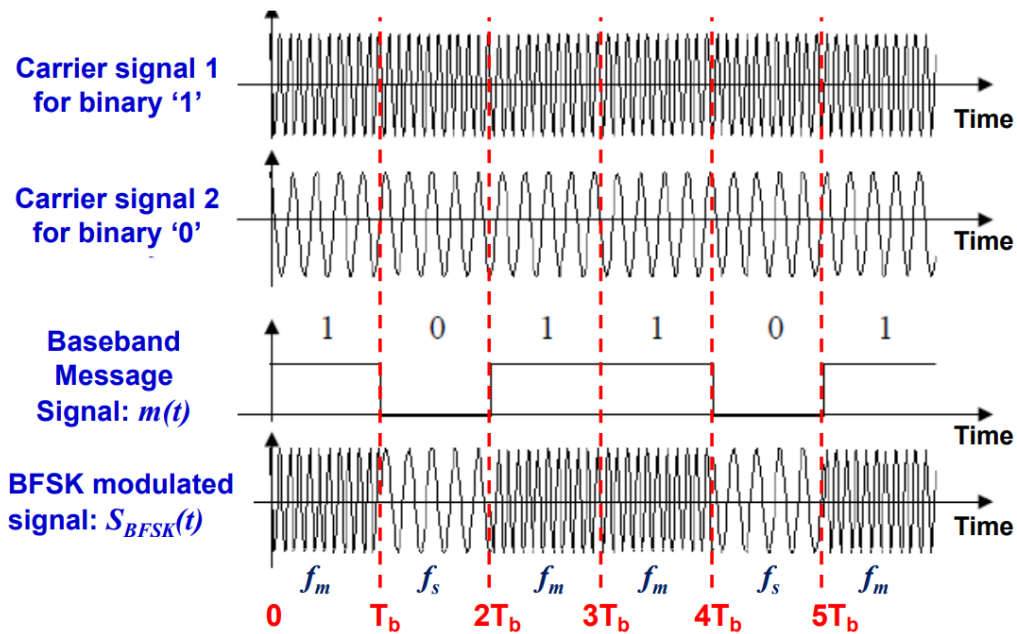
Donde  $f_c = 0.5(f_H + f_L) = m/(2T_b)$ ;  $\Delta f = 0.5(f_H - f_L) = n/(2T_b)$

En M-FSK, el espaciado de frecuencia mínimo para mantener la ortogonalidad entre portadores es:  $2\Delta f_{min} = R_s/2 = 1/(2T_s)$  para detección coherente, y  $2\Delta f_{min} = R_s = 1/(T_s)$  para la detección no coherente. (RF, 2013) Para el caso del esquema de modulación anterior se podría decir que es FSK no coherente, ya que al existir dos VFO (Osciladores de Frecuencia Variable), es muy difícil que exista sincronización con las fases entre las transiciones.

La componente de función inicial es la que determina exactamente que frecuencia se estará usando para la función coseno, donde la amplitud siempre se mantiene constante e invariable. Esto es una ventaja, ya que FSK es una de las modulaciones con mayor inmunidad al ruido radioeléctrico, es posible que existan saltos o picos de tensión sobre la señal emitida, y por supuesto cambiar su valor de amplitud en ese determinado tiempo, pero como resultante no habrá ningún daño a la señal, ya que solo se esperan analizar diferentes componentes de frecuencias que determinan los símbolos. Ver Figura 9 para referencia del proceso de FSK.

FSK tiene un detalle con respecto a su eficiencia espectral, y es que los saltos discontinuos de frecuencias para la representación de símbolos dan como resultante el uso de un mayor ancho de banda comparado con otras modulaciones, cuando FSK es no coherente, el efecto se ve mucho más, ya que al haber dos osciladores completamente separados (ver figura 8) es muy complicado sincronizarlos para que en el momento que un multiplexor seleccione el oscilador necesario para representar el símbolo, estos podrían no estar en fase con respecto uno del otro, causando la no coherencia de la señal y componentes de Fourier.

Figura No. 9. Ejemplo de FSK analizado en un plano de tiempo, Modulación BFSK.



*Nota: Véase que para cada dato existe su frecuencia específica, esto es BFSK y ya que sus fases caen sincronizadamente con la siguiente componente de frecuencia se dice que es FSK Coherente.*

Los problemas de no coherencia se pueden solucionar fácilmente utilizando VFO (Osciladores de frecuencia variable), al existir un solo oscilador que varíe su frecuencia aumentando los valores de tensión, nunca habrá cambios de fases entre los valores de frecuencias ya que nunca se hace conmutación de osciladores, el VFO solo aumenta su velocidad de reloj sin cambiar su fase, a este proceso se le conoce como CPFSK o (Fase Continua - FSK), esto reduce la interferencia entre canales vecinos reduciendo el ancho de banda y también reduce la potencia de las bandas laterales con respecto a la frecuencia central, esto aumenta la eficiencia del mismo.

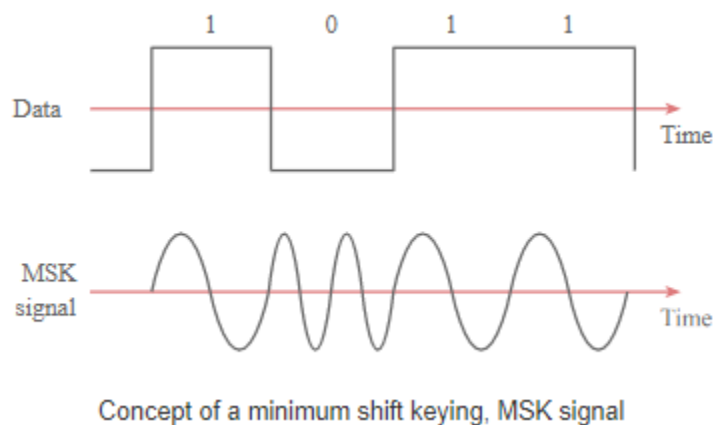
FSK tiene la característica de poder ser aún más eficiente en términos de ancho de banda, eficiencia espectral y potencia, a esto se le denomina MSK.

### 3.1.1.4 MSK (Desplazamiento Mínimo de Frecuencia).

La codificación de desplazamiento mínimo o MSK fue desarrollada por primera vez por los empleados de Collins Radio, Melvin L. Doelz y Earl T. Heald, a fines de la década de 1950. MSK o MFSK, es la técnica mejorada de FSK la cual además de embeber CPFSK se agrega una suave transición entre los estados de frecuencia. Como tal CPFSK, poseía un VFO que variaba su frecuencia de forma instantánea manteniendo la fase entre las transiciones, pero siempre entre transiciones discretas. Con la mejora de MSK, se introducen cambios entre transiciones con índices de desviaciones que suavizan los cambios de valores discretos a incrementales muy similares a una señal análoga, véase en la figura 10.

Esta técnica tiene algunos límites ya que es necesario que las transiciones no sobrepasen un nivel o índice y los valores de cambios de las frecuencias tiene que tener un espaciado entre componentes para evitar retrasos por el incremento progresivo de la frecuencia de los osciladores.

Figura No. 10. MSK modulando datos digitales usando el desplazamiento mínimo de frecuencia.



*Nota: En MSK, se aplica FSK Coherente ya que conserva la fase, y hay pequeños desplazamientos de la frecuencia entre los valores establecidos, por lo tanto, no se muestra una discontinuidad discreta.*

MFSK o simplemente MSK, actualmente se ocupa ya en sistemas de envío de información extremadamente efectiva tanto para el área comercial, telemetría y radiocomunicación amateur, donde las señales recorren largas distancias y los receptores perciben señales por debajo de los -19dB y con pronósticos de propagación muy desfavorables.

En la figura No.11 y 12 Muestra un ejemplo de FT8 y FT4 las cuales son modos de comunicaciones usados en la radioafición en las bandas de HF, VHF, UHF y SHF, son señales extremadamente débiles que requieren muy poca potencia, y son capaces de ser percibidas y decodificadas en ecosistemas radioeléctricos muy ruidosos, en casos muy extremos se pueden decodificar señales a partir de los -22dB entre ruido e interferencia con ese mismo SNR (Radio, 2017).

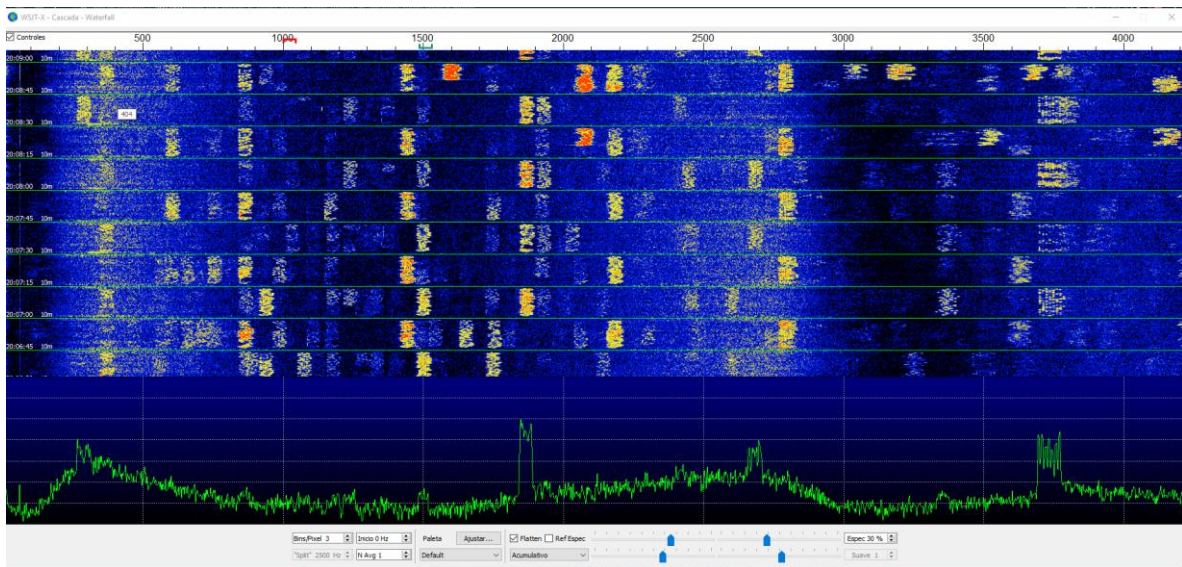
**Figura No. 11 Señales FT8 decodificadas en el programa WSJT en 28.074MHZ USB.**

----- 10m						
200300	-18	0.5	1480	~	CE3RKW	VP2EIH R-16
200300	11	0.3	1731	~	AL0R	HK3J -10
200300	5	0.2	350	~	CQ	AB1WG FN34
200300	-3	0.2	918	~	PU2OTH	AG6X DM12
200300	-13	0.2	1309	~	N0KV	NA2F +07
200300	-13	0.1	1850	~	AL0R	N4SFC EL98
200300	-13	0.4	1237	~	KE5FN	KC1POV FN32
200300	-8	0.3	1174	~	N6YIH	K1RV -14
200300	-20	0.1	1012	~	ZS6PD	K1WIM FN31
200300	-17	0.3	1984	~	MW0ZZK	KQ4ADO EM65
200300	-12	0.2	585	~	KE1AB	PP5TG GG53
200300	-14	0.2	2429	~	N5IF	WA2KGG EM92
200300	-14	0.4	537	~	AA0HJ	NG4C RR73
200300	-20	0.3	1260	~	W8PTB	K7CAR -06
200300	-17	0.4	871	~	CQ	W5LIC EL29
200300	-21	0.3	932	~	CQ	K9ZW EN64
200300	-24	2.3	1439	~	LT5X	LU9HGW -16
200300	-12	0.2	1725	~	KA5D	KOPT R+11
200300	-16	0.3	1159	~	WB3D	NK1I FN43
200300	-24	0.4	1389	~	CQ	W6NUC DN13
200300	-22	0.0	1697	~	CQ	K4SHA EM72
200300	-17	0.2	666	~	CQ	RI LU3HFS FF78

*Nota: Véase como las estaciones W6NUC y K3SHA (Estaciones de Estados Unidos) son recibidas en Nicaragua en el Grilla Geográfica EK62vb con una intensidad de -24 y -22. (Vista tomada desde el programa WSJT).*



**Figura No. 12. Señales de FT8 vistas en el espectrograma de la señal centrada en 28.074MHZ en Banda lateral Superior.**

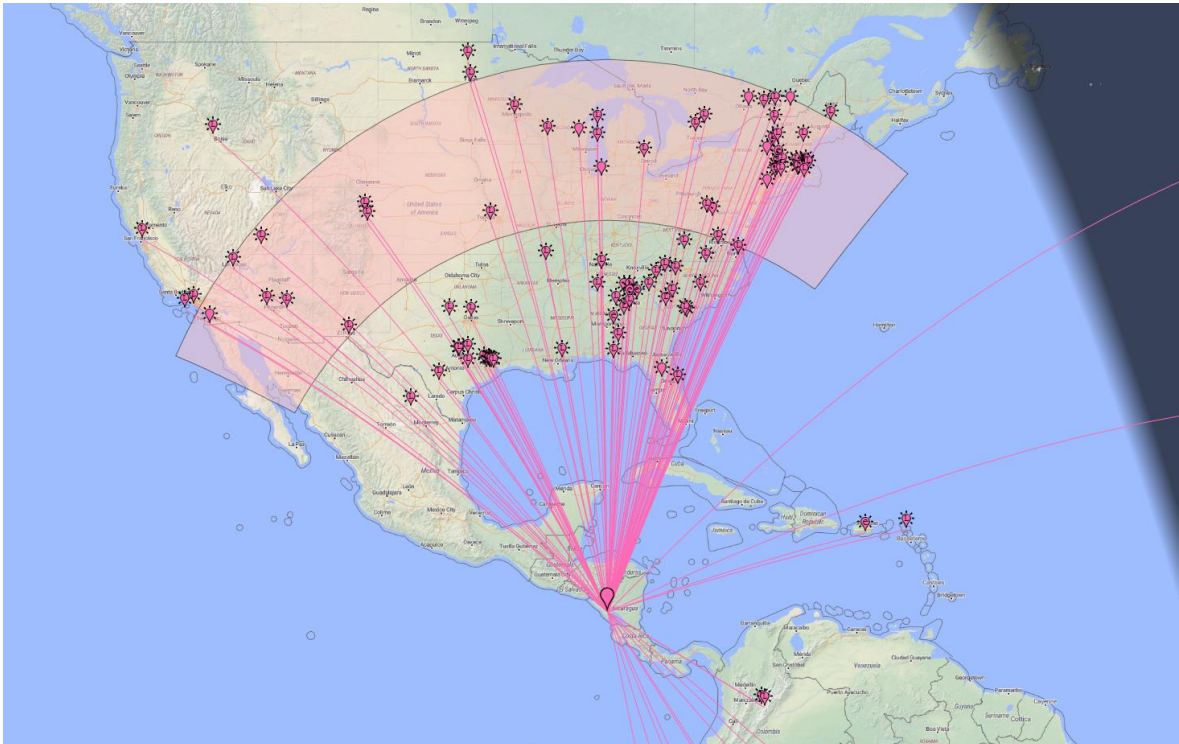


*Nota: Espectrograma de las señales recibidas en 28.074MHz en la Banda Lateral Superior, las señales son transmitidas de la misma forma ubicando los límites de 0 a 3.5kHz.*

Como se puede apreciar en la figura 12 las señales llegan muy débiles, y la potencia nominal con la que se transmite es de 25 a 30W como regla normativa, la gran mayoría de las estaciones que fueron recibidas son de Norteamérica, (Estados Unidos y México), según sea la propagación estas señales pueden ser recibidas desde otras ubicaciones aún más lejanas véase la figura 13.

Como se puede percibir, MSK es utilizado con estos propósitos de enviar mensajes cortos de baja latencia con una increíble eficiencia espectral y evitando los efectos de difusión y multi trayecto de la señal incidente de diferentes medios y distancias. La señal es capaz de ser reconstruida a pesar de las pésimas condiciones de trayectoria y propagación del medio.

**Figura No. 13 Mapa del registro de las señales recibidas según su QRZ (indicativo), la banda utilizada es 10m en 28.07MHZ.Propagacion Diurna.**



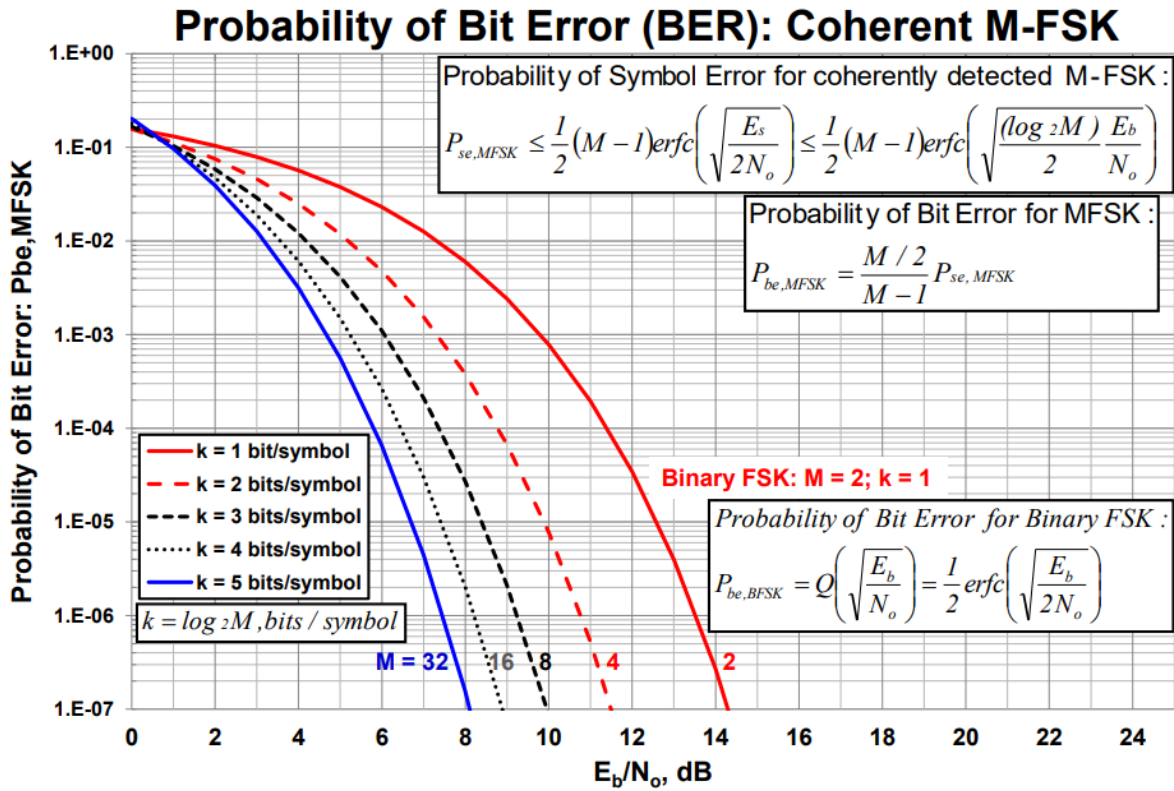
*Nota: Las señales son percibidas gracias a la fuerte inmunidad del ruido que brinda FSK, y a los medios de propagación ionosférica que se percibe en el momento de la prueba.*

FSK con su mejora de MSK es una fuerte referencia para un modulador base estable, robusto y con una gran inmunidad al ruido. Según el grafico de la figura 14, la probabilidad de error por bit se puede calcular usando la siguiente expresión matemática.

$$P_{se,MFSK} \leq (M - 1) \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_s}{2N_o}} \right) \leq \frac{1}{2} (M - 1) \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{(\log_2 M) E_b}{2 N_o}} \right)$$

Donde  $E_b/N_o$  = Energía de señal por bit sobre densidad de ruido por bit. (RF, 2013)

Figura No. 14 Curvatura de probabilidades de error por bit (BER) en FSK coherente.



Nota: En el caso de la tasa de error en FSK se logra apreciar que la curvatura demuestra menos errores según el índice. Fuente: (RF, 2013).

Con las anteriores características mencionadas y apreciando el gráfico de las probabilidades de error podemos resumir algo muy importante de FSK (Figura 14).

- FSK es idealmente una modulación de envolvente constante; por lo tanto, más eficiente energéticamente
- En el transmisor se pueden utilizar amplificadores de potencia no lineales de clase C, facilitando aún más su construcción y eficiencia en su etapa de potencia.
- FSK es más eficiente en ancho de banda que ASK, esto categorizando las mejoras como CPFSK y MSK.
- Los esquemas de modulación y demodulación son razonablemente simples.

Estas cualidades pueden ser aun mejoradas gracias a una técnica que actualmente se usa en comunicaciones como GSM y Bluetooth, esta es la variante de modulación GMSK o GFSK.

### **3.1.1.5 Modulación GMSK (Desplazamiento de Frecuencia Mínimo Gaussiano).**

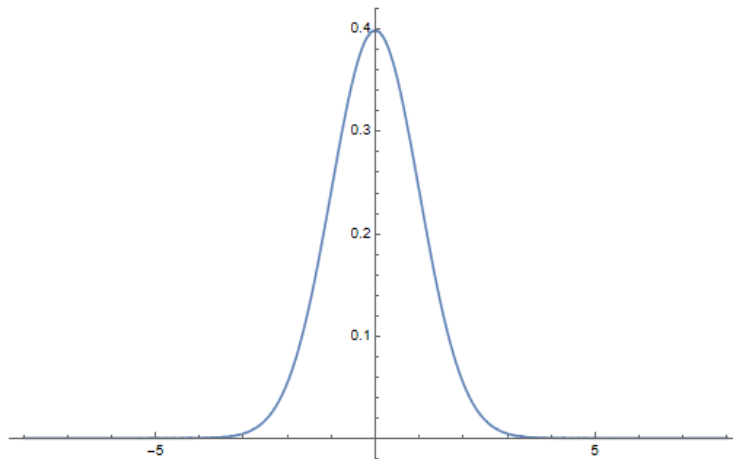
La modulación por desplazamiento mínimo gaussiano, GMSK, es una forma de modulación basada en la modulación por desplazamiento de frecuencia que no tiene discontinuidades de fase y proporciona un uso eficiente del espectro, además de permitir amplificadores de potencia de radio de alta eficiencia. (electronics-notes.com, 2013) Básicamente GMSK es la unión de CPFSK y MSK, usando como modulador base FSK, GMSK además agrega un tercer elemento a la modulación base, un filtro gaussiano al principio de la entrada de los datos antes de ser modulado.

#### **Filtro Gaussiano**

En electrónica y procesamiento de señales, un filtro gaussiano es un filtro cuya respuesta al impulso es una función gaussiana (o una aproximación a ella, ya que una verdadera respuesta gaussiana es físicamente irrealizable ya que tiene soporte infinito). Los filtros gaussianos tienen la propiedad de no sobrepasar una entrada de función escalonada y minimizar el tiempo de subida y bajada. Este comportamiento está estrechamente relacionado con el hecho de que el filtro gaussiano tiene el mínimo retardo de grupo posible. (J. Blinchikoff, 1999)

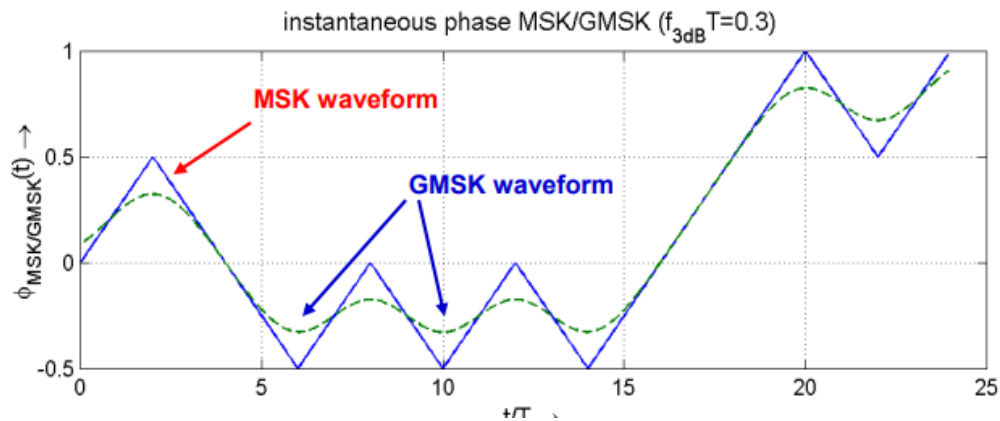
La función gaussiana se aplica a FSK para poder suavizar las transiciones por cada dato transmitido, es decir, el filtro se aplica posterior a la introducción de los datos antes de ser modulados y su rampa de ascenso es suavizada gracias al filtro, para evitar los flancos ascendentes y no tener transiciones discretas, a este principio se le aplica la técnica de MSK para suavizar aún más la transición y ser más eficiente espectralmente. Un ejemplo de la suavidad se puede ver en la figura 15, donde se aplica una rampa ascendente muy suave para poder evitar saltos bruscos entre las transiciones.

**Figura No. 15. Representación en el plano cartesiano de un filtro Gaussiano.**



*Nota: Imagen de gráfica generada en Wolfram Mathematica 12.3 bajo la expresión de filtro:  $\frac{e^{-x^2/2}}{\sqrt{2\pi}}$ . los datos se codifican en forma de variaciones de frecuencia en una portadora de manera similar a FSK. Por lo tanto, el modulador utilizado puede ser el mismo que se utiliza para la modulación FSK. Sin embargo, los impulsos pasan por un filtro gaussiano antes de entrar en el modulador de pulsos para disminuir el ancho espectral de los mismos.*

**Figura No. 16 Modulación GMSK vs MSK comparada en su forma de onda.**

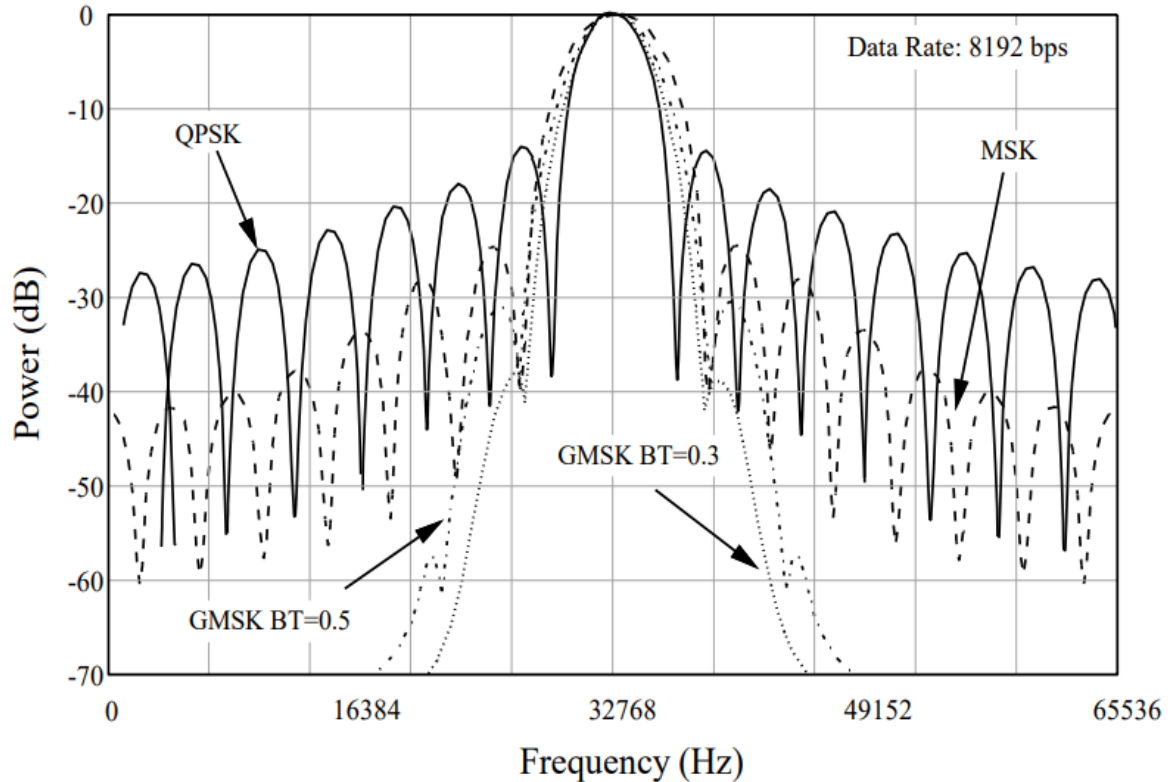


*Nota: El filtro gaussiano es una especie de formateador de pulsos que sirve para suavizar la transición entre los valores de los impulsos. (RF, 2013).*

Como se puede apreciar en la figura 16, el filtro gaussiano suaviza la forma de onda dentro las transiciones y por lo tanto la firma espectral se reduce de igual forma, en este punto posterior al filtrado GMSK, se vuelve incluso más eficiente que cualquier modulador en PSK en densidad espectral, por ejemplo y para tener idea de esta

comparación, véase la figura 17 donde se puede apreciar QPSK, MSK y GMSL según su densidad de potencia espectral.

Figura No. 17 Comparación de firmas espectrales de potencia en QPSK, MSK y GMSL.

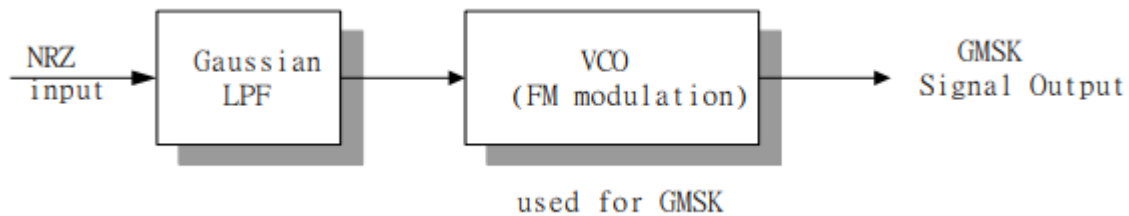


*Nota: El ancho de la firma espectral en GMSK, puede variar según el orden del filtro eventualmente un orden de filtro de orden menor (menor índice) produce una curva aún más suave, en comparación GMSK orden de filtro 0.5 y 0.3, ambos producen anchos de banda distintos en ambos lóbulos laterales. El orden de 0.3 es usado usualmente en GSM.*



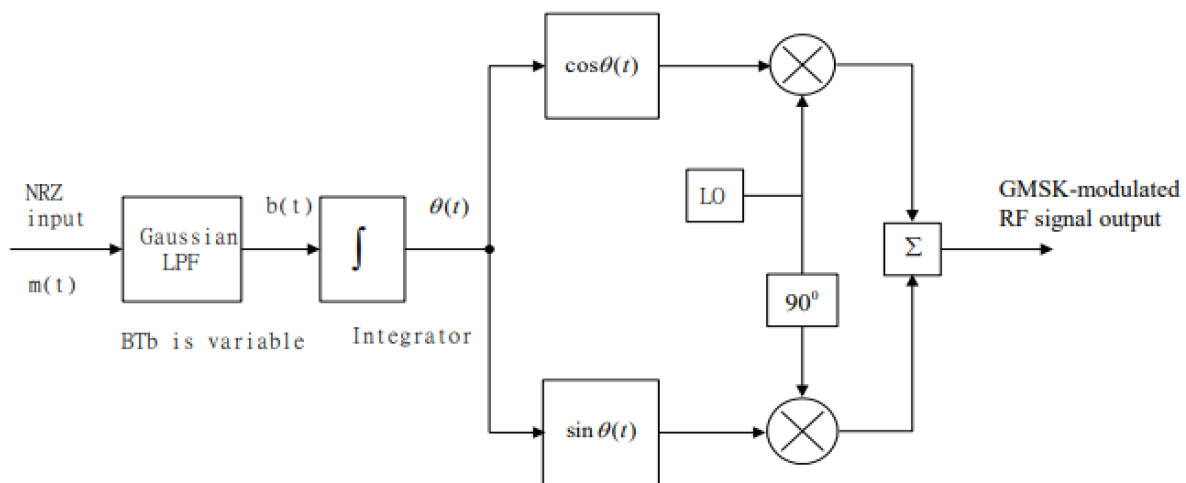
Existen dos modos de generar señales mediante GMSK. Uno de ellos, consiste en una modulación por FSK que usa un circuito de VCO y el otro usa un modulador de cuadratura como los usados para QPSK y QAM, ver Figuras 18 y 19 como referencia. Después del filtrado pasa bajo gaussiano, la señal atraviesa un integrador y, la salida es dividida en dos partes: una de ellas es aplicada a un modulador de producto para ser mezclada con la señal de portadora que tiene una frecuencia a la otra se le aplica un desfase de  $\pi/2$  radianes ( $90^\circ$ ) para ser mezclada en otro modulador de producto con la portadora mencionada, desfasada también en  $\pi/2$  radianes. (electronics-notes.com, 2013)

Figura No. 18. GMSK en uso de un VCO y un filtro gaussiano.



Fuente: (www.atlantarf.com, 2013)

Figura No. 19. GMSK aplicando un integrador antes de pasar al modulador en cuadratura.



Fuente: (electronics-notes.com, 2013) (www.atlantarf.com, 2013)

## **Problemas Generales con GMSK (GFSK)**

Como se puede apreciar, la complejidad de GMSK es grande cuando se aplican integradores y moduladores en cuadratura en vez de un simple VCO (Oscilador controlado por Voltaje).

Esto plantea mayores costos de construcción, y es necesario tener un sistema lo más sencillo posible, la versión con integradores es muy cómoda para poder trabajar con Radios Definidas por Software (SDR), pero esto aumenta considerablemente el costo y el consumo eléctrico por parte del sistema de transmisión y recepción de señales.

Como un agregado a esto, la duración del pulso a la salida del filtro gaussiano es mayor que el tiempo de un bit lo que ocasiona interferencia entre símbolos, por lo que es más difícil diferenciar entre diferentes valores transmitidos de los datos y requiere ecualización adaptativa en el receptor puesto que no está bien definida la transición entre un bit y el siguiente.

Es necesario una mayor potencia de transmisión, para poder transmitir la misma cantidad de datos tanto como QPSK, esto se debe a la complejidad aun superior a la de M-PSK o QPSK, y la disposición de filtros para el tratamiento de la transición de los datos.

## **Conclusión y Elección de Modulador Base**

GMSK, no es apto para la transmisión de telemetría de sistemas descentralizados y completamente desatendido, por su alto nivel de consumo en términos de potencia para lograr transmitir la misma cantidad de datos, además de la complejidad del modulador y los posibles costos de fabricación, en este sentido se concluye que como modulador base se ha de escoger FSK, y como un agregado de mejora para la nueva modulación, se tiene que seguir las mismas recomendaciones que MSK aplicada a la nueva variante, para poder tener un modulador simple pero eficiente espectralmente.



## Capítulo IV

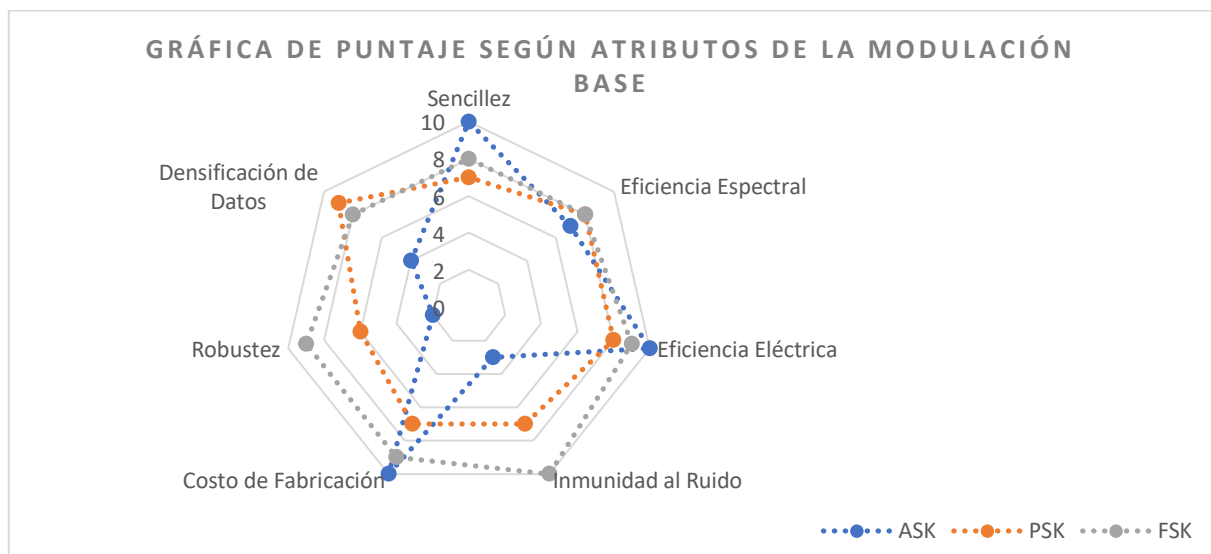
### 4. Análisis y discusión de los resultados

#### 4.1. Selección de la modulación según las características

La modulación base seleccionada, por sus características técnicas y su capacidad de gran adaptación al ruido es FSK.

FSK posee una de las mejores optimizaciones a nivel espectral como modulador, y su capacidad para poder seguir evolucionando y aplicando mejores técnicas en base a su optimización, lo señalan como una fuerte referencia en el mundo de las telecomunicaciones inalámbricas de gran robustez. Véase en la figura 20 el diagrama radial donde se contrasta las características con respecto a los otros moduladores candidatos.

Figura No. 20 Grafica de puntaje según atributos de la modulación base.



*Nota: En la gráfica radial se analizan con puntajes de 1 al 10, siendo el número 10 como el puntaje perfecto según el atributo por cada modulador base, nótese que FSK es la que representa un puntaje más uniforme y con mejores resultados, mientras los otros representan formas más asimétricas dando como resultado desventaja según el uso.*

## **Sencillez y Costos de Construcción**

La primera característica relevante con respecto a FSK es su sencilla fabricación y funcionamiento del modulador, ya que solo hace uso de las transiciones de frecuencia, es tan sencillo como tener múltiples osciladores o un solo oscilador variable controlado por voltaje (VCO). Ya que solo es necesario agregar tantos osciladores como el orden de la modulación lo requiera, su amplificación es sencilla y puede conservar la linealidad, mejorando así la eficiencia y robustez, ya que no es necesario más electrónica para amplificarlo, esto mejora aun cuando se sustituyen los múltiples osciladores por osciladores controlados por voltaje. Los costos de fabricación van de la mano con la sencillez del mismo modulador, más en los últimos tiempos con la llegada al mercado de las radios definidas por software (SDR) es más sencillo modular datos por software para su posterior transmisión.

## **Eficiencia Espectral**

Según la teoría y por lo que se ha repasado, las diferentes mejoras que se han realizado sobre FSK han permitido llegar a tal punto que FSK tiene el mismo ancho de banda espectral que ASK haciendo casi difusa la línea entre un modulador poco eficiente en ancho de banda y un modulador promedio que se acerque al mismo nivel de eficiencia que PSK.

## **Eficiencia Eléctrica**

En términos de eficiencia eléctrica, se sabe que FSK comparte casi la misma categoría que PSK, pero su fácil aplicación a los sistemas de amplificación lineales, crea una plataforma óptima para un consumo relativamente eficiente y si esto se combina con métodos de regulación y transmisión modernos, podemos llevar las características de eficiencia a mejores resultados, esto es útil ya que muchos dispositivos y equipos de transmisión de altas prestaciones y portables utilizan FSK para sus modalidades de transmisión de datos y enlaces entre radioperadores.

## **Inmunidad al Ruido y Robustez**

Actualmente por su increíble propiedad de variar la frecuencia en lugar de la amplitud y la fase, FSK posee el mejor índice de resistencia al ruido, esto lo ha

hecho popular entre los mecanismos de comunicación más seguros y eficientes actualmente, un ejemplo de esto es el uso de FT8 y FT4 para la transmisión de ráfagas cortas y de baja latencia en las bandas de HF con muy poca potencia y aun así recorrer grandes distancias intercontinentales y con la información relativamente intacta. Estas modalidades que hace uso de MSK (una variante mejorada de FSK) uno de los medios de comunicación más populares en los últimos tiempos entre radioaficionados de todo el mundo (Anthony Luscre, 2019). Esto como referencia básica, pero hay que tomar en cuenta que otros protocolos y modos de comunicación utilizan FSK o sus variantes para la transmisión de los datos, ejemplo de esto es el sistema ALE (Automatic Link Establishment), ALE en sus diferentes generaciones es utilizado para el establecimiento de enlaces de radio entre radio operadores como estándar militar por la OTAN (MIL-STD-188-141A y MIL-STD-188-141B (Apéndice A)), esta y otras más aplicaciones y protocolos de uso militar y civiles de alta disponibilidad son una referencia de las altas prestaciones que presta la modulación.

### **Densificación de Datos**

En esta propiedad de las modulaciones se hace referencia a la capacidad que tiene una modulación para su densificación y transmitir más datos por unidad de tiempo, FSK es una modulación que posee uno de los desempeños promedio en esta categoría, siendo superado con creces por QAM o PSK de mayor orden debilitando su inmunidad al ruido, pero aun así los avances de las técnicas como el advenimiento de GMSK a resultado en la capacidad del aumento del tráfico densificado hasta su uso en GSM para la transmisión de Voz y Datos de baja velocidad. FSK está pensado para su eficacia en entrega de datos en condiciones adversas, donde las modulaciones anteriores, necesitan de un medio previamente planificado para su disponibilidad un ejemplo de esto son los radioenlaces, donde es necesario una ingeniería previa que asegure el medio, la visibilidad y un sinnúmero de otros factores que garanticen su buen funcionamiento. FSK está pensado para desplegar en cualquier sitio, transmitir con cualquier infraestructura y recibir datos sea como sea en las peores circunstancias.

## **4.2 Diseño de una nueva variante de modulación basado en FSK para el transporte asíncrono de información y de baja velocidad**

### **4.2.1 Modulación VFSK (Variable Vectorization Frequency Shift Keying)**

El desplazamiento de frecuencia por vectorización variable es una técnica de modulación y variante de FSK que utiliza como método de énfasis al inicio de cada bit transmitido un conjunto de funciones especiales para el aumento progresivo de la amplitud de la señal, y de esta manera amortiguar los cambios bruscos de frecuencia en medida que los datos sean transmitidos. Esta técnica reduce el ancho de banda por amortiguación progresiva de los saltos discontinuos en la selección de las frecuencias para la codificación de los símbolos.

Al igual que FSK, VFSK puede ser mejorado o incluir métodos foráneos de la misma como puede ser MSK y GFSK, esto significa que el modulador base tiene la capacidad de unirse con otros métodos que reducen el ancho de banda para así poder tener mejor rendimiento que la modulación base.

### **4.2.2 Modulación y Demodulación**

VFSK como referencia teórica e investigativa usa tonos de frecuencia audibles (A-VFSK) para luego ser modulado en otra técnica de modulación para su posterior transmisión. No obstante, VFSK está diseñado y pensado para el uso en osciladores controlados por voltajes que otorgue una modulación coherente durante las transmisiones sin su discontinuidad en fase, a este método se le ha llamado como VCFSK adquirido (VFSK con propiedades de fase continua), de esta forma reducir optimizar en un 80% el ancho de banda con respecto a su modulador base.

Como referencia VFSK es capaz de ser decodificado de un mismo demodulador FSK simple, ya que prácticamente el retardo que hay entre las rampas de ascensión de amplitud son ligeramente pequeñas, no obstante, con el uso del algoritmo de Goertzel (G. Baudoin, 1996) con la modificación de sincronía para adaptarse al retraso de la función de amortiguación.

### 4.2.3 Descripción Matemática de VFSK

VFSK en este caso será analizado en su orden de modulación 4-VFSK donde existen como un mínimo de 4 transiciones por cada estado de símbolo representado con la expresión:

$$\begin{bmatrix} S_1 = \varphi_x * A * \cos(2\pi\omega_1 t + \theta_c) \\ S_2 = \varphi_x * A * \cos(2\pi\omega_2 t + \theta_c) \\ S_3 = \varphi_x * A * \cos(2\pi\omega_3 t + \theta_c) \\ S_4 = \varphi_x * A * \cos(2\pi\omega_4 t + \theta_c) \end{bmatrix} \quad 0 < t \leq T$$

Donde las componentes de frecuencia serán expresadas según los valores acordados en  $\omega_n$  y donde  $\varphi_x$  son las funciones que modifica el énfasis por cada componente de frecuencia limitadas en tiempo, estas funciones primitivas son de tres tipos, exponenciales, lineales y logarítmica, estas podrían ser llamadas funciones de filtro inicial, pero son componentes que controlan la amplitud inicial de la función de onda. Nótese que en las funciones en ningún momento se modifica la fase, por lo tanto, las componentes para un sistema VFSK no coherente hará uso de componentes discretas con transiciones discontinuas en frecuencias, pero amortiguadas con funciones en el énfasis de cada bit.

#### **Funciones de Rampa de Énfasis $\varphi_x$**

Las funciones de rampa  $\varphi_x$  son representadas para todas las funciones y señales transmitidas con limitación de tiempo de énfasis y decrecimiento según su velocidad de transmisión, según la velocidad acordada, el índice de modulación propuesto para el protocolo y la aplicación. Cada función tiene los parámetros de, ataque, decrecimiento y tensión de la rampa.

El ataque es la propiedad del gradiente de la pendiente según sea lineal, exponencial o logarítmica, también define el tiempo de retraso para lograr la amplitud final de la señal.

El decrecimiento es la propiedad inversa del ataque para amortiguar el final de la señal una vez su periodo de transmisión del bit es finalizado, esto podría ser o no necesario según el nivel de profundidad que se quiera utilizar con VFSK.

La tensión es la propiedad de curvatura interna del ataque o decrecimiento, esto le da una suavidad extra a la propia función de énfasis, de esta forma es posible agregar la propiedad logarítmica a cada una de las funciones. Este parámetro no es aplicable a funciones logarítmicas o cuadráticas, solo es válido para las lineales y exponenciales.

#### 4.2.4 Función de Amortiguación Logarítmica

Dada la siguiente ecuación para la función de onda de amortiguación de tiempo limitado de tipo logarítmico:

$$S(t) = \left( \frac{1}{Atk_n} + (\log 2\pi\omega) \right) (A * \cos(2\pi\omega_n t + \theta_c)) \{0 < t \leq T\}$$

Donde  $Atk_n$  es el valor de la curvatura y ataque de la función coseno con fase  $\theta_c$  invariable en el tiempo,  $A$  representa el máximo valor de amplitud de la función de onda para VFSK no coherente.

$$S(t) = \left( \frac{1}{Atk_n} + (\log 2\pi\omega) \right) \left( A * \cos \left( 2\pi\omega_n t + \theta_c \int_{-\infty}^t m(\alpha) d\alpha \right) \right) \{0 < t \leq T\}$$

Donde  $m(\alpha)$  es la función que agrega al parámetro de  $\theta_c$  que controla de desviación de la frecuencia base según el índice donde en control de la integral proporciona cero discontinuidades en los cambios de fases, Si se supone que la señal del mensaje es causal, entonces los límites de la integral cambian a un límite inferior de cero y un límite superior de  $t$ . Esto define a VFSK como coherente.

$$S(t) = \left( \frac{1}{Atk_n} + (\log 2\pi\omega) \right) \left( A * \cos \left( 2\pi\omega_n t + b_k(t) \frac{\pi t}{2T} + \theta_c \int_{-\infty}^t m(\alpha) d\alpha \right) \right)$$

La siguiente expresión explica con  $b_k(t)$  las transiciones sean suaves entre frecuencias con el mínimo desplazamiento posible.

#### 4.2.4. Función de Amortiguación Lineal

Dada la siguiente ecuación para la función de onda de amortiguación de tiempo limitado de tipo lineal donde solo los valores positivos de la función de onda serán tomados como limitante no incluyendo la sección de números negativos:

$$S(t) = (Atk_n * \omega_n t)(A * \cos(2\pi\omega_n t + \theta_c)) \{0 < t \leq T\}$$

Donde  $Atk_n$  es el valor del ascenso de inclinación y ataque de la función coseno con fase  $\theta_c$  invariable en el tiempo,  $A$  representa el máximo valor de amplitud de la función de onda para VFSK no coherente.

$$S(t) = (Atk_n * \omega_n t) \left( A * \cos \left( 2\pi\omega_n t + \theta_c \int_{-\infty}^t m(\alpha) d\alpha \right) \right) \{0 < t \leq T\}$$

Donde  $m(\alpha)$  es la función que agrega al parámetro de  $\theta_c$  que controla de desviación de la frecuencia base según el índice donde en control de la integral proporciona cero discontinuidades en los cambios de fases, Si se supone que la señal del mensaje es causal, entonces los límites de la integral cambian a un límite inferior de cero y un límite superior de  $t$ . Esto define a VFSK como coherente para una función exponencial.

$$S(t) = (Atk_n * \omega_n t) \left( A * \cos \left( 2\pi\omega_n t + b_k(t) \frac{\pi t}{2T} + \theta_c \int_{-\infty}^t m(\alpha) d\alpha \right) \right)$$

Para la aplicación de una mínima transición entre las componentes se agrega a la ecuación  $b_k(t)$  para aplicar coherencia y métodos tipo MSK. La componente de  $b_k(t) \frac{\pi t}{2T}$  proviene de la expresión  $s(t) = \cos \left[ 2\pi f_c t + b_k(t) \frac{\pi t}{2T} + \theta_c \right]$ , téngase claro que las fases toman valores suaves y continuos, pero nunca  $\theta_c$  realiza cambios en sus componentes de fase. Originalmente  $s(t) = \cos \left[ 2\pi f_c t + b_k(t) \frac{\pi t}{2T} + \theta_c \right]$  es la reducción de:  $s(t) = a_I(t) \cos \left( \frac{\pi t}{2T} \right) \cos(2\pi f_c t) - a_Q(t) \sin \left( \frac{\pi t}{2T} \right) \sin(2\pi f_c t)$

#### 4.2.5 Función de Amortiguación Exponencial

Dada la siguiente ecuación para la función de onda de amortiguación de tiempo limitado de tipo exponencial donde solo los valores positivos de la función de onda serán tomados como limitante no incluyendo la sección de números negativos:

$$S(t) = (Atk_n^{2\pi\omega_n t})(A * \cos(2\pi\omega_n t + \theta_c)) \{0 < t \leq T\}$$

Donde  $Atk_n$  es el valor del ascenso de inclinación y ataque de la función coseno con fase  $\theta_c$  invariable en el tiempo,  $A$  representa el máximo valor de amplitud de la función de onda para VFSK no coherente. En este caso se limita el tiempo de acción según la velocidad de transmisión de los símbolos a  $1/4 T$  para evitar la interferencia Inter símbolo. Ya que la función exponencial al énfasis crece con mucha velocidad es necesario reducir su tiempo de aplicación ya que se obtiene una similitud a una rampa por su exponenciación.

$$S(t) = (Atk_n^{2\pi\omega_n t}) \left( A * \cos \left( 2\pi\omega_n t + \theta_c \int_{-\infty}^t m(\alpha) d\alpha \right) \right) \{0 < t \leq T\}$$

Función de énfasis con coherencia de VFSK, En este caso se limita el tiempo de acción según la velocidad de transmisión de los símbolos a  $1/4 T$  para evitar la interferencia Inter símbolo. Ya que la función exponencial al énfasis crece con mucha velocidad es necesario reducir su tiempo de aplicación, debido al desplazamiento continuo de fase es necesario evitar índices de rampas muy pronunciados.

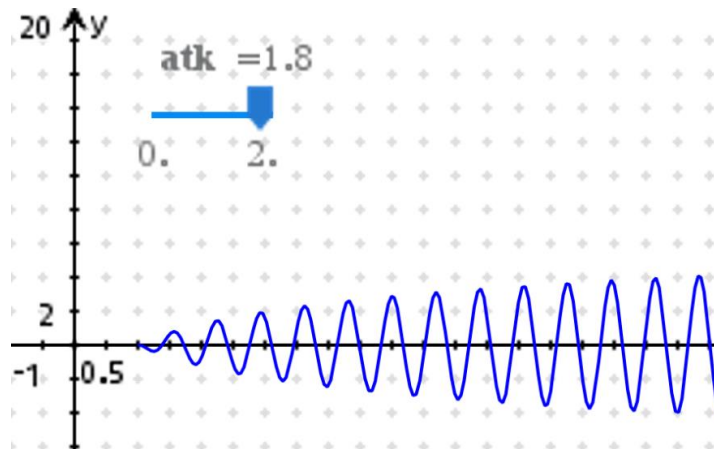
Las funciones deberán estar limitadas en todo momento al ámbito  $\{0 \leq t \leq T\}$  y con las restricciones de  $\forall \omega_n t \in \mathbb{R};$ , las limitas con respecto al tiempo no serán especificadas en este documento ya que podrían existir discrepancia con los niveles de los símbolos y velocidades de transmisión, por lo tanto, queda como referencia que toda aplicación con velocidades estándares quedara limitado a su índice de modulación.



## 4.2.6 Demostración de las funciones de amortiguación

Figura No. 21 Función de énfasis amortiguada por una función logarítmica con un factor de ataque 1.8 sobre la función lineal. La función se estabiliza según la amplitud máxima declarada.

$$S(t) = \left( \frac{1}{Atk_n} + (\log 2\pi\omega t) \right) (A * \cos(2\pi\omega_n t + \theta_c)) \{0 < t \leq T\}$$



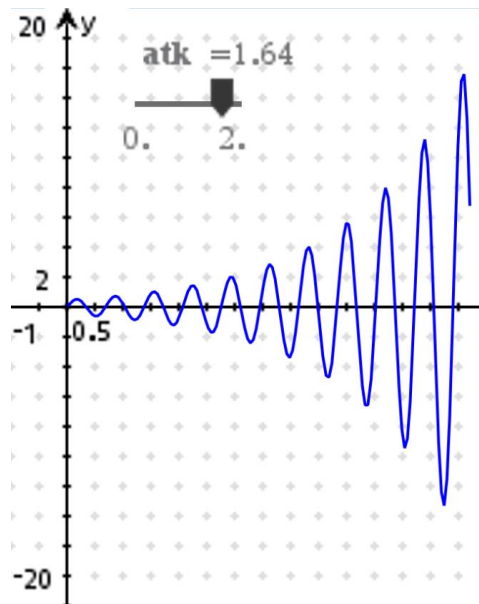
*Nota: La función representada no está graficada en base a las integrales del control de fase, ya que la expresión  $\int_{-\infty}^t m(\alpha) d\alpha$  solo limita el ámbito de las transiciones por el VFO para tener valores continuos que limiten la cantidad de valores discretos.*

Por lo tanto, la función representada en la figura No.21 no se somete a los criterios de control continua de fase para VFSK coherente. Para las funciones de énfasis logarítmicas los valores que puede obtener  $x$  en el plano son estrictamente  $x \geq 1$ .

Las funciones logarítmicas tienen un resultado muy suave cuando se trata de velocidades medias y sistemas tipo MFSK, donde los periodos de sostenimiento de la señal como por ejemplos los modos OLIVIA MSK tienen mucha duración y dependen de múltiples componentes de frecuencia y combinaciones para transmitir cantidades ingentes de datos por unidad de tiempo. Al tener todo esto disponible se es posible usar amortiguación logarítmica.

Figura No. 22 Función de énfasis amortiguada por una función exponencial con índice de ataque de curvatura 1.64.

$$S(t) = (Atk_n^{2\pi\omega_n t})(A * \cos(2\pi\omega_n t + \theta_c)) \{0 < t \leq T\}$$

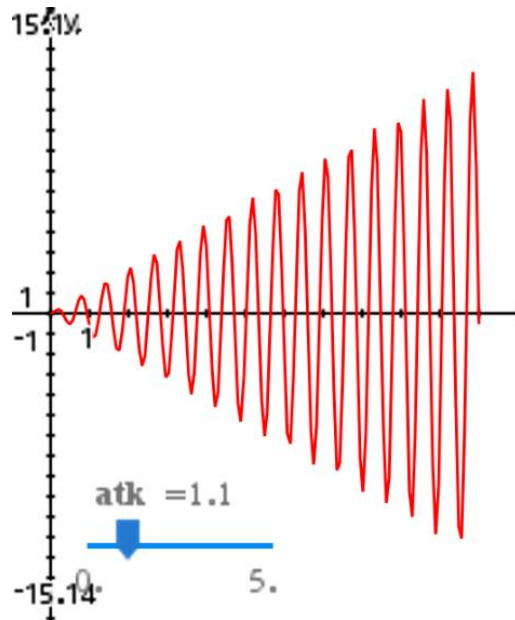


Nota: La función representada no está graficada en base a las integrales del control de fase, ya que la expresión  $\int_{-\infty}^t m(\alpha) d\alpha$  solo limita el ámbito de las transiciones por el VFO para tener valores continuos que limiten la cantidad de valores discretos. Por lo tanto, la función representada en esta imagen no se somete a los criterios de control continua de fase para VFSK coherente.

En la figura No.22 muestra Las funciones exponenciales que tienen los mejores factores de amortiguación, pero deben utilizarse de forma muy limitada para altas tasas de transferencia ya que la ascensión de su curva es demasiado pronunciada con respecto al tiempo y por lo tanto en altas tasas de transmisión es necesario acortar los tiempos de énfasis provocando una visualización o similitud a un flanco ascendente. Esta función de onda es recomendada para el énfasis de salida de TX, pero de igual forma es posible seguir usando el mismo modo para la función tanto de énfasis como de decrecimiento.

Figura No. 23 Función de énfasis amortiguada por una función lineal con índice de ataque de curvatura 1.64

$$S(t) = (Atk_n * \omega_n t)(A * \cos(2\pi\omega_n t + \theta_c)) \{0 < t \leq T\}$$



Nota: La función representada no está graficada en base a las integrales del control de fase, ya que la expresión  $\int_{-\infty}^t m(\alpha) d\alpha$  solo limita el ámbito de las transiciones por el VFO para tener valores continuos que limiten la cantidad de valores discretos. Por lo tanto, la función representada en esta imagen no se somete a los criterios de control continua de fase para VFSK coherente.

Las funciones lineales tienen un comportamiento simple y su rampa se ajusta a todo tipo de velocidades lo cual lo hace una función de énfasis de tipo general, no obstante, toda función de rampa agrega más tiempo en su ascenso de potencia y estas no deben interferir demasiado en el tiempo de transmisión de un mensaje.

Para la figura 23 se agregaron las restricciones de crecimiento  $0 \geq x \leq Atk_n * A$ , esta restricción impone el tiempo máximo que puede crecer la función en base a su pendiente.

#### 4.2.7 Métodos de Codificación y Mapeo de Bits

La codificación para el envío de información en VFSK puede ser de dos tipos:

##### **Mapeo Lineal**

En la codificación lineal teniendo como estándar base de referencia que 4-VFSK-110, contempla 4 componentes de frecuencias que representan 4 combinaciones binarias por cada símbolo transmitido (2bit/símbolo), en este caso a una velocidad de 110 baudios por segundo equivalente a 440bps.

**Tabla No. 2. Mapa Binario en 4-VFSK (tipo lineal).**

Tabla Binaria 4-VFSK	
Portadora	Bit Map
$f_{c_1}$	00
$f_{c_2}$	01
$f_{c_3}$	10
$f_{c_4}$	11

*Nota: 4-VFSK permite 4 estados según el valor de la componente de frecuencia generada por su Oscilador controlado por voltaje (VCO).*

Como normativa, las modulaciones contemplan la necesidad de mayores niveles de modulación en digital para portar más información en menor unidad de tiempo, ya que solo pueden tener un estado a la vez, un ejemplo de esto es PSK, ya que no puede transmitir múltiples señales en desfase a la vez por razones de interferencia, por lo tanto, o se transmite a mayor velocidad los símbolos o se agrega la opción de multicarrier para tener multiplex portadores con estados diferentes.

Toda modulación basada en FSK como VFSK tiene la propiedad de poder transmitir diferentes componentes de frecuencia al mismo tiempo sin mayor incidencia, ya que la técnica que reduce la firma espectral disminuye la interferencia entre componentes. En este caso dado una transferencia lineal solo es posible transmitir a  $2\text{bits}/T$ , eventualmente para mayor capacidad será mejor aumentar el orden de VFSK o la velocidad de transmisión de los símbolos por unidad de tiempo.

#### 4.2.8 Multi Portadora Paralela

En la codificación o mapeo de bits multi portadora, es posible transmitir simultáneamente o en paralelo diferentes frecuencias generadas por osciladores independientes o usando audio para luego ser transmitida por SSB, las múltiples componentes nos permiten tener hasta 15 posibles estados, con el mismo nivel de modulación y con un incremento mínimo de ancho de banda en el espectro. Esto se le conoce como MFSK (Desplazamiento de Múltiples Frecuencias), la ventaja de eso es la capacidad de triplicar la cantidad de información de forma sustancial usando el mismo estándar sin hacer mayores cambios o teniendo un ancho de banda más elevado.

**Tabla No. 3 Mapa binario en 4-VMFSK (tipo multi portadora/paralela).**

Tabla Binaria 4-VMFSK			
Portadora	Bit Map	Tipo	Estado
f1	0001	Unitaria	A
f2	0010		B
f1+f2	0011	Paralela	C
f3	0100	Unitaria	D
f1+f3	0101	Paralela	E
f2+f3	0110		F
f1+f2+f3	0111		G
f4	1000	Unitaria	H
f1+f4	1001	Paralela	I
f2+f4	1010		J
f1+f2+f4	1011		K
f3+f4	1100		L
f1+f3+f4	1101		M
f2+f3+f4	1110		N
f1+f2+f3+f4	0000		O
<b>Símbolos</b>			<b>15</b>

*Nota: Para cualquier codificación usando VMFSK de  $n$  orden, se tiene que los símbolos totales son  $2^n - 1$  donde  $n$  es el índice de modulación o número de componentes de VFSK. Los bits 0000 no son codificables usando tiempo muerto de transmisión, en este sentido sería conveniente aumentar el orden de modulación +1 para poder tener una componente extra que represente el valor 0000, pero este sería aumentar el ancho de banda, por lo tanto, es preferible restar y desplazar a la última*

*combinación de las tablas de combinación que represente los valores 0000, esto resta la posibilidad de perder una componente de símbolo.*

Las componentes de frecuencia para VMFSK serán ordenada según el orden de bit binario, es decir las componentes de frecuencias tendrán patrones binarios ascendentes desde el bit menos significativo situándose para las frecuencias más altas y el más significativo para las frecuencias bajas.

Esta disposición deberá cumplirse para los órdenes de VMFSK, así 8-VMSK 16-VMFSK y 64-VMFSK deberán de ordenar sus combinaciones de bits, de forma binaria desde el bit menos significativo hasta el más significativo, gracias a este estándar, es posible predecir el orden de las componentes para órdenes superiores a 4-VMFSK. Eventualmente

### **Estandarización**

Se utilizará la siguiente nomenclatura para describir y leer el estándar de comunicación empleado para VFSK y VMFSK.

<X<AMT>>-<VFSK/VMSK>/<D>

Donde X expresará explícitamente el orden de la modulación equivalente al número de componentes de frecuencias disponibles para el mapeo de los datos binarios, esto es aplicable tanto a VFSK en su versión lineal y VMSK en su versión de multi portadora. <AMT> describe el tipo de función de amortiguación que esta puede usar como énfasis, normalmente no es necesario tipificarla, pero como métodos de redacción técnica es necesario expresarlo un ejemplo, 8L-VFSK (Logarítmica de 8 componentes) o 4E-VFSK (Exponencial de 4 componentes).

**Tabla No. 4. Estándares de modulación tanto en VFSK como VMFSK, la velocidad de transmisión de los datos esta expresada en baudio.**

	Posibles Modalidades			
	Índices Bajos		Alto Índice	
Baja Velocidad	4/110	8/110	16/110	32/110
Velocidad Media	4/300	8/300	16/300	32/300
	4/1200	8/1200	16/1200	32/1200
	4/9600	8/9600	16/9600	32/9600
Alta Velocidad	4/115200	8/115200	16/115200	32/115200
	4/256000	8/256000	16/256000	32/256000

No Estándar	Estándar	Alta Perdida	Otros
-------------	----------	--------------	-------

*Nota: Según la sub variante a VFSK es posible seguir ascendiendo el índice de modulación para agregar más componentes, pero es necesario restringir proporcionalmente la tasa de transferencia para evitar altas tasas de error por bit o interferencia entre símbolos.*

Según la tabla 4, existen 4 marcas para las distintas modalidades, los estándares son las recomendaciones para baja velocidad y máxima disponibilidad con la mínima perdida.

No Estándar son otras modalidades de velocidad media para transmisión de datos con índices de error bajos, recomendables en medios poco ruidosos en bandas superiores a los 300MHz.

Alta Perdida, se consideran modalidades de alta velocidad, pero con altas probabilidades de perdida, se recomienda tener el canal de transmisión con las mejores condiciones y bajo ruido.

Otras Modalidades, son posibles combinaciones de velocidades e índices de modulación que pueden ser utilizados según conveniencia, no existe recomendaciones y poseen características compartidas entre el estándar y los no estandarizados.

Los modos de transmisión son posibles sub variantes que pueden aplicarse según su necesidad, en términos prácticos como referencia de diseño se toma 4/110 con la capacidad de 4 componentes a una velocidad de 110 baudios, suficiente para transmitir una cantidad limitada de información permitiendo la transmisión de datos en las peores circunstancias que el medio tenga presente en el momento de la secuencia de transmisión, por lo tanto la tabla 4 que especifica los modos, son una guía de las modalidades de construcción permitidas para VFSK y VMSK, no necesariamente solo son capaces de tolerar esos índices y velocidades, para los índices que son incrementales, se definen los anteriormente descrito ya que no son para el transporte masivo de datos y garantiza la fiabilidad y reducido ancho de banda por parte de la emisión. La velocidad de transmisión en baudios se toma de la serie de estándares en baudios descritos por RS232 y los más utilizados, no se toma todo el estándar, pero si se describen los mayormente utilizados, tanto para modalidades de baja velocidad como la mayor tasa de transmisión posible sin entrar en una alta cantidad de pérdida.

Las tasas de transmisión paralela supera con creces la velocidad de transmisión de los sistemas lineales, y esta solo es posible usando las componentes en paralelo para aumentar el número de combinaciones de estados que este puede transmitir, en la tabla 5 se puede ver la velocidad de transmisión en un solo sentido y su equivalencia del índice de modulación en VFSK lineal para poder alcanzar esa misma velocidad.

Eventualmente las tasas de velocidades expresadas en la tabla 5 para las modalidades multi portadora paralela, solo son válidas cuando el medio lo permite con una excelente relación señal ruido (SNR), y mientras el medio que procesa los datos permite la capacidad de procesamiento al mismo ritmo con el que se recibe, no obstante, los valores que superan la tasa de cientos de terabits, se dejan como valores teóricos que pueden ser alcanzables solo en entornos puramente de laboratorio o simulados.



**Tabla No. 5 Tasas de bits según modalidad en entornos ideales, para transmisión de una sola vía (Half-Duplex).**

Modalidad	Índice	Velocidad	Half-Duplex			ATC	
			Tasa bps (Lineal)	Tasa bps (Paralelo)	ETL (Lineal)		
4/110	4	110	0.44 Kbps	1.65 Kbps	Aprox. 16L-VFSK	Practico	
4/300	4	300	1.20 Kbps	4.50 Kbps	Aprox. 16L-VFSK		
4/1200	4	1200	4.80 Kbps	18.00 Kbps	Aprox. 16L-VFSK		
4/9600	4	9600	38.40 Kbps	144.00 Kbps	Aprox. 16L-VFSK		
4/115200	4	115200	460.80 Kbps	1.73 Mbps	Aprox. 16L-VFSK		
4/256000	4	256000	1.02 Mbps	3.84 Mbps	Aprox. 16L-VFSK		
8/110	8	110	0.88 Kbps	28.05 Kbps	256L-VFSK		
8/300	8	300	2.40 Kbps	76.50 Kbps	256L-VFSK		
8/1200	8	1200	9.60 Kbps	306.00 Kbps	256L-VFSK		
8/9600	8	9600	76.80 Kbps	2.45 Mbps	256L-VFSK		
8/115200	8	115200	921.60 Kbps	29.38 Mbps	256L-VFSK		
8/256000	8	256000	2.05 Mbps	65.28 Mbps	256L-VFSK		
16/110	16	110	1.76 Kbps	7.21 Mbps	65536L-VFSK		
16/300	16	300	4.80 Kbps	19.66 Mbps	65536L-VFSK		
16/1200	16	1200	19.20 Kbps	78.64 Mbps	65536L-VFSK		Teórico
16/9600	16	9600	153.60 Kbps	629.14 Mbps	65536L-VFSK		
16/115200	16	115200	1.84 Mbps	7.55 Gbps	65536L-VFSK		
16/256000	16	256000	4.10 Mbps	16.78 Gbps	65536L-VFSK		
32/110	32	110	3.52 Kbps	472.45 Gbps	4294967296L-VFSK		
32/300	32	300	9.60 Kbps	1288.49 Gbps	4294967296L-VFSK		
32/1200	32	1200	38.40 Kbps	5153.96 Gbps	4294967296L-VFSK		
32/9600	32	9600	307.20 Kbps	41231.69 Gbps	4294967296L-VFSK		
32/115200	32	115200	3.69 Mbps	494780.23 Gbps	4294967296L-VFSK		
32/256000	32	256000	8.19 Mbps	1099511.63 Gbps	4294967296L-VFSK		

\* ETL: Equivalencia de Índice Lineal para Emular el Multi Portadora

\* ACT: Aplicabilidad Practica [Factibilidad de Uso y Construcción]

Según la tabla 5 de comparación y equivalencia de velocidad de datos tanto para el método de codificación lineal y multi portadora (paralelo), en las modalidades de multi portadora su incremento de velocidad es de aproximadamente 4 veces la velocidad en lineal, este aumento es proporcional a la velocidad de los símbolos.

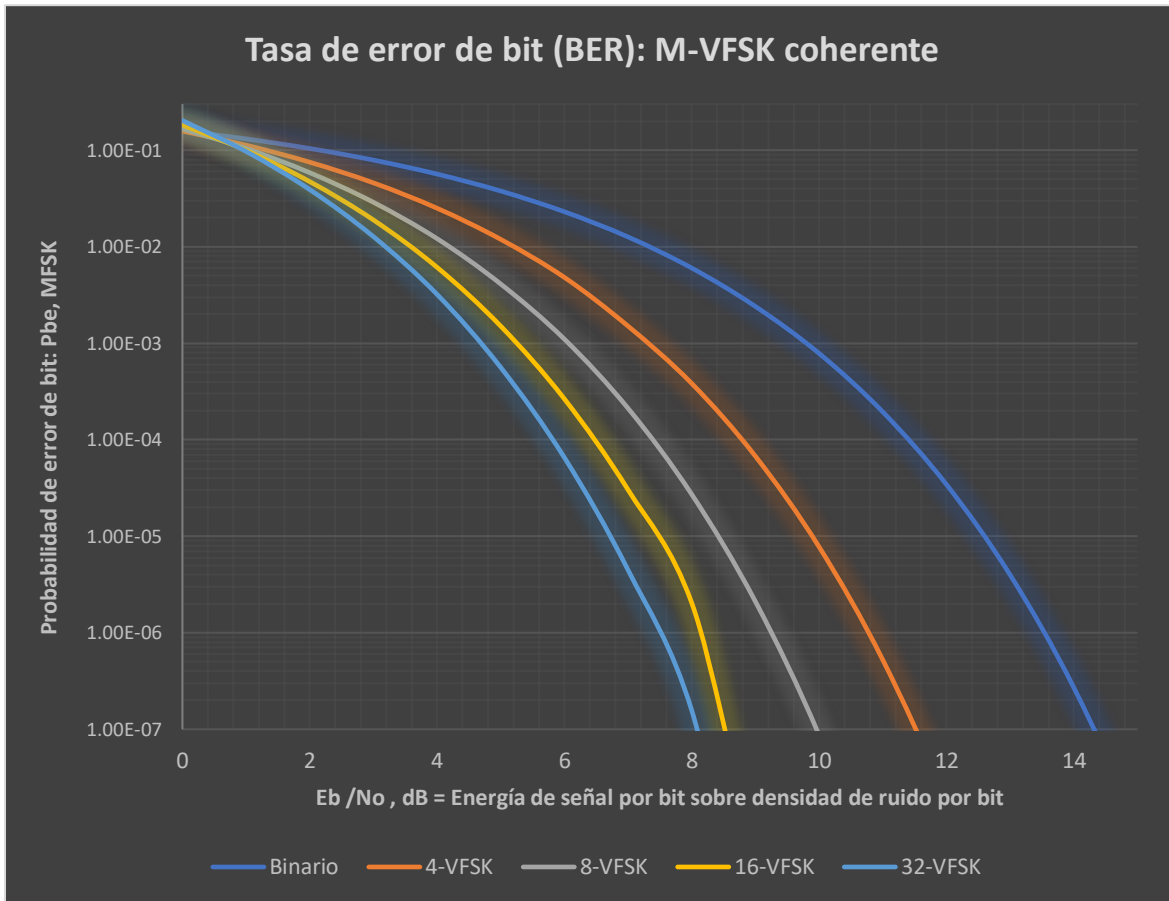
VFSK comparte casi la misma tasa de errores de FSK, ya que técnicamente solo agrega rampas ascendentes al énfasis y final de cada transmisión, por lo tanto, la tabla de relación y probabilidad de error de VFSK queda detallado en la tabla 6 para su análisis en los diferentes ambientes y potencias relativas por cada bit por ruido de fondo.

**Tabla No. 6 Probabilidad de error según el índice de modulación en VFSK lineal.**

k/bits/símbolo		1	2	3	4	5
M Índice de Modulación		2	4	8	16	32
Eb/No, dB	Eb/No	Binario	Probabilidad de Error Por Bit: Pbe, M-VFSK			
0	1.000	0.1587	0.1573	0.1665	0.182	0.2028
1	1.259	0.1309	0.1126	0.1039	0.0993	0.0969
2	1.585	0.1040	0.075	0.0584	0.0472	0.039
3	1.95	0.0789	0.0458	0.0288	0.0189	0.0127
4	2.512	0.0565	0.0250	0.0121	0.0061	0.0032
5	3.162	0.0377	0.0119	0.0041	0.0015	5.60E-04
6	3.981	0.0230	0.0048	0.0011	2.64E-04	6.51E-05
7	5.012	0.0126	0.0015	2.11E-04	3.02E-05	4.45E-06
8	6.31	0.0060	3.82E-04	2.71E-05	2.03E-06	1.56E-07
9	7.943	0.0024	6.73E-05	2.10E-06	6.93E-09	2.35E-10
10	10.000	7.83E-04	7.74E-06	8.64E-08	1.02E-09	1.23E-11
11	12.589	1.94E-04	5.23E-07	1.59E-09	5.13E-12	1.69E-14
12	15.849	3.43E-05	1.80E-08	1.07E-11	6.66E-15	0.00E+00
13	19.953	3.97E-06	2.67E-10	2.04E-14	0.00E+00	0.00E+00
14	25.119	2.70E-07	1.36E-12	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
15	31.623	9.36E-09	1.78E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
16	39.811	1.40E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

*Nota: La tabla de probabilidad de error se representa donde Eb/No, es la densidad de energía por bit sobre la densidad de ruido por cada bit, k/bit/símbolo son las agrupaciones binarias que se envían según el índice M en VFSK. Según el gráfico*

Figura No. 24 Probabilidad de error de bit por densidad de energía de bit según la densidad de ruido de bit del ecosistema.



Nota: Los valores de gráfica son tomados de la tabla 6 y graficados en base a la tasa de error por bit (BER) y la energía por señal de bit, la gráfica está representada en escala logarítmica para una mejor apreciación de los gráficos y diferencia según modulación.

En la figura No.24 se muestra, Los valores de BER que son relativos al ruido de fondo del ecosistema donde se esté recibiendo la señal, eventualmente en un canal completamente despejado y donde el ruido sea extremadamente bajo, es posible tener mejores trazas de curvaturas con menor densidad de potencia por bit transmitido, obviamente esto solo es aplicable a entornos controlados o de alta eficiencia.

### 4.3 Funcionamiento teórico de la nueva modalidad de modulación basada en FSK, para demostrar sus nuevas propiedades

Las modalidades de rampas son funciones que no son nativas en cualquier sistema de simulación de señales y sistemas y su aplicación sobre los bloques de moduladores pueden ocasionar problemas con la interpretación y generación de datos a la hora de su transmisión, por lo tanto, se decide usar la modalidad de Audio VFSK para la generación de los tonos y luego ser transmitidas por medio de la banda lateral superior (USB).

Ya que las ondas de sonido y las electromagnéticas cumplen con los mismos criterios y fenómenos, es posible identificar de mejor manera los efectos de la nueva modulación sobre la señal transmitida en 4-VMFSK en 50 baudios, con una pequeña trama de datos como método de ejemplo práctico y experimental. Se utilizó FL Studio para poder simular tramas de bits moduladas como base en FSK y aplicándole rampas al énfasis generando VMFSK de cuatro niveles en una función senoidal pura y una amplitud limitada. Ver figura No.25

*Figura No. 25. Plugin nativo en FL Studio 3x OSC. oscilador.*



*Nota: 3xOsc es un multi oscilador multifuncional con ajuste de fase, ajuste fino de frecuencia central y canal de emisión, los tres osciladores pueden estar en pleno funcionamiento con diferentes funciones de onda, fase o amplitudes.*

Ya que es un multi oscilador es necesario deshabilitar los otros osciladores para poder simular una sola componente principal, en este caso se selecciona al

oscilador 1 en función senoidal con una fase central por defecto amplitud fija como límite máximo y sin parametrización de tonos en desfase.

**Figura No. 26** Parámetros del oscilador primario, en amplitud media y sin fases.



*Nota: 3X OSC es enrutado al canal de control 1, donde se tienen la instrumentación de análisis espectral y filtros dinámicos.*

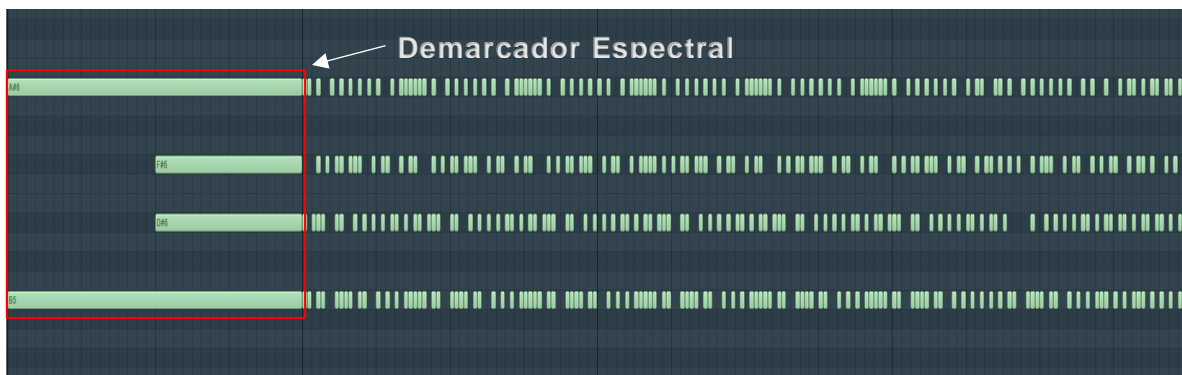
En la figura No. 26 se muestra el analizador espectral de las componentes Wave Cande, que es un instrumento multipropósito. Actualmente con funciones de analizador de espectro, vectorscopio, osciloscopio y vúmetro. Para efectos de prueba se utilizará el analizador de espectro con una resolución de 2048 bandas con escala ampliada para frecuencias bajas con límite máximo de hasta 20kHz, suavizado de curva un nivel dinámico de rango moderado, además de una taza de actualización alta, para ver detalles finos de las componentes de frecuencias.

Una vez seleccionada las componentes de frecuencias y la modalidad, en este caso se utilizará 4-VMFSK, con las siguientes componentes de frecuencias:

- F1 = 1899Hz
- F2 = 1497Hz
- F3 = 1253Hz
- F4 = 996Hz

La emisión de la trama de datos tendrá un ancho de banda de 903Hz, en este caso práctico se utilizaron separaciones de frecuencias muy notables para poder apreciar los cambios y los efectos de las componentes de frecuencias en el espectrograma. Como se puede notar en la figura 27, los datos fueron codificados en pulsos de sonidos

*Figura No. 27. Pulsaciones en representación de los símbolos en combinaciones de 4-VMFSK, el primer tono largo es sincronización y que el receptor ajusta sus filtros. A este proceso se le llama demarcación espectral.*



*Nota: Véase que las componentes crean patrones de las diferentes combinaciones que permite hacerse con 4 frecuencias en paralelo, el demarcador espectral es un tono en las 4 componentes que permite darle una ayuda al sintonizador del receptor para centrar las componentes y sea más sencilla la decodificación de los símbolos.*

El demarcador funciona como una guía inicial, el cual empieza con los tonos límites de borde y a  $\frac{1}{2}$  tiempo del inicio de los bordes entran los dos centrales en 4-VFSK, esto con el propósito que el receptor en caso de usar VFSK coherente, logre centrar las 4 componentes, toma la velocidad de transmisión gracias a la diferencia de tiempo con el que entran las componentes centrales de las de borde, una vez centrado se procede a la trama de datos en bruto, en este sentido también los tonos

de demarcación son útiles para sistemas que usen filtros de rechazo de banda estrecha y evitar el descentrado de la emisión, útil también para el auto ajuste por efecto Doppler en aplicaciones móviles terrestres o aéreas.

#### 4.3.1 Aplicación del Vector de Rampa o función de amortiguación

Dentro de las opciones extendidas del oscilador 3X Osc, es posible tener opciones de sub oscilador, son funciones que permiten modificar el comportamiento de la función, en este caso es posible tener énfasis de larga duración o corta duración a la vez que el control de tiempo de cada pulso y su suavidad hasta llegar a su límite de amplitud. Ver la figura 28 donde se muestra la configuración de énfasis de onda.

Función de Envelope o “Función Envoltente”, donde se puede cambiar los parámetro y comportamiento del énfasis o ataque de la señal en el momento de su oscilación.

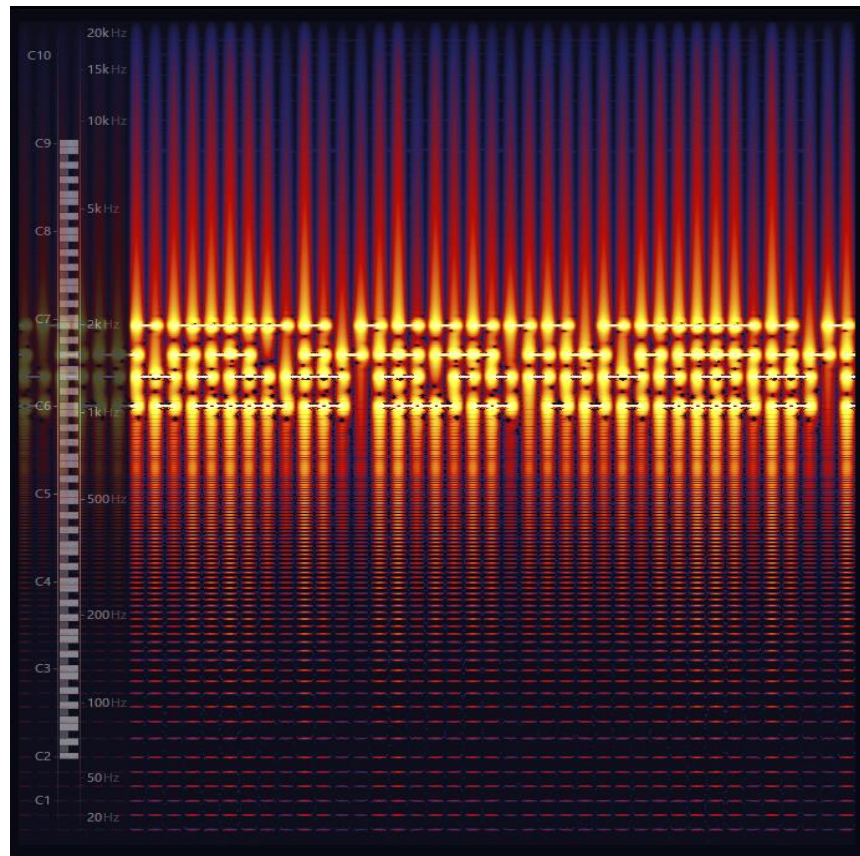
Figura No. 28 Función de Envelope o función envolvente.



*Nota: La función de envolvente de onda es capaz de cambiar las curvaturas de ascenso de una oscilación, agregar retrasos de inicio, tiempo o duración del tono y la función inversa en su proceso de decrementar de la amplitud en el final.*



Figura No. 29 Espectrograma de la emisión usando un simple MFSK, FSK con multiportadora, sin ningún tipo de control de espurias, filtros, mecanismo de transición o amortiguamiento. Esto describe FSK sin las funciones de amortiguación (VFSK)

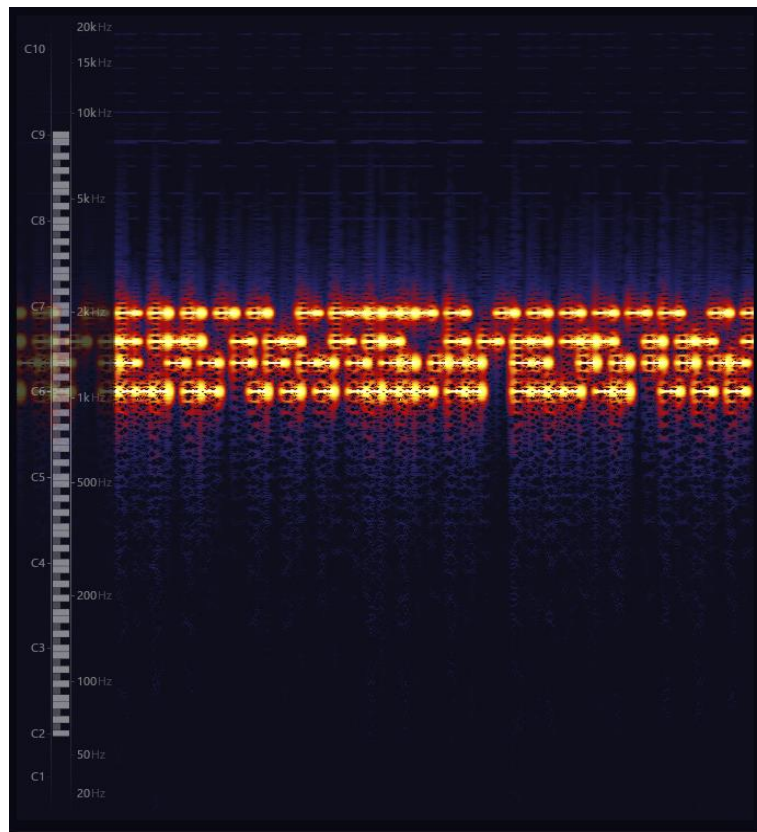


*Nota: Nótese que los cambios discretos entre componente crean espurias de más de 20kHz, provocando un consumo significativo del ancho de banda significativo.*

Como se puede apreciar en la figura 29 esta es la componente espectral de FSK puro, efectivamente la teoría demuestra que FSK es completamente ineficiente en términos espectrales, y para ello se recurren a técnicas que reduzcan estas componentes espectrales que pueden provocar un consumo de potencia, interferencia inter símbolo e interferencias a otras estaciones adyacentes.



Figura No. 30 Espectrograma de la emisión usando VFSK y las funciones de rampas de amortiguación para la supresión de las espurias generadas en los lóbulos laterales sin la necesidad de MSK o GMSK (filtro gaussiano). Es posible tener el mismo resultado.



*Nota: Nótese que los cambios discretos entre componentes crean espurias inferiores a los 3kHz, y estas espurias con amplitudes muy tenues, por lo tanto, queda demostrado la eficacia significativa que VFSK como método de optimización de FSK es superior frente a otras mejoras, ya que no necesita mecanismos más complejos para reducir el ancho de banda de la emisión.*

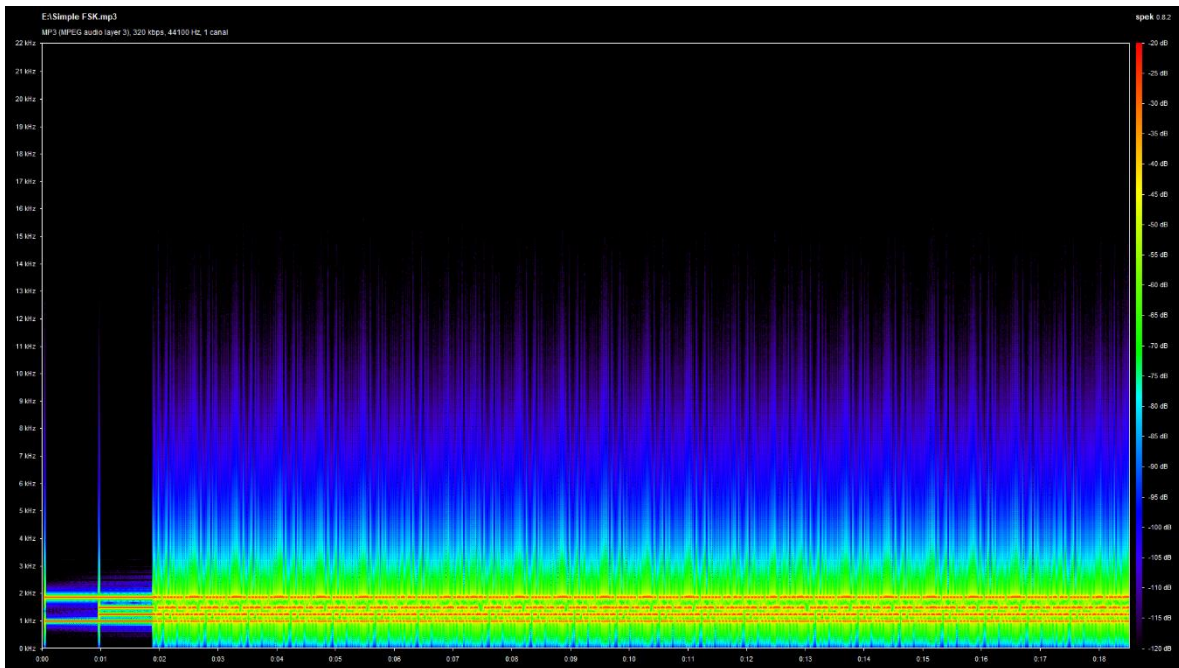
Eventualmente el efecto puede ser mejorado, una vez que, en las etapas de transmisión, pase por la etapa de filtros pasa banda que cualquier equipo de radio incorpora, esto reduce aún más los lóbulos espectrales dando como resultante una emisión muy limpia y libre de espurias.

Una forma muy elegante de ver los datos espectrales, es guardando la señal en un archivo de audio WAV con una alta tasa de muestreo sin compresión para analizar por completo la firma espectral de la transmisión resumida en un archivo de audio. Esta opción es perfecta ya que no existe ruido de fondo y solo se toma en cuenta la

firma espectral generada por los tonos de transmisión en 4-VMFSK. Ver figura No.30

Para esto usara Spek el cual es un programa que analiza el espectro de un archivo de audio y recopila la información de muestreo, en este caso solo lo usaremos para la comparación del espectro en bruto del archivo con la señal modulada en VMFSK. Ver figura No.31 y 32

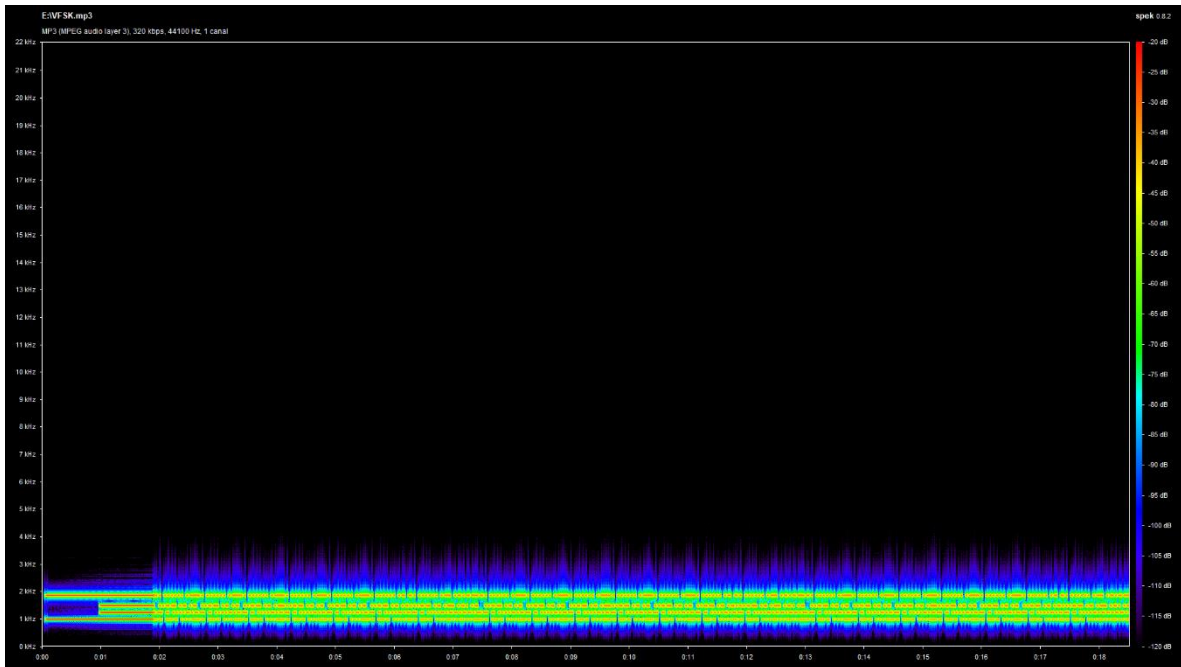
*Figura No. 31 Análisis espectral de un archivo de audio de MFSK puro, sin ningún tipo de variante.*



*Nota: En esta muestra no se aplica ningún tipo de variante y denota el efecto real del desplazamiento de frecuencia y su alto uso de ancho de banda por espurias en sus lóbulos laterales.*

El aspecto dinámico de la amplitud de FSK en sus lóbulos es de -115dB hasta -50dB, esto con un consumo de ancho de banda de 24kHz utilizado por espurias.

Figura No. 32 Análisis espectral de un archivo de audio modulando en VMFSK con funciones de rampas exponenciales basado en 4-VMFSK.



*Nota: El rango dinámico de las señales espurias se redujo en un 95% aproximadamente y dando un rango de amplitud más reducido, ocupando un máximo de 1.2kHz por lóbulos laterales, reduciendo significativamente el consumo de ancho de banda.*

Cuando se aplican las funciones de amortiguación su uso de ancho de banda se reduce drásticamente, eventualmente por efectos de aplicación en producción las componentes tendrán una separación más pequeña, podría haber hasta un máximo de 50Hz de separación y reducir el ancho de banda de forma exponencial, pero con la probabilidad aumentada de generar más errores por Inter símbolos, pero esto es directamente proporcional a la velocidad de transmisión según su modalidad y densidad de la modulación (según su orden).

### 4.3.2 Análisis en el analizador de espectro de la señal transmitida por RF

El análisis por RF se basa en la transmisión vía banda lateral superior de A-VMFSK/VFSK a través de la conexión CAT del radio Yaesu FT-897 ver figura 33, usando la interfaz RIGblaster P&P de la marca West Mountain Radio, ver figura 34. De esta forma somos capaces de mandar comandos CAT al radio para ponerlo en transmisión y enviar señales al radio para luego ser moduladas vía SSB, FM, AM o datos (RTTY).

*Figura No. 33 . Equipo de pruebas experimental transceptor multibanda HF-50MHZ, VHF y UHF. Potencia máxima de transmisión a 100W.*



*Nota: Para la operación de estos equipos es necesaria una licencia de radioaficionado y las bandas están limitadas a las frecuencias de radioaficionados. Ver en anexo A la hoja técnica del transceptor.*

*Figura No. 34 RIGblaster P&P, interfaz de conexión CAT/USB para equipos de radio.*



*Nota: La interfaz de radio a computadora, envía los datos de sonido tanto de recepción como de tonos de transmisión vía el puerto DIN-9 hacia el radio, creando internamente una segunda fuente de audio o micrófono.*

Hasta este punto se tiene la conexión entre la computadora y el radio transceptor listos para operar, pero es necesario utilizar una carga fantasma (Dummy Load) para emular una antena con una relación de ondas estacionarias 1:1 y evitar el daño de los pasos finales o (PA) del equipo de radio, en este caso se utilizó el Acoplador de antena MFJ-949E véase la figura 35, el cual tiene una carga fantasma de 50

Ohm y tolera potencias máximas de 300W, esto asegurara realizar pruebas sin efectos dañinos para los transistores MOSFET de salida.

Figura No. 35 Acoplador de antena MFJ-949E, con selector de antena, opción de bypass y carga fantasma incorporada.



*Nota: El selector de funciones deberá estar situado en "DUMMY LOAD" en la sección de BYPASS, de esta forma la señal de RF no pasará por la bobina y condensadores de acoplamiento y entrará directamente a la resistencia de 50 Ohm. Ver anexo E, para las características técnicas.*

Con lo anteriormente mencionado, se tiene la estructura de transmisión, con su equipo transmisor y su sistema de acople de antena, para su respectivo análisis de RF es necesario tener un segundo equipo remoto con un módulo de radio definida por software (SDR) y sintonizar en USB la frecuencia de referencia para su posterior análisis visual en SDRSharp, ver figura 36.

SDR# (léase SDR Sharp) es una aplicación DSP basada en Windows simple, intuitiva, pequeña y rápida para la radio definida por software. Está escrito en C# teniendo en cuenta tanto la corrección del diseño del objeto como el rendimiento. El objetivo principal es ofrecer una aplicación simple de prueba de concepto para familiarizarse con las técnicas DSP y el análisis espectral.



Figura No. 36 Equipo receptor con un analizador SDR remoto, visualizado vía escritorio remoto (RDP), corriendo en Windows server 2019 y ejecutando SDRSharp para la visualización del espectro radioeléctrico



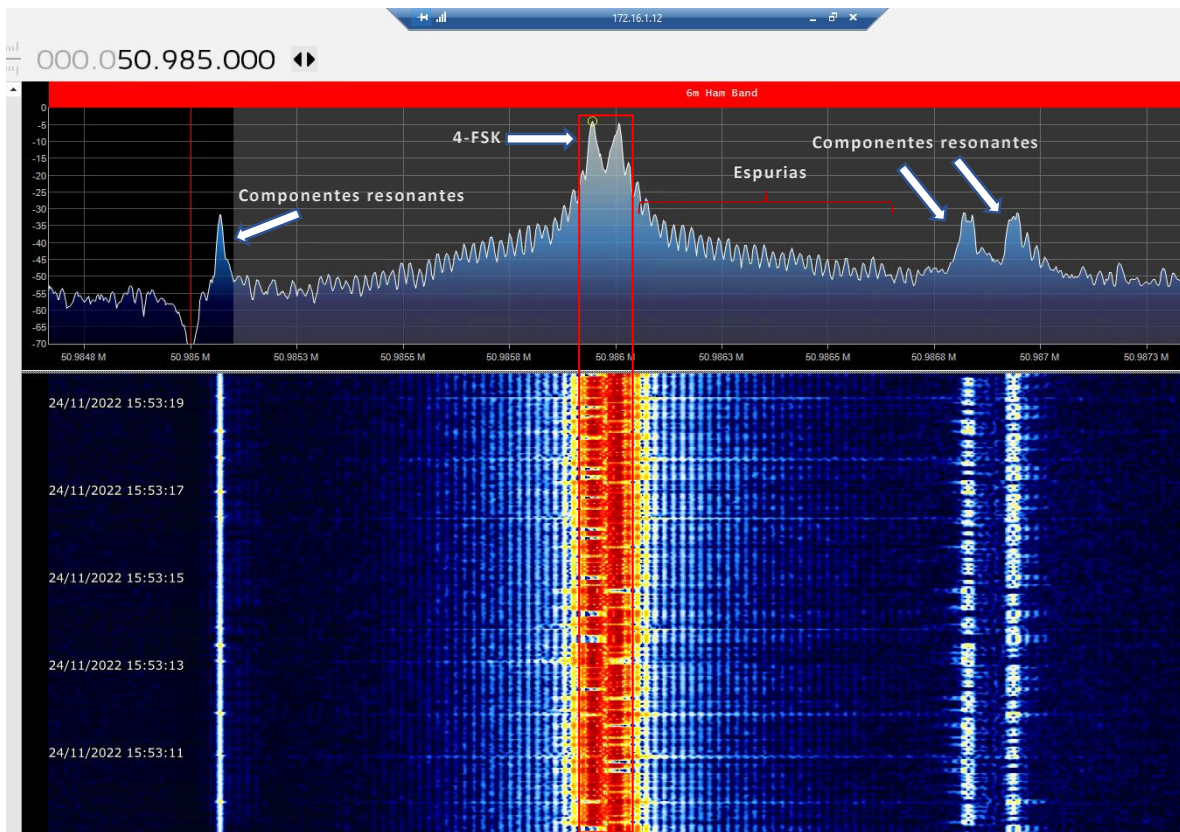
*Nota: El cable coaxial está directamente conectado a un dipolo portátil modificado de 70cm en V invertido.*

Ejecutando SDRSharp se configura usando los siguientes parámetros de análisis, como frecuencia de referencia en 50.985MHz, usando un filtro de análisis Blackman-Harris 7, ancho de banda 2.3kHz, demodulación grafica en banda lateral superior (USB), ganancia del receptor a 20.7dB, tasa de muestreo a 0.25 millones de muestras por segundo, modo de muestreo: Muestreo en Cuadratura. Ver detalles técnicos en el anexo F.

No se usaron desviaciones gracias a la calibración del TXCO del receptor y un reloj de referencia situado a 10MHz para tener doble seguro de precisión, se usaron fuentes de alimentación con el menor ruido posible y situamos el cursor de frecuencia en una zona donde no exista interferencia alguna más que el ruido de fondo residual.

### 4.3.3 Mediciones del Espectro RF

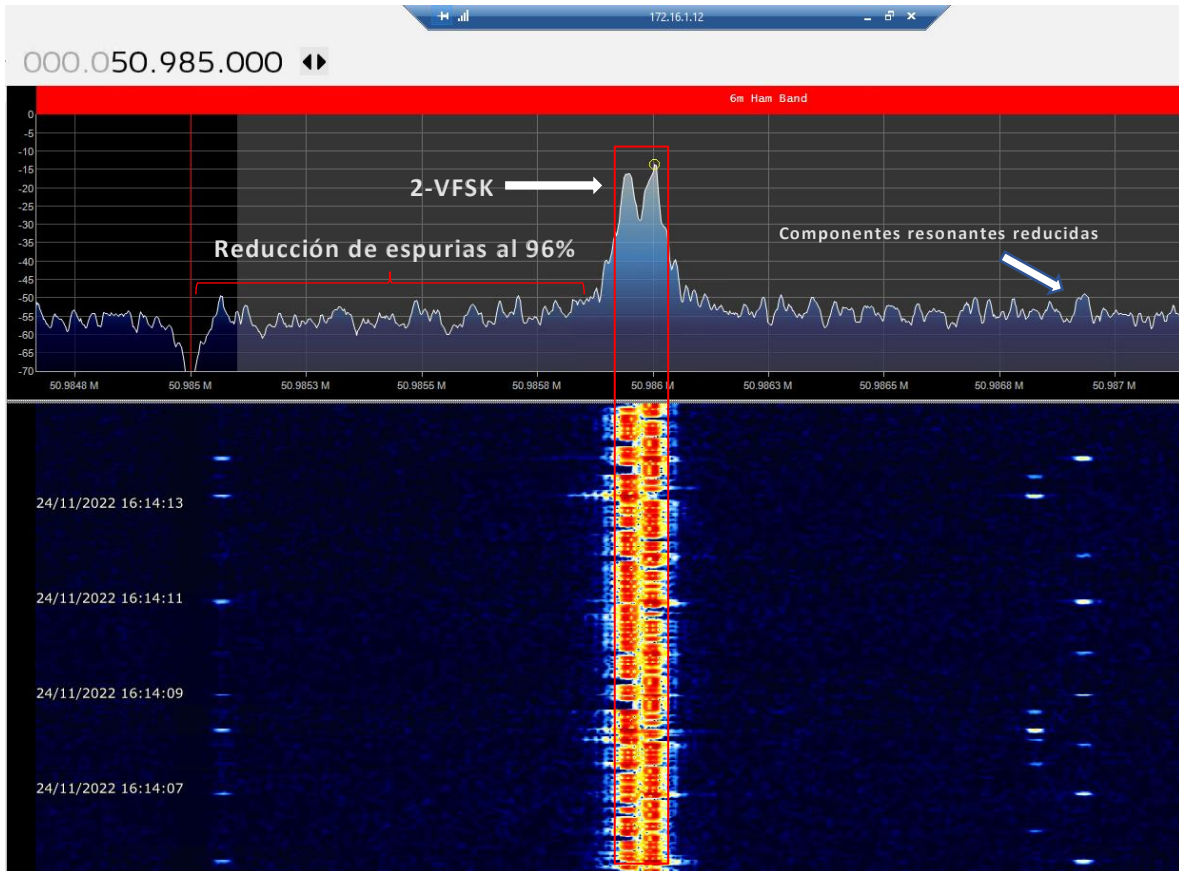
Figura No. 37 Análisis espectral de la transmisión de FSK simple, sin las mejora o sub variantes.



*Nota: Análisis visto desde el equipo de recepción y análisis remoto, muestra, emisión lineal BFSK. En este caso no se aplica VFSK.*

Como se puede observar en la figura 37, la emisión usando 2-FSK produce lóbulos a los costados de la emisión y un aumento significativo de las espurias muy notorios, en los extremos lejanos se observan componentes resonantes de Fourier, son señales espejos que se generan a los costados, esto sucede ya que las componentes de Fourier que se generan en los momentos de transición de frecuencia resuenan en otras frecuencias múltiplos de las que son emitidas, generándose múltiples componentes en todo el espectro.

Figura No. 38 Análisis espectral de la transmisión de 2-VFSK, esto no incluye mejoras derivadas de sistemas tipo MSK o GFSK.

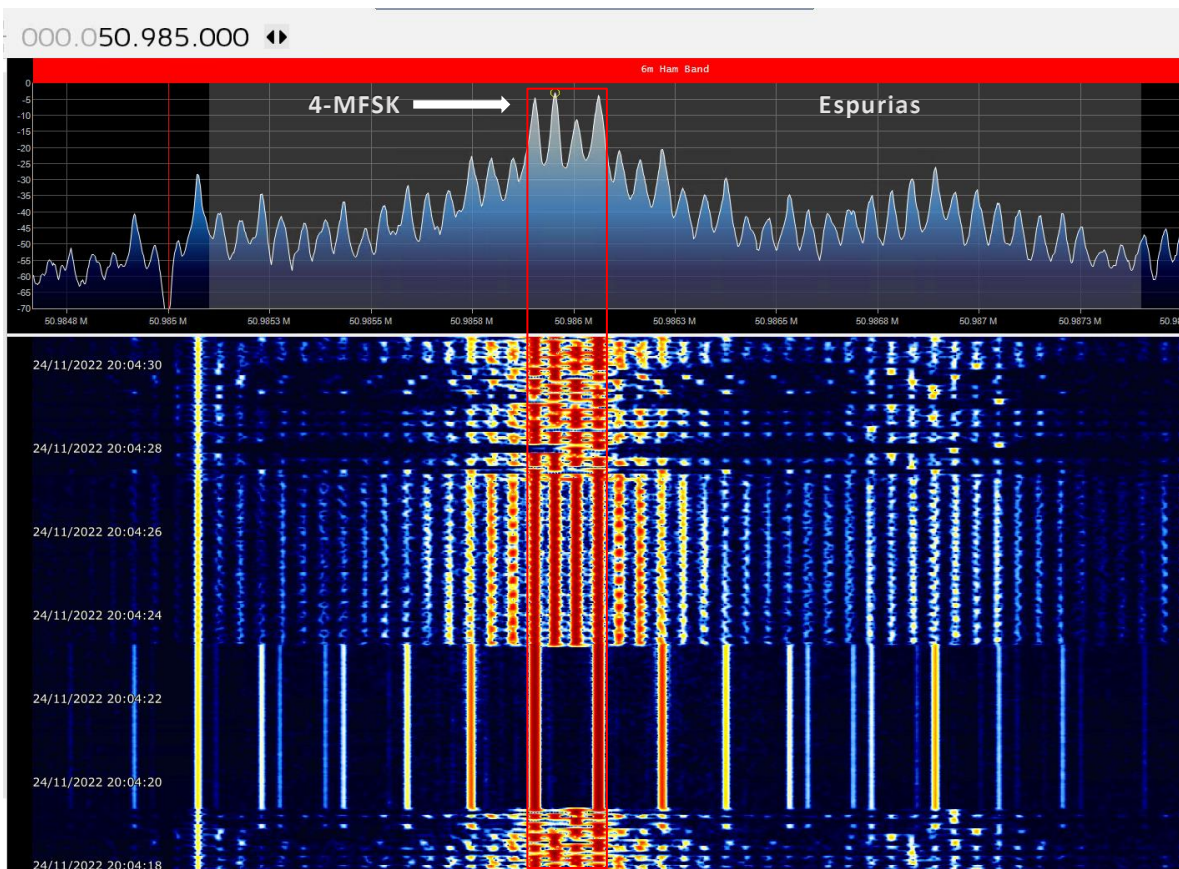


*Nota: En este análisis se activan las funciones vectoriales de rampa y amortiguación, como resultado la variante VFSK es más eficiente en el uso del ancho de banda.*

En la figura No.38 se muestra, La reducción del ancho de banda en VFSK es significativamente mayor, al usar reducción de amplitud al inicio de la transmisión de cada bit, se amortiguan los picos de componentes de Fourier y se reduce la potencia necesaria para enviar la información, eventualmente en este tipo de sistemas es posible aplicar los mecanismos como filtros gaussianos o desplazamiento mínimo (MSK), no obstante VFSK está pensado para soluciones baratas y sencillas que solo requieran optimizar sin agregar complejidad a los circuitos existentes.



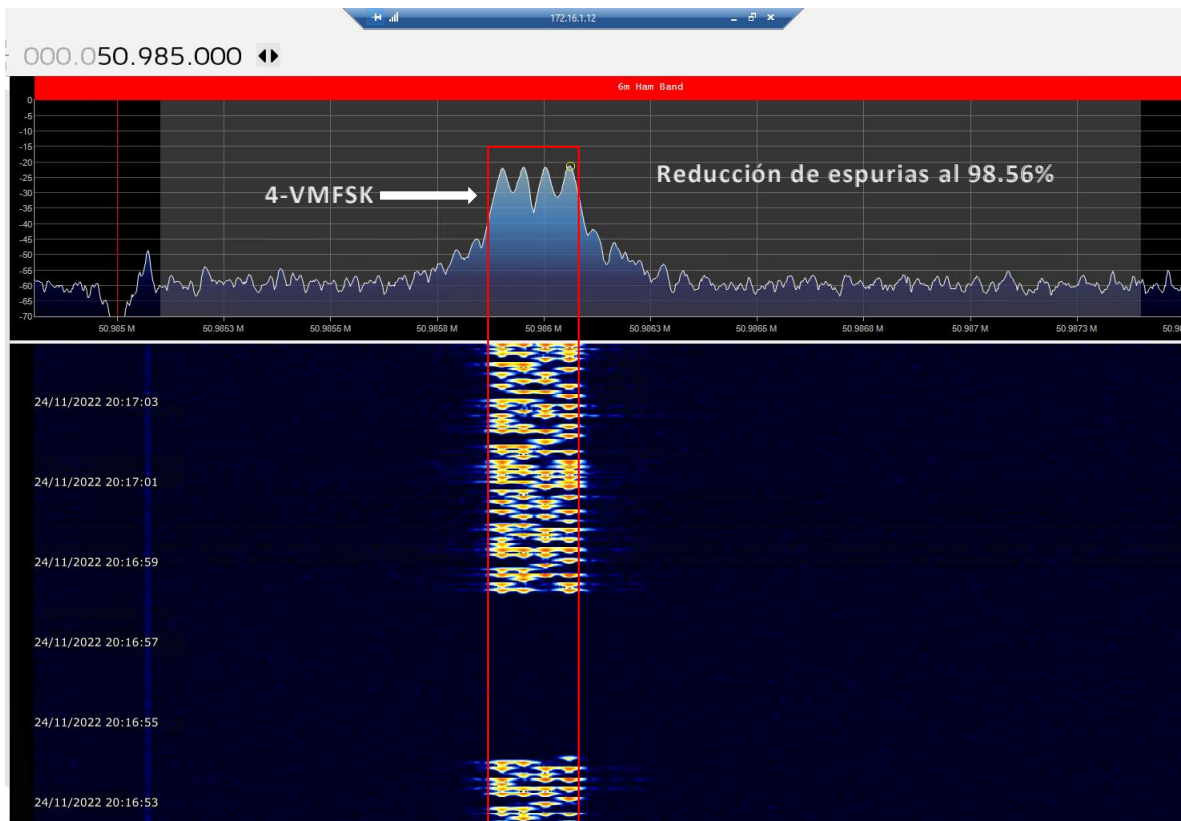
Figura No. 39 Análisis espectral de la transmisión en 4-MFSK (multiportadora), esto no incluye mejoras derivadas de sistemas tipo MSK o GFSK (GMFSK), aquí no se usa VMFSK.



*Nota: En este análisis se puede ver una emisión en 4-MFSK, nótese las señales espurias y reflejadas en los lóbulos laterales a la emisión central.*

En las emisiones multi portadoras de FSK se pueden usar múltiples combinaciones de las componentes de frecuencia simultáneamente, dando lugar a más combinaciones binarias y la capacidad de triplicar la cantidad de data que puede ser transmitida, con el detalle de que se generan más espurias y el ancho de banda se ha duplicado según sea el índice de modulación, pero esto genera más espurias y un ancho de banda aún más elevado. Ver figura No. 39

Figura No. 40 Análisis espectral de la transmisión en 4-VMFSK (multiportadora), esto no incluye mejoras derivadas de sistemas tipo MSK o GFSK (GMFSK), Función de amortiguación exponencial de tensión inversa.



*Nota: En este análisis se puede ver una emisión en 4-VMFSK, como se puede observar la aplicación de las funciones de rampa logran suprimir en su totalidad la mayoría de las espurias en los lóbulos laterales.*

Quando se aplican las funciones de rampa a MFSK surge VMFSK el cual conlleva a una gran reducción del ancho de banda utilizado por las múltiples portadoras, pero esto directamente proporcional ya que para lograr el mismo nivel de reducción es necesario usar dos posibles soluciones, lo más factible es utilizar limitadores de amplitud antes de transmitirlo, lo cual agregaría más procesos antes de la transmisión, y como segunda opción es reducir drásticamente la velocidad para aumentar las curvas de amortiguación. Ver figura No.40

Ya que las curvas de amortiguación tienen la capacidad de modificar el Angulo y tiempo de ascensión hasta alcanzar el límite de amplitud de la componente de frecuencia. Por lo tanto, entre más se aumente el tiempo de amortiguación vectorial, la señal se desvanecerá drásticamente, ya que pasaría más tiempo intentando alcanzar el nivel máximo de amplitud, por lo tanto, es necesario reducir la velocidad de transmisión para así tener una relación rampa/señal adecuada para los datos y el nivel de amplitud general de la señal.

La tabla 5, describe muchas de las modalidades permitidas para VFSK, esto para altas tasas de transferencias teóricas, pero a mayor velocidad entramos en el terreno que no existe suficiente tiempo entre los pulsos de frecuencia como para generar una rampa que absorba esa espuria provocada por la discontinuidad.

Eventualmente el efecto de reducción del ancho de banda pese a que se vea reducido, el efecto aún se conserva y es de gran necesidad utilizar otros mecanismos como MSK para alcanzar tasas de velocidad con las mismas propiedades combinadas con VFSK. Es de gran importancia recordar que VFSK está diseñado para transmisores de muy baja velocidad que prioricen la efectividad de los datos en su recepción reduciendo los anchos de banda utilizando las funciones de amortiguación, en este sentido logramos cumplir la meta de optimizar FSK de forma simple y sin grandes complejidades ni la adhesión de filtros o mecanismos que agregan eficiencia en transmisión.

Es posible mejorar VFSK agregando mecanismos como GFSK, también podemos agregar filtros muy especializados en la etapa de transmisión para reducir aún más la firma espectral, con un coste extra en términos de construcción y aumentar la pérdida de inserción de la señal, además que es necesario ordenes de filtros muy grandes para cortes muy exactos y estos a su vez aumentarían su complejidad y su coste. No obstante, tenemos un excelente resultado con agregar un nuevo concepto para la supresión de los cambios discretos entre los componentes de frecuencia, conservando la simpleza, linealidad y de una forma muy elegante, tan así que es posible agregar otros métodos para perfeccionar más VFSK, esto nos da un sinnúmero de aplicaciones prácticas para este nuevo concepto.

## V. Conclusiones

La modulación VFSK fue diseñado para ser un sistema de modulación sencillo, eficaz y con bajos costes de construcción, diseñado para la transmisión de todo tipo de información de baja velocidad, el cual posee las mejores características de inmunidad al ruido, efectos de multi trayecto o desvanecimiento, esto último con VMFSK y niveles ínfimos de potencia. Es posible usar el método de multi portadoras para aumentar la capacidad de tráfico que VFSK puede mandar, ya que aumenta el número de combinaciones que un limitado número de frecuencias puede enviar, en este caso es posible tener más ancho de banda de velocidad de transmisión sin tener que comprometer el ancho d banda espectral, con el detalle que se necesitan métodos más complejos o aumentar la curva de las funciones vectoriales para amortiguar las señales espurias, ya que los limites teóricos de la aplicación del sistema VFSK son limitados a altas tasas de velocidades solo es recomendable para tasas de transferencia extremadamente baja.

VFSK es una nodulación que tiene la capacidad de ser sobre modulado y montado sobre otro modulador vía señales de audio, por lo tanto, es posible ser transmitido usando bandas laterales inferiores o superiores para una respuesta plana, en cualquier tipo de banda de frecuencia, cuando se transmite vía audio tiene la capacidad que el sistema que genera los tonos puede agregar limitadores de amplitud y mejorar significativamente la señal de salida sin tener que agregar sistemas de filtros.

Aumentar significativamente el índice de nodulación en VMFSK puede provocar un uso exigente de ancho de banda, ya que la separación entre las componentes de frecuencia tienden a tener una separación de entre 15 a 50Hz por componente, no obstante gracias a la propiedad de multi portadora, tener un modo 4-VMFSK es equivalente a 16-VFSK, por lo tanto compensa sutilmente el uso de un ancho de banda más extendido, y que se triplica las cantidades di símbolos y combinaciones

que pueden ser transmitidas, este efecto se replica en dependencia del índice que se tenga.

VFSK puede ser utilizado en cualquier banda de frecuencia, pero su uso de baja latencia está pensado para comunicación de larga distancia utilizando rebote ionosférico, esto en las bandas de HF comprendidas desde 3MHz hasta 30MHz.

Se concluye que las aplicaciones principales para la nueva modulación por su naturaleza y características pueden ser: Telemetría, comunicación de baja velocidad, modalidades digitales para radioaficionados, sistemas de envío y recepción de datos de emergencia.

## **VI. Recomendaciones**

El diseño del modulador reduce la necesidad de un ancho de banda e Inter espaciado entre emisiones adyacentes, no obstante, se recomienda el uso de filtros de alto orden para poder reducir las emisiones no controladas y reducir aún más el espaciamiento entre emisiones y estaciones.

Es recomendable usar adaptadores de líneas desbalanceadas a balanceadas para los sistemas de transmisión que usan dipolos de media longitud de onda, ya que es posible generar espurias no controladas por encima y debajo de HF (3-30MHz).

Las potencias de transmisión necesaria para concretar un comunicado o el envío de data son de 15W en adelante, para ambientes de ciudades no se recomienda elevar la potencia a más de 2.6kW.

Es posible transmitir datos modulados sobre VFSK y VMFSK usando audio a través de FM, AM, y SSB, pero es recomendable utilizar la banda lateral superior para conservar la linealidad y evitar tener un porcentaje mayor de ineficiencia por transmitir una portadora central.

Se recomienda de forma enfática el uso de sistemas de corrección de errores y la verificación de redundancia cíclica, como CRC-32 y como capa extra de seguridad el código de autenticación de mensaje como HMAC-SHA256, estos códigos y mecanismos quedaran a elección del usuario o fabricante.

## VII. Bibliografía

(ITU), I. T. (1990). *Propagación Ionosférica en la banda de ondas métricas*. ITU, ITU-IARU. International Telecommunication Union (ITU) Papers.

Barcell, M. F. (2019). *Medios de transmisión - Redes de Datos* (Vol. 1). Cádiz, España: Universidad de Cádiz.

Benítez, J. C., & González Sánchez, M. G. (2018). ASK - FSK - PSK. *CETI*, 2-12.

Couch, L. (2016). *Sistemas de comunicación digitales y analógicos*. Pearson.

electronics-notes.com, ©. (29 de Enero de 2013). *Electronicsnotes*. Obtenido de Electronic Notes: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/modulation/what-is-gmsk-gaussian-minimum-shift-keying.php>

Franke, S., Taylor, J., & Somerville, B. (2020). *Motivation and design of the digital modes FT4 and FT8*. Princeton University. New Jersey: Princeton Press. Obtenido de [https://physics.princeton.edu/pulsar/k1jt/FT4\\_FT8\\_QEX.pdf](https://physics.princeton.edu/pulsar/k1jt/FT4_FT8_QEX.pdf)

Huertas, J. M. (2012). Fundamentos de Modulación. *Telemática y Sistemas de Transmisión de Datos*, 5-25.

J. Blinchikoff, A. I. (1999). Filtrado en los dominios de tiempo y frecuencia.

Martin, J. M. (2006). *Fundamentos de redes inalámbricas*. (C. Systems, Ed.) España: Pearson Educación. Recuperado el 2022

McGuiggan, P. (2004). *GPRS in Practice: A Companion to the Specifications*. John Wiley & Sons, Ltd.

NGAKAWA , T., ABENA, N., Vournone, M., Mibaile, J., & Yonwa, S. (2020). *Comparative study of basic digital modulation techniques: ASK, FSK and PSK* (International Journal of Scientific & Engineering Research Volume ed., Vol. 11).

Maroua, Maroua, Cameroon: International Journal of Scientific & Engineering Research. Obtenido de <https://www.ijser.org/researchpaper/Comparative-study-of-basic-digital-modulation-techniques-ASK-FSK-and-PSK.pdf>

Radio, T. N. (1 de 8 de 2017). *FT8 Mode is Latest Bright Shiny Object in Amateur Radio Digital World*. Obtenido de ARRL: <http://www.arrl.org/news/ft8-mode-is-latest-bright-shiny-object-in-amateur-radio-digital-world>

Rappaport, T. S. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice* (2nd edition ed.). New York: Prentice Hall.

RF, A. (2013). Digital Modulation Part 2 - FSK. *Atlanta RF Education for Engineers* (págs. 2-4). Atlanta: ATLANTARF Reports.

Rivas, B. (2016). *Transmisión de datos por RF*. Ciudad de México, México: Universidad Autónoma de México. Recuperado el 2021, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/701/A7.pdf?sequence=7>

SRM Institute of Science and Technology. (2018). The Lab Manual for Digital Analogic Carrier Modulations. (S. Institute, Ed.) *Lab Manuals*, 1-3. Recuperado el 2022, de [https://webstor.srmist.edu.in/web\\_assets/srm\\_mainsite/files/files/TN0501%20lab%20manual.pdf](https://webstor.srmist.edu.in/web_assets/srm_mainsite/files/files/TN0501%20lab%20manual.pdf)

Tomasi, W. (2013). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas* (4ta ed.). Marbella, España: Pearson.

Vega, C. P. (2008). *Modulación Angular*. Santander, Torrelavega: Universidad de Cantabria - Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones.

Wikipedia. (2012). Modulaciones. Estados Unidos: Wikipedia Free Encyclopedia.

[www.atlantarf.com](http://www.atlantarf.com). (2013). Modulation: Types and Techniques ASK. *Link Budget Analysis: Digital Modulation* (págs. 2-35). Georgia: Atlanta RF. Obtenido de [http://atlantarf.com/uploads/1/4/3/4/143448818/link\\_budget\\_-\\_digital\\_modulation\\_part\\_1.pdf](http://atlantarf.com/uploads/1/4/3/4/143448818/link_budget_-_digital_modulation_part_1.pdf)



## VIII. Anexos

### Anexo A. Hoja técnica del radio Yaesu FT-897 (Transmisor Primario)

#### General

Frequency Range:  
 Receive: 0.1-56 MHz, 76-108 MHz, 118-164 MHz, 420-470 MHz  
 Transmit: 160 - 6 Meters, 2 Meters, 70 Centimeters  
 (Amateur bands only)  
 5.1675 MHz (Alaska Emergency Frequency: USA only)  
 Emission Modes : A1 (CW), A3 (AM), A3J (LSB/USB), F3 (FM),  
 F1 (9600 bps packet), F2 (1200 bps packet)  
 Synthesizer Steps (Min.): 10 Hz (CW/SSB), 100 Hz (AM/FM/WFM)  
 Antenna Impedance: 50 Ohms, Unbalanced (M)  
 Operating Temp. Range: +14° F to +140° F (-10° C to +60° C)  
 Frequency Stability: ±4 ppm from 1 min. to 60 min after power on. @25° C: 1 ppm/hour  
 ±0.5 ppm/1 hour @25° C, after warmup (with optional TCXO-9)  
 Supply Voltage: Normal: 13.8 VDC ±15 %, Negative Ground  
 FNB-78 (Ni-MH Battery Pack): 13.2 V (Option)  
 Current Consumption: Squelched: 600 mA (Approx.)  
 Receive: 1 A  
 Transmit: 22 A  
 Case Size (W x H x D): 78.7"x 31.5"x 103.1" (200 x 80 x 262 mm)  
 Weight (Approx.): 8.6 lb (3.9 kg)  
 (w/o Ni-MH battery, antenna, Microphone)

#### Transmitter

RF Power Output (@13.8 V DC): SSB/CW/FM AM Carrier  
 160- 6 Meter: 100 W 25 W  
 2 Meter: 50 W 12.5 W  
 70 Centimeter: 20 W 5 W  
 Modulation Types: SSB: Balanced Modulator,  
 AM: Early Stage (Low Level),  
 FM: Variable Reactance  
 FM Maximum Deviation: ±5 kHz (FM-N: ±2.5 kHz)  
 Spurious Radiation: -50 dB (1.8-29.7 MHz)  
 -60 dB (50/144/430 MHz)  
 Carrier Suppression: >40 dB  
 Opp. Sideband Suppression: >50 dB  
 SSB Frequency Response: 400 Hz-2600 Hz (-6 dB)  
 Microphone Impedance: 200-10k Ohms (Nominal: 600 Ohms)

#### Receiver

Circuit Type: Double-Conversion Superheterodyne  
 (SSB/CW/AM/FM)  
 Superheterodyne (WFM)  
 Intermediate Frequencies: 1st: 68.33 MHz (SSB/CW/AM/FM); 10.7 MHz (WFM)  
 2nd: 455 kHz

Sensitivity:	SB/CW	AM	FM
100 kHz-1.8 MHz	—	32 $\mu$ V	—
1.8 MHz-28 MHz	0.2 $\mu$ V	2 $\mu$ V	—
28 MHz-30 MHz	0.2 $\mu$ V	2 $\mu$ V	0.5 $\mu$ V
50 MHz-54 MHz	0.125 $\mu$ V	1 $\mu$ V	0.2 $\mu$ V
144/430 MHz	0.125 $\mu$ V	—	0.2 $\mu$ V
(SSB/CW/AM = 10 dB S/N, FM = 12 dB SINAD)			
Squelch Sensitivity:	SSB/CW/AM	FM	
100 kHz-1.8 MHz	—	—	
1.8 MHz-28 MHz	2.5 $\mu$ V	—	
28 MHz-30 MHz	2.5 $\mu$ V	0.32 $\mu$ V	
50 MHz-54 MHz	1 $\mu$ V	0.16 $\mu$ V	
144/430 MHz	0.5 $\mu$ V	0.16 $\mu$ V	
Image Rejection: HF/50 MHz: 70 dB, 144/430 MHz: 60 dB			
IF Rejection: 60 dB			
Selectivity (-6/-60 dB): SSB/CW: 2.2 kHz/4.5 kHz AM: 6 kHz/20 kHz			
FM: 15 kHz/30 kHz FM-N: 9 kHz/25 kHz			
SSB (optional YF-122S installed): 2.3 kHz/4.7 kHz (-66 dB)			
CW (option YF-122C installed): 500 Hz/2.0 kHz			
AF Output: 2.5 W (@4 Ohms, 10% THD or less)			
AF Output Impedance: 4-16 Ohms			

## Anexo B. Hoja Técnica del ICOM IC-706MKIIG (Radio de Monitoreo Secundario)

### Especificaciones

---

#### General

Cobertura de frecuencia		
Recepción	0.030 - 199.999 MHz*	400 - 470 MHz*
Transmisión	1.8 - 1.999 MHz*	3.5 - 3.999 MHz*
	7.0 - 7.300 MHz*	10.1 - 10.150 MHz
	14.0 - 14.350 MHz	18.068 - 18.168 MHz
	21.0 - 21.450 MHz	24.89 - 24.990 MHz
	28.0 - 29.700 MHz	50.0 - 54.000 MHz*
	144.0 - 148.000 MHz*	430.0 - 450.000 MHz*
	* Varía según la versión	
Modo	USB, LSB, CW, RTTY (FSK), AM, FM, WFM (sólo Rx)	
No. de canales de memoria	107 (99 regulares, 6 bordes de escaneo, 2 canales de llamada)	
Conector de antena	SO-239x2 (for HF/50 MHz and 144/430 MHz)/50Ω	
Estabilidad de frecuencia	Inferior a ± 7ppm desde 1 minuto a 60 minutos después del encendido. Luego la proporción de cambio de estabilidad es menor de ±1 ppm/hora a +25°C (+77°F). Fluctuaciones de temperatura de 0°C a +50°C (+32°F a +122°F) inferior a ±5 ppm.	
Consumo de corriente	Tx	Max 20 A
	Rx	En espera 1.8A
		Audio máx 2.0 A
Rango de temperatura de operación	-10°C a 60°C; 14°F a 140°F	
Dimensiones (no se incluyen las proyecciones)	167 (ancho) × 58 (alto) × 200 (profundidad) mm; 6 <sup>9</sup> / <sub>16</sub> (ancho) × 2 <sup>9</sup> / <sub>32</sub> (alto) × 7 <sup>7</sup> / <sub>8</sub> (profundidad) pulgadas	
Peso (aprox.)	2.45 kg (5 libras 6 onzas)	
Conector CI-V	2 conductores de 3.5 mm de diámetro (1/8 pulgadas)	
Conector ACC	13 clavijas	

## Anexo C. Características del transmisor

### Transmisor

Potencia de salida	SSB/CW/RTTY/FM		AM
	HF/50 MHz	5 - 100 W	2 - 40 W
	144 MHz	2.5 - 50 W	2 - 20 W
	440 MHz	2 - 20 W	2 - 8 W

Sistema de modulación	
SSB	Modulación balanceada
AM	Modulación de bajo nivel
FM	Modulación de reactancia variable
Emisiones de espurias	
por debajo de 47.5MHz	Inferior a -60 dB
47.5-50MHz	-50 a -60 dB
por encima de 50MHz	-60 dB
Supresión de portadora	Superior a 40 dB
Banda lateral no deseada	Superior a 50 dB
Conector para micrófono	enchufe modular de 8 clavijas (600Ω)
Conector KEY	3 conductores de 6.35 mm de diámetro (1/4 pulgadas)
Conector RTTY	3 conductores de 3.5 mm de diámetro mm (1/8 pulgadas)

## Anexo D. Características del Receptor.

### Receptor

Sistema de recepción	SSB/CW/AM/WFM FM	Superheterodina doble Superheterodina triple			
Frecuencias intermedias	(Unidad: MHz)				
		<b>1ra</b>	<b>2a</b>	<b>3a</b>	
	SSB/AM-N/FM	69.0115	9.0115	0.455*	
	CW	69.0106	9.0106	—	
	RTTY	69.0105	9.0105	—	
	AM/FM-N	69.0100	9.0100	0.455*	
	WFM	70.7000	10.7000	—	
	*Sólo FM				
Sensibilidad de recepción	(preamplificador encendido; excepto 4–4.5 y 8–9 MHz)				
		<b>SSB/CW 10 dB S/N</b>	<b>AM 10 dB S/N</b>	<b>FM 12 dB SINAD</b>	<b>WFM 12 dB SINAD</b>
	0.5-1.8 MHz	-	13µV	-	-
	1.8-28 MHz	0.15µV	2.0µV	0.5µV	-
	28.0 - 29.7	0.15µV	2.0µV	0.5µV	-
	Banda de 50.0MHz	0.12µV	1.0µV	0.25µV	-
	76-108MHz	-	-	-	10.0µV
	Banda de 144/440 MHz	0.11µV	1.0µV	0.18µV	-
Sensibilidad de silenciamiento (umbral)	SSB	Inferior a 5.6 µV			
	FM	Inferior a 0.3 µV			
Selectividad (configuración normal)	SSB, CW, RTTY	Superior a 2.4 kHz/- 6 dB Inferior a 4.8 kHz/-60 dB			
	AM/FM-N	Superior a 8.0 kHz/-6 dB Inferior a 30 kHz/-36 dB			
	FM	Superior a 12 kHz/-6 dB Inferior a 30 kHz/-60 dB			
Relación de rechazo de espurias e imagen	Bandas HF	Superior a 70 dB			
	50 MHz	Superior a 65 dB (excepto a través de IF)			
	144/430(440) MHz	Superior a 65 dB			
Potencia de salida de audio	Superior a 2.0 W (a 13.8 V C.C.)				
Rango variable RIT	±9.99 kHz				
Conector para auriculares	3 conductores de 3.5 mm de diámetro (1/8 pulgadas)/8Ω				
Conector para altavoz externo	2 conductores de 3.5 mm de diámetro (1/8 pulgadas)/8Ω				

## Anexo E. Hoja de Datos del Acoplador de antena MFJ-949E

### **MFJ-949E Versa Tuner II Instruction Manual**

#### **General Information**

The MFJ-949E is a 300 watt RF output power antenna tuner that will match any transmitter or transceiver to virtually any antenna. Peak or average forward and reflected power and SWR can be read on the illuminated cross-needle meter.

The MFJ-949E uses a "T" matching network and covers all bands between 160 and 10 meters. This network will tune dipoles, inverted-vees, verticals, mobile whips, beams, random wires, and many other antennas. The MFJ-949E has rear panel connectors for coaxial, single wire or two wire feedlines. A built-in 4:1 balun allows the use of balanced open wire, twinlead, or twin-axial feedlines.

An internal eight position antenna-selector switch selects a built-in 50 ohm dummy load, two separate coaxial line outputs, or a single wire line-balanced line output. All of these functions can be selected in tuned (with tuner's "T" network in line) or bypassed (no tuning circuit) configurations.

#### **Peak Reading SWR/Wattmeter**

The illuminated cross-needle meter measures the peak or average FORWARD power, REFLECTED power, and SWR. The wattmeter is active in all the ANTENNA SELECTOR positions. To use the wattmeter without the tuning circuit select one of the ANTENNA SELECTOR positions under BYPASS.

The meter's full scale forward and reflected power range is controlled by the left METER switch that selects 300W or 30W. If your transmitter runs more than 30 watts of output power, set this switch to 300W (in position). If your transmitter has less than 30 watts of output, set this switch to the 30W switch position (out).

Peak envelope power (PEP) is measured when the PEAK or AVERAGE METER push button (right-hand side) is placed in the PEAK (in) position. Peak power and average power values are equal with steady unmodulated carriers, FSK, or FM. The PEP power is twice the average power with SSB two tone test modulation, and may be any amount larger than the average power with SSB voice signals.

Forward power is displayed on the left-hand FORWARD meter scale. This scale is calibrated from 0 to 300 watts and is read directly in the 300 watt position. Each picket (scale mark) represents 25 watts between 300 and 100 watts, 10 watts between 100 and 10 watts, and has a single 5 watt picket below 10.

In the 30W position the forward power scale must be divided by 10. Each picket represents 1/2 watt below 1 watt, 1 watt from 1 to 10 watts, and 2.5 watts from 10 to 30 watts.

The reflected power is read on the right-hand REFLECTED meter scale. This scale indicates 60 watts full scale when the 300W power sensitivity is selected, and 6 watts full scale when the 30W power scale is selected. This scale has a picket every 5 watts above 10 watts and at each watt below 10 watts. This scale is also divided by 10 when using the 30W switch position.

When trying to measure power with a less than perfect match, the reflected power should be *subtracted* from the forward power readings. The most accurate peak power readings are obtained only with a sustained carrier, voice or two tone test modulation. During normal voice modulation the wattmeter will typically indicate 70% of the true peak power.

The SWR is read directly from eleven red SWR curves that range from 1:1 to infinity. SWR is measured by observing the point where the forward and reflected power needles cross. The SWR is indicated by the red curve closest to the needle crossing point. No cumbersome or time consuming SWR sensitivity adjustments are required with this meter.

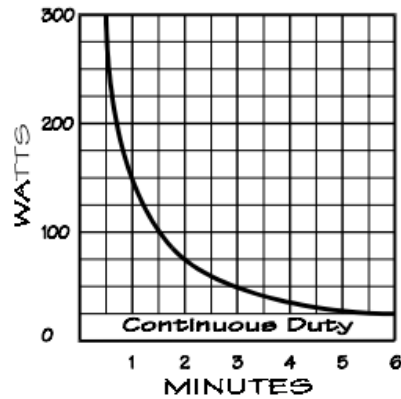
The wattmeter has an internal lamp that backlights the meter scale. The lamp circuit requires power from an external 12 Vdc source, such as the optional MFJ-1312C power supply. The rear panel jack accepts a 2.5 mm coaxial plug with a positive center pin polarity. The METER LAMP ON / OFF switch turns the meter lamp off and on.

### Antenna Selector

The ANTENNA SELECTOR switch has eight positions. From counter-clockwise to clockwise the positions are: DUMMY LOAD, BALANCED or SINGLE WIRE LINE, COAX 1, and COAX 2 with the tuner matching circuits in line, and the reverse sequence from COAX 2 back to DUMMY LOAD with the antenna tuning circuits bypassed.

### Dummy Load

The MFJ-949E has a built-in 50 ohm dummy load. The internal load will dissipate 300 watts for 30 seconds, or 100 watts for 90 seconds. Power levels above 100 watts require a three minute cooling off period between transmissions. The load will operate continuously at power levels of 25 watts or less.



### Adjustment Procedure

When using the MFJ-949E in receive only applications, adjust the MFJ-949E for the highest "S" meter or signal level. The Tuning Chart can be used as a starting reference. To use the MFJ-949E for transmitting, follow the steps below:

1. Select the 30W (out) METER switch scale. Place the PEAK AVG button in the AVG (out) position. Turn the transmitter's power control fully down.
2. Position the TRANSMITTER and ANTENNA MATCHING controls and the INDUCTOR SELECTOR switch in the bottom Tuning Chart position for the operating frequency.

**Tuning Chart**

<b>Band</b>	<b>Transmitter</b>	<b>Antenna</b>	<b>Inductor</b>
160	1.5	1.5	F
80	1.5	1.5	J
40	1.5	1.5	K
30	4	4	Halfway between K and L
20	5	5	L
17	5-1/2	5-1/2	L
15	6-1/2	6-1/2	L
12	8-1/2	8-1/2	L
10	9	9	L

3. Apply just enough power on CW (or AM / FM / RTTY) to obtain noticeable deflection on the reflected power meter.
4. Carefully adjust the TRANSMITTER and ANTENNA MATCHING controls for the lowest reflected power.

**NOTE:** These controls interact. Adjust the TRANSMITTER control for minimum, then adjust the ANTENNA control for minimum SWR. Go back and forth between these adjustments as many times as required until the lowest reflected power (best SWR) is obtained.

5. If a perfect or very low SWR can not be obtained, STOP transmitting. Try the row of chart settings just above the last one tried. Repeat from Step 3.

**NOTE:** If an SWR of 1:1 can not be obtained, move the switch towards the end of the alphabet one position at a time. Repeat Steps 3 and 4 for each new INDUCTOR switch position. Always use the lowest alphabetical setting possible.

**CAUTION:** Never transmit while changing the INDUCTOR SELECTOR.







## Anexo F. Hoja de Datos técnicos del RTL-SDR Stick USB (Analizador de RF)

### RTL-SDR Blog V3 Datasheet



The RTL-SDR Blog V3 is an improved RTL-SDR dongle. RTL-SDR dongles were originally designed for DVB-T HDTV reception, but they were found by hardware hackers to be useful as a general purpose SDR. The standard dongles are okay for DVB-T reception, but are just barely suitable for SDR users/experimenters. The RTL-SDR Blog V3 was redesigned with SDR user needs in mind, instead of DVB-T HDTV users who typically have more relaxed requirements.

Purchase at: [www.rtl-sdr.com/store](http://www.rtl-sdr.com/store)

Quickstart setup guide available at: [www.rtl-sdr.com/qsg](http://www.rtl-sdr.com/qsg)

### Basic Information

- **Bandwidth:** Up to 2.4 MHz stable.
- **ADC:** RTL2832U 8-bits
- **Frequency Range:** 500 kHz – 1766 MHz (500 kHz – 24 MHz in direct sampling mode)
- **Typical Input Impedance:** 50 Ohms
- **Typical Current Draw:** 270 – 280 mA

### Required Computing Hardware

Same requirements as a regular RTL-SDR. Compatible with Windows XP and above (SDR# requires Win 7 or newer), Linux, MacOS and Android. A dual core machine is recommended.

Single board PCs like the Raspberry Pi, Odroid, C.H.I.P are also supported with most command line apps.