



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PROPUESTA DE MIGRACIÓN DE UNA RADIO COMERCIAL DE TECNOLOGIA
ANALÓGICA A TECNOLOGÍA DAB DIGITAL AUDIO BROADCASTING EN GUATEMALA**

Romeo Estuardo López Díaz

Asesorado por el Ingeniero Guillermo Antonio Puente Romero

Guatemala, febrero de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE MIGRACIÓN DE UNA RADIO COMERCIAL DE TECNOLOGIA
ANALÓGICA A TECNOLOGÍA DAB DIGITAL AUDIO BROADCASTING EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ROMEO ESTUARDO LÓPEZ DÍAZ

ASESORADO POR EL INGENIERO GUILLERMO ANTONIO PUENTE
ROMERO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
SECRETARIO	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPUESTA DE MIGRACIÓN DE UNA RADIO COMERCIAL DE TECNOLOGIA ANALÓGICA A TECNOLOGÍA DAB DIGITLA AUDIO BROADCASTING EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha de 15 de octubre de 2019.



Romeo Estuardo López Díaz

Guatemala, 02 de agosto de 2022

Ing. Julio Solares Peñate
Coordinador de Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Ingeniero Solares:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: "PROPUESTA DE MIGRACIÓN DE UNA RADIO COMERCIAL DE TECNOLOGÍA ANALÓGICA A TECNOLOGÍA DAB DIGITAL AUDIO BROADCASTING EN GUATEMALA", desarrollado por el estudiante Romeo Estuardo López Díaz carné No. 1999-11011, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos, por lo que el autor y mi persona somos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,



Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
ASESOR
Colegiado 5898

Guillermo A. Puente R.
INGENIERO ELECTRÓNICO
COL # 5898



Guatemala, 9 de agosto de 2022

Señor director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Señor director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE MIGRACIÓN DE UNA RADIO COMERCIAL DE TECNOLOGÍA ANALÓGICA A TECNOLOGÍA DAB DIGITAL AUDIO BROADCASTING EN GUATEMALA**, desarrollado por el estudiante **Romeo Estuardo López Díaz**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Julio César Solares Peñate'.

Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica

REF. EIME 43.2023.

El director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del asesor, con el Visto Bueno del coordinador de área, al trabajo de Graduación del estudiante Romeo Estuardo López Díaz: **“Propuesta de migración de una radio comercial de tecnología analógica a tecnología DAB Digital Audio Broadcasting, en Guatemala”**, procede a la autorización correspondiente.



Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Guatemala, 30 de agosto de 2023.

LNG.DECANATO.OI.091.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE MIGRACIÓN DE UNA RADIO COMERCIAL DE TECNOLOGÍA ANALÓGICA A TECNOLOGÍA DAB DIGITAL AUDIO BROADCASTING EN GUATEMALA**, presentado por: **Romeo Estuardo López Díaz**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.

Guatemala, febrero de 2024

JFGR/gaac

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Ing. Romeo López y Delia Leticia Díaz, por haberme apoyado y exigido el culminar este proceso que sin su apoyo y cariño no hubiese sido posible.

Mi hermana

Lic. Andrea López, por haber compartido el proceso de realización de este trabajo de graduación.

Mi esposa

Lourdes Peña, por ser parte importante en el apoyo y esfuerzo para culminar este proceso.

Mi hija

Daniela López, por haber sido el motor e inspiración para dar término a este proceso y cumplir una meta personal más.

Mi asesor

Ing. Guillermo Puente, por el tiempo y conocimientos compartidos.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por haberme dado la oportunidad de ser parte de tan honorable casa de estudios.
Mis amigos	Que me acompañaron y apoyaron durante el proceso de estudio.
Catedráticos	Que compartieron sus conocimientos y apoyaron para culminar este proceso.
Mi esposa	Lourdes Peña, que me apoyó en la culminación de este trabajo de graduación.
Mi hija	Daniela López, por ser el motor e inspiración para culminar este proceso.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. SITUACIÓN ACTUAL DEL ESPECTRO DE RADIO FM EN GUATEMALA.....	1
1.1. Derechos de explotación de las radiofrecuencias en la banda FM	2
1.2. Ejemplo de uso actual de radiofrecuencias de FM para cobertura nacional	15
2. MODULACIÓN DE SEÑALES.....	17
2.1. Modulaciones analógicas	17
2.1.1. Modulación de amplitud AM.....	18
2.1.2. Modulador de frecuencia FM	22
2.2. Modulación de impulso codificado PCM.....	27
2.2.1. Muestreo PAM	28
2.2.1.1. Teorema de muestreo	29
2.2.1.2. Cuantificación	30
2.2.1.3. Codificación	32
3. MULTIPLEXACIÓN DE SEÑALES.....	35

3.1.	Definición de multiplexación de señales.....	35
3.2.	Multiplexación por división de frecuencia, FDM	35
3.3.	Multiplexación por división de tiempo, TDM	37
3.3.1.	TDM en señales analógicas	37
3.3.2.	TDM en señales digitales	39
3.3.3.	Tipos de multiplexación digital.....	39
3.3.3.1.	Multiplexación bit por bit	39
3.3.3.2.	Multiplexación por entrelazado de palabra	40
4.	MODULACIÓN DIGITAL.....	43
4.1.	Definición de modulación digital.....	43
4.2.	Modulación PSK.....	44
4.2.1.	Modulador 8-PSK	44
4.2.2.	Demodulador 8-PSK.....	51
4.3.	Modulación de amplitud en cuadratura QAM	55
4.3.1.	Modulador 8-QAM	55
4.3.2.	Demodulador 8-QAM.....	60
4.4.	Modulación por desplazamiento de fase diferencial DBPSK....	60
4.4.1.	Transmisión DBPSK.....	61
4.4.2.	Recepción DBPSK	63
4.5.	Multiplexación por división de frecuencia ortogonal OFDM.....	64
4.5.1.	Modulación OFDM.....	64
4.5.2.	Sistema para producir OFDM.....	67
4.6.	Transmisión mediante portadora única SC y multiportadora OFDM	69
4.7.	Transmisión OFDM vía radio	70
4.7.1.	Prefijo cíclico	72
4.8.	Ortogonalidad.....	74

4.9.	Transmisor OFDM	77
4.9.1.	Circuito conversor serie/paralelo	78
4.9.2.	Circuito de mapeo.....	79
4.9.3.	Unidad IFFT	79
4.9.4.	Circuito conversor párelo/serie, P/S.....	81
4.9.5.	Adición del prefijo cíclico, PC.....	82
4.9.6.	Unidad D/A	82
4.9.7.	Estructura del símbolo OFDM.....	83
4.10.	Receptor OFDM	84
4.11.	El canal de propagación	85
5.	COMPRESIÓN DE SEÑALES	87
5.1.	Definición de compresión de señales	87
5.2.	Técnicas de compresión.....	89
5.2.1.	Compresión sin pérdida	89
5.2.2.	Compresión con pérdida.....	89
5.3.	Psicoacústica.....	90
5.3.1.	Modelo psicoacústico.....	91
5.3.2.	Curva de sensibilidad del oído humano	91
5.3.3.	Enmascaramiento de frecuencia	92
5.3.4.	Enmascaramiento temporal	94
5.3.5.	Bandas críticas	95
5.4.	Formato de compresión MPEG	96
5.4.1.	Capa I de MPEG.....	97
5.4.2.	Capa II de MPEG.....	98
5.4.3.	Capa III de MPEG.....	98
5.5.	Codificador MPEG	99
6.	SISTEMA RADIO DIGITAL TERRESTRE DAB	103

6.1.	Estándares de la radio digital terrestre.....	104
6.1.1.	Sistema IBOC (In-Band, On-Channel).....	104
6.1.2.	Sistema DRM (<i>Digital Rights Management</i>)	105
6.1.3.	Sistema ISDB (<i>Integrated Services Digital Broadcasting</i>)	106
6.1.4.	Sistema DAB (<i>Digital Audio Broadcasting</i>)	106
6.2.	Generación de una señal DAB.....	108
6.2.1.	Arquitectura del sistema DAB.....	110
6.2.1.1.	Canal de servicio MSC	111
6.2.1.2.	Canal de información rápida FIC.....	113
6.2.1.3.	Información de configuración del múltiplex MCI.....	113
6.2.1.4.	Canal de sincronización	114
6.3.	Trama del múltiplex de transmisión.....	114
6.4.	Modulador OFDM.....	116
6.5.	Radiofrecuencias seleccionadas para sistemas DAB	118
6.6.	Recepción de la señal DAB.....	121
6.6.1.	Receptor Digital Audio Broadcasting DAB.....	121
7.	CARACTERÍSTICAS DE LOS RADIOS DIGITAL AUDIO BROADCASTING	123
7.1.	Radioreceptores tecnología DAB	124
7.1.1.	Radioreceptores tecnología DAB, tipo fijo	124
7.1.2.	Radioreceptor tecnología DAB, tipo portátil.....	126
7.1.3.	Radioreceptor tecnología DAB para automóviles	128
7.2.	Radiotransmisores tecnología DAB	130
7.2.1.	Transmisor modelo 1	130
7.2.2.	Transmisor modelo 2.....	132
7.2.3.	Radiotransmisor DAB modelo 3	134

8.	VENTAJAS DE LA TECNOLOGIA DIGITAL EN LA RADIO COMERCIAL.....	137
9.	MIGRACIÓN DE LA RADIO COMERCIAL SONORA DE TECNOLOGIA ANALÓGICA A TECNOLOGIA DAB, DIGITAL AUDIO BROADCASTING	140
9.1.	Consideraciones para la migración de una radio comercial sonora de tecnología analógica a tecnología DAB, Digital Audio Broadcasting.	141
	CONCLUSIONES	147
	RECOMENDACIONES	149
	REFERENCIAS	151
	ANEXOS	157

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Plan de frecuencias FM	3
Figura 2.	Modulación de amplitud	19
Figura 3.	Espectro de frecuencias de la técnica Modulación de Amplitud AM	21
Figura 4.	Modulador de amplitud	22
Figura 5.	Modulación de frecuencia FM	25
Figura 6.	Sistema de modulación de frecuencia FM	26
Figura 7.	Sistema PCM... ..	28
Figura 8.	Muestreo PAM.	29
Figura 9.	Muestreo y cuantificación en PCM	31
Figura 10.	Codificación de una señal PCM	33
Figura 11.	Multiplexación por división de frecuencia, FDM	36
Figura 12.	Multiplexación TDM-PAM	38
Figura 13.	Multiplexación digital bit por bit	40
Figura 14.	Multiplexación digital por entrelazado de palabra	41
Figura 15.	Modulador 8-PSK.	45
Figura 16.	Valores de salida en modulación 8-PSK	47
Figura 17.	Diagrama de fasores en modulación 8-PSK	48
Figura 18.	Fases en modulación 8-PSK	49
Figura 19.	Resultado de ejemplo 4.1	50
Figura 20.	Demodulador 8-PSK	52
Figura 21.	Valores de salida en un demodulador 8-PSK	53
Figura 22.	Modulador 8-QAM.	57

Figura 23.	Tabla de convertidor D/A 8-QAM	58
Figura 24.	Relaciones de fase y amplitud en 8-QAM	59
Figura 25.	Diagramas del Modulador 8-QAM	59
Figura 26.	Demodulador 8-QAM.....	60
Figura 27.	Transmisor DBPSK	62
Figura 28.	Receptor DBPSK.....	64
Figura 29.	Multiplexación de señales en OFDM	65
Figura 30.	Espectro OFDM.....	66
Figura 31.	Modulación OFDM.....	68
Figura 32.	Comparación entre técnicas de modulación.....	70
Figura 33.	Propagación de ondas de radio.....	71
Figura 34.	Interferencia intersímbolo, ISI.....	72
Figura 35.	Esquema y funcionamiento del PC	73
Figura 36.	Recepción de símbolos OFDM.....	74
Figura 37.	OFDM en el tiempo	77
Figura 38.	Transmisor OFDM	78
Figura 39.	Estructura OFDM.....	83
Figura 40.	Receptor OFDM	85
Figura 41.	Sensibilidad del oído humano	92
Figura 42.	Enmascaramiento en frecuencia	93
Figura 43.	Post-enmascaramiento temporal.....	94
Figura 44.	Modelo técnico del oído humano.....	96
Figura 45.	Codificador MPEG.....	100
Figura 46.	Sistema de transmisión DAB.....	108
Figura 47.	Generación de una señal DAB	109
Figura 48.	Arquitectura del sistema DAB.....	111
Figura 49.	Trama del múltiplex de transmisión	116
Figura 50.	Modulador OFDM.....	117
Figura 51.	Receptor DAB	122

Figura 52.	Radio DAB tipo fijo.....	126
Figura 53.	Radioreceptor DAB portátil	128
Figura 54.	Radioreceptor DAB tipo automóvil.....	130
Figura 55.	Radiotransmisor DAB modelo 1.....	132
Figura 56.	Radiotransmisor DAB modelo 2.....	134
Figura 57.	Radiotransmisor DAB modelo 3.....	136
Figura 58.	Capacidad de transmisión FM vs. DAB	138
Figura 59.	Diagrama de transmisión de señales DAB en radio emisoras ...	145

TABLAS

Tabla 1.	Frecuencias centrales de canales asignados al servicio de radiodifusión sonora FM	2
Tabla 2.	Derechos otorgados en radiodifusión FM, cobertura departamental y distribución por departamentos	4
Tabla 3.	Derechos otorgados en radiodifusión FM, cobertura municipal..	11
Tabla 4.	Frecuencias centrales de la banda I	118
Tabla 5.	Frecuencias centrales de la banda III	119
Tabla 6.	Frecuencias centrales de la banda L	120
Tabla 7.	División de gamas de frecuencias de radiotransmisión	142

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
DBPSK	<i>Diferential Binary Phase Shift Keying</i>
DAB	<i>Digital Audio Broadcasting</i>
DMT	<i>Digital Multi Tone</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
EEP	<i>Equal Error Protection</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FIC	<i>Fast Information Channel</i>
FM	<i>Frequency Modulation</i>
ICI	<i>Intercarrier Interference</i>
IDFT	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i>
MSC	<i>Main Service Channel</i>
MCI	<i>Multiplex Configuration Information</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying,</i>
PC	<i>Prefijo Cíclico</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation,</i>
SC	<i>Single Carrier</i>
SIT	<i>Super Intendencia de Telecomunicaciones.</i>

UEP

Unequal Error Protection

GLOSARIO

AM	Modulación de Amplitud (AM). Proceso electrónico en donde varía la amplitud máxima A_c de la onda portadora no modulada $A_c \cos(\omega_c t + \theta_c)$ en función de una onda de señal $m(t)$.
Codificación	La codificación en PCM en esencia es asignarle a cada muestra cuantizada un valor expresado en números binarios, por medio de circuitos conversores A/D.
Cuantificación	Proceso de cuantificación donde una señal analógica es transformada en una señal digital, consiste en asignarle a cada muestra de la señal PAM el nivel más próximo dentro de una escala de valores discretos.
FDM	Método de multiplexación donde señales de audiofrecuencia con ancho de banda de 0 a 15 kHz modulan varias frecuencias portadoras de distinto valor, trasladando cada señal a un rango diferente de frecuencia.
FM	En la técnica de modulación de frecuencia FM, la frecuencia instantánea de la onda portadora es afectada por el voltaje de la onda moduladora.

Modulación DBPSK	Es otra forma de modulación digital en la que los datos son enviados por medio de la variación de únicamente dos fases de la onda portadora.
Modulación digital	Modulación digital es un proceso en el que una señal digital se convierte en analógica portando la información en la variación de solo amplitud, fase, frecuencia, o amplitud y fase al mismo tiempo.
Modulación OFDM	Este proceso electrónico mezcla las funciones de modulación y multiplexación por división de frecuencia en un mismo escenario.
Modulación QAM	La técnica de modulación de amplitud en cuadratura MQAM es otro tipo de modulación digital M-aria en la que la información está contenida en las variaciones de fase y de amplitud que pueda sufrir la portadora.
Modulación PSK	Forma de modulación digital donde la información provoca cambios de fase en la onda portadora.
Multiplexación	La multiplexación de señales eléctricas es un proceso de empaquetamiento o agrupamiento para que varias puedan ser transmitidas por un mismo medio de propagación.
Ortogonalidad	La ortogonalidad de funciones es la herramienta por la cual en OFDM las bandas laterales de las

subportadoras adyacentes se traslapan sin que exista interferencia intersímbolo, ISI.

PAM

El significado eléctrico de muestreo es tomar muestras, durante instantes muy cortos y periódicos, valores de una señal.

PCM

La modulación de impulso codificado, (PCM, Pulse Modulation Code) es una técnica que se utiliza para convertir una señal analógica en una serie de impulsos codificados digitalmente.

TDM

Tipo de multiplexación de señales donde es el tiempo el que se comparte entre varios canales de manera ordenada.

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es dar a conocer las bondades de la tecnología de Radio Comercial Digital Audible, (*DAB, Digital Audio Broadcasting*), comparado con las radios tecnología analógica, con tal consideración el presente trabajo contiene en su primer capítulo, para efectos de comparación, el estado actual de ocupación del espectro radioeléctrico en Guatemala en la banda de radio difusión con modulación de frecuencia, FM, haciéndose referencia a la cantidad de frecuencias que utiliza como repetidoras en radio transmisores, la estación comercial que transmite en 96.9 MHz como frecuencia central para cubrir todas las regiones del país, que hace contraste con la cantidad que utiliza una estación de radio DAB que utiliza un solo transmisor.

En las tablas contenidas en este capítulo puede verse que en Guatemala el espectro FM está completamente saturado no habiendo opción para incorporar al medio nuevas estaciones de radio comercial sonora.

En el capítulo dos se ve el tema modulación de señales o el proceso en que una señal sufre alguna transformación en algún parámetro como amplitud, frecuencia o fase por la influencia de otra onda, esto en el caso de tratar con modulación analógica.

En este capítulo también es tratado el tema Modulación de Impulso Codificado, MIC, (PCM por sus siglas en inglés), considerado importante por ser la transformación que sufren las señales de audio que ingresan al transmisor DAB.

El capítulo tres se toca el tema de multiplexación de señales. Las técnicas de multiplexación hacen eficiente los medios de transmisión o de propagación de señales electrónicas al enrutar por un mismo medio un grupo de señales de esta o distinta procedencia. Se trata la forma de cómo opera un multiplexor por división de frecuencia FDM y multiplexor por división de tiempo TDM.

En el capítulo cuatro se ven los temas de modulación digital, que se puede definir como el proceso que ejecuta un circuito electrónico cuando convierte pulsos codificados en una señal analógica codificada lo que sucede en los casos de moduladores M-arios como M-QAM, modulación de amplitud en cuadratura y M-PSK modulación por desplazamiento de fase. En este capítulo se analiza el funcionamiento de los moduladores y demoduladores 8-PSK y 8-QAM, se resuelve un ejemplo de conversión en cuanto a la modulación y demodulación de señales de cada uno de estos procesos.

A la vez en el capítulo cuatro se trata el tema modulación OFDM, por considerarse un fenómeno de modulación digital, con mayor detenimiento por la importancia que tiene en los sistemas de radio digital audio broadcasting, DAB. En la modulación OFDM la unidad IFFT es la parte esencial del sistema, aquí se efectúa la modulación a través de técnicas de procesamiento digital de señales.

El capítulo cinco trata el tema de compresión de señales, trata de la reducción de volumen de datos, que contienen determinada cantidad de información, sin afectar su contenido, destinadas a ser almacenada o transmitida. Con el volumen de datos reducido, se espera cuando sea requerida, obtener la misma información utilizando un mínimo de espacio. El sistema DAB utiliza un modelo de compresión de sonido llamado MUSICAM-mpg con un bit rate 192 kbps, proporcionando una calidad parecida al cd, elimina toda señal no audible

consiguiendo de esta manera reducir 7 veces la cantidad de información a transmitir.

Este capítulo contiene conceptos como el modelo psicoacústico resultado de una serie de experimentos realizados a un grupo de personas que participan en una serie de laboratorios y producen, entre otros, la curva de sensibilidad del oído humano, el enmascaramiento de frecuencias audibles, enmascaramiento temporal y las bandas críticas de audición.

El capítulo seis se hace una descripción sobre los estándares de la radio digital terrestre: IBOC, *In Band On Channel*, DRM, *Digital Radio Mondiale*, Sistema ISDB (*Integrated Services Digital Broadcasting*) y principalmente sobre el sistema DAB, *Digital Audio Broadcasting*, siendo esta última la esencial para el presente trabajo.

En el capítulo siete se presentan tres distintos modelos de radio receptores con tecnología DAB, fijos, portátiles y para automóviles, los datos son tomados de material de publicidad de distintas fábricas, lo mismo que los radiotransmisores.

El capítulo ocho contiene las ventajas que ofrece esta tecnología digital sobre la analógica en cuanto a la radio sonora comercial, por ejemplo, el hacer más eficiente el espectro radio eléctrico al permitir una red de frecuencias única para cubrir toda una región, el utilizar una sola frecuencia para transmitir más de seis estaciones de radio, entre otros.

En el capítulo nueve se presentan distintas acciones que ejecutarse para que se haga efectiva la migración de la radio comercial sonora analógica a la radio comercial sonora digital.

OBJETIVOS

General

Propuesta de migración de una radio comercial de tecnología analógica a tecnología DAB *Digital Audio Broadcasting*, en Guatemala.

Específicos

1. Analizar la situación actual del espectro FM en Guatemala.
2. Presentar los conceptos de un Documento de consulta para los estudiantes de telecomunicaciones sobre conceptos de radio digital terrestre.
3. Presentar conocimientos sobre nuevos medios de comunicación.

INTRODUCCIÓN

La radio comercial sonora con tecnología de amplitud modulada, AM, fue inventada en el año 1900, pero fue puesta en operación oficialmente, alrededor del mundo, en el mes de noviembre de 1920 en los Estados Unidos de Norte América, cuando salió al aire la radio KDKA de Pittsburg, operando con licencia comercial.

En 1933 fue inventada la radio con tecnología de frecuencia Modulada, FM, siendo hasta el año 1937 que aparecen las primeras empresas a funcionar comercialmente con esta tecnología.

En Guatemala oficialmente, la radio sonora con tecnología AM, es puesta en funcionamiento el 15 de septiembre de 1930 fecha en que el presidente de turno, Lázaro Chacón, inauguró la radio TGW, Radio Nacional de Guatemala.

La evolución de la radio llega a Guatemala y las radios comerciales con tecnología de frecuencia modulada, FM, surgen en la década de los 60, como un avance en el mundo de la radiotransmisión. La radio FM utiliza un ancho de banda mayor, lo que produce mejor fidelidad en la música y presenta mayor inmunidad a la interferencia que AM.

En la actualidad la radio comercial sonora, esta rama de las comunicaciones, ha surgido con una nueva tecnología perteneciente a la electrónica digital, la técnica Digital Audio Broadcasting, DAB, con amplias ventajas sobre la FM, por ejemplo, para tener cobertura en todo un país FM utiliza varias frecuencias en distintas estaciones repetidoras, DAB solo requiere de una.

Asdemás, posee un alto porcentaje de inmunidad a la interferencia inter portadora, ICI, y a la interferencia intersímbolo, ISI.

Así mismo, presenta un ahorro económico en cuanto al uso de energía eléctrica, los transmisores DAB transmiten con menor potencia y en cuanto a la calidad del sonido proporciona una similar a la de un CD. DAB optimiza el espectro radio eléctrico, FM con una frecuencia de transmisión solo porta información de una estación de radio, DAB con una sola frecuencia puede hacerlo para una cantidad mayor o igual a seis estaciones distintas, y además de transportar voz y música lleva información escrita del tiempo, estado de las carreteras, el tránsito y las noticias.

El país donde por primera vez una radio transmite utilizando esta tecnología es el Reino Unido por la BBC en septiembre de 1995, así mismo ocurrió en Suecia por medio de la estación *Sveriges Radio*.

De acuerdo con la fuente, *British Broadcast Corporation*. En el año 2016 se creó la *European Digital Radio Alliance* con el objetivo de promover la radio digital DAB como la opción preferida para los radioescuchas de todo Europa a través de una estrategia de promoción de un modelo híbrido DAB/FM analógica que permitiría a cada país avanzar a su propio ritmo hacia el apagón analógico.

En respuesta, son varios los países que ya han iniciado la transmisión radial por medio de la tecnología DAB, contándose entre ellos a Noruega, Italia, Suecia, Suiza, Alemania y Francia. En Noruega el 11 de enero de 2017 se efectuó el apagón analógico.

Estados Unidos está migrando de la técnica analógica hacia la digital con su propia norma, IBOC (*in-Band On-Channel*) o canal dentro de banda, norma

que México ha adoptado desde 2011 y lo mismo que en República Dominicana. En México hasta finales del año 2015 estaban funcionando ciento una radioemisoras con tecnología digital, 14 en la ciudad capital.

En el espectro de FM se disponen de cien frecuencias centrales, en la ciudad capital de Guatemala solo se disponen de cincuenta y otras cincuenta para servicio en la zona departamental y municipal, por consideraciones de distribución del ente administrador, SIT, por lo que solo cincuenta radioemisoras pueden laborar en la capital.

En el campo radio eléctrico existe la UIT, Unión Internacional de Telecomunicaciones, ente perteneciente a la Organización de Naciones Unidas, cuya función es la de reglamentación, normalización y desarrollo de las telecomunicaciones en todo el mundo, así como la gestión internacional del espectro de frecuencias radioeléctricas. UIT ha asignado para la transmisión de las radios comerciales con tecnología DAB, tres bandas: I, III y L con 12, 41 y 46 frecuencias centrales respectivamente, por medio de cada frecuencia pueden transmitir en promedio seis estaciones.

En el momento que Guatemala opte por cambiar a tecnología digital en el campo de la radiodifusión comercial, se podría considerar hacerlo en la banda L, se contaría con 46 frecuencias centrales y se daría servicio a una cantidad mayor que doscientos setenta y seis estaciones de radio sonora para todo el país.

Como se ha mencionado, una de las características muy importantes de la tecnología DAB es la eficiencia que presenta en el uso del espectro radioeléctrico, en cuanto a que una radio emisora requiere de una sola frecuencia para tener cobertura en toda una región o país. La técnica FM requiere de varias frecuencias distintas a la frecuencia de la estación origen, citando como ejemplo

la estación de radio que transmite en la ciudad capital con la frecuencia de 96.9 MHz, esta requiere de diez y ocho, 18, frecuencias distintas para llegar a todo el país, con esta cantidad de repetidoras en la tecnología DAB se estaría dando oportunidad a un mínimo de ciento catorce, 114, estaciones de radio distintas para llegar a todos los rincones de todo el país.

1. SITUACIÓN ACTUAL DEL ESPECTRO DE RADIO FM EN GUATEMALA

Las frecuencias de radio comercial FM están ubicadas en la banda VHF del espectro radioeléctrico, sus valores están entre 88 y 108 MHz, cada estación ocupa un espacio de 200 kHz, está ubicada entre los canales de televisión VHF 6 y 7. Las radioemisoras FM operan con frecuencias centrales que van desde 88,1 MHz, con una separación de 200 kHz entre ellas, teniendo capacidad el espectro asignado para 100 radioemisoras. Cada estación de FM tiene una desviación máxima de su frecuencia central de 75 kHz, lo cual deja dos bandas guardas superior e inferior de 25 kHz para minimizar la interacción entre bandas de frecuencias adyacentes (SIT, 2019).

En Guatemala la SIT, Super Intendencia de Telecomunicaciones, ha dividido el espectro FM en dos grupos: A y B, como lo muestra la tabla 1 y está representado en el mapa de la figura 1.

Tabla 1.

Frecuencias centrales de canales asignados al servicio de radiodifusión FM

Grupo A

Frecuencia MHz	88.1	88.5	88.9	...	106.9	107.3	107.7
Número de canal	1	2	3	...	48	49	50

El valor de frecuencia de cada canal se puede determinar por la expresión

$$C = 88.1 + n \cdot 0.4 \text{ MHz}$$

Donde n puede tomar valores entre 0 y 49

Grupo B

Frecuencia MHz	88.3	88.7	89.1	...	107.1	107.5	107.9
Número de canal	51	52	53	...	98	99	100

El valor de frecuencia de cada canal se puede determinar por la expresión

$$C = 88.3 + n \cdot 0.4 \text{ MHz}$$

Donde n puede tomar valores entre 0 y 49

Nota. SIT. Elaboración propia, realizado con Excel.

1.1. Derechos de explotación de las radiofrecuencias en la banda FM

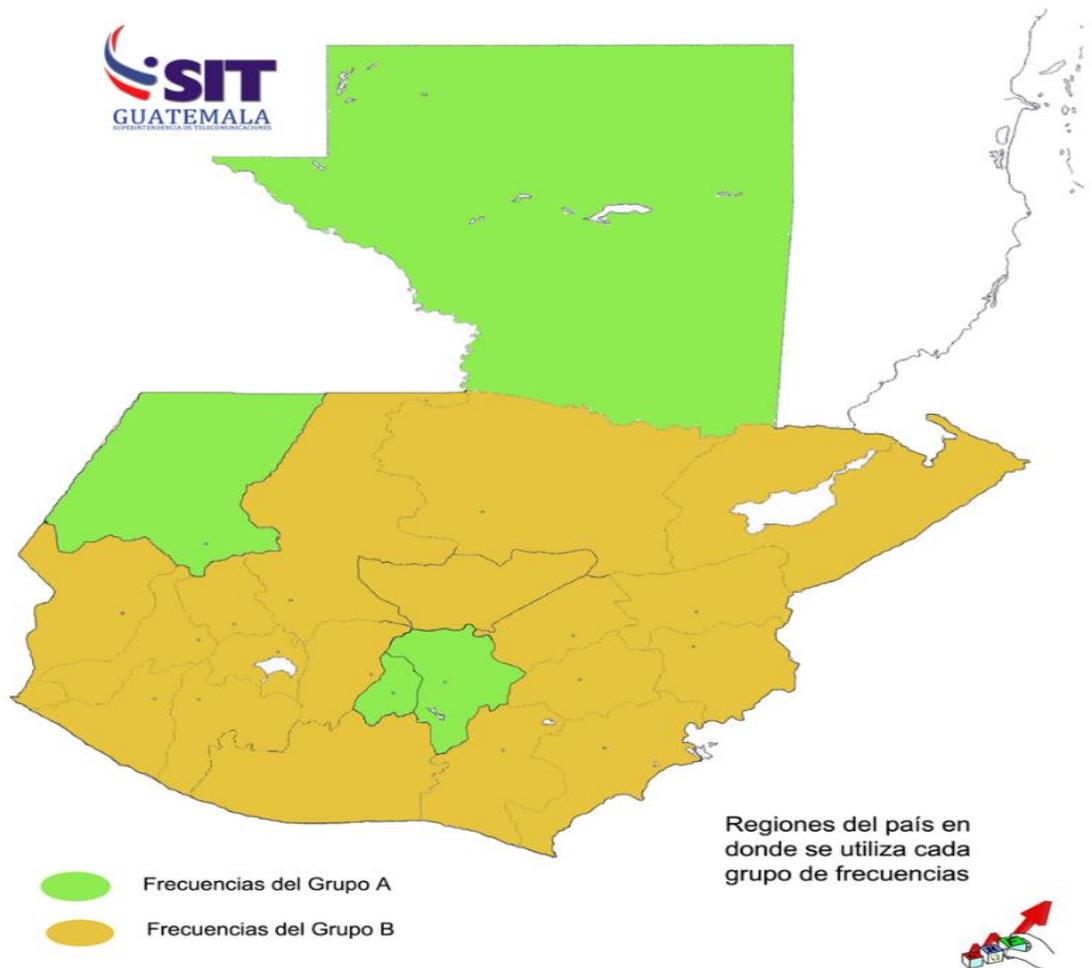
La SIT otorga derechos de explotación comercial de las radiofrecuencias en dos tipos de coberturas:

- Derechos otorgados en radiodifusión FM cobertura departamental
- Derechos otorgados en radiodifusión FM cobertura municipal

Las tablas 2 y 3 contienen la información sobre las comunidades y sus respectivas frecuencias adjudicadas.

Figura 1.

Plan de frecuencias FM



Nota. La figura muestra la división geográfica de los grupos de frecuencia en el país. SIT. (<https://sit.gob.gt/?s=plan+de+frecuencias+fm>). consultado el 19 de octubre de 2023, de dominio público.

Tabla 2.

Derechos otorgados en FM, cobertura y distribución por departamento

Depto.	Frecuencia Central (MHz)	Límite Inferior (MHz)	Límite Superior (MHz)	Depto.	Frecuencia Central (MHz)	Límite Inferior (MHz)	Límite Superior (MHz)
Alta Verapaz	88.7	88.6	88.8	Chimaltenango	89.1	89	89.2
	91.1	91	91.2		91.1	91	91.2
	93.9	93.8	94		93.9	93.8	94
	94.7	94.6	94.8		97.5	97.4	97.6
	95.9	95.8	96		98.3	98.2	98.4
	96.7	96.6	96.8		99.5	99.4	99.6
	97.5	97.4	97.6		100.3	100.2	100.4
	99.1	99	99.2		101.5	101.4	101.6
	100.7	100.6	100.8		102.7	102.6	102.8
	103.1	103	103.2		103.9	103.8	104
	103.9	103.8	104		106.7	106.6	106.8
	105.9	105.8	106		107.5	107.4	107.6
	106.7	106.6	106.8				
	107.5	107.4	107.6				
	107.9	107.8	108				
Baja Verapaz	89.9	89.8	90				
	91.5	91.4	91.6				
	93.1	93	93.2				
	94.3	94.2	94.4				
	98.3	98.2	98.4				
	100.3	100.2	100.4				
	101.9	101.8	102				
	104.3	104.2	104.4				
	107.1	107	107.2				
	107.5	107.4	107.6				

Continuación de la tabla 2.

Depto.	Frecuencia Central (MHz)	Límite Inferior (MHz)	Límite Superior (MHz)	Depto.	Frecuencia Central (MHz)	Límite Inferior (MHz)	Límite Superior (MHz)
Chiquimula	89.9	89.8	90	Escuintla	88.7	88.6	88.8
	91.1	91	91.2		89.5	89.4	89.6
	91.5	91.4	91.6		90.3	90.2	90.4
	92.3	92.2	92.4		90.7	90.6	90.8
	92.7	92.6	92.8		91.9	91.8	92
	93.9	93.8	94		93.1	93	93.2
	94.7	94.6	94.8		93.5	93.4	93.6
	95.5	95.4	95.6		94.3	94.2	94.4
	97.5	97.4	97.6		94.7	94.6	94.8
	97.9	97.8	98		96.3	96.2	96.4
	99.1	99	99.2		97.1	97	97.2
	99.5	99.4	99.6		98.7	98.6	98.8
	100.7	100.6	100.8		99.1	99	99.2
	103.9	103.8	104		99.9	99.8	100
	105.1	105	105.2		101.1	101	101.2
	106.7	106.6	106.8		101.9	101.8	102
	107.1	107	107.2		102.3	102.2	102.4
	107.5	107.4	107.6		103.1	103	103.2
	107.9	107.8	108		104.3	104.2	104.4
El Progreso	89.5	89.4	89.6	104.7	104.6	104.8	
	92.7	92.6	92.8	105.1	105	105.2	
	97.9	97.8	98	105.9	105.8	106	
	99.5	99.4	99.6	106.3	106.2	106.4	
	101.5	101.4	101.6	107.5	107.4	107.6	
	104.7	104.6	104.8	107.9	107.8	108	
	105.5	105.4	105.6				
	107.5	107.4	107.6				

Continuación de la tabla 2.

<i>Depto.</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Límite Inferior (MHz)</i>	<i>Límite Superior (MHz)</i>	<i>Depto.</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Límite Inferior (MHz)</i>	<i>Límite Superior (MHz)</i>
Guatemala	88.1	88	88.2	Huehuetenango	88.5	88.4	88.6
	88.5	88.4	88.6		88.9	88.8	89
	88.9	88.8	89		89.3	89.2	89.4
	89.3	89.2	89.4		90.1	90	90.2
	89.7	89.6	89.8		90.5	90.4	90.6
	90.1	90	90.2		90.9	90.8	91
	90.5	90.4	90.6		91.3	91.2	91.4
	90.9	90.8	91		91.7	91.6	91.8
	91.3	91.2	91.4		92.9	92.8	93
	91.7	91.6	91.8		93.7	93.6	93.8
	92.1	92	92.2		94.5	94.4	94.6
	92.5	92.4	92.6		96.1	96	96.2
	92.9	92.8	93		96.5	96.4	96.6
	93.3	93.2	93.4		96.9	96.8	97
	93.7	93.6	93.8		97.3	97.2	97.4
	94.1	94	94.2		97.7	97.6	97.8
	94.5	94.4	94.6		98.1	98	98.2
	94.9	94.8	95		98.9	98.8	99
	95.3	95.2	95.4		99.3	99.2	99.4
	95.7	95.6	95.8		99.7	99.6	99.8
	96.1	96	96.2		100.1	100	100.2
	96.5	96.4	96.6		100.5	100.4	100.6
	96.9	96.8	97		100.9	100.8	101
	97.3	97.2	97.4		101.3	101.2	101.4
97.7	97.6	97.8	101.7	101.6	101.8		
98.1	98	98.2	102.3	102.2	102.4		
98.5	98.4	98.6	102.9	102.8	103		
98.9	98.8	99	103.3	103.2	103.4		
99.3	99.2	99.4	104.1	104	104.2		
99.7	99.6	99.8	104.5	104.4	104.6		
100.1	100	100.2	104.9	104.8	105		
100.5	100.4	100.6	105.3	105.2	105.4		

Continuación de la tabla 2.

<i>Depto.</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Límite Inferior (MHz)</i>	<i>Límite Superior (MHz)</i>	<i>Depto.</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Límite Inferior (MHz)</i>	<i>Límite Superior (MHz)</i>
Guatemala	100.9	100.8	101	Huehuetenango	106.1	106	106.2
	101.3	101.2	101.4		106.5	106.4	106.6
	101.7	101.6	101.8		106.9	106.8	107
	102.1	102	102.2		107.3	107.2	107.4
	102.5	102.4	102.6	Izabal	89.5	89.4	89.6
	102.9	102.8	103		89.9	89.8	90
	103.3	103.2	103.4		91.5	91.4	91.6
	103.7	103.6	103.8		92.7	92.6	92.8
	104.1	104	104.2		93.5	93.4	93.6
	104.5	104.4	104.6		95.5	95.4	95.6
	104.9	104.8	105		97.1	97	97.2
	105.3	105.2	105.4		97.9	97.8	98
	105.7	105.6	105.8		100.3	100.2	100.4
	106.1	106	106.2		101.9	101.8	102
	106.5	106.4	106.6		104.3	104.2	104.4
	106.9	106.8	107		105.1	105	105.2
	107.3	107.2	107.4		107.1	107	107.2
	107.7	107.6	107.8		107.5	107.4	107.6
	Jalapa	88.7	88.6		88.8	107.9	107.8
90.7		90.6	90.8	Jutiapa	93.1	93	93.2
93.5		93.4	93.6		96.7	96.6	96.8
94.3		94.2	94.4		98.3	98.2	98.4
97.1		97	97.2		101.1	101	101.2
98.7		98.6	98.8		103.1	103	103.2
100.3		100.2	100.4		106.3	106.2	106.4
101.9		101.8	102		107.5	107.4	107.6
104.3		104.2	104.4				
107.5		107.4	107.6				

Continuación de la tabla 2.

Depto.	Frecuencia Central (MHz)	Límite Inferior (MHz)	Límite Superior (MHz)	Depto.	Frecuencia Central (MHz)	Límite Inferior (MHz)	Límite Superior (MHz)
Petén	88.1	88	88.2	Quetzaltenango	90.3	90.2	90.4
	88.5	88.4	88.6		90.7	90.6	90.8
	89.3	89.2	89.4		91.1	91	91.2
	90.1	90	90.2		91.5	91.4	91.6
	90.5	90.4	90.6		92.7	92.6	92.8
	90.9	90.8	91		93.9	93.8	94
	91.7	91.6	91.8		94.3	94.2	94.4
	92.5	92.4	92.6		94.7	94.6	94.8
	93.3	93.2	93.4		95.5	95.4	95.6
	94.5	94.4	94.6		96.3	96.2	96.4
	94.9	94.8	95		97.1	97	97.2
	95.3	95.2	95.4		98.3	98.2	98.4
	95.7	95.6	95.8		98.7	98.6	98.8
	96.1	96	96.2		99.1	99	99.2
	96.5	96.4	96.6		99.5	99.4	99.6
	96.9	96.8	97		99.9	99.8	100
	97.3	97.2	97.4		100.3	100.2	100.4
	98.1	98	98.2		101.1	101	101.2
	98.5	98.4	98.6		102.3	102.2	102.4
	98.9	98.8	99		104.7	104.6	104.8
99.3	99.2	99.4	105.5	105.4	105.6		
99.7	99.6	99.8	106.3	106.2	106.4		
100.1	100	100.2	106.7	106.6	106.8		
100.5	100.4	100.6	107.1	107	107.2		
100.9	100.8	101	107.5	107.4	107.6		
101.3	101.2	101.4	107.9	107.8	108		
101.7	101.6	101.8					
102.1	102	102.2					
102.9	102.8	103					
103.3	103.2	103.4					

Continuación de la tabla 2.

<i>Depto.</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Límite Inferior (MHz)</i>	<i>Límite Superior (MHz)</i>	<i>Depto.</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Límite Inferior (MHz)</i>	<i>Límite Superior (MHz)</i>	
Petén	103.7	103.6	103.8	San Marcos	88.7	88.6	88.8	
	104.5	104.4	104.6		89.9	89.8	90	
	104.9	104.8	105		91.9	91.8	92	
	105.3	105.2	105.4		92.3	92.2	92.4	
	105.7	105.6	105.8		93.1	93	93.2	
	106.5	106.4	106.6		93.5	93.4	93.6	
	106.9	106.8	107		96.7	96.6	96.8	
	107.3	107.2	107.4		100.7	100.6	100.8	
Quiché	88.3	88.2	88.4		101.5	101.4	101.6	
	89.5	89.4	89.6		101.9	101.8	102	
	93.5	93.4	93.6		103.5	103.4	103.6	
	95.5	95.4	95.6		103.9	103.8	104	
	96.3	96.2	96.4		104.3	104.2	104.4	
	98.7	98.6	98.8		107.5	107.4	107.6	
	99.9	99.8	100		Santa Rosa	89.1	89	89.2
	101.1	101	101.2			89.9	89.8	90
	103.5	103.4	103.6	91.1		91	91.2	
	106.3	106.2	106.4	91.5		91.4	91.6	
107.5	107.4	107.6	92.3	92.2		92.4		
Retalhuleu	88.3	88.2	88.4	92.7		92.6	92.8	
	91.3	91.2	91.4	93.9		93.8	94	
	93.1	93	93.2	95.1		95	95.2	
	96.7	96.6	96.8	95.9		95.8	96	
	102.7	102.6	102.8	97.5		97.4	97.6	
	103.1	103	103.2	99.5	99.4	99.6		
	105.9	105.8	106	100.7	100.6	100.8		
	107.5	107.4	107.6	101.5	101.4	101.6		
			103.9	103.8	104			
			105.5	105.4	105.6			
			106.7	106.6	106.8			
			107.5	107.4	107.6			

Continuación de la tabla 2.

<i>Depto.</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Límite Inferior (MHz)</i>	<i>Límite Superior (MHz)</i>	<i>Depto.</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Límite Inferior (MHz)</i>	<i>Límite Superior (MHz)</i>
Sacatepequez	88.1	88	88.2	Sacatepequez	100.5	100.4	100.6
	88.5	88.4	88.6		100.9	100.8	101
	88.9	88.8	89		101.3	101.2	101.4
	89.3	89.2	89.4		101.7	101.6	101.8
	89.7	89.6	89.8		102.1	102	102.2
	90.1	90	90.2		102.5	102.4	102.6
	90.5	90.4	90.6		102.9	102.8	103
	90.9	90.8	91		103.3	103.2	103.4
	91.3	91.2	91.4		103.7	103.6	103.8
	91.7	91.6	91.8		104.1	104	104.2
	92.1	92	92.2		104.5	104.4	104.6
	92.5	92.4	92.6		104.9	104.8	105
	92.9	92.8	93		105.3	105.2	105.4
	93.3	93.2	93.4		105.7	105.6	105.8
	93.7	93.6	93.8		106.1	106	106.2
	94.1	94	94.2		106.5	106.4	106.6
	94.5	94.4	94.6		106.9	106.8	107
	94.9	94.8	95		107.3	107.2	107.4
	95.3	95.2	95.4		107.7	107.6	107.8
	95.7	95.6	95.8		Suchitepequez	89.1	89
	96.1	96	96.2	89.9		89.8	90
	96.5	96.4	96.6	92.3		92.2	92.4
	96.9	96.8	97	95.1		95	95.2
	97.3	97.2	97.4	95.9		95.8	96
	97.7	97.6	97.8	97.5		97.4	97.6
	98.1	98	98.2	97.9		97.8	98
	98.5	98.4	98.6	100.7		100.6	100.8
	98.9	98.8	99	101.5		101.4	101.6
99.3	99.2	99.4	103.5	103.4		103.6	
99.7	99.6	99.8	103.9	103.8		104	
100.1	100	100.2	107.5	107.4		107.6	

Continuación de la tabla 2.

Depto.	Frecuencia Central (MHz)	Límite Inferior (MHz)	Límite Superior (MHz)	Depto.	Frecuencia Central (MHz)	Límite Inferior (MHz)	Límite Superior (MHz)
Totonicapán	92.3	92.2	92.4	Zacapa	88.3	88.2	88.4
	95.1	95	95.2		89.1	89	89.2
	95.9	95.8	96		90.3	90.2	90.4
	101.5	101.4	101.6		91.9	91.8	92
	102.7	102.6	102.8		95.1	95	95.2
	103.9	103.8	104		96.3	96.2	96.4
	105.9	105.8	106		96.7	96.6	96.8
	107.5	107.4	107.6		98.3	98.2	98.4
			99.9		99.8	100	
			101.1		101	101.2	
			102.3		102.2	102.4	
			106.2		106.2	106.2	
			107.5		107.4	107.6	

Nota. Tabla de distribución de frecuencias por departamento, se indica el límite inferior y superior de la banda de guarda para cada frecuencia. *SIT.* Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 3.

Derechos otorgados en radiodifusión FM, cobertura municipal

Depto.	Frecuencia Central (MHz)	Límite Inferior (MHz)	Límite Superior (MHz)	Municipio
Alta Verapaz	89.1	89	89.2	Rabinal
	92.3	92.2	92.4	Rabinal
	102.3	102.2	102.4	Purulhá
Chimaltenango	88.7	88.6	88.8	San Andrés Itzapa
	92.7	92.6	92.8	San Martín Jilotepeque
	95.1	95	95.2	Tecpán Guatemala
	97.1	97	97.2	Santa Apolonia

Continuación de la tabla 3.

<i>Depto.</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Límite Inferior (MHz)</i>	<i>Límite Superior (MHz)</i>	<i>Municipio</i>
Baja Verapaz	93.5	93.4	93.6	Rabinal
	95.1	95	95.2	Rabinal
	97.1	97	97.2	Purulhá
	102.7	102.6	102.8	Rabinal
				San Jerónimo
	105.1	105	105.2	Cubulco
San Jerónimo				
Chiquimula	89.5	89.4	89.6	San José La Arada
				Esquipulas
	95.9	95.8	96	Concepción las minas
				Jocotán
Escuintla	88.3	88.2	88.4	Escuintla
				Palín
				Guanagazapa
				San José
				Iztapa
	98.3	98.2	98.4	San Vicente de Pacaya
				La Democracia
	100.3	100.2	100.4	Siquinalá
				Masagua
				La Democracia
107.1	107	107.2	Palín	
			La Gomera	
			Iztapa	
Huehuetenango	94.9	94.8	95	San Vicente de Pacaya
				San Pedro Soloma
	105.7	105.6	105.8	La Democracia
				Santa Cruz Barillas
	107.7	107.6	107.8	Santa Eulalia
				La Democracia
Izabal	92.3	92.2	92.4	San Pedro Soloma
				Puerto Barrios
				El estor
101.5	101.4	101.6	Puerto Barrios	
			Puerto Barrios	

Continuación de la tabla 3.

<i>Depto.</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Límite Inferior (MHz)</i>	<i>Límite Superior (MHz)</i>	<i>Municipio</i>	
Jutiapa	88.3	88.2	88.4	Moyuta	
	91.9	91.8	92	Santa Catarina Mita	
	99.9	99.8	100	Asunción Mita	
Petén	88.9	88.8	89	San Luis	
				Sayaxché	
	89.7	89.6	89.8	La Libertad	
	97.7	97.6	97.8	Sayaxché	
	104.1	104	104.2	Poptún	
				Sayaxché	
	106.1	106	106.2	Dolores	Melchor de Mencos
La Libertad				San Benito	
Quetzaltenango	89.5	89.4	89.6	Cabricán	Coatepeque
				Cajolá	Salcajá
	105.1	105	105.2	Almolonga	San Mateo
				Cabricán	Zunil
				Colomba	
Quiché	90.3	90.2	90.4	Chichicastenango	
	104.7	104.6	104.8	Chichicastenango	
				Joyabaj	
	105.1	105	105.2	Chajul	Sacapulas
				Chiché	San Andrés Sacabajá
				Chichicastenango	San Antonio Ilotenango
				Chinique	San Bartolomé Jocotenango
				Cunén	San Juan Cotzal
				Ixcán	San Pedro Jocopilas
				Nebaj	Santa Cruz del Quiché
Patzité					
Retalhuleu	103.5	103.4	103.6	Champerico	
				Retalhuleu	

Continuación de la tabla 3.

<i>Depto.</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Límite Inferior (MHz)</i>	<i>Límite Superior (MHz)</i>	<i>Municipio</i>	
San Marcos	97.5	97.4	97.6	Comitancillo	Sibinal
				Concepción Tutuapa	Tacaná
				Esquipulas Palo Gordo	Tejutla
				San Antonio Sacatepéquez	
	98.7	98.6	98.8	Tejutla	
	105.9	105.8	106	El Tumbador Tacaná	
Santa Rosa	97.9	97.8	98	Chiquimulilla	
	102.7	102.6	102.8	Nueva Santa Rosa	Taxisco
				Santa María Ixhuitán	
Sololá	89.5	89.4	89.6	Panajachel	
				Santa Lucía Utatlán	
	94.7	94.6	94.8	Nahualá	
				Panajachel	
	99.1	99	99.2	Panajachel	
	107.1	107	107.2	Concepción	San Pablo la Laguna
				Panajachel	San Pedro la Laguna
				San Andrés Semetabaj	Santa Catarina Palopó
				San Antonio Palopó	Santa Clara la Laguna
				San José Chacayá	Santa Cruz la Laguna
				San Juan la Laguna	Santa Lucía Utatlán
San Lucas Tolimán				Santiago Atitlán	
San Marcos la Laguna	Sololá				
Totonicapán	89.1	89	89.2	Momostenango	
	97.9	97.8	98	Santa María Chiquimula	

Continuación de la tabla 3.

<i>Depto.</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Límite Inferior (MHz)</i>	<i>Límite Superior (MHz)</i>	<i>Municipio</i>
Zacapa	93.1	93	93.2	Gualán
	103.1	103	103.2	Gualán

Nota. Distribución de frecuencias por departamento y municipio. *S/T.* Elaboración propia, realizado con Excel.

1.2. Ejemplo de uso actual de radiofrecuencias de FM para cobertura nacional

En los sistemas de radio comercial FM, actualmente transmitiendo con tecnología analógica, para que la señal de una radioemisora tenga recepción en una región que abarque el país se requiere de una serie de estaciones repetidoras que han de transmitir con distinta frecuencia, como sucede con la radio que utiliza como frecuencia principal 96.9 MHz, emplea 18 distintas frecuencias en 28 repetidoras, situación que no sucede con un sistema de radio comercial digital como se verá en el desarrollo del presente trabajo, el anexo 1 muestra lo expresado.

2. MODULACIÓN DE SEÑALES

2.1. Modulaciones analógicas

En cuanto a, la radiodifusión tomó notoriedad en el mundo en los años 20 del siglo pasado. En Guatemala fue el 15 de septiembre de 1930 cuando surge la primera radioemisora, conocida por sus siglas como TGW y se le nombró Radio Nacional de Guatemala, transmitiendo en varias frecuencias de onda larga (153 kHz a 281 kHz) y onda corta (1,705 kHz a 30 MHz) utilizando tecnología de amplitud modulada AM. En el país la radio evoluciona y así en los años 60 aparecen las primeras estaciones que transmitirían en frecuencia modulada FM. (Aroche, 2022)

La emisión AM y FM son medios destinados a desaparecer, la tecnología que ha de utilizarse en un futuro próximo en las radios comerciales sonoras será con modulación digital, que presenta varias virtudes como por ejemplo la transmisión de una estación de radio para todo un país utilizando una misma frecuencia, en estaciones base y estaciones repetidoras.

En cuanto a, la modulación analógica es una tecnología que provoca la variación de un parámetro; amplitud, fase o frecuencia de una onda llamada portadora por la influencia de otra onda llamada moduladora, ocasionando un desplazamiento del rango de frecuencias de la portadora. El proceso de modulación analógica es básicamente una translación de frecuencias. (Brown, Glazier, 1978)

Como habrá de verse en el desarrollo del presente trabajo, existen técnicas de modulación analógicas y digitales, la analógica puede ser de onda continua o de impulsos, en este capítulo se hará un desarrollo de modulación de amplitud AM, modulación de frecuencia FM, dado que son las técnicas utilizadas actualmente, en Guatemala en la radio sonora comercial, además se revisarán los conceptos básicos de la técnica Modulación de Impulso Codificado MIC (PCM, *Pulse Code Modulation*), tecnología base para la conversión de las señales de audio analógico a señales digitales. (Castro, Mendieta, s.f)

2.1.1. Modulación de amplitud AM

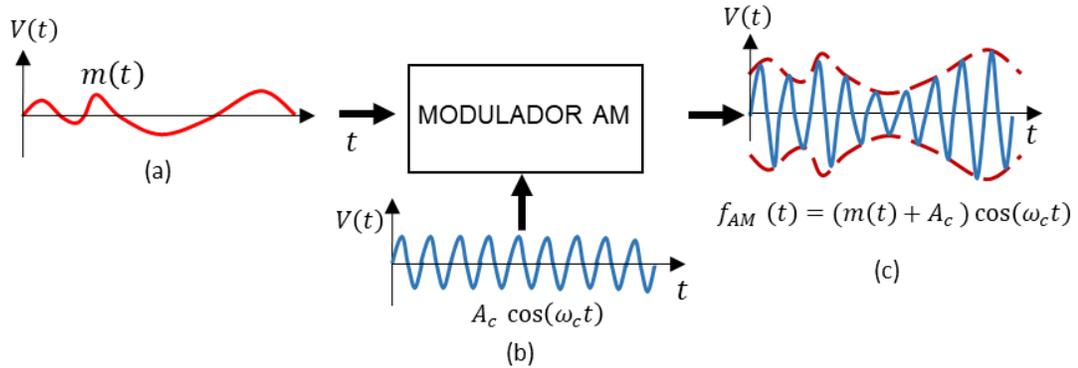
En cuanto a, modulación de amplitud (AM) el parámetro que varía es la amplitud máxima A_c de la onda portadora no modulada $A_c \cos(\omega_c t + \theta_c)$ en función de una onda de señal $m(t)$. (Brown, Glazier, 1978)

El fenómeno físico es representado gráficamente en la figura 2.

Para conocer la estructura de la onda modulada en amplitud a continuación se hace un análisis matemático, el que se inicia sumando a la amplitud máxima de la onda portadora la onda de señal u onda moduladora.

Figura 2.

Modulación de amplitud



Nota. Modulación de amplitud: (a) onda de señal $m(t)$, (b) onda portadora $A_c \cos(\omega_c t + \theta_c)$, (c) onda modulada en amplitud $f_{AM}(t) = (m(t) + A_c) \cos(\omega_c t)$. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

$$f_{AM}(t) = (m(t) + A_c) \cos(\omega_c t). \quad (1)$$

$$f_{AM}(t) = A_c \cos(\omega_c t) + m(t) \cos(\omega_c t) \quad (2)$$

Donde:

f_{AM} : Onda modulada en amplitud

$A_c \cos \omega_c t$: Onda portadora

$m(t)$: Señal moduladora.

En el siguiente desarrollo, por facilidad θ_c se considera igual a cero y A_c igual a 1.

Las expresiones (1) y (2) están definidas en el dominio del tiempo. La modulación AM efectúa un corrimiento de frecuencia, que es fácil ver cuando

la onda es tratada en el dominio de la frecuencia. Para aclarar se hace el siguiente análisis:

La translación de una señal $x(t)$ dada en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia $X(\omega)$ está definida por la transformada de Fourier de la siguiente manera:

$$F[x(t)] = X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

Entonces se determina la transformada de Fourier de la onda modulada en amplitud f_{AM} .

$$F[f_{AM}(t)] = F_{AM}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{AM}(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$F_{AM}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} (\cos(\omega_c t) + m(t) \cos(\omega_c t)) e^{-j\omega t} dt$$

$$F_{AM}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} (\cos(\omega_c t) e^{-j\omega t} dt + \int_{-\infty}^{\infty} m(t) \cos(\omega_c t)) e^{-j\omega t} dt$$

Por medio de la Relación de Euler, las propiedades de la función Delta de Dirac y las propiedades de la Transformada de Fourier mostradas en el anexo 1, se tiene:

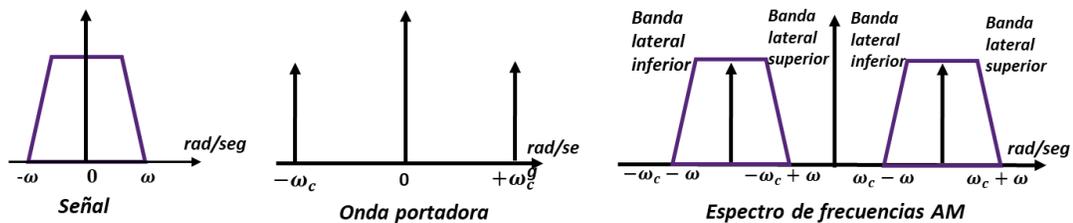
$$F_{AM}(\omega) = \pi (\delta(\omega - \omega_c) + \delta(\omega + \omega_c)) + M(\omega - \omega_c) + M(\omega + \omega_c) \quad (4)$$

El resultado de la expresión (4) se representa en la figura 2.2, muestra que en modulación AM el espectro de frecuencias de $m(t)$ es desplazado hacia arriba y hacia abajo de ω_c . La componente $M(\omega_c - \omega)$ recibe el nombre de banda lateral inferior (BLI) y la componente $M(\omega_c + \omega)$ el de banda lateral superior (BLS). (Tomasi 1996)

Cabe mencionar que las frecuencias negativas obtenidas con la transformada de Fourier físicamente no existen.

Figura 3.

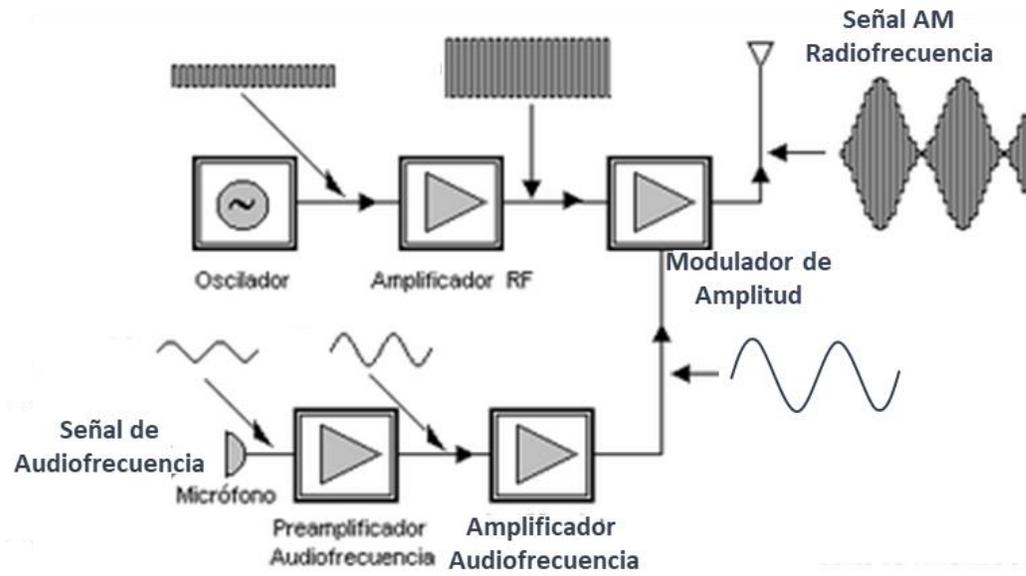
Espectro de frecuencias de la técnica Modulación de Amplitud AM



Nota. Espectro de frecuencias en el proceso de modulación de una señal AM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

Para tener una idea más amplia sobre el proceso de la técnica de modulación de amplitud AM se presenta un diagrama de bloques del modulador de amplitud AM.

Figura 4.
Modulador de amplitud



Nota. Diagrama esquemático a bloques de un modulador de amplitud, AM. *Radiotransmisor.* <https://es.wikipedia.org/wiki/Radiotransmisor>, consultado el 11 de octubre de 2023. De dominio público.

2.1.2. Modulador de frecuencia FM

En cuanto a, la técnica de modulación de frecuencia FM, la frecuencia instantánea de la onda portadora es afectada por el voltaje de la onda moduladora (Tomasi, 1996).

Para efectuar el estudio de este tipo de modulación nuevamente se considera la ecuación de la onda portadora:

$$A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) = A_c \cos \theta_c \quad (5)$$

Cuya frecuencia angular instantánea es dada por la variación en el tiempo de la fase instantánea. Para determinar la fase consideramos el siguiente procedimiento:

En la expresión (5), eligiendo adecuadamente el origen se puede hacer $\varphi_c = 0$ y $\omega_c t = \theta_c$.

Entonces la fase y frecuencia angular de la onda portadora será: $\omega_c t$ y ω_c respectivamente. Con lo que la frecuencia de la portadora modulada en frecuencia será:

$$\omega_{FM} = \omega_c + k m(t) \quad (6)$$

Donde $m(t)$ es la señal moduladora.

La nueva fase de la onda portadora modulada en frecuencia ω_{FM} se puede determinar de la forma siguiente:

$$\theta_{MF} = \int_0^t \omega_{FM} dt = \int_0^t (\omega_c + k m(t)) dt \quad (7)$$

$$\theta_{MF} = \omega_c t + \int_0^t k m(t) dt$$

Así la ecuación de la onda portadora modulada en frecuencia la representa la ecuación:

$$f_{FM} = A_c \cos \left(\omega_c t + \int_0^t k m(t) dt \right) \quad (8)$$

Si en la expresión (8) se sustituye $m(t)$ por la onda $A_m \cos \omega_m t$ se tendrá el resultado:

$$f_{FM} = A_c \cos \left(\omega_c t + \frac{kA_m}{\omega_m} \text{sen } \omega_m t \right) \quad (9)$$

$$f_{FM} = A_c \cos(\omega_c t + m \text{sen } \omega_m t)$$

$$f_{FM} = A_c \cos \omega_c t + A_c \cos (m \text{sen}(\omega_m t)) \quad (10)$$

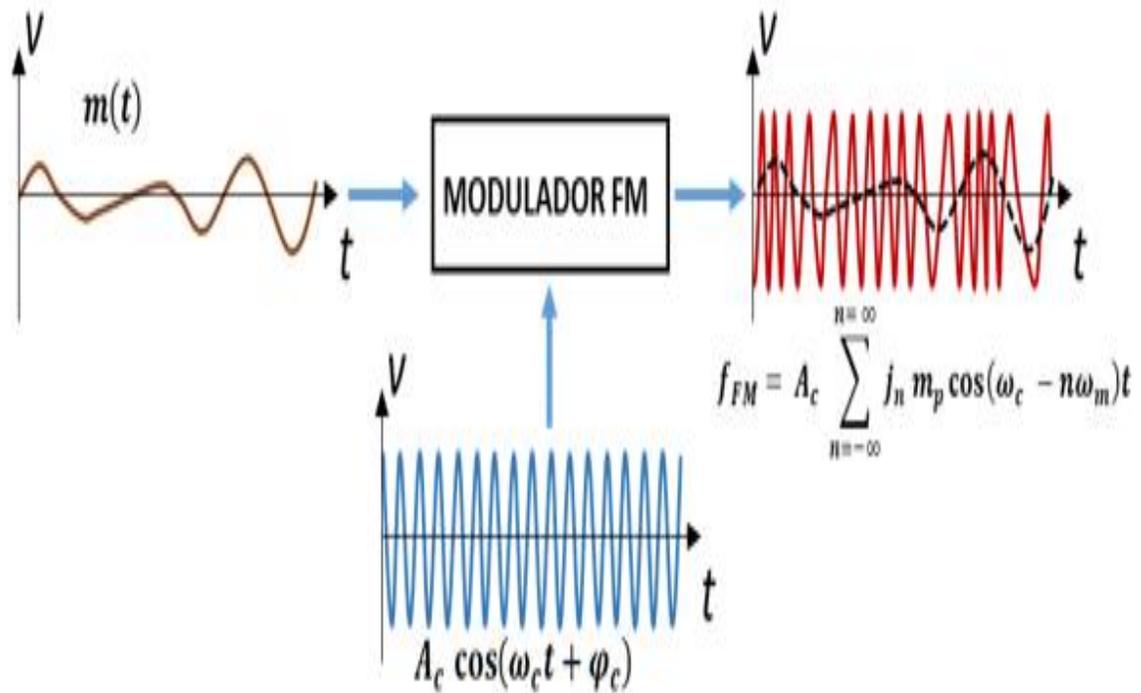
Un desarrollo matemático permite obtener:

$$f_{FM} = A_c \sum_{n=-\infty}^{\infty} j_n m \cos(\omega_c - n\omega_m)t \quad (11)$$

Donde $j_n m_p$ representan las funciones de BESSEL.

Figura 5.

Modulación de frecuencia FM

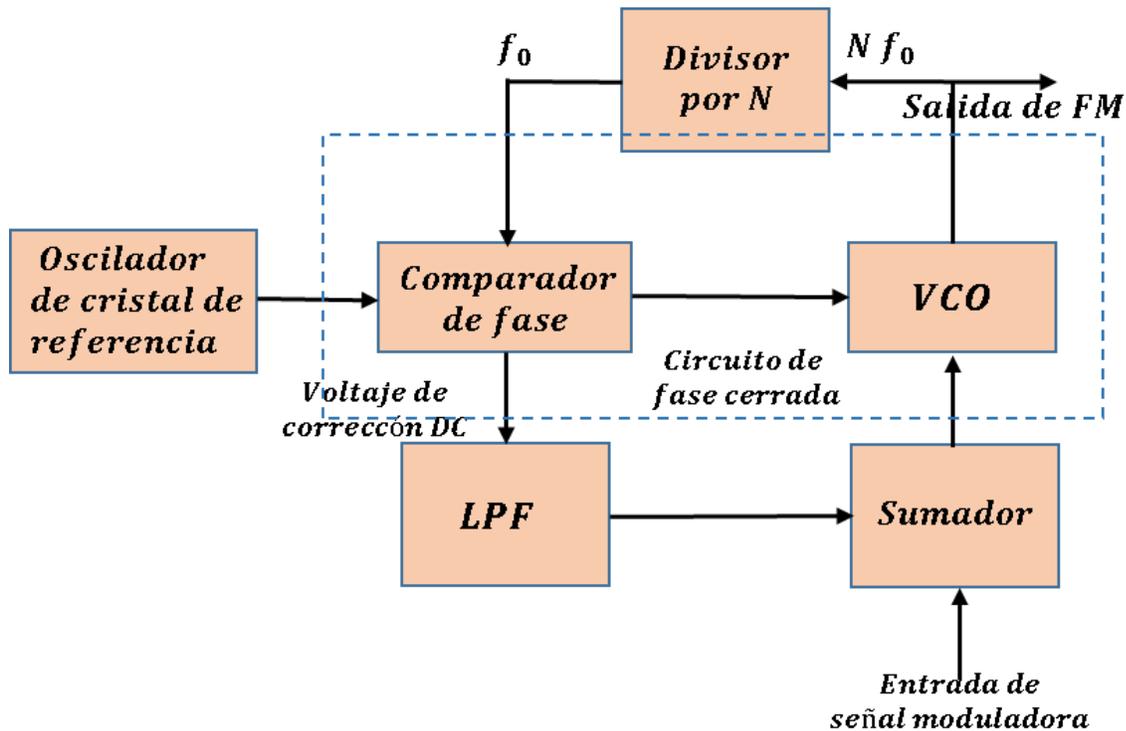


Nota. Proceso de modulación de una señal análoga en frecuencia, FM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

Puede observarse en la expresión (11) el corrimiento de ω_m arriba y abajo de ω_c solo que esta vez en una serie infinita.

Figura 6.

Sistema de modulación de frecuencia FM



Nota. Diagrama de bloques de un sistema de modulación en frecuencia, FM. *Transmisor FM*
Transmisor de Frecuencia Modulada Transmisor FM. <https://slidetodoc.com/transmisor-fm-transmisor-de-frecuencia-modulada-transmisor-fm/>, consultado el 11 de octubre de 2023, de dominio público.

Para conocer en detalle el fenómeno de este proceso de modulación, el desarrollo se encuentra en el anexo 2.

Una idea del fenómeno físico de la modulación de frecuencia FM se presenta en la figura 5.

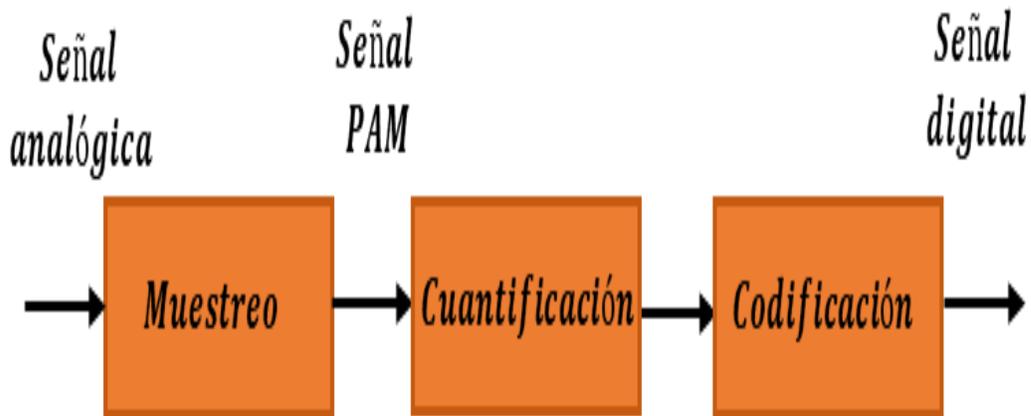
Para tener una visión más amplia de la técnica modulación de frecuencia FM, se presenta la figura 6, en ella se muestra un diagrama de bloques de un modulador de frecuencia FM con sus elementos básicos, se esquematiza un sistema Transmisor FM con tecnología de realimentación de un circuito de fase cerrada.

Otro tema importante de modulación de señales es OFDM, (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal) que actualmente se utiliza en los sistemas de televisión digital europeo. Televisión Digital Comercial Terrestre y también en el radio comercial digital terrestre DAB (Digital Audio Broadcasting). Este será tratado en el capítulo modulación digital del presente trabajo.

2.2. Modulación de impulso codificado PCM

En cuanto a, la modulación de impulso codificado, (PCM, *Pulse Code Modulation*) es una técnica que se utiliza para convertir una señal analógica en una serie de impulsos codificados digitalmente. La modulación PCM involucra tres procesos básicos: muestreo, cuantificación y codificación. La figura 7 es un diagrama de bloques de un sistema PCM. En seguida se hace una descripción del proceso iniciando con la etapa de muestreo (López, 1990).

Figura 7.
Sistema PCM



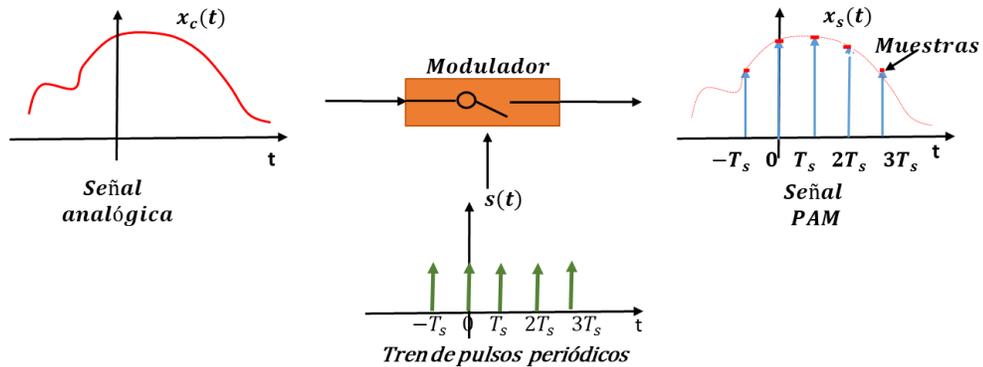
Nota. Diagrama de bloques de un sistema PCM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

2.2.1. Muestreo PAM

El significado eléctrico de muestreo es tomar muestras, durante instantes muy cortos y periódicos, valores de una señal. El muestreo es en realidad un fenómeno de modulación por amplitud de pulsos denotado por PAM, donde la señal moduladora será el mensaje y la onda portadora un tren de pulsos. La amplitud de la onda modulada PAM estará de acuerdo con el valor de voltaje que tenga en el instante de muestreo la señal de mensaje, este fenómeno se representa en la figura 8. (López, 1990)

Figura 8.

Muestreo PAM



Nota. Proceso de modulación en amplitud de una señal, PAM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

2.2.1.1. Teorema de muestreo

El teorema de muestreo establece que no es necesario transmitir todos los valores posibles de una señal para que pueda ser reconstruida en el extremo receptor, es suficiente transmitir muestras a intervalos regulares, lo que implica que existe una frecuencia, periodo o velocidad de muestreo. Considerando la frecuencia de muestreo, el teorema establece que no tomará un valor al azar, tendrá que cumplir con la demanda de valores que exige éste.

El teorema de muestreo uniforme en el tiempo afirma que si una señal función del tiempo $f(t)$ de banda limitada en frecuencia es muestreada, se puede recuperar por completo mediante las muestras, si el valor de los intervalos de tiempo entre muestras es menor que $\frac{1}{2}f_m$ segundos donde f_m representa la frecuencia de muestreo. Expresado matemáticamente: (Tomasi 1996)

$$T_s \leq \frac{1}{2f_m},$$

Donde:

T_s : Período de muestreo

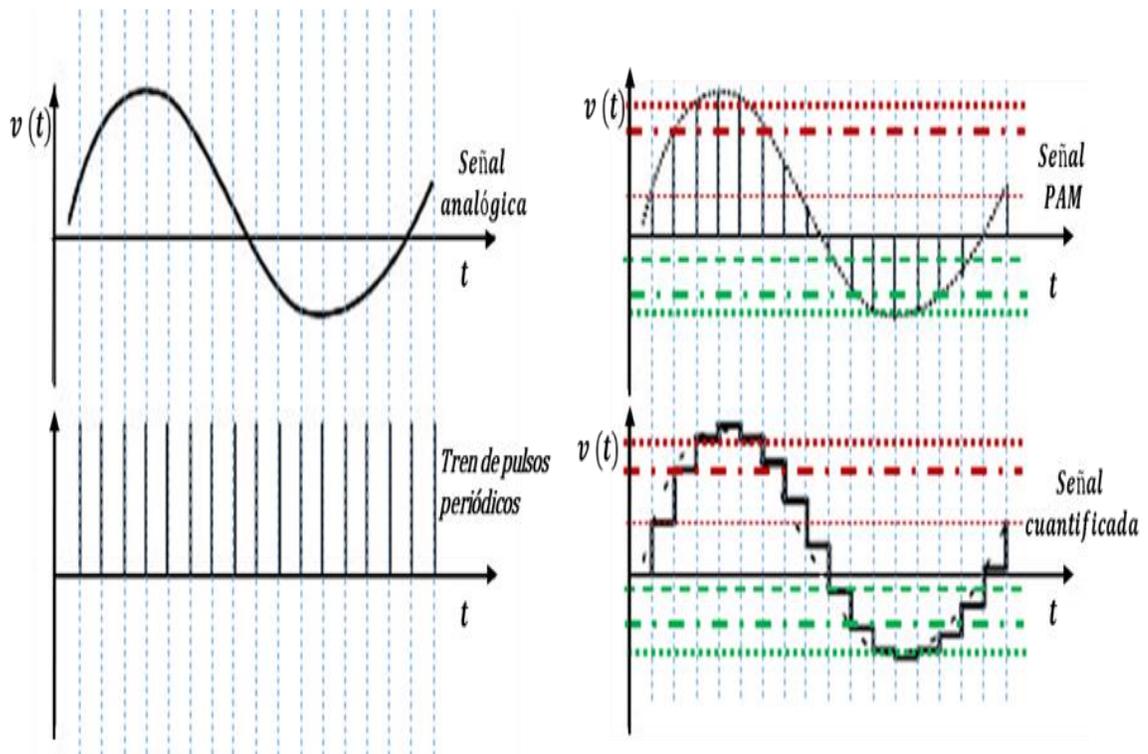
f_m : Frecuencia máxima de la señal a muestrear

2.2.1.2. Cuantificación

En el proceso de cuantificación la señal analógica es transformada en una señal digital, consiste en asignarle a cada muestra de la señal PAM el nivel más próximo dentro de una escala de valores discretos. En este tratamiento la magnitud de tensión de cada muestra se compara con una escala de valores predeterminados, denominados niveles cuánticos y cada muestra tomará el valor cuantizado más próximo mediante la operación de redondeo, así, por ejemplo, una muestra de un valor relativo de 5.19 tomará el valor cuantizado próximo 5, otra muestra con valor relativo 5.72 tomará el valor cuantizado 6. A estas muestras así ajustadas se les llama señales cuantizadas. El fenómeno de cuantificación puede observarse en la figura 9. (López 1990)

Figura 9.

Muestreo y cuantificación en PCM



Nota. Proceso de muestreo y cuantificación de una señal analógica a PCM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

El proceso de cuantificación implica una pérdida ineludible de información debido a que es imposible reconstruir la señal analógica original tomando como base la señal digital. La diferencia de valores entre la señal original y la cuantizada recibe el nombre de Ruido de Cuantificación, Error de Cuantificación o Distorsión de Cuantificación.

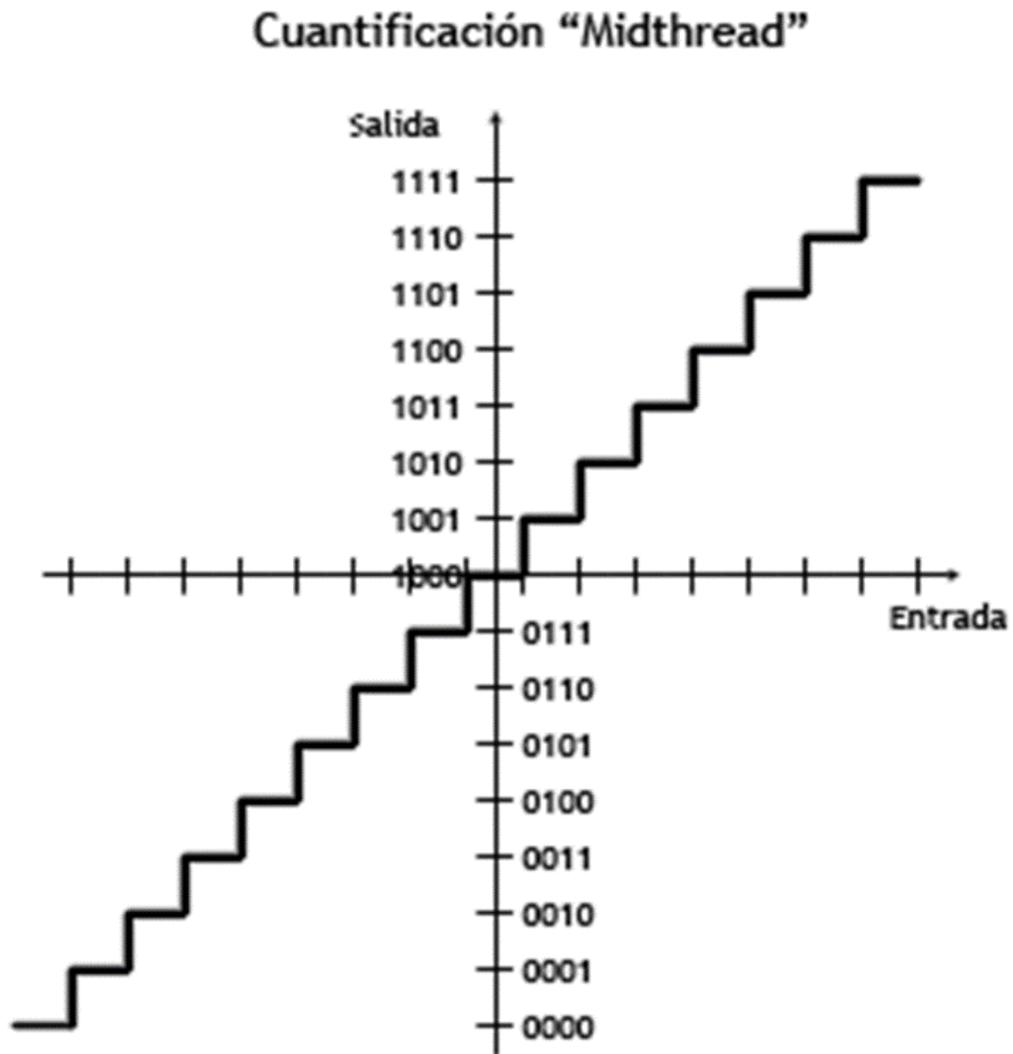
El desarrollo de muestreo unido al de cuantificación constituyen la base para la digitalización de las señales analógicas.

2.2.1.3. Codificación

Hasta ahora el tratamiento de la señal analógica ha sido su conversión a una con valores discretos de voltaje, que pueden ser 256 o 512. Para ser transmitida como una señal digital con 1s y 0s, visto de otra forma voltaje o no voltaje. La codificación en PCM en esencia es asignarle a cada muestra cuantizada un valor expresado en números binarios, por medio de circuitos conversores A/D. (Castro, Mendieta s.f)

Figura 10.

Codificación de una señal PCM



Nota. Codificación de una señal de 16 niveles. *Cuantificación (procesado de audio)* [https://es.wikipedia.org/wiki/Cuantificaci%C3%B3n_\(procesado_de_audio\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Cuantificaci%C3%B3n_(procesado_de_audio)), consultado el 16 de octubre de 2023, de dominio público.

En el sistema PCM clásico se utiliza para codificar 256 muestras $n+1=8$ bits por muestra, considerándose n igual a 7 bits para la magnitud y 1 para la polaridad habiendo en este caso 128 valores positivos y 128 negativos.

La figura 10 es una presentación de una cuantización de 16 niveles codificadas en 8 muestras positivas y 8 muestras negativas.

3. MULTIPLEXACIÓN DE SEÑALES

3.1. Definición de multiplexación de señales

La multiplexación de señales eléctricas es un proceso de empaquetamiento o agrupamiento para que varias puedan ser transmitidas por un mismo medio de propagación sin que sufran interferencia entre sí, de tal forma que en el extremo receptor las señales originales puedan ser recuperadas con toda la información (López 1990).

Existen dos formas básicas de multiplexación para señales de voz:

- Multiplexación por división de frecuencia FDM
- Multiplexación por división de tiempo TDM

3.2. Multiplexación por división de frecuencia, FDM

Con este método de multiplexación las señales de audiofrecuencia con ancho de banda de 0 a 15 kHz modulan varias frecuencias portadoras de distinto valor, trasladando cada señal a un rango diferente de frecuencia (Dau, Cantero, 2015).

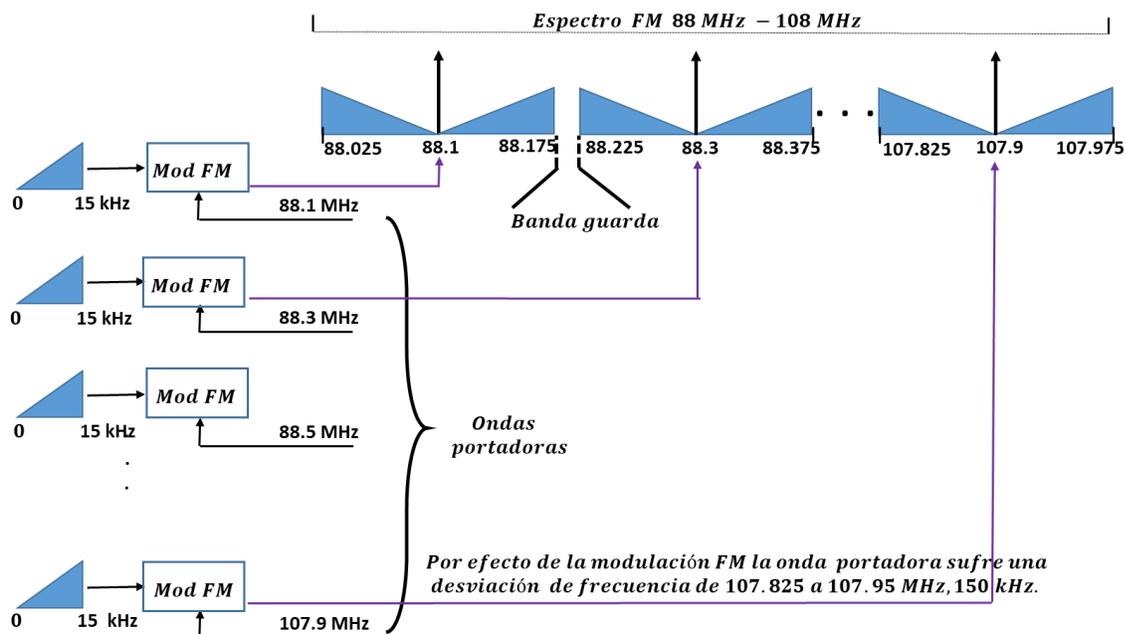
Si el valor de las frecuencias portadoras se elige suficientemente separado, los espectros de las señales moduladas no se traslaparán y así no se interferirá la una con la otra. En esta técnica, el ancho de banda del medio

de transmisión es compartido por varias comunicaciones, ejemplo claro es el de las estaciones de radio comercial, FM, que operan en el espectro 88 a 108 MHz La figura 11 presenta gráficamente este fenómeno (Couch 1997).

Así, la portadora de 88.1 MHz es modulada por la señal de audio de 0 a 15 kHz, la onda modulada ocupa el ancho de banda de 88.025 a 88.175 MHz, la portadora de 88.3 MHz modulada toma el ancho de banda de 88.225 a 88.375 MHz, la de 88.5 MHz se ubicará en 88.425 a 88.575 MHz, entre otros. Se puede observar que entre bandas de canales sucesivos existe una distancia de 50 kHz llamada Banda Guarda o Banda de Protección para evitar la interferencia entre distintas estaciones de radio.

Figura 11.

Multiplexación por división de frecuencia, FDM



Nota. Proceso de multiplexación por división de frecuencia, FDM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

3.3. Multiplexación por división de tiempo, TDM

En cuanto a, este tipo de multiplexación es el tiempo el que se comparte entre varios canales de manera ordenada, (Couch 1997).

Existiendo básicamente dos tipos:

- Multiplexación en el tiempo de señales analógicas
- Multiplexación en el tiempo de señales digitales.

3.3.1. TDM en señales analógicas

La técnica de empaquetamiento en el tiempo de señales analógicas ocurre cuando muestras de señales analógicas de distintos canales son tomadas con tiempos idénticos y luego transmitidas por un mismo medio, esto lo muestra la figura 12.

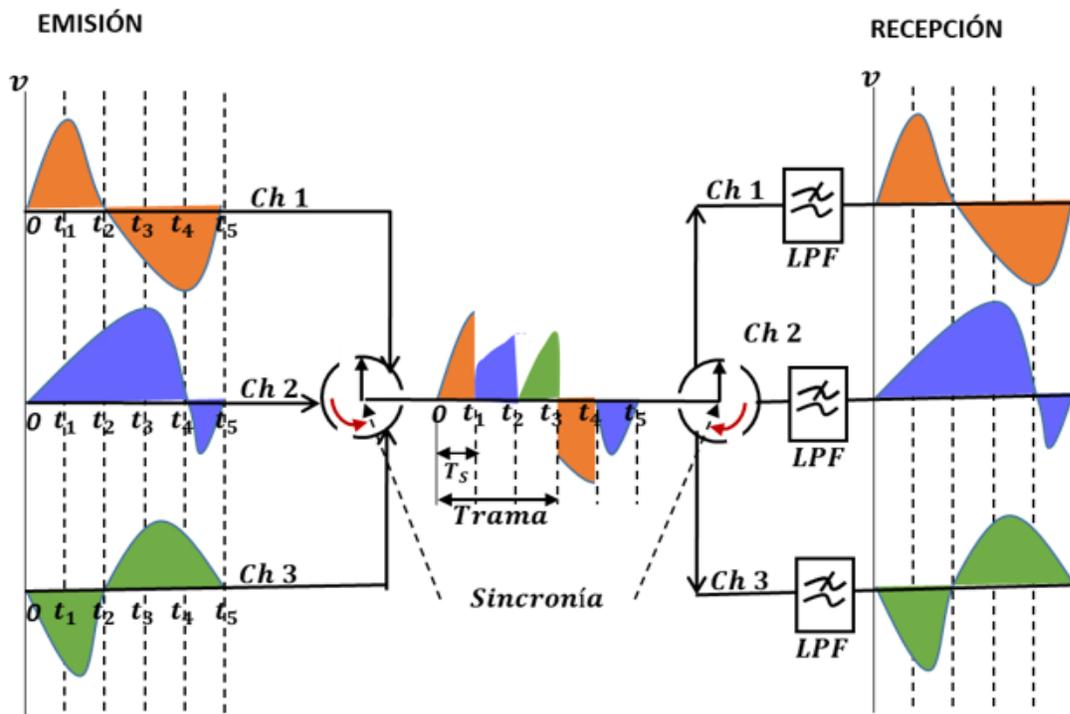
En cuanto a, el proceso de muestreo que convierte una señal analógica, de banda limitada, en una señal muestreada, requiere que la frecuencia muestreo sea mayor o igual a dos veces la frecuencia máxima de la señal para obtener en el lado de recepción la información de interés como lo establece el Teorema de Muestreo visto en capítulo 2 (López 1990).

En la multiplexación TDM de señales analógicas, llamada también TDM-PAM, el tiempo que queda libre entre trenes de muestras de un canal, es aprovechado para intercalar muestras correspondientes a señales de otros canales (Tomasi 1996).

Este sistema es representado en la figura 12, donde se muestra el multiplexado de tres canales. El tiempo empleado en la transmisión de una sola muestra de cada canal que conforman un sistema, en este ejemplo tres, recibe el nombre de trama y el tiempo que ocupa cada muestra, el de ranura de tiempo T_s .

Figura 12.

Multiplexación TDM-PAM



Nota. Representación del funcionamiento de un muestreo y multiplexación en el emisor y receptor de un sistema TDM-PAM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

Como lo representa la figura, la recuperación de la señal de interés en TDM-PAM se logra instalando filtros de baja frecuencia, paso bajo, en cada

canal y para que la señal llegue a su respectivo receptor es necesario que exista una señal de sincronía entre los relojes de emisión y recepción.

3.3.2. TDM en señales digitales

En cuanto a, la necesidad de enviar señales digitales de origen y fin distintos a través de un mismo canal, crean la técnica de multiplexación digital cuyo pago es el incremento del ancho de banda del medio de transmisión, existen básicamente dos tipos de multiplexación digital que en esencia son sistemas de multiplexación TDM, múltiplex por división de tiempo, este tema es importante dado que en los sistemas radio DAB, *Digital Audio Broadcasting*, es de uso obligatorio considerando que por medio de una sola y misma frecuencia se propaga la señal a través del espacio de al menos seis radiodifusoras que transmiten distinta información (Dau, Cantero, 2015).

3.3.3. Tipos de multiplexación digital

Existen dos tipos de multiplexación digital, estos son:

- Multiplexación bit por bit
- Multiplexación por entrelazado de palabras

3.3.3.1. Multiplexación bit por bit

En cuanto a, esta forma de multiplexación distintos flujos de datos provenientes de varios orígenes se combinan e intercalan, ordenada y sincrónicamente se intercalan bit por bit, para ser transmitidos por un solo medio. La figura 13 ilustra este procedimiento. Tres canales A, B y C

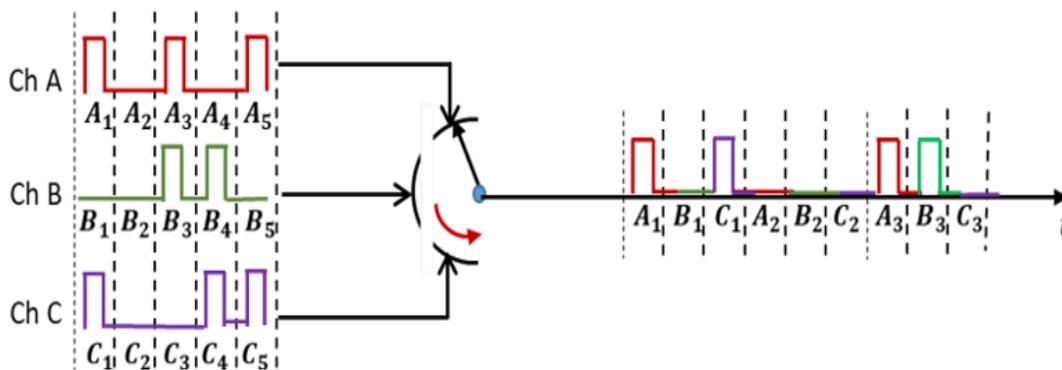
identificados con distintos colores son empaquetados y enviados por un mismo medio (López, 1990).

3.3.3.2. Multiplexación por entrelazado de palabra

En cuanto a, la multiplexación digital por entrelazado de palabras se intercala no uno sino una serie de bits por canal, lo que hace más complicada que la anterior pues necesita de un almacenamiento previo de cada señal, la llave giratoria del multiplexor tiene que detenerse en los distintos canales el tiempo que dure la transferencia del grupo de dígitos. La figura 14 representa lo descrito (López, 1990).

Figura 13.

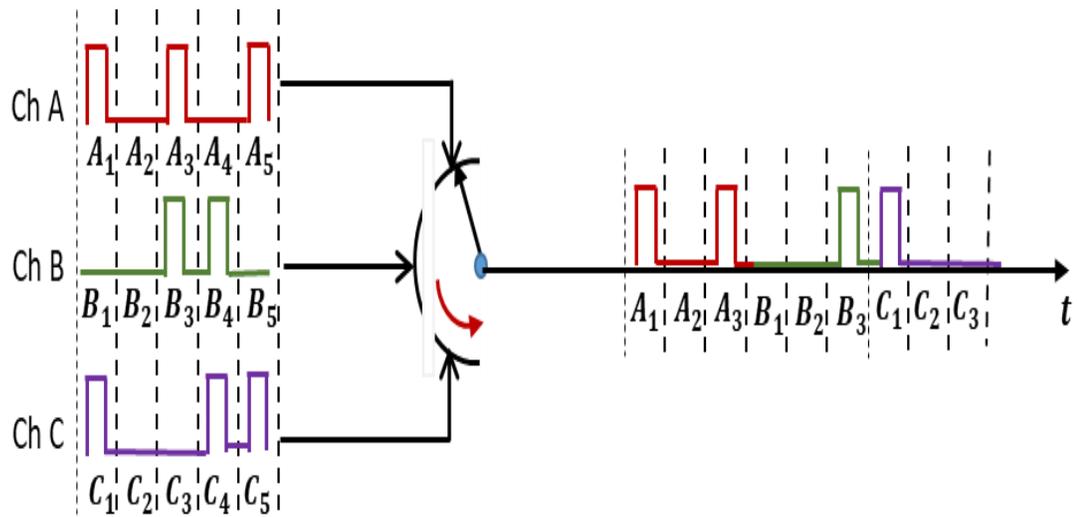
Multiplexación digital bit por bit



Nota. Representación gráfica del procedimiento de la multiplexación digital bit por bit. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

Figura 14.

Multiplexación digital por entrelazado de palabra



Nota. Representación gráfica del proceso de la multiplexación digital por entrelazado de palabra.
Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

4. MODULACIÓN DIGITAL

4.1. Definición de modulación digital

Modulación digital es un proceso en el que una señal digital binaria de “1s” o “0s” se convierte en analógica portando la información en la variación de solo amplitud, fase, frecuencia, o amplitud y fase al mismo tiempo. Existen distintas técnicas por ejemplo la ASK, modulación por variación de amplitud, FSK, modulación por variación de frecuencia, la información va contenida en las variaciones de amplitud o de frecuencia de la onda portadora, respectivamente (Sánchez, s.f.).

En el presente trabajo se enfocan dos formas dado que éstas son utilizadas en la radio difusión comercial sonora digital, DAB.

- PSK (*Phase shift keying*) Codificación por cambio de fase
- QAM (*Quadrature amplitude modulation*) En este caso se cambia la amplitud y fase de la portadora.

Otro tipo de modulación digital a la cual se hará referencia principal es la técnica de modulación multiportadora OFDM, (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), utilizada en los sistemas de *Radio Digital Broadcasting*.

4.2. Modulación PSK

La modulación digital por desplazamiento de fase se generaliza nombrándola MPSK en donde M representa el número de cambios de fase que sufrirá la portadora, matemáticamente puede determinarse el valor de M de la siguiente manera:(Luque & Clavijo,1995)

$$M = 2^k \quad (12)$$

Donde:

k : representa el número de bits utilizados en la modulación

M : número de posibles variaciones de fase.

Dependiendo de las necesidades que se tengan, puede disponerse de varias técnicas así: BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-PSK. En este trabajo, como ejemplo, se hace referencia a la modulación PSK y QAM de ocho fases y Modulación por desplazamiento de fase diferencial DBPSK.

4.2.1. Modulador 8-PSK

En un modulador digital PSK (*Phase shift keying*), Codificación por Cambio de Fase de ocho fases, la amplitud de la portadora analógica permanece invariable, no así la fase donde existen hasta ocho variaciones provocadas por k bits (Tomasi, 1996).

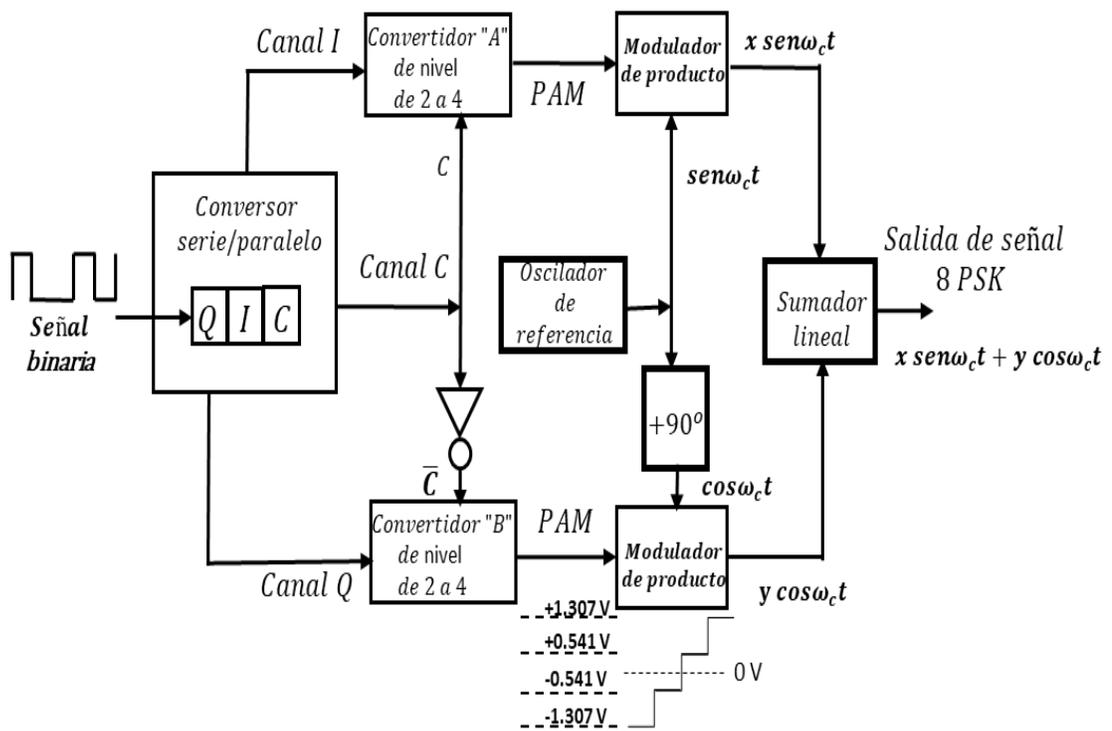
Para conocer la cantidad de bits requeridos en esta modulación se recurre a la ecuación (12), la que al resolverse para K se determina que el valor es 3.

Un circuito utilizado en modulación 8-PSK se representa en la figura 15. Seguidamente se hace una breve descripción de funcionamiento.

Al modulador llega un tren de pulsos binarios en forma serial, éste ingresa a un circuito QIC, conversor serie a paralelo donde se forman grupos de tres bits, tribits, de manera paralela, estos son enrutados a dos circuitos convertidores de nivel identificados en el diagrama como convertidor A o B de nivel 2 a 4 por medio de las conexiones llamadas canales Q, I y C.

Figura 15.

Modulador 8-PSK



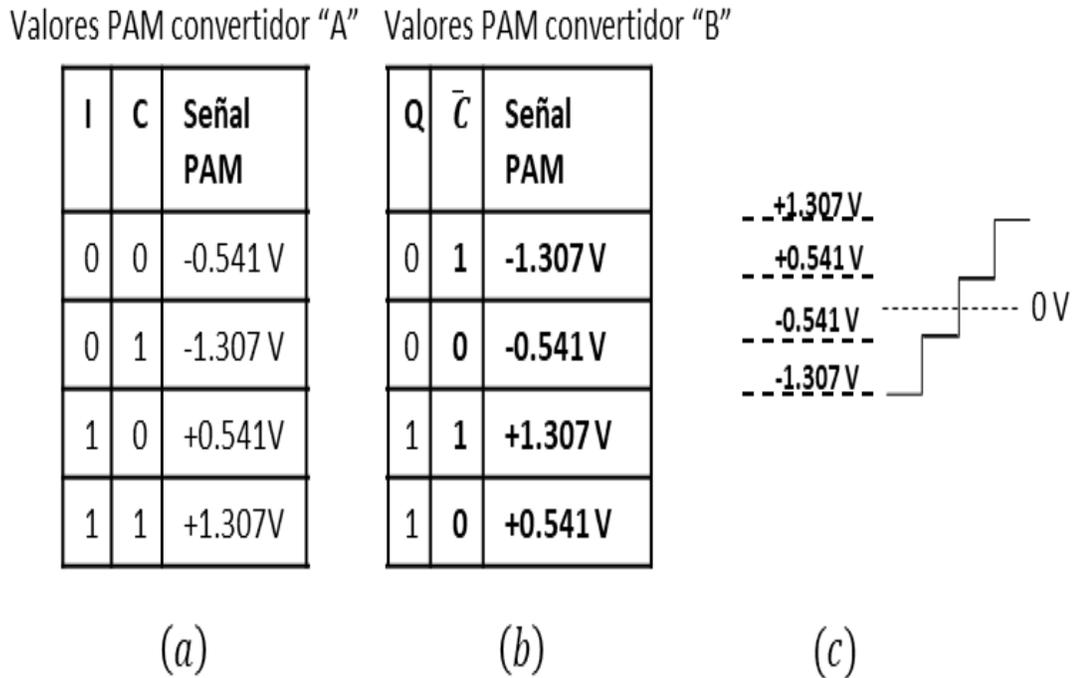
Nota. Diagrama de bloques de un modulador 8-PSK. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

Al convertidor de nivel A llegan los bits I y C, éste produce una señal PAM de cuatro niveles, al convertidor B ingresan los bits Q y \bar{C} que también son convertidos a una señal PAM de 4 niveles. Cada señal de voltaje PAM producida tendrá un valor y polaridad correspondiente contenidas en la figura 16, funcionando de acuerdo con los bits, así, el bit Q o el I determina la polaridad, 1 lógico = +V, 0 lógico = -V y el bit C o \bar{C} la magnitud, 1 lógico = 1.307, 0 lógico = 0.542, con el concurso de valores de voltaje y dos polaridades distintas se obtienen cuatro estados diferentes.

En los moduladores de producto, una señal PAM modula la onda portadora que está en fase con el oscilador de referencia, $\text{sen } \omega_c t$, y la otra modula que está fuera de fase 90° , $\text{cos } \omega_c t$, generando las ondas $x \text{ sen } \omega_c t$, $y \text{ cos } \omega_c t$, las que al ser sumadas forman la señal 8-PSK, $x \text{ sen } \omega_c t + y \text{ cos } \omega_c t$.

Figura 16.

Valores de salida en modulación 8-PSK



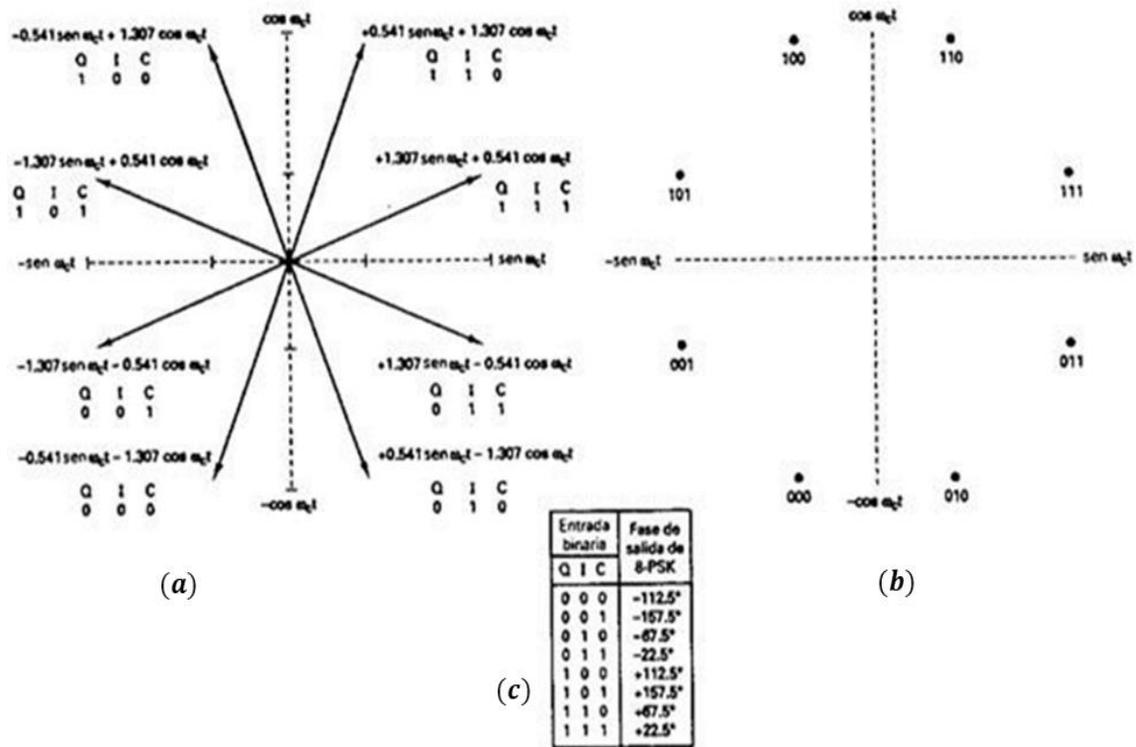
Nota. (a) Valores de voltaje de salida del convertidor A; (b) Valores de voltaje de salida del convertidor B para distintos estados de los canales Q, I y C; (c) Niveles PAM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

En la modulación 8-PSK se presenta una separación angular de 45° entre dos fases adyacentes resultado de dividir 360° entre 8, como lo ilustra la figura 17 parte (a) diagrama de fasores y la figura 18 muestra la relación de fase de cada símbolo 8-PSK, $x \text{ sen}\omega_c t + y \text{ cos}\omega_c t$, como producto de cada tribit binario que ingresa al modulador.

Es de notar que en el código tribit, entre dos fases adyacentes, solo hay un cambio en un bit, esta característica lo define como un código Gray.

Figura 17.

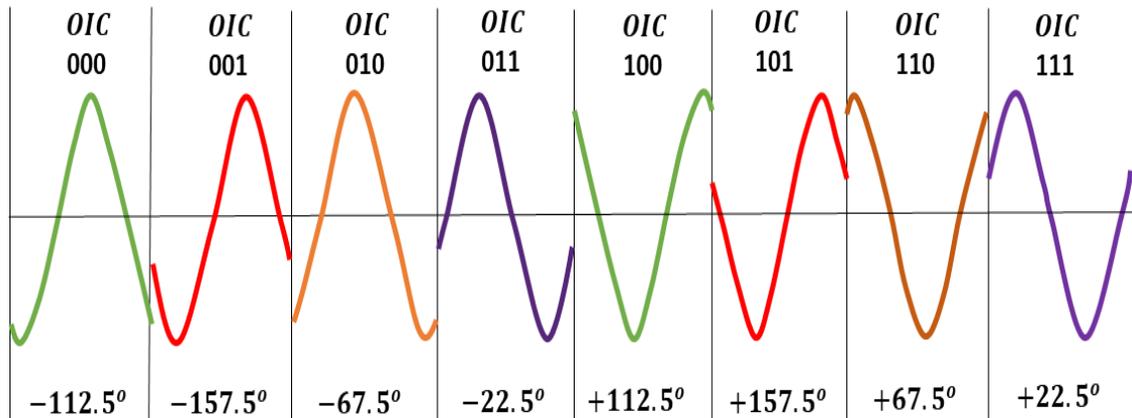
Diagrama de fasores en modulación 8-PSK



Nota. (a) Diagrama de fasores; (b) Diagrama de constelación; (c) Tabla de verdad de los distintos estados tribit QIC. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

Figura 18.

Fases en modulación 8-PSK



Nota. Relación de fases de símbolos de salida por tribit de entrada en un modulador 8-PSK. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

A continuación, se desarrolla un ejemplo para determinar la fase de salida del símbolo 8-PSK en función del tribit de entrada Q I C = (110).

- Ejemplo 1.
 - Tribit de entrada (Q I C) = (1 1 0)
 - Salida de los convertidores de 2 a 4
 - No.1. bits de entrada (I C) = (1 0), PAM = + 0.541V
 - No.2. bits de entrada (Q \bar{C}) = (1 1), PAM = + 1.307V
 - Salida de los moduladores de producto

No. 1. $0.541 \operatorname{sen} \omega_c t$

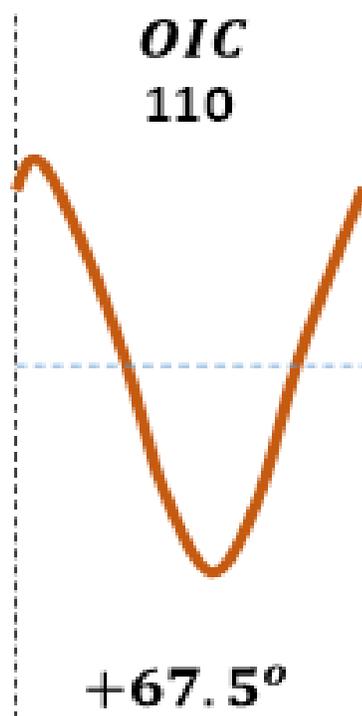
No. 2. $1.307 \operatorname{cos} \omega_c t$

Salida del sumador lineal: $0.541 \operatorname{sen} \omega_c t + 1.307 \operatorname{cos} \omega_c t =$

$1.41 \operatorname{sen}(\omega_c t + 67.5^\circ)$, expresión matemática que corresponde al símbolo de la figura 19.

Figura 19.

Resultado de ejemplo 4.1



Nota. Símbolo producido por el modulador 8-PSK para el tribit de entrada 110. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

4.2.2. Demodulador 8-PSK

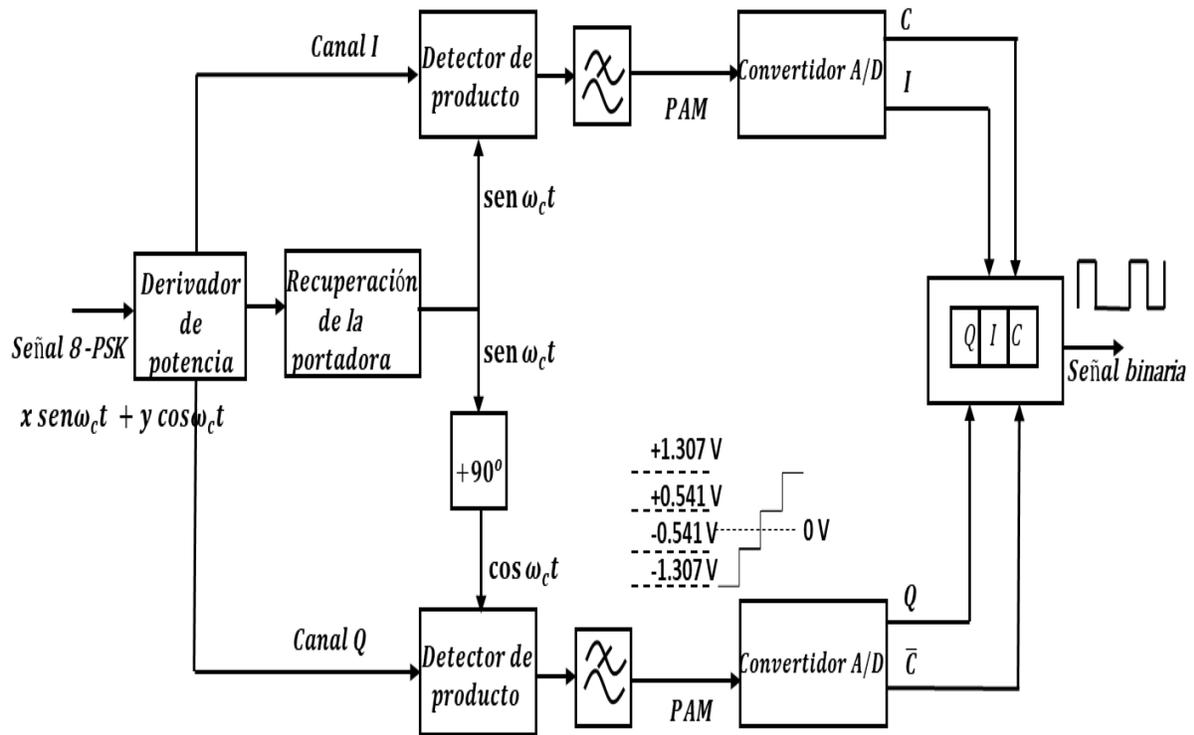
La figura 20 es un diagrama de bloques que representa en bloques un dispositivo demodulador 8-PSK.

A continuación, se hace una breve descripción del proceso que sigue la señal analógica 8-PSK hasta convertirse en un flujo de dígitos binarios, ésta ingresa a un circuito denominado derivador de potencia donde es separada en tres ramas nombradas: canal I, canal Q y de recuperación de portadora, denominada así pues por medio del circuito se obtiene el voltaje $sen\omega_c t$, la que en una de sus ramas pasa por un módulo que la desfasa 90° produciendo la onda $cos\omega_c t$ (Tomasi, 1996).

Las señales del canal I y Q se mezcla cada uno con la onda de la portadora recuperada en su respectivo detector de producto que entregan, el ubicado en la parte superior la señal $(x sen\omega_c t + y cos\omega_c t)(sen\omega_c t)$ y el ubicado en la parte inferior $(x sen\omega_c t + y cos\omega_c t)(cos\omega_c t)$, de estas señales los filtros paso bajas únicamente permiten el paso de corriente continua identificadas como señal PAM que en los convertidores analógico a digital son transformados en dígitos binarios de acuerdo a los valores mostrados en la figura 20. Para conocer la obtención del flujo digital a continuación se hace el desarrollo de un ejemplo de aclaración.

Figura 20.

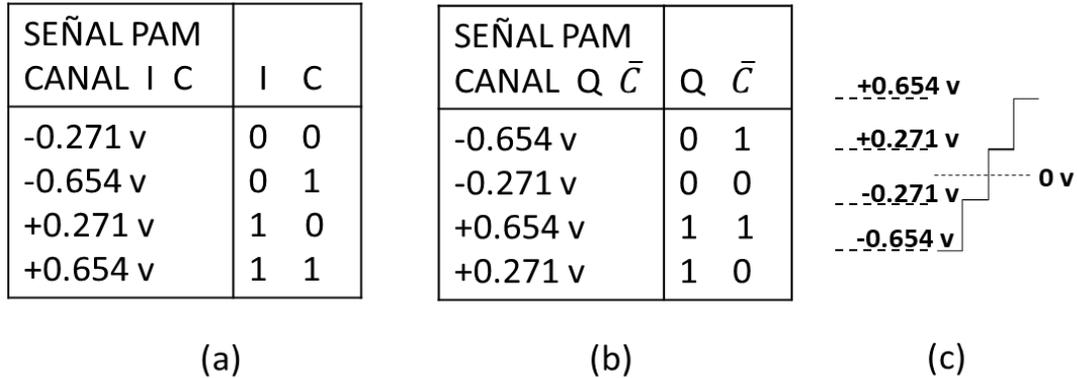
Demodulador 8-PSK



Nota. Diagrama de bloques de un demodulador 8-PSK, Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

Figura 21.

Valores de salida en un demodulador 8-PSK



Nota. (a) Salida del convertidor A/D, canales I-C; (b) Salida del convertidos A/D, canales Q- \bar{C} ; (c) niveles PAM, Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

Supongamos que se transmite en el modulador el tribit (010), a la salida se tendrá el símbolo $-1.307\cos\omega_c t + 0.541\sen\omega_c t$, señal 8PSK = f_{8PSK} .

En el extremo de recepción la señal f_{8PSK} al entrar al demodulador se divide en tres ramas: a) rama canal I, b) rama recuperación de portadora y c) rama canal Q. En el siguiente desarrollo se hace un análisis de lo que ocurre en el demodulador 8-PSK.

A la salida del detector de producto alimentados por los canales I y recuperación de portadora se tiene el producto = $f_{8PSK} * \sen\omega_c t = (-1.307\cos\omega_c t + 0.541\sen\omega_c t)(\sen\omega_c t)$.

$$= (-1.307\cos\omega_c t * \sen\omega_c t + 0.541\sen^2\omega_c t)$$

$$\begin{aligned}
&= -1.307 \left(\frac{\text{sen}(\omega_c t + \omega_c t)}{2} + \frac{\text{sen}(\omega_c t - \omega_c t)}{2} \right) \\
&\quad + 0.541 \frac{1 - \cos 2\omega_c t}{2} \\
&= \frac{-1.307}{2} \text{sen} 2\omega_c t - \frac{1.307}{2} \text{sen} 0 + \frac{0.541}{2} - \frac{0.541}{2} \cos 2\omega_c t \\
&= (a) \quad - \quad 0 \quad + \quad (b) \quad - \quad (c)
\end{aligned}$$

Las señales (a) y (c) son rechazadas por el filtro paso bajas, pero permite el de la señal (b) = 0.271 voltios, valor que de acuerdo con la tabla de la figura 21 corresponde al dicit IC = 10.

A la salida del detector de producto alimentados por los canales Q y recuperación de portadora se tiene el producto = $f_{8PSK} * \cos \omega_c t = (-1.307 \cos \omega_c t + 0.541 \text{sen} \omega_c t) (\cos \omega_c t) = (-1.307 \cos^2 \omega_c t + 0.541 \text{sen} \omega_c t * \cos \omega_c t)$

$$\begin{aligned}
&= -1.307 \frac{1 + \cos 2\omega_c t}{2} + 0.541 \left(\frac{\text{sen}(\omega_c t + \omega_c t)}{2} + \frac{\text{sen}(\omega_c t - \omega_c t)}{2} \right) \\
&= \frac{-1.307}{2} - \frac{-1.307}{2} \cos 2\omega_c t + \frac{0.541}{2} \cos 2\omega_c t + \frac{0.541}{2} \text{sen} 0 \\
&= (a) \quad + \quad (b) \quad + \quad (c) \quad + \quad 0
\end{aligned}$$

Las señales (b) y (c) son rechazadas por el filtro paso bajo, pero permite el paso de la señal (a) = -0.654 voltios, valor que de acuerdo con la tabla de la figura 21 corresponde al dicit $Q\bar{C} = 01$ (Luque, Clavijo, 1995).

El resultado indica que al conversor paralelo serie llega el tribit QIC = 010

4.3. Modulación de amplitud en cuadratura QAM

La técnica de modulación de amplitud en cuadratura MQAM es otro tipo de modulación digital M-aria en la que la información está contenida en las variaciones de fase y de amplitud que pueda sufrir la portadora. También sigue la relación que para grupos de k bits se puede tener M distintos símbolos QAM (Couch, 1997).

4.3.1. Modulador 8-QAM

El modulador 8QAM es representado en la figura 22. Es idéntico al modulador 8-PSK, la diferencia está en que éste no requiere del circuito inversor de la señal del canal C que enlaza con el convertidor de nivel B. Construye símbolos cuando la portadora varía en fase y amplitud, basado en grupos de tres bits o tribits (Huayas Flores, 2021).

De la misma forma que en el modulador 8-PSK, en el 8QAM la señal binaria ingresa al modulador por un circuito conversor serie paralelo que agrupa bits de tres distribuyéndose en igual número de ramas: canal I, canal C y canal Q. Los canales IC conectan con el convertidor A de nivel de 2 a 4, que producen una señal analógica PAM de cuatro valores de la siguiente manera (Huayas Flores, 2021).

El estado del bit C determina el valor del voltaje de la siguiente manera: C = "0" = 0.541 V, C = "1" = 1.307 V, los bits Q/C determinan la polaridad del voltaje: Q=I="0" = - X, Q=I="1" = +X.

Los cuatro valores distintos de voltaje de la señal PAM se forman de acuerdo con la tabla de la figura 23, el dicit IC = 10 producirá el valor de voltaje + 0.541 voltios.

La señal PAM producida por los dos convertidores de nivel modulará las frecuencias $\text{sen}\omega_c$ y $\text{cos}\omega_c t$, generadas por el oscilador de referencia, produciendo las ondas $x \text{sen}\omega_c t$, $y \text{cos}\omega_c t$, dos formas de voltaje que ingresan al circuito sumador líneal dando lugar a la formación de la señal 8QAM como lo ilustra la figura 24 (Tomasi, 1996).

En modulación 8-QAM se utilizan dos diagramas, el de fasores y el de constelación y la tabla de verdad contenidos en la figura 25. La gráfica muestra la amplitud y la fase de la señal de salida de cada tribit que se transmite a través del modulador 8-QAM (Luque, Clavijo 1995).

Para verificar el procedimiento desarrollamos el siguiente ejercicio.

- Ejemplo 2

Determinar la fase y amplitud de la portadora para el modulador 8-QAM del tribit QIC = 010. Se analiza lo producido por los convertidores de nivel.

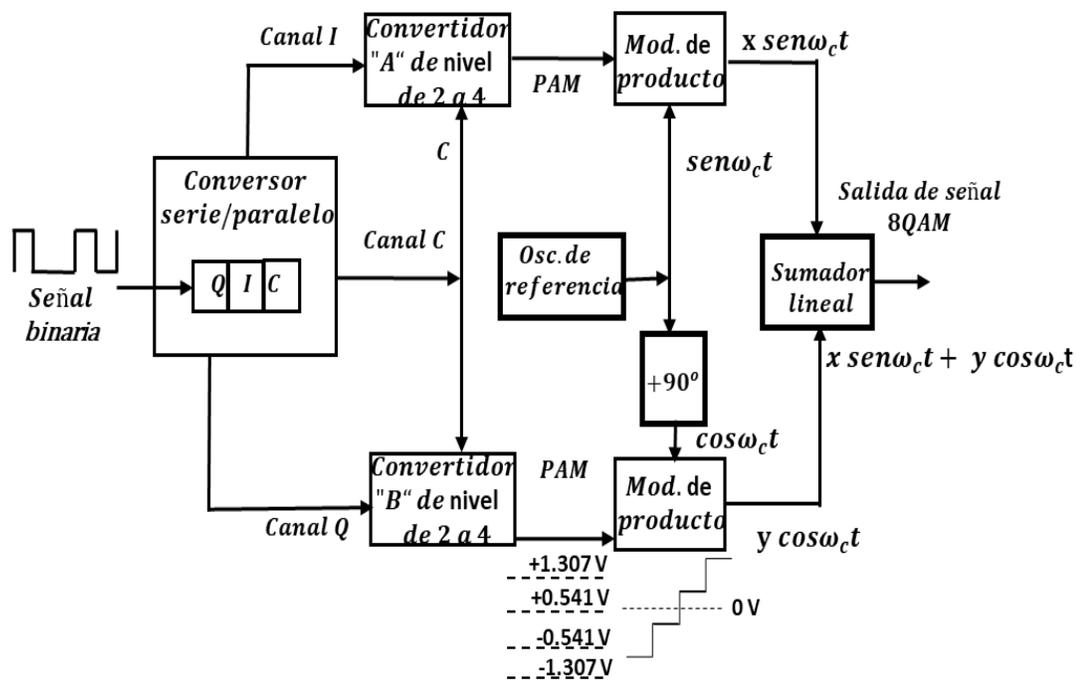
Al convertidor de nivel A ingresan los bits I=1 y C=0, de acuerdo con la tabla de la figura 5-9 la señal PAM de salida vale +0.541 voltios.

Al convertidor de nivel B ingresan los bits Q=0 y C=0, de acuerdo con la tabla de la figura 5-9 la señal PAM de salida vale -0.541 voltios.

En seguida se hace un análisis de la tarea de los moduladores de producto. En el primer modulador operan los voltajes 0.541 y $\text{sen}\omega_c t$ produciendo la señal $+0.541\text{sen}\omega_c t$.

Figura 22.

Modulador 8-QAM



Nota. Diagrama de bloques de un modulador 8-QAM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

En el segundo modulador operan los voltajes -0.541 y $\text{cos}\omega_c t$ produciendo la señal $-0.541 \text{cos}\omega_c t$. A la salida del circuito sumador lineal se tiene la señal $f_{8QAM} = 0.541 \text{sen}\omega_c t - 0.541 \text{cos}\omega_c t = f_{8QAM} = 0.765 \text{sen}(\omega_c t - 45^\circ)$.

En la tabla de verdad de la figura 25 se encuentra el resultado de cada uno de los ocho tribits (Tomasi, 1996).

Figura 23.

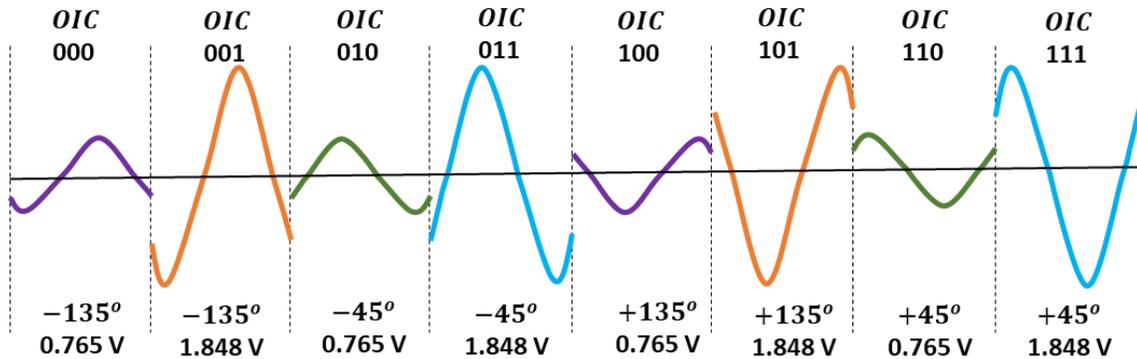
Tabla de convertidor D/A 8-QAM

I/Q	C	Señal PAM de salida
0	0	-0.541 v
0	1	-1.307 v
1	0	+0.541 v
1	1	+1.307 v

Nota. Tabla del convertidor D/A de 2 a 4 niveles. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 24.

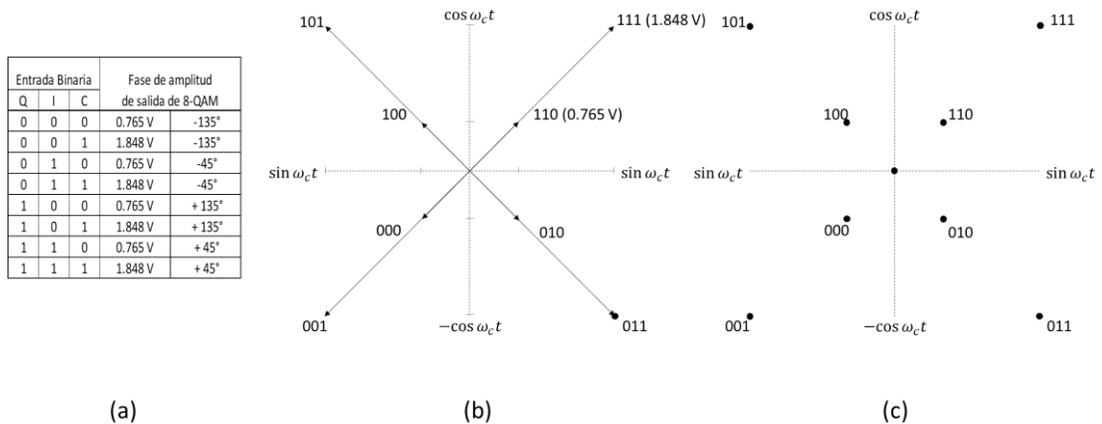
Relaciones de fase y amplitud en 8-QAM



Nota. Relación de fase y amplitud de símbolos de salida por tribit de entrada en un modulador 8-QAM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

Figura 25.

Diagramas del Modulador 8-QAM



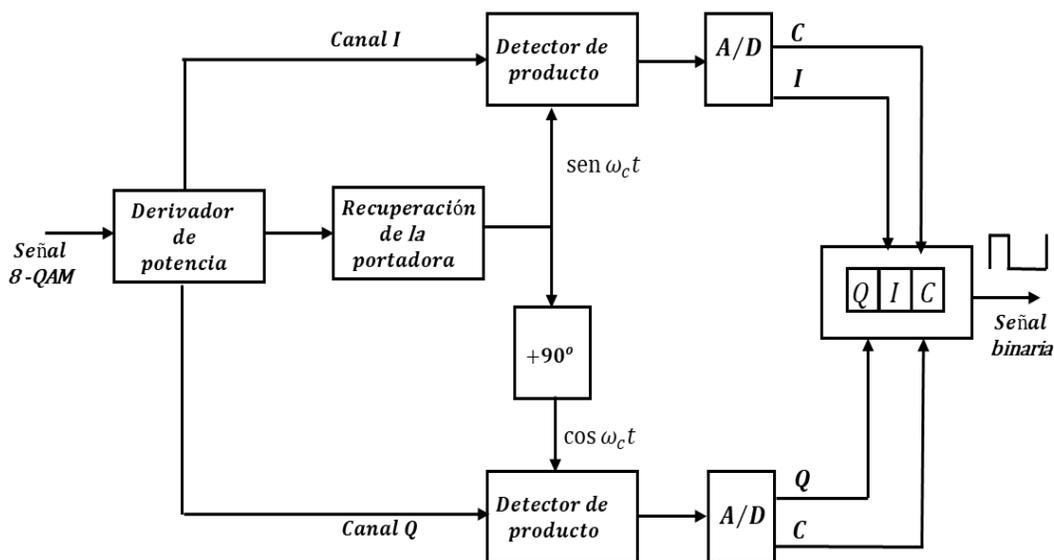
Nota. (a) tabla de verdad; (b) Diagrama de fasores; (c) diagrama de constelación. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

4.3.2. Demodulador 8-QAM

En el presente tema únicamente se presenta un amplio y claro diagrama de bloques del demodulador 8-QAM. Figura 26. (Tomasi, 996)

Figura 26.

Demodulador 8-QAM



Nota. Diagrama de bloques de un demodulador 8-QAM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

4.4. Modulación por desplazamiento de fase diferencial DBPSK

A continuación, se trata la descripción matemática y mediante diagramas y figuras el proceso de modulación DBPSK para tratamiento de señales digitales.

4.4.1. Transmisión DBPSK

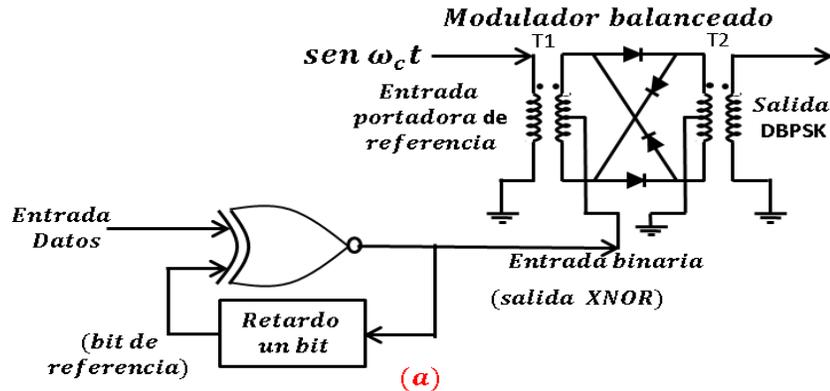
La modulación por desplazamiento de fase binaria diferencial (DBPSK) es otra forma de modulación digital en la que los datos son enviados por medio de la variación de únicamente dos fases de la onda portadora $\text{sen}\omega_c t$.

Para efectos del tratado del modulador se presenta la figura 27. En el proceso de transmisión los datos ingresan a la compuerta XNOR donde son comparados con un bit de referencia del que se desconoce el estado lógico y que por motivos de facilidad se considera con valor 0. (Tomasi, 1996)

Si el dato que ingresa es 0 habrá un bit 1 en la salida XNOR, éste pondrá en conducción los diodos en posición horizontal del modulador balanceado, entonces la señal de salida DBPSK será $\text{sen}\omega_c t$ en fase con la portadora de referencia, o sea, fase de salida 00 tal como se muestra en la parte (b) de la figura 27. (Luque, Clavijo, 1995).

Figura 27.

Transmisor DBPSK



(a)

("0" bit inicial de referencia)

<i>Datos de entrada</i>	0	1	0	0	0	1	1	0
	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
<i>salida XNOR</i>	1	1	0	1	0	0	0	1
<i>Fase de salida</i>	0^0	0^0	180^0	0^0	180^0	180^0	180^0	0^0

(b)

Nota. (a) Diagrama esquemático de un transmisor DBPSK; (b) Tabla de estados de distintos puntos. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

Si a continuación ingresa un dato 0 siendo el bit de referencia 1 se dará en la salida XNOR un estado 0 que pondrá en conducción los diodos verticales del modulador provocando que la salida DBPSK se transfiera la señal $-sen\omega_c t$, es decir, un desfase de 180° entre la entrada y la salida del transmisor (Luque, Clavijo, 1995).

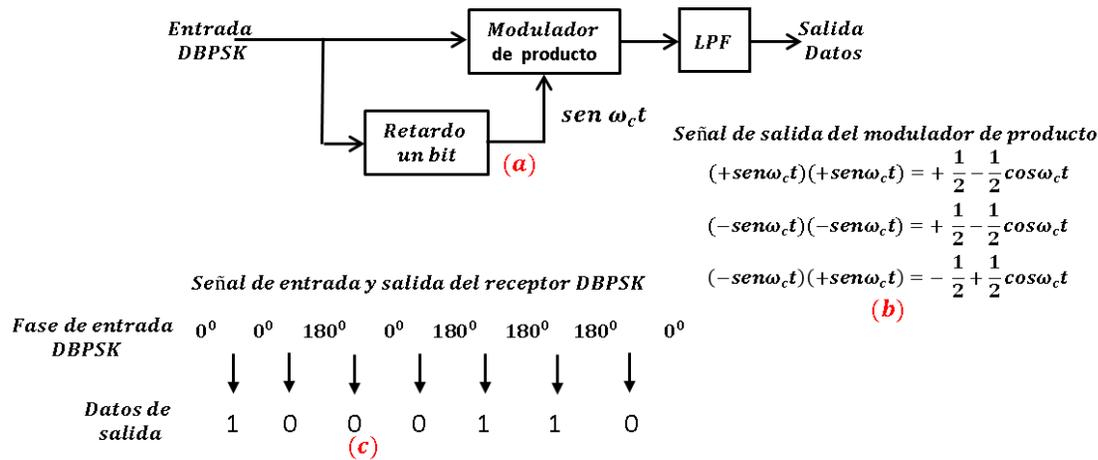
4.4.2. Recepción DBPSK

La función del receptor es transformar los símbolos DBPSK en datos digitales de interés, éste es representado en el diagrama de bloques de la figura 28 parte (a) (Tomasi, 1996).

El funcionamiento es el siguiente, la señal DBPSK, $\pm \text{sen} \omega_c t$ se divide en dos partes, una conecta al circuito de retardo que la enruta al modulador de producto la otra directamente al modulador (Luque, Clavijo, 1995).

El modulador de producto entrega las señales mostradas en la parte (b) de la figura, con tres posibilidades, que conectan con el filtro pasabajos, a la salida se obtienen los voltajes (+V) correspondiente al estado lógico 1 y (V) al estado lógico 0 (Luque, Clavijo, 1995).

Figura 28.
Receptor DBPSK



Nota. Receptor DBPSK; (a) Diagrama de bloques del receptor; (b) Señal de salida del modulador de producto; (c) Señales de entrada y salida. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

4.5. Multiplexación por división de frecuencia ortogonal OFDM

En este apartado, se trata la descripción matemática y mediante diagramas y figuras el proceso de modulación OFDM, muy importante para el tema que se trata en este documento.

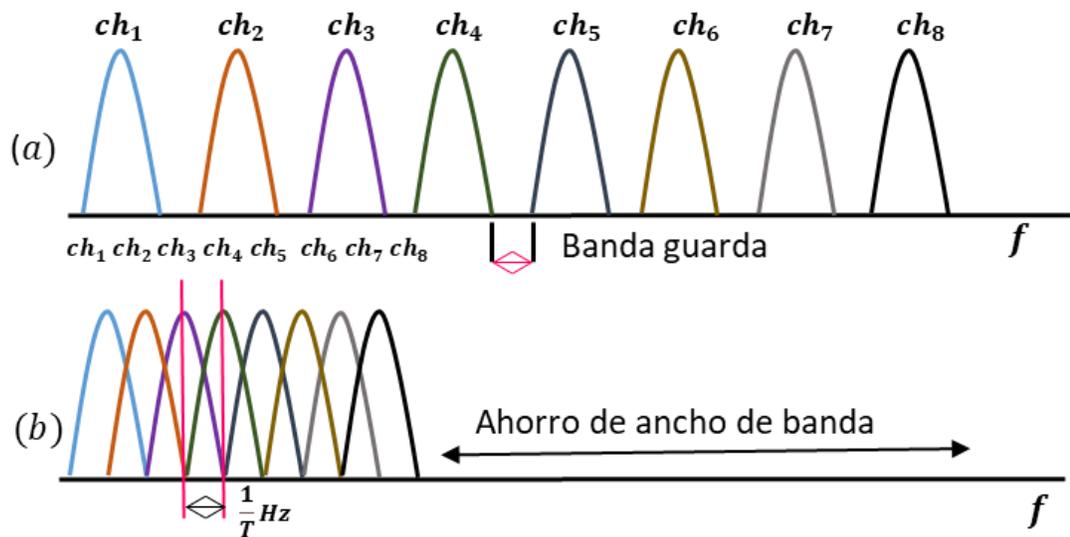
4.5.1. Modulación OFDM

En la técnica OFDM, (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), se mezclan las funciones de modulación y multiplexación por división de frecuencia en un mismo escenario, que respectivamente, se refieren a la variación de un parámetro de una onda llamada portadora por medio del voltaje de otra llamada moduladora y el proceso de empaquetamiento de

varias señales de distinto origen que serán transmitidas por un mismo medio (Jiménez, Parrado, Quizá & Suárez, s.f.).

Figura 29.

Multiplexación de señales en OFDM



Nota. (a) Multiportadoras FDM convencional; (b) Multiportadoras ortogonales OFDM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

El desarrollo de multiplexación OFDM es parecido al de FDM, la diferencia entre ambos radica en el aprovechamiento del espectro de frecuencias, en FDM existen anchos de banda no utilizados, señalados como banda guarda, OFDM utiliza distintas ondas portadoras que parcialmente se solapan, pero no se interfiere una con otra porque son señales ortogonales, una comparación entre estos dos procedimientos lo ilustra la figura 29. (López, 1990).

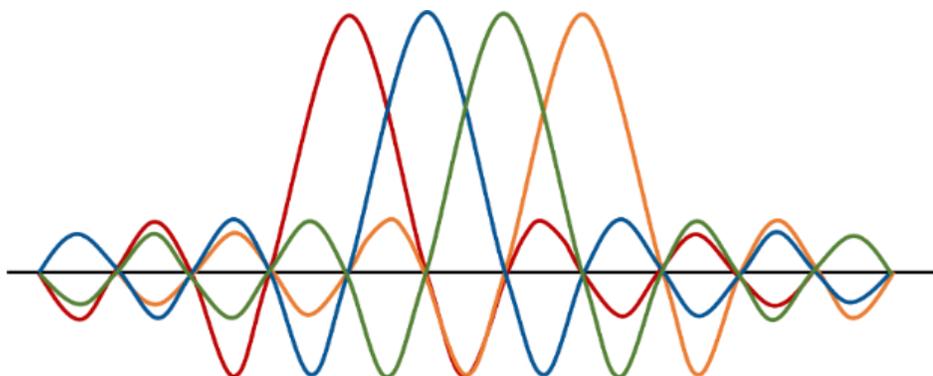
En OFDM se utilizan N subportadoras, la duración de símbolos OFDM es T segundos, las subportadoras están separadas $1/T$ Hz. En el transmisor, los datos almacenados son modulados paralelamente, a través de la transformada inversa de Fourier de tiempo discreto (IDFT) y enviados en serie hacia el canal.

OFDM es una técnica de modulación que soluciona problemas relacionados con interferencia intersímbolo, ISI, interferencia interportadora, ICI por sus siglas en inglés, frecuentes en sistemas de transmisión vía radiofrecuencia, ocasionados por la propagación (Gallardo, 2007).

En la figura 30 se muestra el espectro OFDM, las subportadoras están sobrepuestas y son ortogonales. La ortogonalidad hace que la interferencia interportadoras (ICI) sea mínima, puede apreciarse que cuando una portadora alcanza la amplitud máxima, las adyacentes presentan una menor, disminuyendo la interferencia (Jiménez, Parrado, Quizá & Suárez, s.f.).

Figura 30.

Espectro OFDM



Nota. Espectro OFDM con cuatro portadoras ortogonales. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

4.5.2. Sistema para producir OFDM

La producción de la técnica de la multiplexación OFDM se enmarca en la figura 31, los datos o información de interés $s[n]$, luego de pasar por un proceso de conversión de un flujo serie a N paralelos que ingresan al módulo de mapeo, donde son transformados en símbolos MQAM o MPSK: X_n , cada uno de éstos modula una portadora (o subportadora, en este desarrollo se manejarán los dos términos indistintamente) compleja (Cabrera, 2009).

$$\phi_n(t) = e^{j\omega_n t} \quad (13)$$

Produciendo una señal compleja.

$$x_n(t) = X_n e^{j2\pi f_n t} = X_n (\cos 2\pi f_n t + j \operatorname{sen} 2\pi f_n t) \quad (14)$$

Donde:

f_n es el conjunto de frecuencias ortogonales.

X_n son símbolos MQAM o MFSK

I_n y jQ_n corresponden a los componentes en fase y cuadratura de cada símbolo.

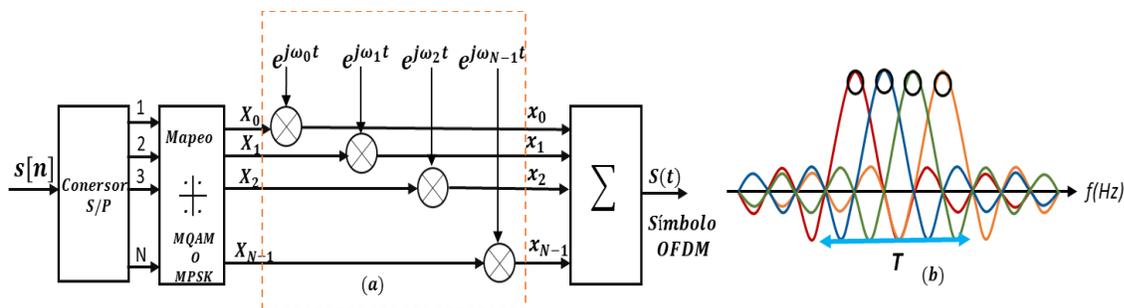
x_n es la transformada inversa discreta de Fourier de X_n

La gran cantidad N de señales x_n son ingresadas a un circuito sumador o multiplexor TDM produciendo el símbolo OFDM, $S(t)$, que tendrá la expresión matemática (15):

$$S(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n = \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{j2\pi f_n t} \quad (15)$$

Donde, $S(t)$ es la señal OFDM en el tiempo.

Figura 31.
Modulación OFDM



Nota. (a) Modulador OFDM; (b) Espectro de la señal OFDM haciéndose énfasis en las amplitudes. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

En la expresión (14) puede notarse que los datos X_n corresponden a la amplitud de cada una de las portadoras moduladas, son marcados en la parte (b) de la figura 31, con círculos negros (Ramírez, 2006).

Como puede verse en la ecuación (15), $S(t)$ es la sumatoria de la transformada inversa de Fourier de los coeficientes X_n y éstos la transformada directa de Fourier de $S(t)$.

Como lo representa la figura 31, cada subcanal X_n modula una portadora $e^{j\omega_n t}$ de manera que las frecuencias f_n estén lo suficientemente

separadas, por lo que debe seguir la relación: el espaciamiento entre portadoras Δf_p debe ser mayor que el ancho de banda de cada una $B\omega_p$

$$\Delta f_p > B\omega_p$$

La relación anterior se basa en el principio de ortogonalidad de frecuencias, que explica como dos frecuencias no se mezclan en una transmisión simultánea con un ancho de banda angosto. El tema Ortogonalidad de Frecuencias es desarrollado en páginas adelante (Gallardo, 2007).

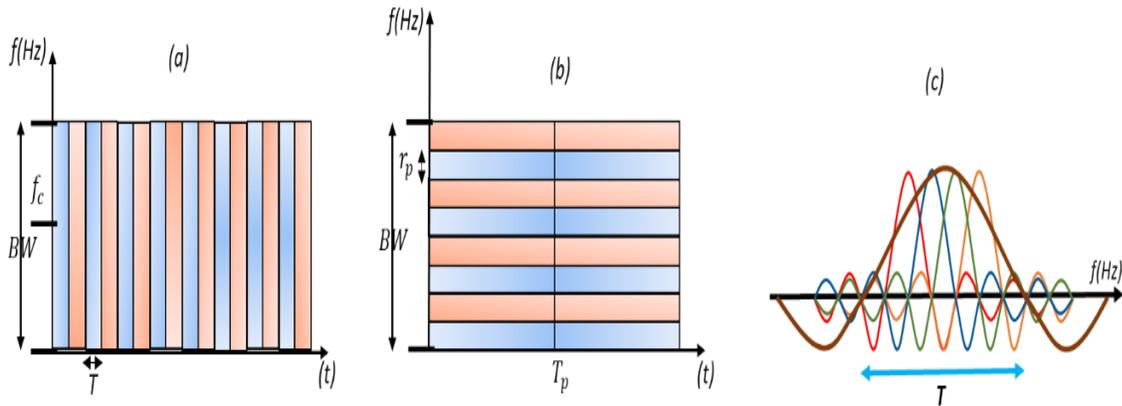
4.6. Transmisión mediante portadora única SC y multiportadora OFDM

Para tener una idea amplia de la diferencia entre modulación FM con portadora única (*Single Carrier*, SC) parte (a) y la modulación multiportadora OFDM parte (b) véase la figura 32.

En (a) se muestra que todo un ancho de banda $B\omega$ es ocupado por una sola portadora o un solo símbolo todo un tiempo T, en (b) se muestra que el mismo ancho de banda, $B\omega$, es ocupado por un conglomerado de ondas portadoras o símbolos. En la parte (c) presenta el espectro de frecuencias de portadora única sobrepuesta al espectro de frecuencias de multiportadoras para un mismo ancho de banda $B\omega = \frac{1}{T}$, este periodo T corresponde al de la figura 32 (c), no es la duración del símbolo OFDM (Cabrera & Tarrés, s.f.).

Figura 32.

Comparación entre técnicas de modulación



Nota. Comparación entre las técnicas de modulación por portadora única y multiportadora OFDM. (a) Portadora única; (b) Multiportadora OFDM; (c) Comparación en frecuencia. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

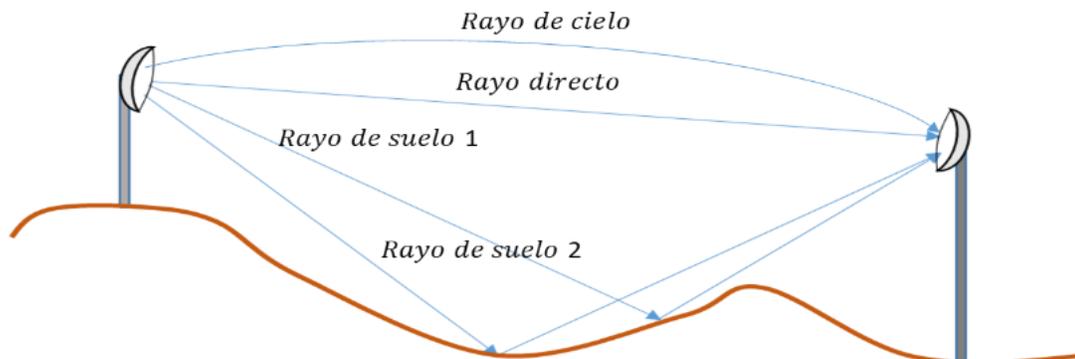
4.7. Transmisión OFDM vía radio

En un sistema de radiodifusión la señal que va desde el transmisor consiste en un frente de onda amplio, no es un rayo único, la forman varios que viajan por distintos caminos o multitrayectos, así al receptor llegan el directo o de línea de vista y varios indirectos, los no directos llegarán al receptor a través de rebotes en el suelo, edificios, árboles, lagos, entre otros., o por efecto de difracción causado por la ionósfera, los cerros, como lo muestra la figura 33, arribando al receptor con varios tiempos de retraso respecto al rayo directo, provocando fenómenos como eco que en la televisión analógica se observa como una segunda imagen (Gallardo, 2007).

En la transmisión de radio digital los símbolos S_i que llegan retrasados afectan a los siguientes símbolos produciendo interferencia intersímbolo ISI, causando distorsión por la energía de la señal del símbolo presente sobre el siguiente, son llamados problemas de multitrayectos (Gallardo, 2007).

Figura 33.

Propagación de ondas de radio



Nota. Propagación de ondas de radio dependiendo de los distintos rayos de trayectoria entre dos antenas. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

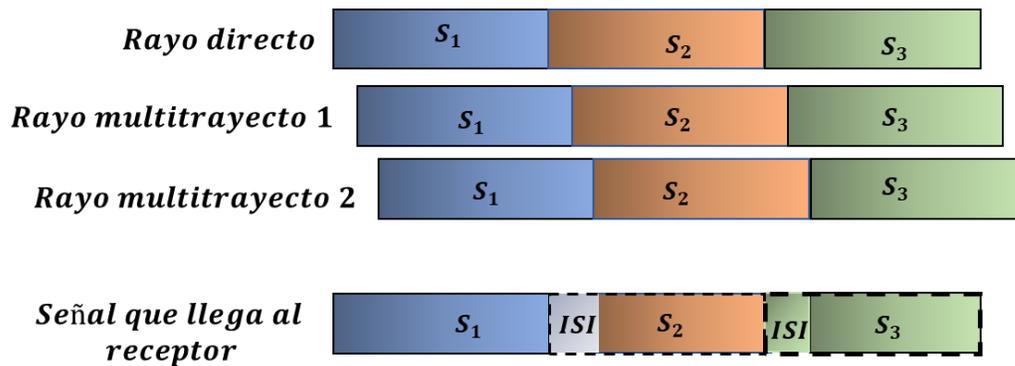
El fenómeno ISI es representado en la figura 34. Ese traslape de símbolos ocasiona algunas veces que el receptor no identifique los cambios de estado. Las ondas componentes de caminos indirectos arriban al receptor con distintos niveles de energía, algunas significativos, para efectos de diseño son consideradas las cuatro con mayor potencia, despreciándose las siguientes.

Con el fin de minimizar el ISI en la técnica de modulación OFDM se emplea el prefijo cíclico, CP por sus siglas en inglés (Gallardo, 2007).

Otro fenómeno ocurrente en la transmisión vía radio es la interferencia interportadora ICI, que en OFDM es superado en un alto porcentaje por la técnica de Ortogonalidad de frecuencias, en el receptor las bandas laterales de las subportadoras se solapan en sus mínimos como puede apreciarse en la figura 30, lo que permite una recepción sin interferencia interportadora.

Figura 34.

Interferencia intersímbolo, ISI



Nota. Se muestra cómo dependiendo del rayo o trayecto, hay una diferencia en el tiempo de llegada de las señales, lo que produce la interferencia intersímbolos, ISI. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

4.7.1. Prefijo cíclico

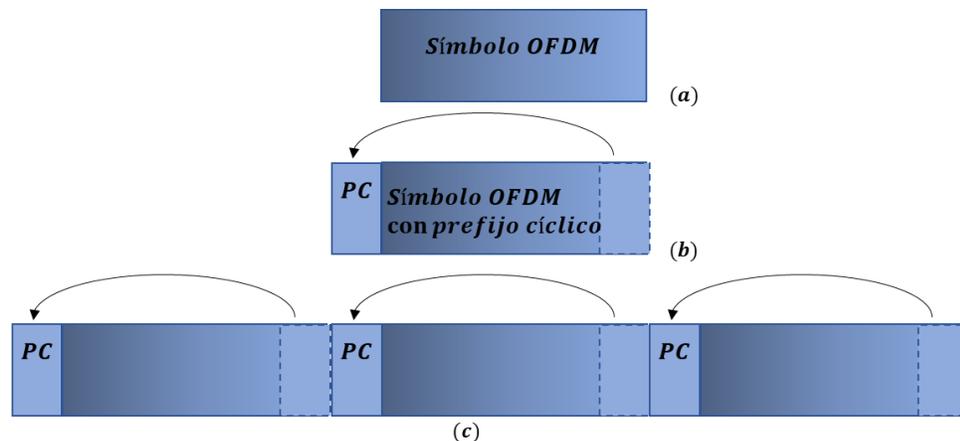
El prefijo cíclico es una banda guarda intersímbolos. Es un mecanismo que consiste en ampliar el tiempo de duración de un símbolo al colocar una réplica de la parte final a la inicial de este, como se muestra en la figura 35. parte (b), ese tiempo es el que está determinado para evitar la interferencia intersímbolos, (ISI) cuya longitud puede ser del 10 % al 25 % del símbolo, dependiendo si la comunicación se lleva a cabo en las ciudades o en la zona rural respectivamente. En las ciudades la distancia entre el transmisor y

receptor es más pequeña y la cantidad de rayos que alcanzan al receptor es mayor, el PC es de menor magnitud (Leopedrini, 2014).

Otra consideración que se tiene sobre la duración del prefijo cíclico, que debe ser superior a la máxima dispersión del canal esperable, es decir, superior a la máxima duración del eco que se pueda esperar en un determinado escenario. Por la ayuda del prefijo cíclico se puede establecer una sucesión de símbolos, según se aprecia en (c) de la figura 35, sin que afecte el eco producido por la propagación en la parte de radio (Gallardo, 2007).

Figura 35.

Esquema y funcionamiento del PC



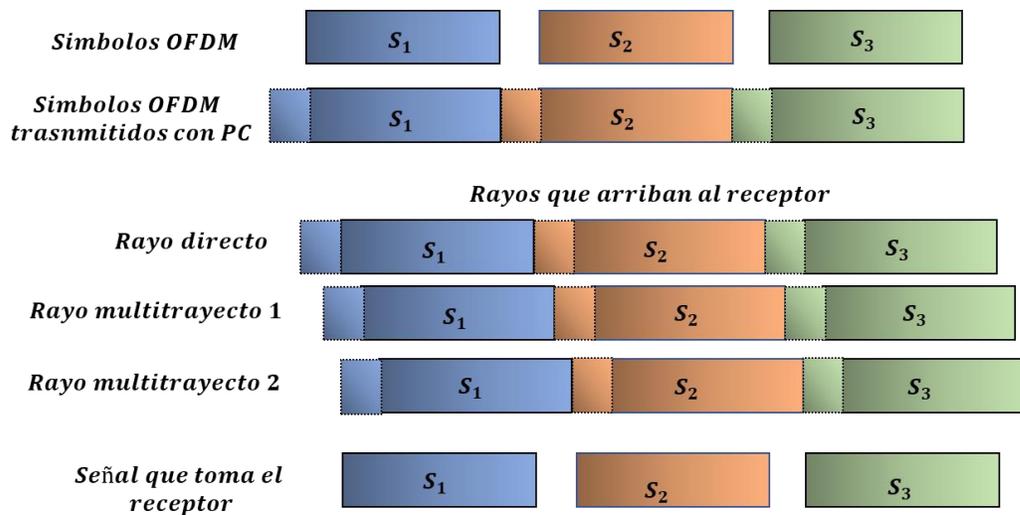
Nota. (a) Diagrama de bloque de un símbolo OFDM; (b) Símbolo OFDM con prefijo cíclico; (c) Tren de símbolos OFDM como son transmitidos. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

En OFDM esta nueva forma de multiplexación y modulación por multiportadora se elimina el problema de interferencia intersímbolo, ISI, como lo detalla la figura 34. El fenómeno ocurrido en la parte de recepción de un

radio enlace digital donde a cada símbolo transmitido se le ha incorporado el prefijo cíclico, es que el receptor toma la información identificando el final de cada símbolo recibido eliminando de esta manera el problema de la interferencia Intersímbolos permitiendo una correcta recepción y reproducción de las señales recibidas, es decir, en el receptor se cuenta con la información real y fidedigna de las señales generadas en el lado del transmisor (Leopedrini, 2014).

Figura 36.

Recepción de símbolos OFDM



Nota. Recepción de símbolos OFDM con PC incorporado. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

4.8. Ortogonalidad

La ortogonalidad de funciones es la herramienta por la cual en OFDM las bandas laterales de las subportadoras adyacentes se traslapan sin que exista interferencia intersímbolo (ISI por sus siglas en inglés) entre ellas. La

ortogonalidad de frecuencias significará entonces que las portadoras no se mezclen en una transmisión simultánea en un angosto ancho de banda (Cabrera & Tarrés, s.f.).

Respecto de la ortogonalidad de funciones se hacen las siguientes consideraciones.

Se dice que las funciones φ_n y φ_m son ortogonales entre si sobre el intervalo $a < t < b$ si satisfacen la condición:

$$\int_a^b \varphi_n(t) \varphi_m^*(t) dt = 0$$

También que en el conjunto $\{\varphi_n(t)\}$ las funciones son ortogonales si satisfacen la relación:

$$\int_a^b \varphi_n(t) \varphi_m^*(t) dt = \begin{cases} 0, & n \neq m \\ K_n & n = m \end{cases} \quad (16)$$

Como apoyo para las expresiones anteriores se desarrolla el siguiente ejemplo.

- Ejemplo 3.

En este ejemplo se muestra que el conjunto de funciones exponenciales $\{e^{jn\omega_0 t}\}$ son ortogonales sobre el intervalo $a < t < b$ donde $b = a + T_0$, $\omega_0 = 2\pi f_0$ y n es un entero. Tomado de Sistemas de comunicaciones digitales y analógicos. León W. Couch, II.

Definiendo $\varphi_n(t) = e^{jn\omega_0 t}$ y $\varphi_m(t) = e^{jm\omega_0 t}$ y sustituyendo en (16), tenemos:

$$\int_a^b e^{jn\omega_0 t} \varphi_m^*(t) dt = \int_a^{a+T_0} e^{jn\omega_0 t} e^{-jm\omega_0 t} dt = \int_a^{a+T_0} e^{j(n-m)\omega_0 t} dt$$

Si $n \neq m$

$$= \frac{e^{j(n-m)\omega_0(a+T_0)} - e^{j(n-m)\omega_0 a}}{j(n-m)\omega_0} = \frac{e^{j(n-m)\omega_0 a} [e^{j(n-m)\omega_0 T_0} - 1]}{j(n-m)\omega_0} = 0$$

Si $n = m$

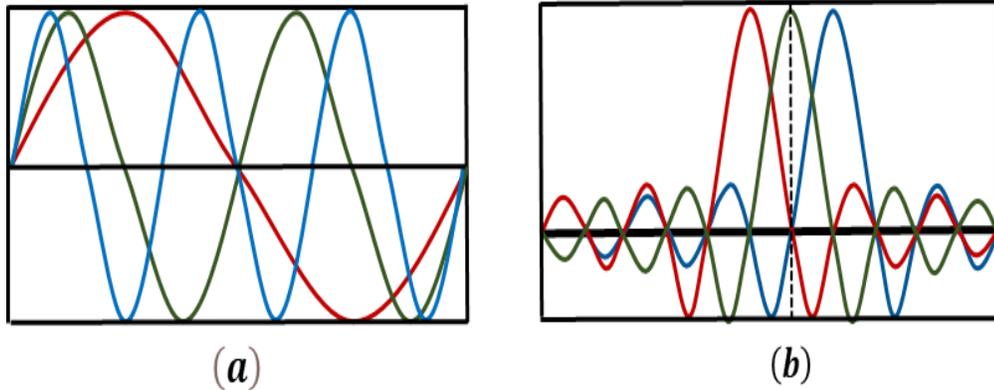
$$\int_a^{a+T_0} e^{j(n-m)\omega_0 t} dt = \int_a^{a+T_0} 1 dt = T_0$$

$$K_n = T_0$$

Se concluye que las funciones exponenciales $\{e^{jn\omega_0 t}\}$ son ortogonales. La figura 37 presenta una señal OFDM en el tiempo.

Figura 37.

OFDM en el tiempo



Nota. Ortogonalidad en OFDM; (a) Señal OFDM en el tiempo; (b) OFDM en representación espectral con funciones Sinc. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

En la figura 37 se presentan en (a) una señal OFDM con tres subportadoras, puede apreciar en un periodo de la portadora de menor frecuencia caben varios periodos de las portadoras de mayor frecuencia y en (b) la señal espectral donde, como se ha mencionado, el máximo de una portadora coincide con el nulo de las adyacentes, lo resalta la línea a trazos (Gallardo, 2007).

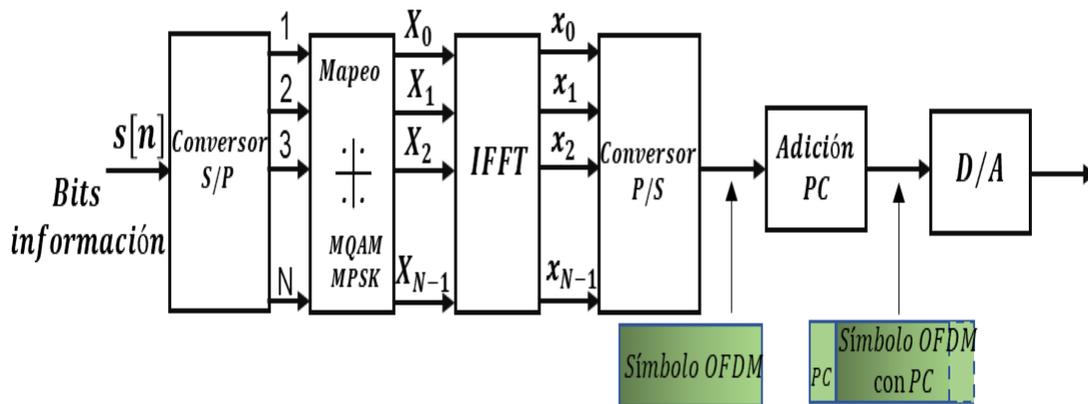
4.9. Transmisor OFDM

El transmisor OFDM está formado por una serie de circuitos representados por el diagrama de bloques en la figura 38 de esta forma: el conversor serie/paralelo S/P, el circuito de mapeo, MQAM o MPSK, el módulo de la transformada inversa rápida de Fourier IFFT, un conversor paralelo/serie, P/S y el módulo de incorporación del prefijo cíclico PC, la unidad conversora

de señal digital a analógica, D/A. De este conjunto de partes se describe la función de cada uno (Wechler, 2017).

Figura 38.

Transmisor OFDM



Nota. Diagrama de bloques de un transmisor OFDM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

4.9.1. Circuito convertor serie/paralelo

Al circuito S/P llega la señal digital $s[n]$ que porta datos, información de voz, música o imagen, señales analógicas previamente digitalizadas, en éste, el tren serial es convertido a N flujos paralelos, cada uno de ellos porta una cantidad pequeña de datos por lo que la velocidad de bit por portadora será baja determinando con esto que la interferencia intersímbolo, ISI, sea pequeña.

4.9.2. Circuito de mapeo

En este circuito son formados pequeños grupos de bits, cuya cantidad depende de la técnica de modulación utilizada M-QAM o M-PSK, obteniéndose a la salida del circuito de mapeo un conjunto de símbolos complejos $X_i = \{X_0, X_1, X_2, \dots, X_{N-1}\}$.

En la unidad IFFT a cada uno de estos símbolos X_i se le asigna una portadora ortogonal de distinta frecuencia.

4.9.3. Unidad IFFT

Unidad de modulación IFFT, (del inglés *Inverse Fast Fourier Transform*, transformada inversa rápida de Fourier). En esta unidad se generan N portadoras ortogonales de distinta frecuencia, dividiendo el ancho de banda disponible entre la cantidad de subportadoras. Cada subportadora puede tener una expresión más amplia que la dada en (16) de la forma:

$$\phi_n(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_n t} & \text{si } t \in [0, T] \\ 0 & \text{e o c} \end{cases} \quad (17)$$

La frecuencia de cada subportadora se puede determinar de la siguiente manera:

$$f_n = f_0 + n\Delta f = f_0 + n \frac{B\omega}{N} \quad (18)$$

Donde:

f_0 frecuencia de menor valor.

$\Delta f = \frac{B\omega}{N}$, espaciamiento entre subportadoras

$B\omega$ ancho de banda disponible

N Número de subportadoras

T periodo de símbolo OFDM

n Posición de subportadora, $n = 0, 1, \dots, N-1$

La unidad IFFT Es la parte principal del sistema, aquí se efectúa la modulación a través de técnicas de procesamiento digital de señales, la señal OFDM discreta se produce cuando a los símbolos X_n se les aplica la IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*). Así, los símbolos X_n pueden ser vistos como el espectro de amplitud de las portadoras moduladas. (Wechler, 2017)

$$x_n = X_n \phi_n \quad (19)$$

En la parte de recepción para recuperar la información X_n , motivo principal de la operación del sistema, se aplica la DFT (*Discrete Fourier Transform*).

En los sistemas OFDM donde se utilice un alto número de portadoras, el tiempo para realizar la IDFT y la DFT crece linealmente y el tiempo para realizar todas las operaciones crecerá exponencialmente, lo que acarrea dificultad en las operaciones. Por esto, para minimizar el tiempo de procesamiento se utiliza el algoritmo denominado transformada rápida de Fourier, FFT (*Fast Fourier Transform*) que produce que el tiempo de modulación y demodulación de señales OFDM sea reducido.

El algoritmo FFT reduce el tiempo de cálculo de n^2 pasos a $n \log_2(n)$, (requisito obligado, debe cumplirse que n^2 sea una potencia de dos), elimina gran parte de los cálculos repetitivos a que está sometida la DFT, por lo que se logra un proceso más rápido.

La implementación de la FFT puede realizarse mediante el desarrollo de una tarjeta (Hardware) en la cual se emplean circuitos integrados específicos DCP.

En el transmisor, por la IFFT operación inversa de la FFT se realiza una transformación del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, así mismo en el receptor se efectúa el proceso inverso de conversión del dominio del tiempo al de la frecuencia.

Las señales complejas paralelas producida por IFFT y entregada por el módulo conversor paralelo serie, P/S, será el símbolo OFDM: $S(t)$.

4.9.4. Circuito conversor párelo/serie, P/S

Al circuito conversor paralelo/serie que básicamente es un multiplexor TDM, ingresan N flujos eléctricos convirtiéndose en uno solo que puede matemáticamente ser expresado de la forma:

$$S(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X_i e^{j2\pi f_n t} \quad (20)$$

$$S(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X_i e^{j2\pi \left(f_0 + n \frac{BW}{N}\right) t} \quad (21)$$

El flujo se representa como una sumatoria debido a que se han multiplexado muestras discretas no señales continuas en el tiempo.

4.9.5. Adición del prefijo cíclico, PC

La función del prefijo cíclico es operar como una banda de guarda entre símbolos con el fin de minimizar o eliminar la interferencia intersímbolos ISI. Esta interferencia es un fenómeno que ocurre cuando existe la transferencia de símbolos de un dispositivo electrónico llamado transmisor y receptor aunado al fenómeno de propagación multicamino inherente en los enlaces de radiofrecuencia como sucede en los casos de la propagación cualquier estación de radio comercial (Flores, 2018).

A continuación del conversor paralelo serie se encuentra el dispositivo que ejecuta la función de copiar una sección del símbolo OFDM y adicionarlo al mismo.

4.9.6. Unidad D/A

En esta unidad la señal digital del símbolo OFDM, es convertida a una analógica para que pueda ser transmitida a través del canal o medio de propagación, ya sea fibra óptica, cobre o radio frecuencia como sucede en el caso de la señal de radio *Digital Audio Broadcasting, DAB*. La señal que entrega el transmisor al canal es una sucesión de símbolos OFDM, que matemáticamente puede ser expresado de la siguiente manera:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} X_{k,n} \phi_n(t - kT) \quad (22)$$

Donde:

$$\phi_n(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_n t} & \text{si } t \in [0, T] \\ 0 & \text{e o c} \end{cases} \quad (23)$$

Y la letra k representa el k -ésimo símbolo.

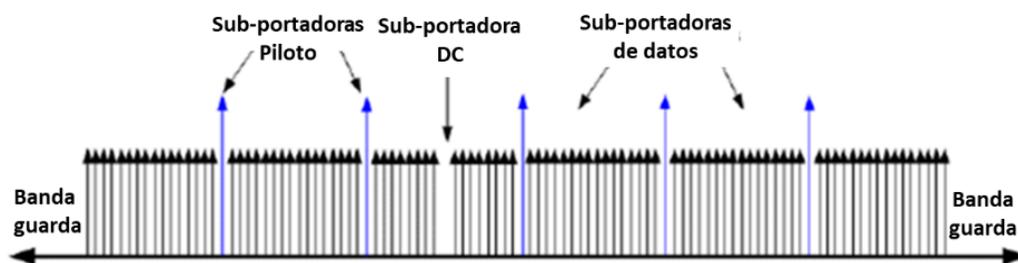
4.9.7. Estructura del símbolo OFDM

La estructura del símbolo OFDM está compuesto por sub-portadoras distribuidas en datos, pilotos para funcionamiento del canal y para banda de guarda, subportadoras no activas y para DC que operan como referencia o frecuencia central del canal.

Respecto a la distribución de las subportadoras en el canal se cita, como ejemplo, lo establecido en la capa física del estándar 802.16-2004 donde se especifica la interfaz OFDM, en la cual se establece que se utilizan 256 subportadoras, de las cuales 192 son utilizadas para datos, 8 son pilotos para minimizar los desplazamientos de frecuencia y 56 son nulas para espacio de banda guarda. La figura 39 muestra la estructura de la trama de un símbolo OFDM (Vargas, López & da Rocha, 2015).

Figura 39.

Estructura OFDM



Nota. Estructura de la trama OFDM. *Caracterización de un esquema de modulación y demodulación caótico para el estándar LTE,* p 16.

<http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/4943/josmome.pdf?%20sequence=3>

4.10. Receptor OFDM

El receptor, es la parte, en un sistema de telecomunicaciones a donde llega a actuar la información, la señal de interés; datos, música, voz, video, entre otros., que ha de ser tomada por el usuario quien obtendrá algún beneficio. La figura 40 da una idea de la forma de operar del receptor OFDM.

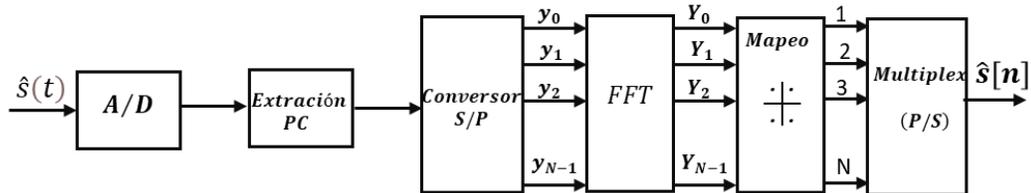
El receptor OFDM llegan los signos de su naturaleza $\hat{s}(t)$, que ingresa al bloque conversor A/D, donde la señal es convertida de analógica a digital, seguidamente es extraído el prefijo cíclico, en el módulo S/P el flujo de datos seriales es convertidos a varios trenes paralelos, los que al pasar por la etapa de la unidad FFT (Transformada Rápida de Fourier) son demodulados y convertidos a datos digitales M-arios de la forma (Jiménez, Parrado, Quizá & Suárez, s.f.).

$$Y_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{\frac{-j2\pi kn}{N}} \quad (24)$$

En la unidad de mapeo, por medio de demoduladores MPSK o QAM, se obtienen N flujos binarios los que son demultiplexados en la unidad P/S (paralelo/serie) para obtener un solo flujo de datos binarios $\hat{s}[n]$.

Figura 40.

Receptor OFDM



Nota. Diagrama de bloques de un receptor OFDM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

4.11. El canal de propagación

En el desvanecimiento multicamino es característico que ocurra la respuesta impulsiva del canal, que no afecta la señal en el receptor cuando su duración es igual o menor que el tiempo del prefijo cíclico.

Desde el punto de vista del receptor, el uso de un prefijo cíclico, PC, con una longitud mayor que la del canal, implica la transformación de la convolución lineal en una convolución circular. Si se denota esta convolución circular por \otimes se puede expresar el sistema OFDM completo como:

$$y_l = DFT(IDFT(x_l) \otimes g_l + \tilde{n}_l) = DFT(IDFT(x_l) \otimes g_l) + n_l \quad (25)$$

donde y_l contiene los N datos recibidos, x_l los N puntos pertenecientes a la constelación en el transmisor, g_l es la respuesta impulsiva del canal (rellenada de ceros hasta obtener la longitud N), y \tilde{n}_l es el ruido introducido por el canal. Como el ruido es considerado blanco y gaussiano, entonces el

término $DFT(\tilde{n}_l) = n_l$ representa ruido gaussiano incorrelado. Así la DFT de la convolución circular de dos señales es equivalente al producto de las transformadas de cada una de las señales de forma individual. Denotando al producto elemento a elemento como “•” podemos escribir (Gallardo, 2007).

$$y_l = x_l \bullet DFT(g_l) + n_l = x_l \bullet h_l + n_l \quad (26)$$

donde $h_l = DFT(g_l)$) es la respuesta en frecuencia del canal. Así se ha encontrado el mismo tipo de sistema que en el caso frecuencial con la única diferencia que la atenuación del canal h_l viene dada por la DFT de N puntos del canal discreto, en lugar de la respuesta en el campo de la frecuencia dada por:

$$h_l = \left(k' \frac{W}{N} \right)$$

es decir, la Transformada de Fourier de $g(\tau)$.

5. COMPRESIÓN DE SEÑALES

En este capítulo desarrollará la teoría sobre la forma en que las señales son comprimidas para que pueda optimizarse el uso del ancho de banda y varias señales puedan ser transmitidas por un mismo canal.

5.1. Definición de compresión de señales

La compresión de señales trata de la reducción de volumen de datos, que contienen determinada cantidad de información, sin afectar su contenido, destinadas a ser almacenada o transmitida. Con el volumen de datos reducido, se espera cuando sea requerida, obtener la misma información utilizando un mínimo de espacio (Vega, 2008).

Hoy en día, estando en la era de la digitalización, la compresión de sonido y de vídeo es necesario para el aprovechamiento de ancho de banda cuando involucra un medio de transmisión, fibra óptica o radiofrecuencia vía terrestre y satelital, sobre todo en los campos de Internet donde actualmente se transporta entretenimiento, educación virtual, videoconferencias, multimedia entre otros. El método de compresión está ligado a todo tipo de datos que se van a comprimir, no se comprime una imagen del mismo modo que un archivo de audio (Pérez, 2005).

La compresión de las señales puede definirse como el proceso mediante el que se obtiene la reducción del caudal de datos a transmitir o almacenar. La compresión de audio es una forma de compresión de datos,

específicamente en la reducción del tamaño de los archivos. Los algoritmos de compresión de audio normalmente son llamados códec de audio.

Cada vez que se procesa, almacena o transmite una señal de audio digital se operan grandes flujos de datos. La velocidad de estos flujos de datos se llama tasa de bits, la cual mide la cantidad de datos en bits por segundo. Una buena calidad de una señal de audio requiere de una mayor tasa de bits.

Las señales de audio digital ocupan mucho más ancho de banda que sus equivalentes analógicos, por lo tanto, existe la búsqueda de procesos de compresión que reduzcan los espectros pero que conserven la calidad. En estos días están disponibles varios sistemas que permiten la transmisión de audio digital de alta calidad en menos de un cuarto del ancho de banda previamente requerido.

Las técnicas de codificación para la compresión utilizan las características propias de la señal de audio y las particularidades perceptuales del oído humano, de modo que cualquier distorsión que introduzca el codificador resulte irrelevante desde el punto de vista de la calidad subjetiva de la señal reproducida.

En los siguientes párrafos se tratará principalmente la compresión de sonidos que ocupan un ancho de banda entre 20 Hz a 20 kHz dado que es la forma de comunicación en la radio difusión comercial o broadcasting, entre el emisor y receptor humanos.

5.2. Técnicas de compresión

Existen dos técnicas básicas de compresión de audio, compresión sin pérdidas y compresión con pérdidas y éstas contienen otras más como la PAC (*Perceptual Audio Coding*, Codificación del Audio Percibido).

5.2.1. Compresión sin pérdida

Conocida también como un modelo de compresión reversible donde un bloque de información comprimido puede ser descomprimido sin omitir una muestra. Un ejemplo de compresión sin pérdida es la técnica de compresión PCM diferencial, DPCM (*Differential Pulse Code Modulation*), este método codifica la diferencia entre muestras de amplitud efectiva y un valor de amplitud predeterminado, es decir, estimado por las muestras anteriores, la diferencia de valores entre muestras es por lo regular es muy pequeña por lo que para su codificación necesitan un número pequeño de bits, este tipo de codificación es aplicable en las audiofrecuencias donde la variación promedio de amplitud es pequeño comparado con la variación total (Castro & Mendieta, s.f.).

Estas técnicas son poco eficientes, su aplicación ha alcanzado razones de compresión de más o menos 4:1.

5.2.2. Compresión con pérdida

Este tipo de compresión elimina un porcentaje de datos con la consideración de que en la descompresión se obtenga la información lo más fiel a la original. Un ejemplo de este proceso son los formatos MP3, el ADPCM (Modulación de Impulso Codificado Diferencial Adaptativo) cuya operación

consiste en convertir una señal digital de 64 kbps en una señal digital de 32 kbps (Castro & Mendieta, s.f.).

La compresión de audio con pérdidas se basa por completo en las características perceptuales de la audición humana. En cuanto al audio se pueden eliminar datos sin que sean sustanciales al oído.

Dado que los datos eliminados no se vuelven a obtener este método recibe el nombre de compresión irreversible. Otra técnica con pérdida, altamente desarrollada es la PAC, creada por *Bell Laboratories*, que ha alcanzado razones de compresión que van desde 3:1 a 24:1 de acuerdo con el algoritmo. Esta basa su operación en los principios del comportamiento del oído humano de enmascaramiento de frecuencia, enmascaramiento temporal y el de bandas críticas. La técnica consiste en eliminar parte de la señal de audio que el oído humano no es capaz de percibir por causa de otras señales que la enmascaran (Castro & Mendieta, s.f.).

Para considerar información sobre el enmascaramiento se requiere conocer la respuesta del oído humano en función de las frecuencias, por lo que se hace referencia a la sensibilidad en función de las frecuencias, temas relacionados con la psicoacústica.

5.3. Psicoacústica

La psicoacústica es la disciplina encargada de averiguar cómo el oído humano reacciona a distintos estímulos o sonidos, es decir, la interpretación que el ser humano da a los sonidos que su oído percibe.

5.3.1. Modelo psicoacústico

El modelo psicoacústico es el resultado de una serie de experimentos realizados con un grupo de personas que participan en varios laboratorios y producen, entre otros, la curva de sensibilidad del oído humano, el enmascaramiento de frecuencias audibles, enmascaramiento temporal y las bandas críticas de audición, fenómenos básicos en el tema de la compresión de señales de audio. Un ejemplo de enmascaramiento es cómo el ruido de una licuadora en operación que anula el sonido de una radio (Mangiaterra, s.f.).

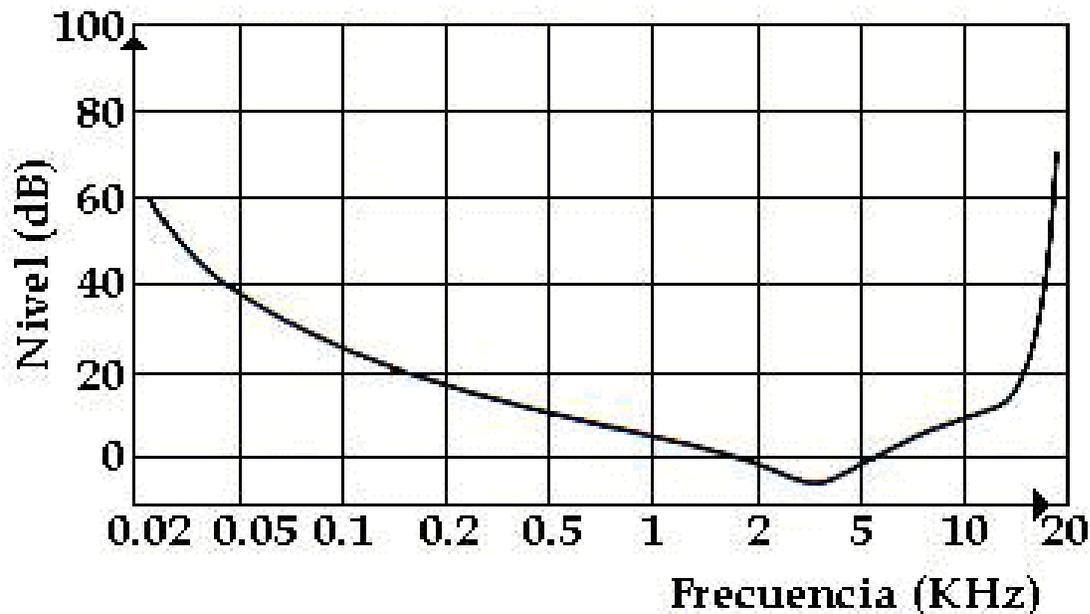
5.3.2. Curva de sensibilidad del oído humano

En la figura 41 se muestra el nivel de presión sonora, L_p , que corresponde al umbral de audición en función de la frecuencia en un espectro de audición humana de 20 Hz a 20 kHz y con un rango dinámico de 120 dB, así por ejemplo la frecuencia de es 2 kHz es sensible al oído a una potencia de 0 dB y una de 15 kHz a una potencia de 20 dB aproximadamente.

La mayor sensibilidad del oído se tiene a las frecuencias de voz, entre unos 400 y 4000 Hz, espectro considerado en una comunicación telefónica. La gráfica también arroja información de cómo las distintas frecuencias requieren de distintos niveles de presión para ser escuchadas, así, frecuencias bajas al igual que parte del espectro de frecuencias altas exigen mayor potencia para atravesar el umbral del sonido, limitado por el trazo en color rojo. Es de mencionar que la respuesta del oído en función de la frecuencia no es lineal (Zapata, 2007).

Figura 41.

Sensibilidad del oído humano



Nota. Gráfica de sensibilidad del oído humano, frecuencia vs. nivel de percepción del sonido.

El formato MP3, Fundamentos técnicos.

http://www.hpca.ual.es/~vruiz/docencia/laboratorio_arquitectura/proyectos/01-02/El%20formato%20MP3/fundamentos.html, consultado el 19 de octubre de 2023, de dominio público.

5.3.3. Enmascaramiento de frecuencia

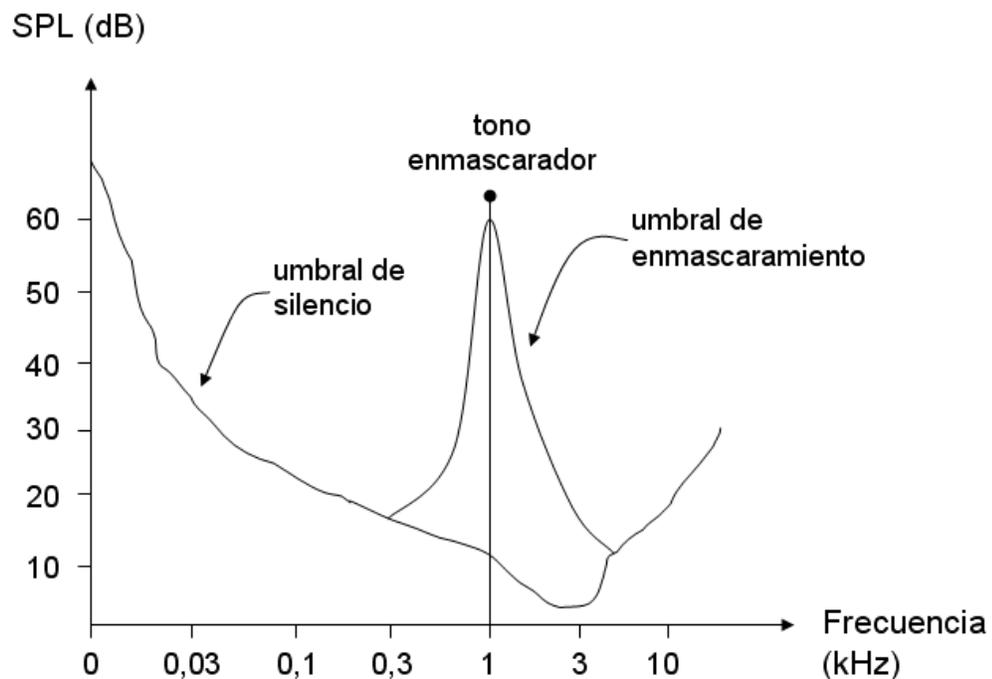
Para el desarrollo de este tema se hace referencia a la figura 42. El enmascaramiento en frecuencia también llamado enmascaramiento sonoro, se produce cuando la presencia de una señal de mayor volumen anula la presencia de otra señal de distinta frecuencia cercana y de menor potencia.

Por ejemplo, si se tiene operando una frecuencia de 1 kHz con un nivel de 60 dB y un tono de prueba de 1.4 kHz con un nivel de 30 dB, el oído humano

no escuchará el sonido de mayor frecuencia de 1.4 kHz dado que la de 1 kHz de mayor potencia la enmascarará, como se representa en la figura 42. Así la frecuencia de 2 kHz no podrá escucharse si está siendo generada con una potencia acústica de 10 dB. La Asociación Americana de Normalización (ASA) define el enmascaramiento como el proceso por el cual el umbral de audición para un sonido (enmascarador) es elevado en la presencia de otro (enmascarado) (Pardo, s.f.).

Figura 42.

Enmascaramiento en frecuencia



Nota. Gráfica del enmascaramiento de frecuencia, se obtiene al sobreponer frecuencias de mayor potencia para que estas sean audibles. *Umbral de enmascaramiento.* https://es.wikipedia.org/wiki/Umbral_de_enmascaramiento, consultado el 19 de octubre de 2023, de dominio público.

La magnitud del tiempo de retardo, τ , por el efecto del post-enmascaramiento puede ser hasta unos 200 ms después, presentándose también para sonidos de prueba de unas pocas centenas de milisegundos.

En el enmascaramiento temporal se define también el pre-enmascaramiento temporal, éste se manifiesta cuando una señal de baja intensidad principia a sonar y un tiempo después se presenta una de alta intensidad y frecuencia cercana, la primera puede no llegar escucharse por causa de la frecuencia de alta potencia

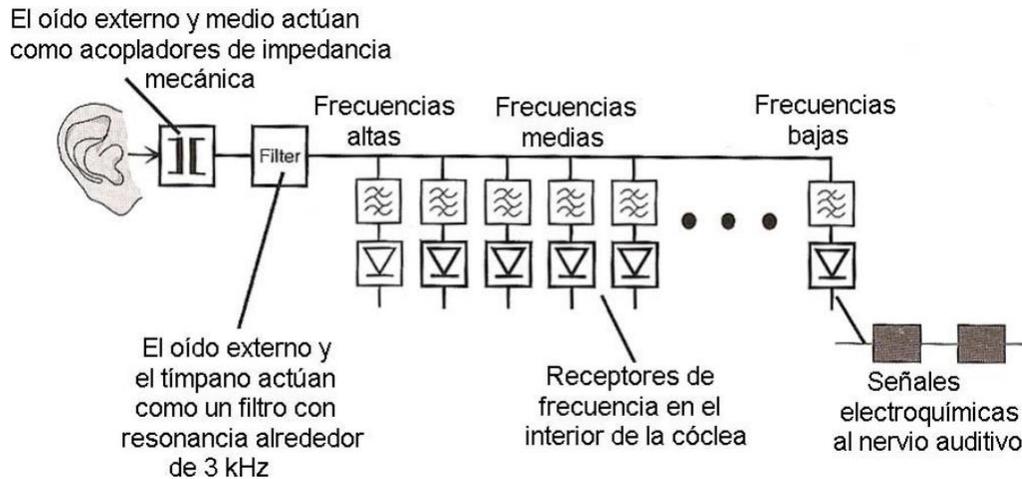
5.3.5. Bandas críticas

Otro principio psicoacústico es el concepto de bandas críticas. Existen bandas que el oído humano percibe como una sola frecuencia en todo lo ancho, por lo que no identifica dos frecuencias distintas dentro de una misma banda, llamada banda crítica y así una frecuencia de alta intensidad opacará el resto de las frecuencias del espectro, el oído no es capaz de discernir diferencias pequeñas en frecuencia (Pérez, 2005).

Las bandas críticas no poseen un mismo ancho, es decir, estos no son constantes a lo largo de todo el espectro audible, así, en las partes bajas tienen un valor aproximado de 100 Hz y a frecuencias altas 4kHz por lo que la cantidad de bandas es mayor en la sección de la parte baja del espectro que la de más alto valor. Experimentalmente se ha determinado que pueden encontrarse 25 bandas críticas. El oído tendrá un comportamiento como el mostrado en la figura 44 (Castro & Mendieta, s.f.).

Figura 44.

Modelo técnico del oído humano



Nota. Modelo técnico del oído humano en función de las frecuencias auditivas. Adaptado de C. Pérez Vega. Compresión de audio y radio digital, p 6, <https://personales.unican.es/perezvr/pdf/compresion%20de%20audio%202011.pdf>.

5.4. Formato de compresión MPEG

MPEG son las siglas de *Moving Picture Experts Group*, Grupo de Expertos en Imágenes en Movimiento. Es una junta identificada como subcomité 29, grupo de trabajo 11 (ISO/IEC JTC1/SC29/WG11), formado en 1988 por la Organización Internacional de Normas, ISO (*Internacional Standards Organization*) en unión con la Comisión Internacional Electrotecnia, IEC (*International Electrotechnical Commission*), que tendría a su cargo la codificación o compresión de señales de audio o video. El objetivo principal era desarrollar un algoritmo de compresión que permitiera almacenar en un CD con hora y media de sonido y video de alta calidad. MPEG no discrimina entre si la señal es voz o música, codifica cualquier señal audible (Mangiaterra, s.f.).

El MPEG no especifica una técnica única de compresión, sino que presenta un conjunto de herramientas de compresión que pueden usarse en conformidad con reglas exactas de compresión. Estas reglas exactas facilitan el intercambio de flujo de bits entre aplicaciones diferentes.

Con la compresión que utiliza el MPEG se pierden ciertos datos, pero esta pérdida es generalmente imperceptible al ojo cuando se trata señales de video u oído humanos con las señales audibles.

Son varias las aplicaciones que requieren ahorro en el ancho de banda de transmisión utilizado, siendo obligatorio el uso de la compresión en las comunicaciones vía satélite y hoy día en las señales audibles que son operadas por medio de radio comercial digital o broadcasting, por ejemplo, en las emisiones de la técnica DAB (Millman, 2010).

El audio no comprimido produce un caudal binario de alrededor de 1.5 Mbit/s. Después de la compresión, los flujos binarios para canales monofónicos se sitúan entre 32 y 192 kbps y los estereofónicos, entre 128 y 324 kbps. El estándar de compresión de audio MPEG contempla tres capas de calidad subjetiva y complejidad crecientes; capa I, capa II y capa III. Soporta muestreo a 32, 44.1 y 48 khz. A 16 bits por muestra.

5.4.1. Capa I de MPEG

Es la capa más simple de las tres y proporciona audio de buena calidad a 192 kbits/s. Computacionalmente la más barata a tasas binarias mayores que 128 kbps, la máxima que soporta es de 448 kbits/s. Se usa principalmente en videoconferencia para lo que utiliza cuadros de 384 muestras de modo que el retardo no es apreciable. Es útil en las aplicaciones de grabación, tanto en

cinta como disco duro o discos magneto-ópticos, que aceptan la tasa de 384 kbps sin problemas. También llamada pre-MUSICAM utiliza el algoritmo PASC. Su principal ventaja es la relativa sencillez para implementar el codificador y el decodificador (Pardo, s.f.).

5.4.2. Capa II de MPEG

Usada en CD a tasas del orden de 128 kbps, Complejidad intermedia. Utilizado en TV digital. (aprox. 190 kbps). produce sus mejores resultados de calidad a 256 kbps, su nivel aceptable es 64 kbps por lo que se utiliza en transmisión de audio, televisión y productos multimedia. Su algoritmo se conoce bajo el nombre de MUSICAM. Permite obtener una calidad equivalente con un flujo menor con una reducción del 30 % al 50 % de la capa I, lo que implica un incremento moderado de la complejidad tanto del codificador como del decodificador (Pardo, s.f.).

La capa II utiliza una FFT de mayor resolución que la I, cuantificación más fina y una forma más eficiente de transmitir los factores de escala para las subbandas. El modelo psicoacústico empleado en esta capa es más complejo que el utilizado en la capa I. Proporciona audio con calidad de CD a 128 kbits/s por canal y la máxima tasa binaria que soporta es de 384 kbits/s.

5.4.3. Capa III de MPEG

Más compleja que las dos primeras. Es la que proporciona mayor compresión y se corresponde con MP3. La calidad es excelente hasta 64 kb/s (monoaural) y 128 kbps (estéreo). Se utiliza en telecomunicaciones y sistemas de sonido profesional, así como al nivel de usuario por parte de aficionados

con formación informática. Es de desarrollo más reciente y utiliza un modelo psicoacústico diferente. (Pardo, s.f.)

En la capa III de MPEG el control de pre ecos es una parte importante y, para ello, en esa capa se agrega una descomposición de las subbandas mediante la transformada del coseno discreto (DCT) modificada, con el fin de conseguir una división de frecuencia mucho más fina. En la capa III se agrega cuantificación no uniforme, en el sentido de que las señales de mayor nivel pueden enmascarar errores de cuantificación mayores. Además, se incluye codificación por entropía y conmutación dinámica de ventanas, con lo que se obtiene mejor resolución temporal y mejor control de los pre ecos (Studio 22, 2015).

Las tres capas soportan tasas binarias tan bajas como 32 kbps, de ellas, la capa I es la más simple de las tres y proporciona audio de buena calidad a 192 kbps. La máxima tasa binaria que soporta es de 448 kbps.

La capa II utiliza una FFT de mayor resolución que la I, cuantificación más fina y una forma más eficiente de transmitir los factores de escala para las subbandas. El modelo psicoacústico empleado en esta capa es más complejo que el utilizado en la capa I. Proporciona audio con calidad de CD a 128 kbits/s por canal y la máxima tasa binaria que soporta es de 384 kbits/s.

5.5. Codificador MPEG

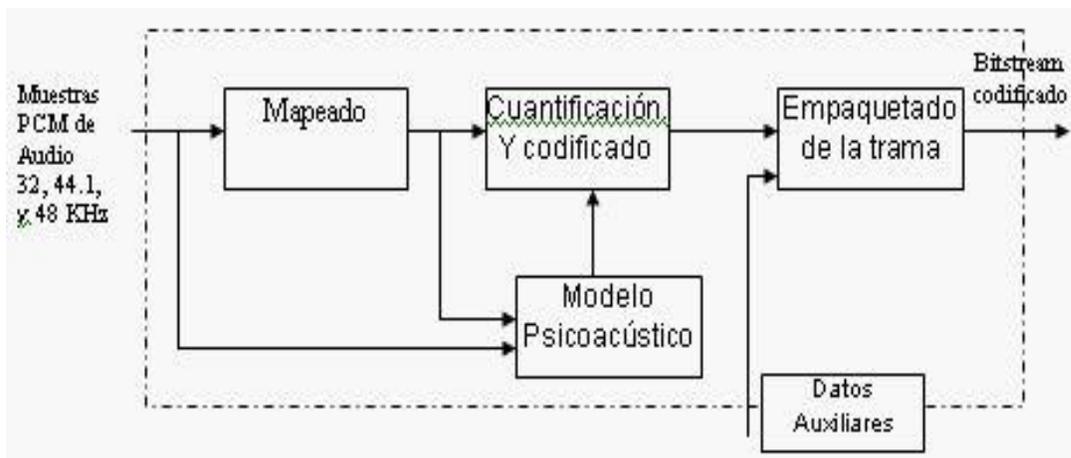
Es un codificador del tipo perceptual, representado en el diagrama de bloques de la figura 45, toma la señal digital de audio (PCM) y produce el bitstream comprimido para el almacenamiento o transmisión. Su

funcionamiento se basa en los fenómenos psicoacústicos mencionados; enmascaramiento de frecuencia y temporal y el de bandas críticas.

El algoritmo del codificador no está estandarizado, y pueden ser utilizados por varios medios, tales como la estimación del umbral de enmascaramiento auditivo, cuantificación y establecimiento de la escala (escalado) de la señal (UNED, 2009-2010).

Figura 45.

Codificador MPEG



Nota. Diagrama de bloques de un codificador MPEG. *Compresión audio MPEG.* <https://plusformacion.com/Recursos/r/Compresion-audio-MPEG>, consultado el 19 de octubre de 2023, de dominio público.

Las muestras de audio PCM ingresan al codificador arribando a un banco de filtros donde la banda total es dividida en una serie de 32 subbandas. El mapeo crea una representación filtrada y submuestreada de la señal de audio de entrada. Las muestras mapeadas pueden llamarse tanto muestras

de subbanda (como en capa I y II) o muestras de subbandas transformadas (como en capa III).

Un modelo psicoacústico crea un conjunto de datos para controlar la cuantización y codificación. Calcula las partes irrelevantes de la señal de audio entrante. Estos datos son diferentes dependiendo de la implementación del correspondiente codificador.

El cuantificador y el bloque de codificación crean un conjunto de símbolos codificados con las muestras de entrada mapeadas. Nuevamente, este bloque puede depender del sistema de codificación. El bloque de empaquetado de la trama ensambla el bitstream, en formato MPEG, con los datos procedentes del cuantificador y codificador y le agrega información adicional o datos auxiliares, por ejemplo, corrección de errores.

El bitstream de datos comprimidos puede contar con uno o dos canales de audio en alguno de los siguientes modos:

- Modo monofónico: un solo canal de audio
- Modo doble monofónico: parados canales de audio independientes (esta funcionalidad es idéntica al modo estéreo tradicional).
- Modo estéreo: para canales estéreo que poseen bits en común
- Modo Joint-Stereo: que toma ventaja de las correlaciones entre canales estéreo y de la irrelevancia de la diferencia de fase entre canales.

6. SISTEMA RADIO DIGITAL TERRESTRE DAB

En Guatemala las radios comerciales terrestres pertenecen a la tecnología de Amplitud Modulada AM y de Frecuencia Modulada FM, producen señales que contienen información a través del tiempo, tecnología que está pasando a ser obsoleta, dado que en muchos países se está migrando a la radio comercial de características digitales.

La radio digital comercial no es transmitida por Internet donde se paga por un servicio. La radio de tecnología digital comercial es como la analógica, un medio de distracción e información sin costo para el usuario quien solo debe contar o adquirir un radioreceptor de tecnología digital donde podrá escuchar música de alta calidad, leer información del clima, estado de las carreteras, entre otros. Las características de esta tecnología serán desarrolladas en el presente capítulo enfocado sobre el estándar DAB, (*Digital Audio Broadcasting*), Radio Sonora Digital Comercial (Salinas, 2012).

Para entrar en conocimiento de la tecnología de la radio digital comercial sonora, se dirá de ésta que trabaja con datos binarios (0s y 1s) en el tiempo, que una de sus virtudes es entregar una mejor calidad y más fuerte sonido.

En la actualidad se fabrican radioreceptores que incluyen la tecnología análoga, por lo que el escucha podrá tener acceso a sus programas conocidos en FM e ir adaptándose a las opciones especiales que presenta la digital.

Son varias las ventajas de una radio comercial digital sobre la analógica, por lo que en el presente trabajo se desarrolla el capítulo 8 con este contenido.

6.1. Estándares de la radio digital terrestre

Son tres los estándares que tomaremos en cuenta al desarrollar este punto, siendo estos:

- IBOC, *In Band On Chanel*
- DRM, *Digital Radio Mondiale*
- DAB, *Digital Audio Broadcasting*.

Se hace una descripción somera de las dos primeras para luego entrar en materia sobre la técnica DAB, tema base de este tratado.

6.1.1. Sistema IBOC (In-Band, On-Channel)

Es un estándar propio de los Estados Unidos aprobada por el NRSC (*National Radio System Committee*), en septiembre de 2005, bajo el estándar NRSC-5-A [8] desarrollado por la *iBiquity Digital Corporation*.

El sistema IBOC permite una migración suave entre la radio análoga a la radio digital, lo que hace que la radio difusión tanto en FM como en AM continúe prestándose, sobre las mismas bandas de frecuencia, adicionándoles las nuevas facilidades de la radio digital. El usuario podrá continuar utilizando sus receptores convencionales y de acuerdo con sus necesidades y recursos

migrar paulatinamente a receptores que le ofrezcan las bondades de la radio digital (García, 2014).

La Radio funciona tecnológicamente de manera muy similar a la transmisión de radio analógica, sin embargo, permite a los radiodifusores transmitir programas tanto en el formato analógico como en el digital, junto a una señal para datos de texto. El sistema inserta portadoras digitales en cualquiera de los dos lados del espectro de la señal analógica y emplea técnicas de codificación que evitan la interferencia entre las señales analógicas y digitales (Gutierrez, 2012)

6.1.2. Sistema DRM (Digital Rights Management)

El término DRM proviene del inglés *Digital Rights Management*, que significa sistema de gestión de derechos digitales. Se trata de una tecnología de protección aplicada por empresas que distribuyen contenidos digitales, es un sistema de radio que utilizan las bandas ocupadas por la AM de onda larga, onda media y onda corta de 150 a 529 kHz, de 530 a 1710 kHz y de 1711 kHz a 30 MHz respectivamente. En las tres bandas la radio AM se propaga por difracción de las ondas electromagnéticas, sigue la curvatura de la tierra, en onda media su alcance puede ser de cientos de kilómetros, indudablemente es pobre la calidad del servicio (García, 2014).

El estándar DRM es desarrollado por un consorcio sin fines de lucro cuyos fundadores incluyen las emisoras internacionales Radio France Internationale, BBC World Service, Deutsche Welle y Voice of America.

6.1.3. Sistema ISDB (*Integrated Services Digital Broadcasting*)

Por considerarlo importante también se trata el sistema ISDB. En el mundo de la radiofrecuencia se cuenta con la tecnología *Integrated Services Digital Broadcasting* (ISDB) o Sistema de Servicios Integrados de Radio Difusión Digital. Este progreso tecnológico lo desarrolló la Asociación de Industrias de Radio y Negociaciones (ARIB) de Japón para proporcionar flexibilidad, expansibilidad y concordancia a los servicios de difusión multimedia usando la red existente (DiBEG, 2022).

Este sistema se emplea en la radio y la televisión, usa multiplexores para que diferentes flujos de datos se puedan enviar a través de un mismo canal, transmite confiablemente gran cantidad de datos, brinda distintos servicios por lo que el sistema emplea esquema de modulación y protección de errores que pueden seleccionarse y combinarse de manera flexible, para integración de diferentes aplicaciones (DiBEG, 2022).

6.1.4. Sistema DAB (*Digital Audio Broadcasting*)

El sistema DAB (*Digital Audio Broadcast*) es la norma europea para transmitir programas de radio comercial mediante tecnología de codificación y transmisión digital, conocido también como Eureka 147, el estándar DAB, aceptado por la *International Telecommunications Union* (ITU), fue desarrollado desde finales de los años ochenta por un consorcio de 19 países europeos, con el propósito de modernizar los sistemas convencionales de radiodifusión.

DAB es un estándar mundial y está especificado por la ETSI (Instituto de Estándares Europeo) en la normativa ETSI 300401.

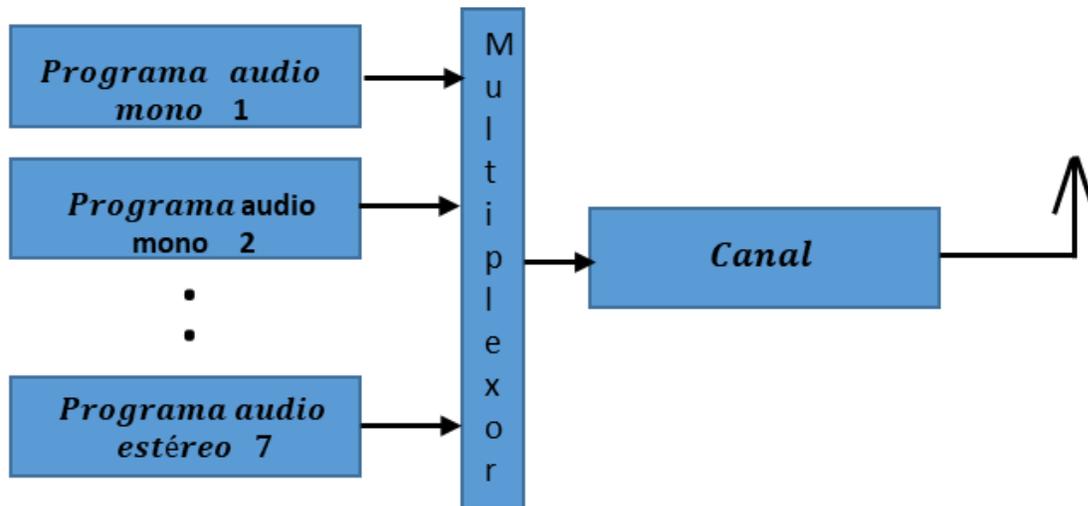
La técnica DAB al igual que FM tiene acceso a receptores domésticos y de bolsillo, pero su eficiencia es marcada en los receptores para automóviles, dado que el fenómeno de la recepción multitrayecto no es dañina como FM, es superada por la modulación empleada OFDM que provoca una suma de las señales que llegan al receptor por distintos caminos o multitrayectos.

En el sistema DAB se da una transmisión-recepción de audio, datos e imagen, se podrá apreciar en las características de los ejemplos de receptores presentados en el capítulo 7, éstos presentan en una de sus caras una pantalla, donde el auditorio podrá leer informes del tiempo, por ejemplo, además observar imágenes.

La figura 46 muestra una característica especial de la técnica DAB, por un mismo canal se puede transmitir el contenido de 6 o 7 programas de radio a través de un equipo multiplexor, por ejemplo, la BBC multiplexa 7 servicios diferentes, 4 servicios de audio de alta calidad a 192kbit/s (equivalente a CD estéreo) y 3 servicios audio mono de 96kbit/s normalmente para transmisión de información tipo noticias o deportes.

Figura 46.

Sistema de transmisión DAB



Nota. Capacidad de transmisión de un sistema DAB. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

Para que la transmisión de todos los programas estéreo pueda hacerse efectiva con buena calidad y ocupando un ancho de banda aceptable el sistema DAB depura las señales por procedimientos de compresión y codificación.

6.2. Generación de una señal DAB

Para comprender el proceso de conversión de las señales de audio a una señal *Digital Audio Broadcasting* se presenta la figura 47.

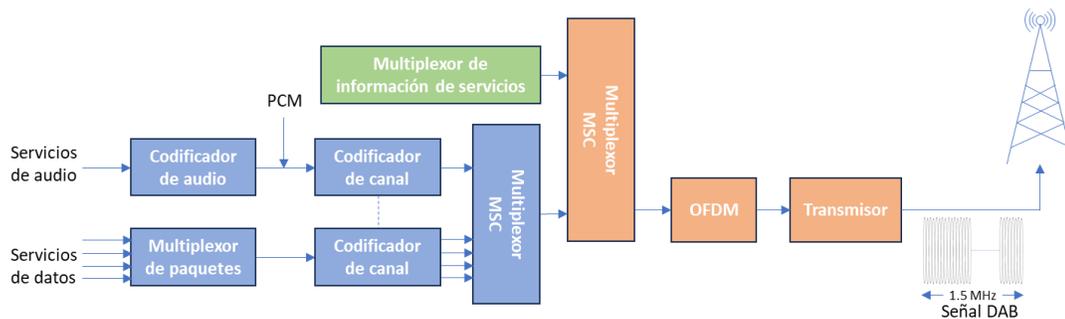
Los diferentes programas de audio estéreo ingresan al sistema a los circuitos conversores donde cada señal pasa de su característica analógica a digital por medio de la técnica Modulación de Impulso Codificado MIC (PCM

por las siglas en inglés, *Pulse Code Modulation*), tema desarrollado en el capítulo 2. Para su conversión las señales pasan por el proceso de muestreo, cuantificación y codificación, en la figura 47 el este proceso es marcado únicamente como PCM.

Luego de ser trasladada la señal de audio y datos a un bloque PCM, ingresa a los módulos codificadores de canal en donde es eliminada parte de la información no necesaria o frecuencias que el oído humano no escucha estando éstas dentro del espectro 0.3 a 20 kHz, sin menos cabo de la calidad del audio. Este fenómeno se logra por medio de la aplicación de medios de compresión, tema tocado en el capítulo 5.

Figura 47.

Generación de una señal DAB



Nota. Diagrama de bloques de un generador de señal DAB. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

En el proceso de compresión son eliminados sonidos, se reduce los datos con una relación de 1 a 7, la señal comprimida es codificada por medio del sistema Musicam-mpg produciendo cada bloque codificador un bit rate o

sea volumen de datos por segundo de 192 kbps conteniendo una señal con calidad CD, Disco Compacto.

Los diferentes trenes de audio de 192 kbps son empaquetados junto con los canales de datos en el bloque señalado como Multiplex de transmisión que también recibe el nombre de Canal Principal de Servicio (MSC).

Las distintas señales de audio, que pueden ser 6 y de servicio de datos, que han sido multiplexados en el MSC ingresan al Multiplexor de transmisión donde se combinan con la señal de información de control y servicio, formando las tramas de transmisión. El flujo de datos de transmisión es modulado en el circuito OFDM, Multiplex por División de Frecuencia Ortogonal: proceso por el que se reduce el número de unidades de información, bits, a transmitir para una misma señal MP2.

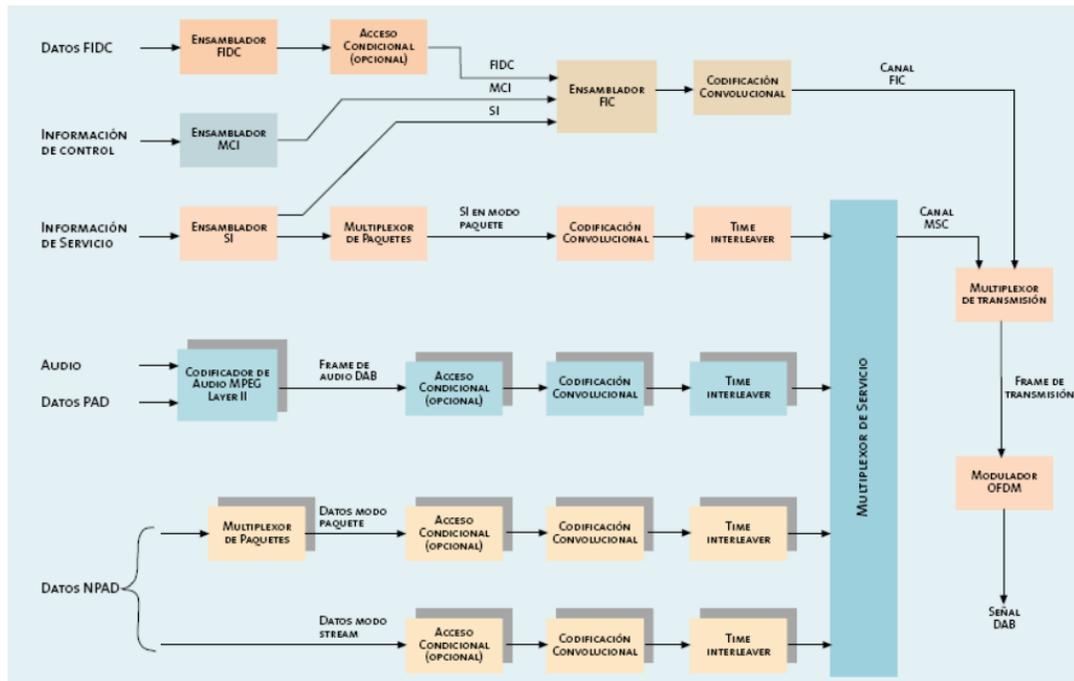
Las subportadoras van moduladas en D-PSK, Modulación por desplazamiento diferencial de fase. Al final la señal es trasladada a la banda de radio frecuencia, amplificada a través de un circuito amplificador de potencia para luego ser transmitida vía radiofrecuencia.

6.2.1. Arquitectura del sistema DAB

Para una descripción más amplia sobre la formación de la señal DAB se hace referencia al contenido del diagrama de bloques de la figura 48, donde se muestra la conformación de cada una de las señales que la integran: la del canal MSC, la del canal FIC y el canal de sincronización, de las características de cada una se hace una descripción en los siguientes párrafos con apoyo de la figura.

Figura 48.

Arquitectura del sistema DAB



Nota. Arquitectura funcional del sistema DAB. *Capítulo I. El Sistema DAB*, p. 20. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11307/fichero/MEMORIA%252F7+-+Cap%C3%ADtulo+1.pdf>

6.2.1.1. Canal de servicio MSC

El canal de Servicio Principal (MSC, *Main Service Channel*) transporta audio y datos NPAD y PAD (Datos Asociados al Programa).

Los datos PAD, se dedican a la información directamente relacionada con los programas de audio como: títulos musicales, autor, texto, entre otros., de las canciones en varios idiomas, que son vistas en la pantalla del dispositivo

receptor DAB. La capacidad del PAD es ajustable (mínimo de 667 bit/s con MPEG-1 o 333 bit/s con MPEG-2). (UNAM, s.f.)

En la parte de recepción, los datos PAD se extraen de la trama Musicam (sistema que transmite a 192 Kbps permitiendo obtener una calidad similar a CD), en el decodificador.

El Canal de Servicio Principal MSC, básicamente es un canal de datos dividido en sub-canales que son codificados convolucionalmente, para proveer una protección fuerte contra errores de bit, en el bloque Codificación Convolucional se entrelazan en el tiempo y frecuencia, puede ser tipo EEP (*Equal Error Protection*) o UEP (*Unequal Error Protection*), proporcional o desproporcional (UNAM, s.f.).

En el Canal de Servicio Principal, para una corrección de errores eficiente, con una codificación convolucional, es necesaria una distribución uniforme de los errores de bit del canal (antes del decodificador) producido por errores de ráfagas, por lo que algunos bits adyacentes pueden ser distorsionados por un desvanecimiento.

En OFDM esto se realiza en el tiempo y en frecuencia. Para alcanzar una distribución más uniforme de los bits mal recibidos en el flujo de datos antes del decodificador, los bits codificados serán extendidos sobre un gran intervalo de tiempo y de frecuencia antes de que sean pasados al canal físico. Este procedimiento es llamado *interleaving* (entrelazado) en tiempo y en frecuencia el proceso es efectuado en el módulo *Time Interleaver*. En el receptor este entrelazado tiene que ser invertido por el *deinterleaver* para restaurar el correcto orden del flujo de bits antes del decodificador.

En el MSC todos los canales: información y control, Información de servicio, Audio, Datos PAD y Datos NPAD, pasa por el proceso de los bloques *Codificación Convolucional* y *Time Interleaver*.

6.2.1.2. Canal de información rápida FIC

El Canal de Información Rápida (FIC, *Fast Information Channel*) se utiliza para que el receptor pueda tener acceso rápido a información, por lo que es un canal de datos no entrelazado con una protección contra errores fija. Es un canal de baja velocidad (4Kbps) que en particular es usado para enviar la Información de Configuración del Multiplex (MCI) y opcionalmente Información de servicio y servicios de datos (Gonzalez, s.f.).

6.2.1.3. Información de configuración del multiplex MCI

Multiplex Configuration Information MCI, que es la unidad que indica cómo está estructurado el multiplex y provee la siguiente información:

- Define la organización del sub-canal
- Enlista los servicios disponibles en el multiplex
- Establece las ligas entre los servicios y los componentes del servicio
- Establece enlaces entre los sub-canales y los componentes del servicio
- El manejo de la reconfiguración del multiplex

6.2.1.4. Canal de sincronización

El Canal de Sincronización es utilizado de manera interna por el sistema de transmisión para realizar las funciones básicas de demodulación, como la sincronización de la trama de transmisión, control automático de frecuencia, estimación del estado del canal y la identificación del transmisor.

La combinación de los tres canales es efectuada en el circuito Multiplexor de Transmisión cuya salida convertida en un solo flujo que es identificado como la trama del múltiplex, representado en la figura 49. (Gonzalez, s.f.).

6.3. Trama del múltiplex de transmisión

La trama de la señal que sale del multiplexor de transmisión es representada en la figura 49, que debe ser leída de derecha a izquierda.

El primer bloque enfoca un canal de audio con su respectivo canal de datos asociado que porta información ya descrita como título del programa o título de una canción, intérprete, entre otros.

El último bloque muestra la forma en que se empaqueta el canal de servicio principal con el canal de información rápida para producir una sola señal.

El flujo de datos que produce el multiplexor de transmisión tiene una capacidad total de 3 Mbps como producto del canal de servicio principal MSC que aporta 2.3 Mbps, tomando como ejemplo la estación BBC que multiplexa

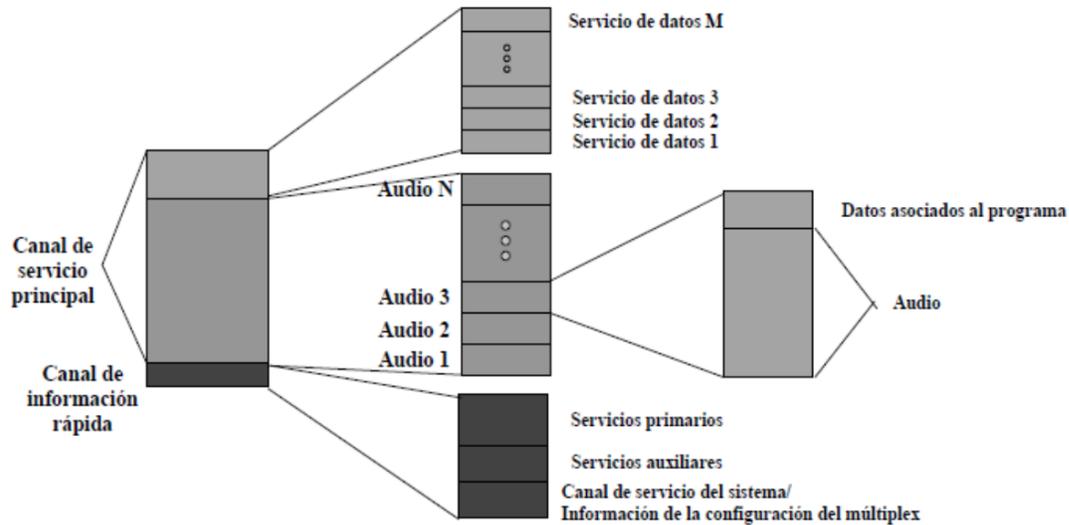
7 servicios divididos en 4 servicios de audio de alta calidad a 192 kbps cada uno y 3 de servicio de audio mono de 96 kbps.

Considerando la capacidad total del canal MSC presentamos algunas configuraciones de distribución de los 3 Mbps para las que se varía la tasa de bits y el nivel de la información: (Gimeno, 2012).

- 5 programas de audio a 256 kbps. Con 58 kbps de otros datos de la programación.
- 6 programas de audio a 192 kbps (calidad CD estéreo). Con 45kbps para otros programas de datos.
- 2 programas de audio de 256 kbps y 3 programas de audio de 192 kbps, con un canal de datos de 150 kbps.
- 18 programas de audio usando 96 kbps (CD's mono). Con 1 canal de datos usando 1824 kbps.

Figura 49.

Trama del múltiplex de transmisión



Nota. Composición de la trama del múltiplex de transmisión. *Adaptación de una emisora FM a DAB,* *p.* *17.*

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/18418/ADAPTACI%C3%B4N%20DE%20EMISORA%20FM%20A%20DAB.pdf>

La señal multiplexada ingresa al modulador OFDM paso esencial en un sistema DAB, dado que esta tecnología es el soporte principal por sus especiales características (Gimeno, 2012).

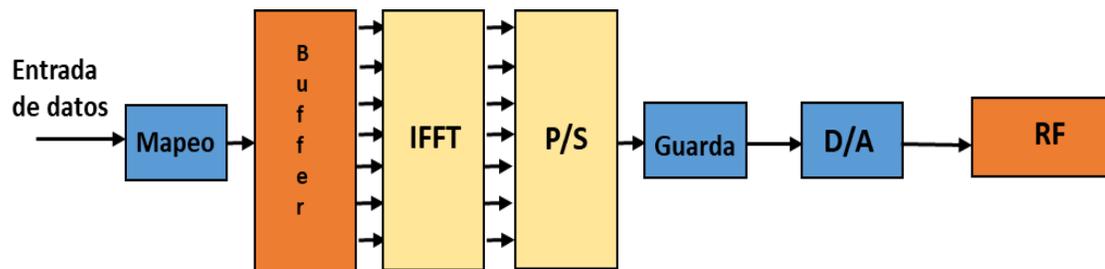
6.4. Modulador OFDM

El modulador OFDM, tema que ha sido desarrollado previamente, le da robustez a los canales de radiodifusión terrestre utilizado por los sistemas de radio comercial sonora DAB.

La figura 50 representa en un diagrama de bloque el modulador OFDM. El flujo de datos que ingresa al modulador OFDM a través de un circuito modulador o mapeador de técnica M-PSK o M-QAM es de tipo serial, (codificado o sin codificar), como se mencionó anteriormente de serial pasa a varios flujos paralelos formando símbolos de n bits, a cada uno se le asigna una subportadora.

Figura 50.

Modulador OFDM



Nota. Diagrama de bloques del modulador OFDM. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

Por medio de la unidad IFFT se convierten un número de puntos de datos complejos (amplitud y fase de cada componente) de longitud N la cual es una potencia de 2 en una señal en el dominio del tiempo de igual número de puntos. A la salida del modulador el flujo de datos es convertido en una señal en el dominio del tiempo y pasados al formato serial agregándose un intervalo de guarda en cada símbolo OFDM para suprimir la interferencia intersímbolo ISI causado por la distorsión multitrayecto (Muñoz, s.f.).

La señal OFDM por medio del conversor digital analógico D/A, vuelve a ser analógica en banda base para ser modulada en RF y sometida a un amplificador de potencia alimentando de esta forma una antena de transmisión y con su respectiva radiofrecuencia.

6.5. Radiofrecuencias seleccionadas para sistemas DAB

La especificación Eureka 147/DAB permite el uso un alto número de frecuencias centrales. Los valores se detallan en las tablas 5, 6 y 7.

Si se suma la cantidad de las tres bandas, se dispone de 99 canales y si cada uno opera con 6 radioemisoras, en el sistema digital se puede disponer de un gran número de posibles empresarios por frecuencia, el estado podría rentar no la frecuencia sino la operación de cada una de las radioemisoras.

Tabla 4.

Frecuencias centrales de la banda I

Canal		Frecuencia MHz
2	A	47,936
2	B	49,648
2	C	51,360
2	D	53,072
3	A	54,928
3	B	56,640
3	C	58,352
3	D	60,064
4	A	61,936
4	B	63,648
4	C	65,360
4	D	67,072

Nota. Frecuencias de la banda I. *Capítulo I. El sistema DAB, p. 29.*

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11307/fichero/MEMORIA%252F7+-+Cap%C3%ADtulo+1.pdf>

Tabla 5.

Frecuencias centrales de la banda III

Canal		Frecuencia MHz
5	A	174,928
5	B	176,640
5	C	178,352
5	D	180,064
6	A	181,936
6	B	183,648
6	C	185,360
6	D	187,072
7	A	188,928
7	B	190,640
7	C	192,352
7	D	194,064
8	A	195,936
8	B	197,648
8	C	199,360
8	D	201,072
9	A	202,928
9	B	204,640
9	C	206,352
9	D	208,064
10	A	209,936
10	B	211,648
10	C	213,360
10	D	215,072
10	N	210,096
11	A	216,928
11	B	218,640
11	C	220,352
11	D	222,064
11	N	217,088
12	A	223,936
12	B	225,648
12	C	227,360
12	D	229,072
12	N	224,096
13	A	230,784
13	B	232,496
13	C	234,208
13	D	235,776
13	E	237,488
13	F	239,200

Nota. Frecuencias de la banda I. *Capítulo I. El sistema DAB, p. 30.*

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11307/fichero/MEMORIA%252F7+-+Cap%C3%ADtulo+1.pdf>

Tabla 6.*Frecuencias centrales de la banda L*

Canal		Frecuencia MHz
L	A	1,452,960
L	B	1,454,672
L	C	1,456,384
L	D	1,458,096
L	E	1,459,808
L	F	1,461,520
L	G	1,463,232
L	H	1,464,944
L	I	1,466,656
L	J	1,468,368
L	K	1,470,080
L	L	1,471,792
L	M	1,473,504
L	N	1,475,216
L	O	1,476,928
L	P	1,478,640
L	Q	1,480,352
L	R	1,482,064
L	S	1,483,776
L	T	1,485,488
L	U	1,487,200
L	V	1,488,912
L	W	1,490,624
L	1	1,452,816
L	2	1,454,560
L	3	1,456,304
L	4	1,458,048
L	5	1,459,792
L	6	1,461,536
L	7	1,463,280
L	8	1,465,024
L	9	1,466,768
L	10	1,468,512
L	11	1,470,256
L	12	1,472,000
L	13	1,473,744
L	14	1,475,488
L	15	1,477,232
L	16	1,478,976
L	17	1,480,720
L	18	1,482,464
L	19	1,484,208
L	20	1,485,952
L	21	1,487,696
L	22	1,489,440
L	23	1,491,184

Nota. Frecuencias de la banda I. *Capítulo I. El sistema DAB*, p. 31.

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11307/fichero/MEMORIA%252F7+-+Cap%C3%ADtulo+1.pdf>

6.6. Recepción de la señal DAB

Al igual que en la tecnología analógica para escuchar una radio, en la tecnología digital, se elige la estación deseada, para este caso van desde los 174 MHz a 240MHz (en la banda III), entre 1452MHz y 1492Mhz (en la banda L) y entre 47 MHz y 67 MHz (en la banda I). El Sintonizador selecciona por medio de un menú de texto sencillo el programa deseado. El receptor proporcionará música, además datos con información del clima, deportes, estado de carreteras, entre otros.

6.6.1. Receptor Digital Audio Broadcasting DAB

Básicamente un radioreceptor con tecnología DAB está integrado por los módulos: sintonizador, demodulador OFDM, decodificador de canal, decodificador de audio, un demultiplexor de paquetes, un circuito controlador y la interfaz de usuario, este se representa en la figura 51.

La señal luego de pasar por el sintonizador, donde es convertida digital, alimenta al demodulador OFDM y decodificador de canal para eliminar los errores de la transmisión. La información contenida en el FIC es pasada a la interfaz de usuario para la selección del servicio y para fijar adecuadamente la estación de recepción. Para la adecuada aceptación de un programa de radio estéreo son procesados los datos MSC que conectan el demultiplexor de paquetes al decodificador de audio.

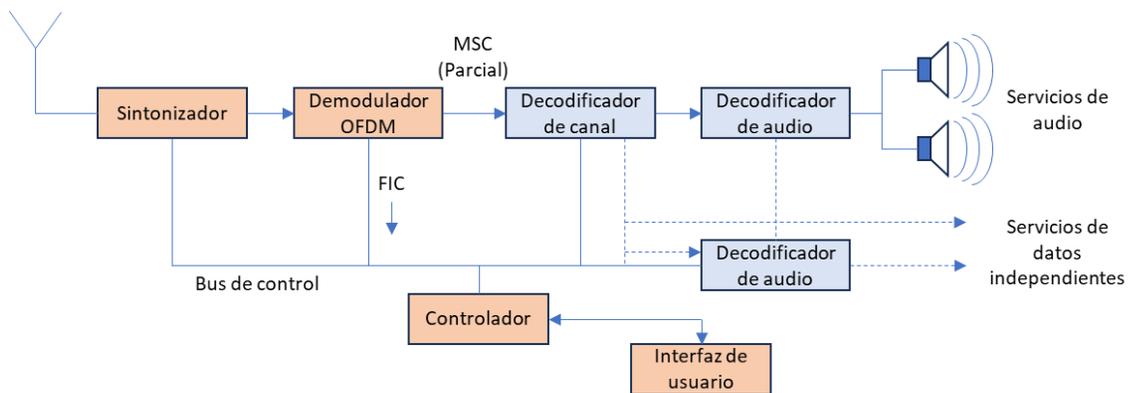
Se selecciona en el sintonizador análogo, la salida convertida a digital del cual se alimenta el demodulador de OFDM y decodificador del canal para eliminar errores de la transmisión. La información contenida en el FIC se pasa al interfaz utilizado para la selección del servicio y se utiliza para fijar el

receptor apropiadamente. Los datos del MSC se procesan más a fondo en un decodificador audio para producir las señales audio izquierdas y derechas o en un decodificador de los datos (paquete Demux). (Pérez, s.f.)

El receptor decodifica programas de audio estéreo con una tasa binaria de 256 kbps. En caso de servicio de pago, el receptor informa al usuario.

Actualmente se cuenta con tres tipos de receptores, el fijo para uso en casa, el portátil y móvil para uso en automóvil de cuyas características se describirán en párrafos posteriores en capítulo dedicado.

Figura 51.
Receptor DAB



Nota. Diagrama de bloques del receptor DAB. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

7. CARACTERÍSTICAS DE LOS RADIOS DIGITAL AUDIO BROADCASTING

En el presente tema se presentan muestras o ejemplos de estos dispositivos de distintas fábricas con sus propios parámetros apegados a la tecnología DAB.

Inicialmente se presentan diferentes tipos de radio receptores, habiendo de uso doméstico, oficinas, tipo fijo, también para recepción en móviles y portátiles o de bolsillo. Algunos son de aplicación mixta tecnología digital y frecuencia modulada. Todos se encuentran hoy en día en el mercado internacional. Se finaliza el capítulo con muestras de radiotransmisores DAB.

Hay tres tipos de receptores (clasificados según el tipo de recepción para la cual se diseñen:

- Fijo, para casa. Aquí entran receptores Hi-Fi (con display-pantalla) para manejar los datos de los servicios asociados que apuntábamos al principio) y tarjetas DAB para ordenadores.
- Portátil. El típico, de momento sólo transmiten audio, aunque ya están empezando a aparecer algunos multimedia (que consumen mucha batería)
- Móvil para los coches. Como estos receptores son bastante caros una empresa inglesa (Radioscope) ya ha preparado un sistema de

recepción a través del ordenador por medio de un programa decodificador de la señal DAB procedente de una antena normal.

Para los países donde se está efectuando la transición de sistema analógico a digital se están diseñando receptores que incluyen FM, AM y DAB a la vez.

7.1. Radioreceptores tecnología DAB

Es amplio el mercado de radio receptores desarrollados con tecnología digital audio broadcasting, solo presentaremos tres escogidos al azar. Las características son tomadas del material de publicidad perteneciente a casas vendedoras.

7.1.1. Radioreceptores tecnología DAB, tipo fijo

Entre estos tipos de radioreceptores podemos encontrar el Panasonic RF-D30BTEG-W, cuyas principales características se enlistan a continuación, así mismo se presenta en la imagen 52 su aspecto físico.

- Radio digital compacta DAB+ en diseño con funcionamiento de red y batería
- Bluetooth para reproducir música cómodamente desde el smartphone
- Bandas de radio compatibles: FM (10)(87.50-108.00 MHz (50K step) / DAB Plus (10) (Band III, 174.928-239.200 MHz)
- Tipo de amplificador: 1ch. AMP analog

- RMS Output Power: 2W (4 Ohm, 1 kHz, 10%THD)
- Alimentación: DC-In
- Voltaje: 220-240V, 50Hz
- Display digital retroiluminado
- Consumo de potencia nominal: 10 W
- Consumo de potencia en espera: 0.3 W
- Idiomas: inglés, italiano, alemán y francés
- Autoapagado.
- Protección IPX4
- Dimensiones (W x H x D): 261 x 154 x 83 mm
- Peso con baterías: 1.3 Kg
- Peso sin baterías: 1.1 Kg

Figura 52.

Radio DAB tipo fijo



Nota. Radio DAB tipo fijo, marca Panasonic, modelo RF-D30BTEG-W. <https://m.media-amazon.com/images/I/71kDjXyxEPL.AC.SX679.jpg>. Consultado el 20 de octubre de 2023, de dominio público.

7.1.2. Radioreceptor tecnología DAB, tipo portátil

Dentro de la amplia gama de los dispositivos radioreceptores DAB portátiles podemos considerar el radio marca Pomya, modelo DAB-P9, sus principales características son:

- Soporte de formato: DAB+ y radio FM

- DAB/DAB + Frecuencia: Banda III (174.00 – 240.00 MHz.)
- Frecuencia FM: 87.5 – 108 MHz con RDS
- Número de preajustes: 10 canales DAB y 10 canales FM
- Capacidad de la batería: Litio 1000 mAh
- Altavoz: 23 mm, 4 Ohm, 2W
- Pantalla LCD con resolución de 128 x 64

Figura 53.

Radioreceptor DAB portátil



Nota. Radioreceptor DAB tipo portátil, marca Pomya, modelo DAB-P9. https://m.media-amazon.com/images/I/61naSH4PRmL.AC_SX679.jpg. Consultado el 20 de octubre de 2023, de dominio público.

7.1.3. Radioreceptor tecnología DAB para automóviles

En su gran mayoría y en países en donde ya se migró a radio digital, los vehículos ya cuentan con radios que soportan esta tecnología, de igual forma existe la opción para que pueda adaptarse estos radios a vehículos cuyos radios aún no tienen esta función. Se analiza a continuación el radio marca Xiaoling, modelo Car DAB. Características principales:

- Radio FM/AM/DAB
- Reproductor de formato MP3
- Conectividad Bluetooth
- Control remoto inalámbrico
- Voltaje: 12V
- Bandas de señal soportadas: DAB, DAB+, FM, AM
- Peso: 400g
- Potencia: 60W
- Temperatura de trabajo: 10-60 °C
- Chip amplificador: TDA7388
- Ranura para tarjeta flash
- Interfaz USB versión 2.0
- Formatos de audio compatibles MP3, WMA, WAV, FLAC

Figura 54.

Radioreceptor DAB tipo automóvil



Nota. Radioreceptor DAB tipo automóvil, marca Xiaoling, modelo Car Dab. https://m.media-amazon.com/images/I/71pFa9BnwqL.AC_SX522.jpg. Consultado el 20 de oct. de 23, de dominio público.

7.2. Radiotransmisores tecnología DAB

En la actualidad también es grande el mercado de fabricantes de radiotransmisores que operan con tecnología DAB, en este punto se presentan las especificaciones como frecuencia de transmisión, tipo de voltaje de alimentación, AC o DC, que publican empresas de fábricas y de ventas. Se les determinara como N.

7.2.1. Transmisor modelo 1

Se comparte a continuación algunas especificaciones principales del transmisor marca Syes, modelo DAB TX 500w:

- Banda de frecuencia: VHF-III (174 a 230 MHz o 160 a 260 MHz *)
- Totalmente compatible con el estándar TS 102 428 (DAB/DAB+/DMB)

- Alta eficiencia y tamaño compacto
- Entradas
 - ETI dual (radio)
 - Ethernet EDI: 2xGBE + 1xSFP
 - Sat * (ranura DVB-S / S2-multistr.- CAM)
- Transmisión RF
- Totalmente calificado para SFN – Conmutación de entrada sin hit
- Frecuencia ágil: corrección previa estática o adaptativa (tanto lineal como no lineal)
- Diseño estandarizado de banda ancha
- OCXO incorporado de alta estabilidad
- Entrada para fuente externa opcional
- Receptor GPS incorporado
- Suministro de voltaje monofásico de alta eficiencia
- Pantalla del panel frontal y SNMP/HTTP para control directo y remoto de equipos.

Figura 55.

Radiotransmisor DAB modelo 1



Nota. Radiotransmisor DAB marca Syes, modelo DAB TX 500w. <https://starcom.es/producto/syes-transmisor-dab-tx-slim2-01-vhf-sd-pcm-2ppt/>. Consultado el 20 de octubre de 2023, de dominio público.

7.2.2. Transmisor modelo 2

Se comparte a continuación algunas especificaciones principales del transmisor marca Onestatic, modelo OneDriver MultiD:

- Chasis compacto de 1U rack 19"
- Potencia de salida (modo común) hasta 150W rms
- Totalmente compatible con las modulaciones DAB/DAB+/T-DMB
- Circuitos de pre-corrección adaptativa de banda ancha

- 3 entradas ETI independientes
- No necesita un combinador RF externo para operar en canales adyacentes
- Función de receptor GPS / GLONASS de alta estabilidad
- SNMP, interfaz web y pantalla táctil
- Rango de frecuencia ágil: VHF Banda III – de 174 a 240 MHz (hasta 260 MHz, opcional)
- Modulador DAB/DAB+/T-DMB, norma EN 300401, ETS 300 799
- Entradas: 4x ETI (NI[G703], NA5376[G704] o NA5592[G704]) BNC (h), 75 Ohm
- Modalidad de transmisión: Modo I, II, III, IV
- Chassis: 1U rack 19"
- Dimensiones (W x H x D): 472 x 43.6 x 460.5 mm
- Peso: 7.5 Kg
- Pantalla táctil TFT
- Temperatura operativa: -5°C +45°C

- Alimentación: Monofásica 100÷240 V~ 50/60 Hz, Enchufe IEC320 C14

Figura 56.

Radiotransmisor DAB modelo 2



Nota. Radiotransmisor DAB, marca Onestatic, modelo OneDriver MultiD.
<http://www.onetastic.com/wp-content/uploads/2017/10/ONEDRIVER-MultiD-3-Channels.jpg>.
Consultado el 20 de octubre de 2023, de dominio público.

Para simplificar las operaciones de mantenimiento, el módulo amplificador y la fuente de alimentación se pueden reemplazar individualmente sin tener que desmontar el equipo del chasis.

Diseñado para aplicaciones de baja potencia, Onedriver MultiD revoluciona el concepto de espacio, y también puede utilizarse para cubrir túneles de carretera y ferrocarril, así como mejorar la recepción indoor en zonas densamente pobladas.

7.2.3. Radiotransmisor DAB modelo 3

Se comparte a continuación algunas especificaciones principales del transmisor marca RFE Broadcast, modelo TS Power:

- Dimensiones compactas (rack de 19")
- Potencia de salida hasta 12000W rms (COFDM), hasta 20000W rms (ATSC) o hasta 24000W p.s. (análogo)
- Un excitador (driver doble como opción), con circuitos de pre-corrección
- Varias etapas de amplificador (de 2 a 8 según el modelo y el nivel de potencia de salida)
- Una unidad de control y monitoreo, con cambio incorporado sobre el sistema (Onelogic);
- Un sistema innovador y altamente eficiente de refrigeración líquida
- Tecnología de amplificador de banda ancha o banda ancha de alta eficiencia tanto en bandas UHF como VHF
- Driver simple o doble
- Redundancia mejorada en unidades de fuente de alimentación
- DVB-T / H / T2, ISDB-T / Tb, DAB / DAB + / T-DMB, ATSC, PAL, NTSC, modulaciones NICAM totalmente compatibles
- Convertidor de Re-Multiplexor / Combinador de Capa / TS a BTS (188 a 204 bytes) integrado para ISDB-Tb
- Circuitos de pre-corrección adaptativa

- Receptor GPS / GLONASS de alta estabilidad integrado con batería
- Interfaces de entrada flexibles (ASI/BTS/SMPTE-310M, ETI, EDI, IP, Satellite, audio y video analógico)
- Unidad de control y monitoreo lógico con sistema integrado de cambio y conmutación

Figura 57.

Radiotransmisor DAB modelo 3



Nota. Radiotransmisor DAB marca RFE Broadcast, modelo TS Power. <https://www.rfebroadcast.com/products/dab-ts-power-systems/>, consultado el 20 de oct. de 23, de dominio público.

8. VENTAJAS DE LA TECNOLOGIA DIGITAL EN LA RADIO COMERCIAL

Este tema sobre las ventajas de la tecnología digital es enmarcado dentro de la comparación entre los sistemas de radio analógico FM y la tecnología DAB Digital Audio Broadcasting.

Considerando la capacidad de transmisión, mientras una estación FM puede únicamente transmitir un programa estéreo, DAB permite transportar hasta 6 programas estéreo de 192 kb/s por medio de un circuito multiplexor con capacidad de aproximadamente 1.5 Mbit/s. La figura 58 esquematiza este punto.

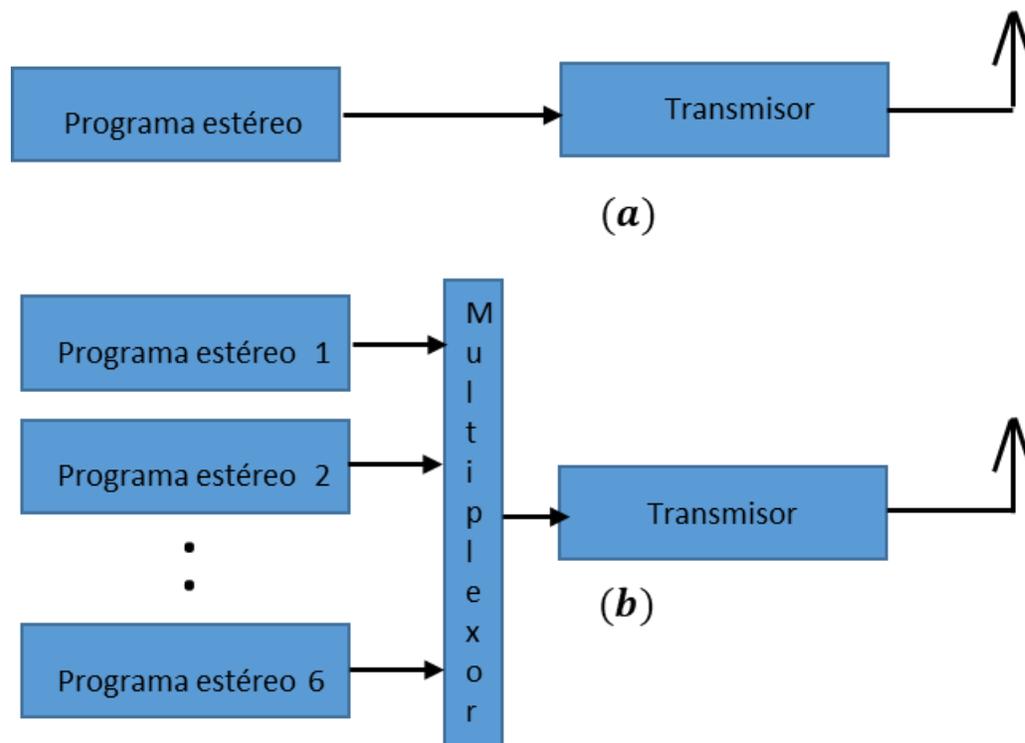
La selección de la estación a escuchar en DAB se hace a través de un menú de texto sencillo escribiendo, por ejemplo, el nombre del programa, en FM se hace por medio de la sintonía de una frecuencia visualizado su valor en una pantalla digital.

En FM se presenta una degradación de la calidad de recepción de la señal tanto en las zonas urbanas como en las zonas rurales causadas por los desvanecimientos provocados por los multitrayectos que causan los rebotes de la radio frecuencia en edificios, montañas, árboles, automóviles, entre otros, facilitando interferencias y perturbaciones en los radios receptores. La técnica DAB disminuye estos males mediante la transmisión COFDM (codificación OFDM) que utiliza un sistema de codificación para distribuir la información entre un elevado número de frecuencias.

En FM se recibe se escucha únicamente voz y música. DAB permite la recepción, además de audio y música, de servicios de datos e incluso gráficos y vídeo, muestra en la pantalla el menú de programación, publicidad, información actualizada sobre el tráfico o el clima, el estado de la ruta por el que se desplace un automóvil, letras de canciones, titulares de noticias, precios de acciones, entre otros (Graham, 2012).

Figura 58.

Capacidad de transmisión FM vs. DAB



Nota. Capacidad de transmisión (a) señal FM y; (b) señal DAB. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

En nuestro medio las radio emisoras para tener amplia cobertura necesitan de estaciones repetidoras las que utilizan distinto valor de

frecuencias, al transmisor principal, así por ejemplo la radio FM Globo en la ciudad capital utiliza la frecuencia 98.9 MHz como estación piloto, para tener alcance en otras regiones usa en el oriente 94.7 MHz, para el occidente 95.9 MHz y en el sur 105.9 MHz, no así DAB que abarca grandes zonas geográficas con una sola señal ininterrumpida utilizando una misma frecuencia, en un receptor dispuesto en una automóvil, el conductor podrá desplazarse por un país entero, escuchando la misma sin resintonizar y sin sufrir desvanecimiento en la señal.

DAB posee mayor calidad en el audio, presenta una calidad de sonido similar al de un CD, utiliza un sistema de compresión de sonido llamado MUSICAM que elimina la información no audible reduciendo la cantidad de datos a transmitir. DAB elimina la interferencia entre canales. FM no elimina ese tipo de interferencia.

FM que utiliza el espectro 88 a 108 MHz tiene capacidad para que puedan transmitir 50 radioemisoras comerciales con un ancho de banda cada una de 400 kHz, DAB que utiliza un ancho de banda de 1.7 MHz por estación, en la banda I tiene capacidad para 12 canales, en la banda III 26 y en la banda L 26, dando un total de 104 canales y si transmite 4 estaciones en cada canal puede disponer el usuario de más de 400 programas de voz y música. DAB mejora en el aprovechamiento del uso del espectro.

La tecnología DAB permite el envío de una gran cantidad de información de diferentes tipos, es posible crear grupos de usuarios que serán capaces de recibir servicios exclusivos, debido a que cada receptor puede ser direccionado, en la tecnología analógica eso no es posible (Graham, 2012).

DAB contiene un canal de información donde a través de un circuito multiplexor agrupa datos de fecha y hora, radio búsqueda, avisos de emergencia, sistemas de posicionamiento global, etc. FM no dispondrá de ese servicio.

En los países donde está ya operación la tecnología DAB, se cuenta con una amplia gama de receptores, así, receptores de radio fijas, móviles y portátiles con pantallas incluidas, las computadoras personales y algunos teléfonos móviles.

La tecnología de la radio comercial continúa en avance, así de DAB se está desplazando hacia DAB+ y hacia DBD.

La radio DAB permite la transmisión de sitios web para su visualización en los receptores de radio digital, los cuales deben estar equipados con software de búsqueda, también permite ofrecer imágenes, gráficos animados, archivos MP3 o videos.

Igual cobertura con menor potencia, DAB logra una amplia cobertura empleando transmisores de baja potencia contribuyendo a una reducción de costos en cuanto al consumo de energía eléctrica.

Con el sistema DAB se logra un uso eficiente del espectro radioeléctrico. Con DAB se elimina los efectos de interferencia intersímbolo ISI e intercanal ICI al incluir el prefijo cíclico en el modulador OFDM.

El sistema DAB Proveerá una recepción confiable y robusta para servicios de audio de alta calidad, incluyendo multimedia hacia receptores portátiles: móviles y fijos (Graham, 2012).

9. MIGRACIÓN DE LA RADIO COMERCIAL SONORA DE TECNOLOGIA ANALÓGICA A TECNOLOGIA DAB, DIGITAL AUDIO BROADCASTING

Este capítulo busca dar los pormenores técnicos de una futura migración de la radio análoga en Guatemala a radio digital con tecnología Digital Audio Broadcasting.

9.1. Consideraciones para la migración de una radio comercial sonora de tecnología analógica a tecnología DAB, Digital Audio Broadcasting

La migración de la radio comercial analógica a digital en Guatemala puede llevarse a cabo durante un tiempo de convivencia entre ambas tecnologías, para tal efecto deben considerarse varios aspectos.

- Los radios receptores. Hoy en día existen radioreceptores que han sido contruidos en varias fábricas para operar en cualquiera de los dos ámbitos, como ejemplo de esta aseveración se muestran dos fotografías con modelos DAB/FM, por lo que todo usuario podrá elegir sin molestia estaciones de una o de otra mediante un sencillo menú.
- Frecuencias de operación de ambas tecnologías. Para tal situación se presentan dos tablas con contenido de radiofrecuencias donde se han enmarcados con color rojo las bandas: I, III y L, ámbito donde operan los transmisores DAB y con color celeste la banda II asignada a FM. Se ve claramente que no hay coincidencia en ninguno de los valores, son

completamente diferentes por lo que pueden operar simultáneamente sin ninguna molestia o interferencia entre una y otra.

- Torres para soporte de antenas. En caso de utilizar las existentes deben analizarse las posibilidades de ampliación carga y altura para lo cual habrán de efectuárseles diversas pruebas de su estado, siendo algunas las de verticalidad y torque, características de cimentación, medición de puesta a tierra, tensión de los arriostres, estado del pararrayos y su soporte, entre otros. El personal encargado de efectuarlas debe ser calificado en la materia.

En el apartado 7.1 del capítulo 7, se menciona varios radioreceptores con tecnología dual, es decir, que opera en bandas de frecuencia FM y bandas de frecuencia DAB.

Tabla 7.

División de gamas de frecuencias de radiotransmisión

Designación	Gamas de frecuencias (MHz)		
	Región 1	Región 2	Región 3
I	47-68	54-68	47-68
II	87,5-108	88-108	87-108
III	174-230	174-216	174-230
IV	470-582	470-582	470-582
V	582-960	582-890	582-960

(a)

Continuación de la tabla 7.

Símbolo literal	Utilización en el campo del radar (GHz)		Radiocomunicaciones espaciales	
	Gama del espectro	Ejemplos	Designación nominal	Ejemplos (GHz)
L	1-2	1,215-1,4	Banda de 1,5 GHz	1,525-1,710
S	2-4	2,3-2,5 2,7-3,4	Banda de 2,5 GHz	2,5-2,690
C	4-8	5,25-5,85	Banda de 4/6 GHz	3,4-4,2 4,5-4,8 5,85-7,075
X	8-12	8,5-10,5	–	–
Ku	12-18	13,4-14,0 15,3-17,3	Banda de 11/14 GHz Banda de 12/14 GHz	10,7-13,25 14,0-14,5
K ⁽¹⁾	18-27	24,05-24,25	Banda de 20 GHz	17,7-20,2
Ka ⁽¹⁾	27-40	33,4-36,0	Banda de 30 GHz	27,5-30,0
V	–	–	Banda de 40 GHz	37,5-42,5 47,2-50,2

(b)

Nota. Cuadros de radiofrecuencias, en rojo se enmarcan las frecuencias de operación DAB y en color celeste las frecuencias de operación FM. *Recomendación IUT-R V.431-8. Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones, p (5)* https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-8-201508-!!!PDF-S.pdf.

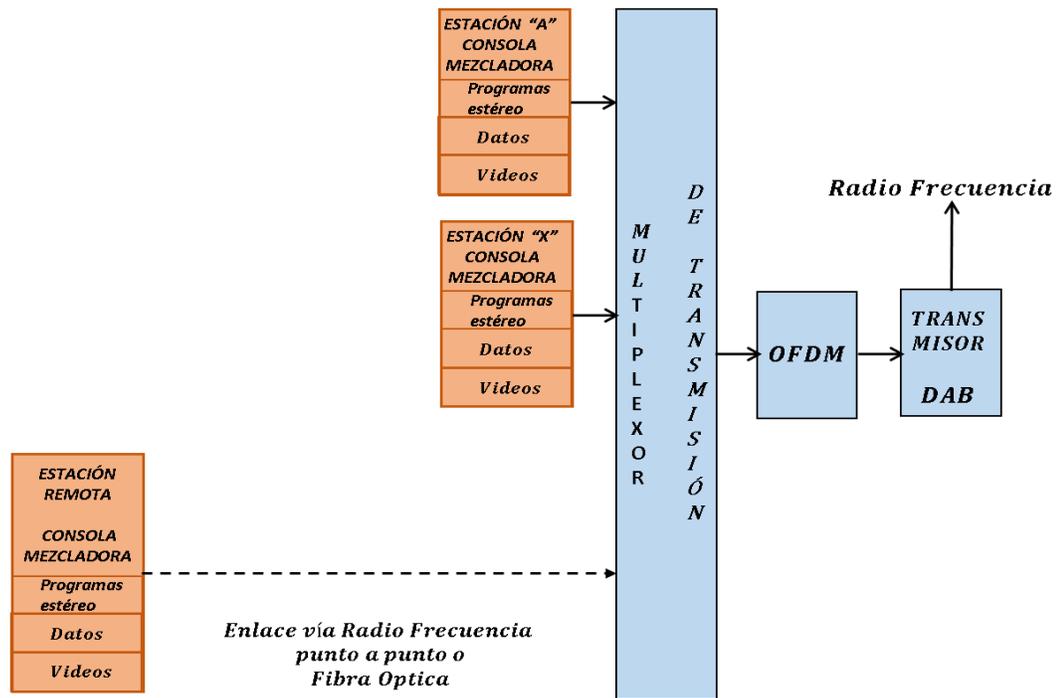
- En cuanto al sistema de energía, deberá disponerse de lo necesario y de calidad para la alimentación del equipo digital DAB, información que se tendrá en los manuales técnicos proporcionados por el fabricante.
- Dado que un solo transmisor de radio DAB y una sola antena dará servicio a más de un propietario de radioemisora, las distintas personas, deberán agruparse en asociaciones o consorcios.
- Los equipos individuales para generación de audio, video y datos a transmitir por sistemas DAB podrán ubicarse en un mismo edificio o

transportar estas señales por medio de radioenlaces punto a punto con frecuencias AM, FM o con fibra óptica, desde sus lugares de generación como se esquematiza en la figura 9.2.

- Durante el tiempo que dure la transición en operación simultanea deberá, el ente encargado y especializado, de elaborar la Ley de Radio Digital Sonora Comercial. Una vez aprobada ésta podrá darse el momento del apagón analógico de la radio comercial sonora en Guatemala. Situación que tendrá que ocurrir dado que se está en la era de la digitalización.

Figura 59.

Diagrama de transmisión de señales DAB en radio emisoras



Nota. Diagrama básico de la forma de enlace entre estaciones de radio o salas de producción ubicadas en el mismo ambiente que el sistema de transmisión DAB y estaciones remotas. Elaboración propia, realizado con PowerPoint.

CONCLUSIONES

1. El cambio de tecnología analógica a digital en el campo de la Radio Comunicación Comercial Audible, algún día tendrá que hacerse realidad en Guatemala dado que en el mundo gran parte de países han empezado su transición, así por ejemplo Alemania cubre un 80 % de su población, dato de 2005, Dinamarca el 90 %, México se encuentra en experimentación e incluso en algunos como Singapur ya se ha dado el apagón analógico. Entonces el equipo comercial analógico dejará de fabricarse.
2. Los Ingenieros de telecomunicaciones encargados de la instalación, operación y mantenimiento de equipo con tecnología DAB deben tener conocimiento de este tema que estará contenido en algún curso de la carrera de ingeniería electrónica.
3. Si se comparan los diagramas de bloques de las figuras correspondientes a los sistemas de radio transmisión analógica AM y FM, 4 y 6 respectivamente y la figura 47 correspondiente a un sistema de radio transmisión digital DAB, se nota que los equipamientos son completamente distintos por lo que al haber una transición del sistema analógico al sistema digital ninguna sección electrónica del analógico podría ser utilizado en el equipamiento digital.

RECOMENDACIONES

1. Solicitar a la Super Intendencia de Telecomunicaciones, SIT o la oficina de Radio Comunicación Nacional inicie alguna experimentación en cuanto a transmisión y recepción de Radio Comunicación Comercial Audible utilizando cualquier tecnología existente. La Digital Audio Broadcasting, DAB es la mayor y mejor propagada en los países que ya cuentan con el sistema digital.
2. Coordinar, en conjunto con la oficina encargada de la actualización de contenido de los cursos de La Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, para que los conocimientos de la tecnología de radio comunicación digital audible sea incluida en el curso que por su naturaleza los incluya.
3. Utilizar, los propietarios de radio comercial analógica audible, la infraestructura como casetas, escalerillas, torres de transmisión para ubicar las nuevas antenas, así como las instalaciones eléctricas, para la alimentación del equipo digital, si sus condiciones físicas garantizan un buen funcionamiento durante un tiempo de vida adecuado.

REFERENCIAS

- Albentia Systems. (octubre de 2023). *Modulación OFDM*.
<https://blog.albentia.com/2013/09/05/modulacion-ofdm-wimax-madrid/>
- Alcorlo, R. (2007). *Diseño de un diplexor para un receptor de DAB*. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11307/>
- Baltanás, I. (s.f.) *Los 21 formatos de audio más populares y su explicación*.
<https://isaacbaltanas.com/los-22-formatos-de-audio-mas-populares>
- Calderón, Y., Gaitán, J. & Ortegón, S. (12 de septiembre de 2023). *Comparación MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4*.
<https://www.studocu.com/co/document/universidad-de-cundinamarca/comunicaciones-digitales/comparacion-mpeg-mpeg/23858437>
- Castro, H. & Ordoñez. A. (2010). *Desarrollo de un Códec basado en Ogg-Vorbis e implementación de un codificador G722 aplicados a sonidos estetoscópicos*. [Trabajo de fin de carrera previa a la obtención del título de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Técnica Particular de Loja]. Archivo digital.
<https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/13038/1/Castro%20Hurtao%20Hugo%20Alberto.pdf>

Celplan. (octubre de 2023). 2G, 3G, 4G, NB-IoT, eMTC, 5G, 6G.

<https://www.celplan.cl/tecnologias/2g-3g-4g-nb-iot-emtc-5g-6g>

Francesc, M. (2012). *Multiplexación por división en frecuencias ortogonales (OFDM)*. Universidad Oberta de Catalunya.

[https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/63345/2/Teor%c3%ada%20de%20la%20codificaci%c3%b3n%20y%20modulaciones%20avanzadas_M%c3%b3dulo%205_Multiplexaci%c3%b3n%20por%20divisi%c3%b3n%20en%20frecuencias%20ortogonales\(OFDM\).pdf](https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/63345/2/Teor%c3%ada%20de%20la%20codificaci%c3%b3n%20y%20modulaciones%20avanzadas_M%c3%b3dulo%205_Multiplexaci%c3%b3n%20por%20divisi%c3%b3n%20en%20frecuencias%20ortogonales(OFDM).pdf)

Gimeno, N. (2012). *Adaptación de emisora FM a DAB*. [Trabajo final de grado, Universidad Politécnica de Valencia]. Archivo digital.

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/18418/ADAPTACI%c3%b4N%20DE%20EMISORA%20FM%20A%20DAB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Guridi, F. (4 de noviembre de 2018). *Modulación OFDM*.

https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/213537/mod_resource/content/2/tsa_notas_ofdm_20181104.pdf

Guzmán, E. (2021). *Las técnicas de modulación digital*. [Para optar al Título Profesional de Licenciado en Educación, Especialidad: Electrónica e Informática, Universidad Nacional de Educación].

<https://repositorio.une.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14039/7274/MONOGRAF%20-%20OGRAF%20-%20HUAYAS%20FLORES%20DAVID%20JHONATHAN%20-%20FATEC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Jimenez, L. Parrado, J., Quizá, C. y Suárez, C. (2001). *Modulación multiportadora OFDM*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/reving/article/view/2699/3891>

López, J., Esguerra, R. (2009). *Evaluación y análisis del desempeño en el nivel físico para redes de área local inalámbricas (WLAN) IEEE 802.11G*. Universidad del Cauca.

<http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/2055?show=full>

López, R. (1990). *Utilización de transcodificadores para la duplicación de los enlaces PCM*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

Luque, J. & Clavijo, S. (1995). *Modulación de señales digitales*. Universidad de Sevilla.

<https://www.dte.us.es/personal/sivianes/tcomu/Libros%20y%20Apuntes/1995%20Modulacion%20digital.pdf>

Muñoz, N. (2012). *Adaptación de emisora FM a DAB*. Universidad Politécnica de Valencia.

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/18418/ADAPTACI%C3%B4N%20DE%20EMISORA%20FM%20A%20DAB.pdf>

Oramas, C. (10 de junio de 2014). *Sonido digital*.

<https://es.slideshare.net/claudiarodriguezoramas/apuntes-audio-digital>

- Pardo, A. (s.f.) *Codificación de audio MPEG*.
<https://dokumen.tips/documents/codificacin-de-audio-mpeg-caractersticas-de-la-compresin-de-audio-mpeg-1-las.html?page=1>
- Pérez, C. (2007). *Sistemas de Telecomunicación*. Universidad de Cantabria.
https://personales.unican.es/perezvr/apuntes_sc.htm
- Pérez, C. (2011). *Compresión de audio y radio digital*. Universidad de Cantabria.
<https://personales.unican.es/perezvr/pdf/compresion%20de%20audio%202011.pdf>
- Plusformación. (octubre de 2023). *Compresión de audio MPEG*.
<https://plusformacion.com/Recursos/r/Compresion-audio-MPEG>
- Sanchez, J. (16 de octubre de 2016). *Modulaciones M-arias. QAM y QPSK*.
<https://telecomundo.wordpress.com/2016/10/16/modulaciones-m-arias-gam-y-qpsk/>
- Superintendencia de Telecomunicaciones, Guatemala. *Plan de frecuencias FM*.
<https://sit.gob.gt/?s=plan+de+frecuencias+fm>
- Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2015). *Recomendación UIT-R V.431-8. Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones*.
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-8-201508-!!!PDF-S.pdf

Wechsler, A. (2017). *Módulos de codificación y modulación OFDM de señales digitales implementados en FPGA*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Mar del Plata].
<http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/bitstream/handle/123456789/274/AMWechsler-TFG-IEe-2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ANEXOS

Anexo 1.

Radio repetidora de la estación que utiliza como frecuencia base 96.9 MHz

Orden	Frecuencia Central MHz	Localidad
1	88.3	Escuintla
2	89.1	Santa Rosa
3	89.5	Coatepeque, Quetzaltenango
		Costa de San Marcos
		Quiché
		Retalhuleu
		San Marcos
4	92.3	Quetzaltenango
		Totonicapán
5	92.7	Chiquimula
		Zacapa
6	93.7	Huehuetenango
7	95.3	Sur del Petén
8	95.5	Izabal
9	96.9	Antigua Guatemala
		Chimaltenango
		El Progreso
10	97.9	Esquipulas, Chiquimula
11	98.7	Jalapa
12	101.5	Suchitepéquez
13	102.3	Alta Verapaz
14	103.1	Jutiapa
15	105.9	Retalhuleu
16	106.1	Belice
		Melchor de Mencos, Petén
17	106.7	Occidente de Chimaltenango
18	107.1	Baja Verapaz
		El Progreso

Nota: SIT. Elaboración propia, realizado con Excel.

Anexo 2.

La Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier de una señal definida en el tiempo $x(t)$, efectúa la translación al dominio de la frecuencia $X(\omega)$ por medio de la expresión matemática:

$$F[x(t)] = X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (27)$$

Propiedades de la transformada de Fourier

Propiedad de la linealidad:

$$F[ax(t) + bz(t)] = a.X(\omega) + b.Z(\omega) \quad (28)$$

Propiedad de retardo en el tiempo:

$$F[x(t - t_0)] = X(\omega)e^{-j\omega t_0} \quad (29)$$

Propiedad de corrimiento de frecuencia:

$$F[x(t)e^{j\omega_0 t}] = X(\omega - \omega_0) \quad (30)$$

Demostración:

$$\begin{aligned} F[x(t)e^{j\omega_0 t}] &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{j\omega_0 t} e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{j\omega_0 t - j\omega t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-jt(\omega - \omega_0)} dt = X(\omega - \omega_0) \end{aligned} \quad (31)$$

Propiedad de la dualidad:

$$F[X(t)] = 2.\pi.x(-\omega) \quad (32)$$

Continuación del anexo 2.

$$x(t) \leftrightarrow X(\omega) \quad \leftrightarrow \quad X(t) \leftrightarrow x(-\omega)$$

Nota. Características y propiedades de la Transformada de Fourier. (2023). *Transformada de Fourier*. (https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_de_Fourier). Consultado el 5 de noviembre de 2023. De dominio público.

Anexo 3.

Función Delta de Dirac δ

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases} \quad (33)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (34)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \delta(t) dt = x(0) \quad (35)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \delta(t - a) dt = x(a) \quad (36)$$

Transformada de Fourier de la función Delta de Dirac

$$F[\delta(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) e^{-j\omega t} dt = e^{-j\omega 0} = 1 \quad (37)$$

$$F[\delta(t - t_0)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - t_0) e^{-j\omega t} dt = e^{-j\omega t_0} \quad (38)$$

Continuación del Anexo 3.

Demostración

$$t - t_0 = \tau, \quad dt = d\tau, \quad t = \tau + t_0$$

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[\delta(t - t_0)] &= \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\tau) e^{-j\omega(\tau+t_0)} d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\tau) e^{-j\omega\tau} e^{-j\omega t_0} d\tau = e^{-j\omega t_0} \end{aligned} \quad (39)$$

Nota. Características y propiedades de la función Delta de Dirac. (2023). *Apéndice Matemático sobre la Delta de Dirac.* (<https://gdenittis.files.wordpress.com/2016/08/dirac.pdf>). Consultado el 4 de noviembre de 2023. De dominio público.

Anexo 4.

Fórmula de Euler o Relación de Euler

$$e^{jx} = \cos x + j \operatorname{sen} x$$

$$e^{-jx} = \cos x - j \operatorname{sen} x$$

$$\cos x = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2}$$

$$\operatorname{sen} x = \frac{e^{jx} - e^{-jx}}{2j}$$

$$\cos \omega_0 t = \frac{1}{2} (e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}) \quad (40)$$

Nota. La fórmula de Euler. (2023). *La fórmula de Euler.* (https://maticasiesoja.files.wordpress.com/2020/04/formula_de_euler.pdf). Consultado el 11 de noviembre de 2023. De dominio público.

Anexo 5.

Transformada de la función coseno

$$\begin{aligned}\mathcal{F}[\cos \omega_0 t] &= \frac{1}{2} \mathcal{F}[e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}] \\ &= \frac{1}{2} (\mathcal{F}[e^{j\omega_0 t}] + \mathcal{F}[e^{-j\omega_0 t}]) \\ &= \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi (\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)) \\ \mathcal{F}[\cos \omega_0 t] &= \pi (\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0))\end{aligned}\quad (41)$$

Aplicación.

$$\begin{aligned}\mathcal{F}[m(t) \cos \omega_0 t] &= \int_{-\infty}^{\infty} m(t) \cos(\omega_c t) e^{-j\omega t} dt \\ \mathcal{F}[m(t) \cos(\omega_c) t] &= \int_{-\infty}^{\infty} m(t) \frac{e^{j\omega_c t} + e^{-j\omega_c t}}{2} e^{-j\omega t} dt \\ &= \frac{1}{2} \left(\int_{-\infty}^{\infty} m(t) e^{j\omega_c t - j\omega t} dt + \int_{-\infty}^{\infty} m(t) e^{-j\omega_c t - j\omega t} dt \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\int_{-\infty}^{\infty} m(t) e^{-jt(\omega - \omega_c)} dt + \int_{-\infty}^{\infty} m(t) e^{-jt(\omega + \omega_c)} dt \right) \\ &= \frac{1}{2} (M(\omega - \omega_c) + M(\omega + \omega_c))\end{aligned}\quad (42)$$

La función $e^{jx \text{ sen } \theta}$ es periódica en θ con período 2π por lo que puede ser escrita en forma de serie de Fourier:

$$e^{jx \text{ sen } \theta} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\theta}\quad (43)$$

Continuación del anexo 5.

Los coeficientes C_n dependen de x esto permite escribir el coeficiente enésimo como la función de Bessel de argumento x y de orden n , lo que lleva a la relación:

$$C_n = J_n(x) \quad (44)$$

Nota. Transformada de la función coseno. (2023). *Transformada de coseno discreta.* (https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_de_coseno_discreta). Consultado el 9 de noviembre de 2023. De dominio público.

Anexo 6.

Desarrollo de modulación de frecuencia de una onda senoidal

Determinar que:

$$f_{FM} = A_c \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} j_n m \cos(\omega_c - n\omega_m)t$$

Con base en la ecuación de la onda modulada en frecuencia f_{FM}

$$\begin{aligned} f_{FM} &= A_c \cos[\omega_c t + m \text{sen}(\omega_m t)] \\ &= A_c \text{Re}\{e^{j[\omega_c t + m \text{sen}(\omega_m t)]}\} \\ &= A_c \text{Re}[e^{j\omega_c t}][e^{jm \text{sen}(\omega_m t)}] \end{aligned}$$

Tomando como base lo establecido en la expresión (1) y (2) de este anexo, se tiene:

Continuación del anexo 6.

$$e^{jm_p \text{sen}(\omega_m t)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} j_n m e^{jn\omega_m t}$$

De donde se tiene:

$$f_{FM} = A_c \text{Re} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} j_n m e^{jt(\omega_c + n\omega_m)} \right]$$

$$f_{FM} = A_c \sum_{n=-\infty}^{\infty} j_n m \cos(\omega_c t + n\omega_m t),$$

resultado idéntico al de la ecuación 11 del tema de modulación de frecuencia, del capítulo 2.

Nota. Desarrollo de la modulación de una onda senoidal. (2023). *Transmisión de Modulación de Amplitud.*

(<https://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/electronicaaplicadaiii/aplicada/cap03modulacionam1.pdf>). Consultado el 8 de noviembre de 2023. De dominio público.

Anexo 7.

Ortogonalidad

Se dice que las funciones σ_n y σ_m son ortogonales con respecto a cada una sobre el intervalo $a < t < b$ si satisfacen la condición:

$$\int_a^b \varphi_n(t) \varphi_m^*(t) dt = 0 \quad \text{donde } n \neq m \quad (45)$$

Continuación del anexo 7.

Considerando el conjunto $\{\varphi_n(t)\}$, para determinar si es ortogonal se verifica si satisface la relación:

$$\int_a^b \varphi_n(t) \varphi_m^*(t) dt = \begin{cases} 0, & n \neq m \\ K_n & n = m \end{cases} \quad (46)$$

En el desarrollo se muestra que el conjunto de funciones exponenciales $\{e^{jn\omega_0 t}\}$ es ortogonal sobre el intervalo $a < t < b$ donde $b = a + T_0$, $\omega_0 = 2\pi f_0$ y n es un entero.

Considerando $\varphi_n(t) = e^{jn\omega_0 t}$ y $\varphi_m(t) = e^{jm\omega_0 t}$ y sustituyendo en (45)

$$\begin{aligned} \int_a^b e^{jn\omega_0 t} \varphi_n(t) \varphi_m^*(t) dt &= \int_a^{a+T_0} e^{jn\omega_0 t} e^{-jm\omega_0 t} dt = \int_a^{a+T_0} e^{j(n-m)\omega_0 t} dt \\ &= \frac{e^{j(n-m)\omega_0 t} \Big|_a^{a+T_0}}{j(n-m)\omega_0} = \frac{e^{j(n-m)\omega_0 (a+T_0)} - e^{j(n-m)\omega_0 a}}{j(n-m)\omega_0} = \\ &= \frac{e^{j(n-m)\omega_0 a} e^{j(n-m)\omega_0 T_0} - e^{j(n-m)\omega_0 a}}{j(n-m)\omega_0} \\ &= \frac{e^{j(n-m)\omega_0 a} [e^{j(n-m)2\pi} - 1]}{j(n-m)\omega_0} \end{aligned}$$

$$e^{j(n-m)2\pi} = \cos[2\pi(n-m)] + j\text{sen}[2\pi(n-m)] = 1$$

luego si $n \neq m$

$$\int_a^{a+T_0} e^{jn\omega_0 t} e^{-jm\omega_0 t} dt = \frac{e^{j(n-m)\omega_0 a} [e^{j(n-m)2\pi} - 1]}{j(n-m)\omega_0} = 0$$

Continuación del anexo 7.

Si $n = m$,

$$\int_a^{a+T_0} e^{j(n-m)\omega_0 t} dt = \int_a^{a+T_0} 1 dt = T_0$$
$$K_n = T_0$$

Por lo que las funciones exponenciales $\{e^{jn\omega_0 t}\}$

cumplen con las dos condiciones este resultado muestra que las funciones $\{\varphi_n(t)\}$, son ortogonales.

Nota. Funciones ortogonales. (2023). *Ortogonalidad.*

(https://matematicas.uam.es/~fernando.chamizo/asignaturas/2021algin/sections/4_2.pdf).

Consultado el 12 de noviembre de 2023. De dominio público.

Anexo 8.

Transformada discreta de Fourier

En un sistema digital las señales que este maneja son señales muestreadas que a su vez son señales discretas, por tanto, se contempla la utilización de la transformada discreta de Fourier de una señal muestreada.

Muestrear una señal implica tener una separación constante en el tiempo de los impulsos y por tanto de las muestras; a dicha separación se le llama período de muestreo (T_s) el cual es el inverso de la frecuencia de muestreo (f_s), y tal como se indica en la siguiente ecuación.

Continuación del anexo 8.

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (47)$$

Por lo tanto, siendo la señal continua en el tiempo $x(t)$, n el índice de las muestras de dicha señal, $x(nT_s)$ la amplitud de la muestra n de la señal $x(t)$.

Si se define la siguiente ecuación:

$$\sigma(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma(t - nT_s) \quad (48)$$

Entonces, matemáticamente la señal muestreada $\tilde{x}(t)$ se define por la multiplicación de la señal $x(t)$ por $\sigma(t)$ y su transformada de Fourier está dada por la ecuación 49 cuyo resultado se logra usando adecuadamente las propiedades lineales y de desplazamiento en el tiempo que tiene la transformada de Fourier.

$$\begin{aligned} F\{\tilde{x}(t)\} &= \tilde{X}(\omega) = F\left\{\sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s)\sigma(t - nT_s)\right\} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s)e^{-j\omega T_s n} \end{aligned} \quad (49)$$

Donde:

$F\{\tilde{x}(t)\}$ es la Transformada de Fourier Discreta en el Tiempo DTFT

Continuación del anexo 8.

Se debe tener en cuenta que el uso de la DTFT (Transformada de Fourier Discreta en el tiempo, Discrete Time Fourier Transform) como método numérico tiene dos inconvenientes básicos que son los siguientes:

- Su sumatoria infinita no es calculable
- Según el teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo limita el ancho de banda de las señales.

Por lo tanto, se define la DFT (Transformada Discreta de Fourier, Discrete Fourier Transform) la cual utiliza un número limitado de muestras en el dominio del tiempo, por tal razón se obtiene la misma cantidad en el dominio de la frecuencia.

Así, se define $\hat{x}(n)$ como la versión limitada de $\tilde{x}(t)$, cuya relación es la siguiente:

$$\hat{x}(n) = x(nT_s) \quad (50)$$

$$\hat{X}(\omega)|_{\Omega=T_s\omega} = \hat{X}(\Omega) \quad (51)$$

Y la DFT para N_s puntos queda definida en la ecuación 52:

$$\hat{X}(k) = \sum_{n=0}^{N_s} \hat{x}(n)e^{-j\Omega_k n} = \sum_{n=0}^{N_s} \hat{x}(n)e^{-j\frac{2\pi nk}{N_s}} = \sum_{n=0}^{N_s} \hat{x}(n)W_N^{kn}$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, N_s - 1 \quad (52)$$

Donde:

Continuación del anexo 8.

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N_s}} \quad (53)$$

A W_N normalmente se le denomina factor de giro (twiddle factor). También queda establecido el índice k para las subportadoras en el dominio de la frecuencia, y n en el dominio del tiempo.

La relación inversa está dada básicamente por la misma relación, con la diferencia de que se cambian los índices y se adiciona un factor de compensación a la sumatoria, por tanto, la ecuación 54 describe la IDFT.

$$\begin{aligned} \hat{x}(n) &= \frac{1}{N_s} \sum_{k=0}^{N_s} \hat{X}(k) e^{j\Omega_k n} = \frac{1}{N_s} \sum_{k=0}^{N_s} \hat{X}(k) e^{j\frac{2\pi nk}{N_s}} \\ &= \frac{1}{N_s} \sum_{k=0}^{N_s} \hat{X}(k) W_N^{-kn} \end{aligned} \quad (54)$$

$$n = 0, 1, 2 \dots N_s - 1$$

Nota. Desarrollo y origen de la transformada discreta de Fourier. (2023). *Transformada discreta de Fourier.* (https://www.uv.es/soriae/tema_5_pds.pdf). Consultado el 12 de noviembre de 2023. De dominio público.

Anexo 9.

Transformada rápida de Fourier

El cálculo de la DFT requiere de un número de sucesivas multiplicaciones y sumas lo cual se traduce en altos requerimientos de

Continuación del anexo 9.

procesamiento o de recursos computacionales si la cantidad de las muestras es grande.

El objetivo básico de la transformada rápida de Fourier es reducir el número de operaciones necesarias para el cálculo de la DFT un número de cálculos dado por:

$$\frac{N(\log_2 N)}{2}$$

Donde N es el número de muestras de la sumatoria.

La FFT tiene en cuenta el factor de giro (W) del que aprovecha su periodicidad y simetría para realizar el cálculo de la DFT de forma más rápida, la idea básica es dividir las N muestras de la sumatoria de la DFT y expresarlas como una combinación de sumatorias de N/2 muestras.

De la ecuación 53 se puede aprovechar la simetría que presenta la sumatoria de la DFT par deducir lo que se conoce como radix-2 FFT, donde el factor de giro es:

$$W_{\frac{1}{2}} = e^{-j\frac{2\pi}{N}/2} = e^{-j\frac{2\pi}{N}} = W_N^2 \quad (55)$$

Radix es uno de los algoritmos utilizados por la transformada rápida de Fourier para simplificar el cálculo de la DFT.

Nota. Explicación de la funcionalidad de la transformada rápida de Fourier. (2023). *Transformada rápida de Fourier*. (https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_r%C3%A1pida_de_Fourier). Consultado el 13 de noviembre de 2023. De dominio público.

Anexo 10.

Código Convolutional

En teoría de la información, un código convolutional es un tipo de código de detección de errores donde los códigos convolucionales se describen a partir de ciertos elementos como son la tasa del código, la longitud del código y la memoria del codificador.

- k , número de bits que entran al codificador
- n , número de bits que salen del codificador
- R , tasa del código k/n

La longitud del código, K , denota en cuántos ciclos de codificación tiene influencia un bit que tengamos a la entrada del mismo a partir de un instante dado, ya que este bit que tenemos a la entrada del codificador en un instante dado irá recorriendo la cadena de flip-flops que forman el registro de desplazamiento.

- m , memoria del codificador (# de flip- flops del codificador)

Cada símbolo de m bits de información se transforma, al ser codificado, en un símbolo de n bits, donde m/n es la tasa del código ($n \geq m$). La transformación es función de los k símbolos anteriores, donde k es la longitud del código.

Continuación del anexo 10.

Los códigos convolucionales son códigos lineales al igual que los códigos bloque (como los códigos de Hamming, por ejemplo) y, por tanto, se utilizan para proteger la información añadiendo redundancia a la misma, de manera que las palabras del código tengan la distancia mínima necesaria.

Sin embargo, a diferencia de los códigos bloque, las palabras de un código convolucional se generan no sólo a partir de los dígitos de información actuales sino también con la información anterior en el tiempo. Es decir, un codificador convolucional es un sistema con memoria y, en consecuencia, lleva asociada una cadena de Markov aunque ésta no es visible en la salida pero sí la condiciona.

- Codificación

Existen varios métodos de codificación de códigos convolucionales, aunque una de la más usuales es la basada en registros de desplazamiento conectados con sumadores base 2 en los que se realiza la codificación. Por cada bit que entre en el codificador se obtienen n bits.

- Decodificación

La decodificación de un código convolucional consiste en escoger la secuencia más probable entre todas las posibles. Existen diversos algoritmos que permiten la decodificación de este tipo de códigos y la decodificación óptima se consigue mediante el algoritmo de Viterbi.

Continuación del anexo 10.

Los códigos convolucionales se describen a partir de ciertos elementos como son la tasa del código, la longitud del código y la memoria del codificador.

La longitud del código, K , denota en cuántos ciclos de codificación tiene influencia un bit que tengamos a la entrada del mismo a partir de un instante dado, ya que este bit que tenemos a la entrada del codificador en un instante dado irá recorriendo la cadena de flip-flops que forman el registro de desplazamiento.

Nota. Explicación de la funcionalidad de un código convolucional. (2023). *Código Convolucional*. (https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%B3digo_convolutacional). Consultado el 28 de noviembre de 2023. De dominio público.