

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA ELECTRONICA



PROYECTO DE GRADO

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO RADIODIFUSOR
DIGITAL EN BASE AL ESTÁNDAR DRM+ EN LA BANDA DE FM
PARA EL INSTITUTO DE ELECTRONICA APLICADA”**

Proyecto de Grado para obtener el Título de Licenciatura

POR: Univ. POMACOSI BLANCO KEVIN MAURICIO

TUTOR: Mg. Ing. FABIAN AMADO TITO LUQUE

LA PAZ – BOLIVIA

2021



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERIA ELECTRONICA

Proyecto de grado:

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO RADIODIFUSOR DIGITAL
EN BASE AL ESTÁNDAR DRM+ EN LA BANDA DE FM PARA EL
INSTITUTO DE ELECTRONICA APLICADA EN LA BANDA DE FM
PARA EL INSTITUTO DE ELECTRONICA APLICADA”**

Presentado por: Univ. Pomacosi Blanco Kevin Mauricio

Para optar el grado académico de:

Nota Numeral:

Nota Literal:

Ha sido:

Director de carrera de ingeniería electrónica:

Ing. Juan Carlos Machicao

Tutor: Ing. Fabian Amado Tito Luque

Tribunal: Ing. Wilber Salvador Flores Bustillos

Tribunal: Ing. Marcelo Gutiérrez Guachalla

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional, protegiéndome y brindándome salud durante este largo camino, por estar conmigo en cada paso que doy fortaleciendo mi corazón e iluminando mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mis padres por su apoyo incondicional en cada momento, fueron la fuerza y motivación que me impulsa a ser mejor persona cada día, son el pilar fundamental en mi vida, gracias a sus consejos y valores inculcados logre estar aquí, muchas gracias.

Al instituto de investigaciones de electrónica por haberme brindado la oportunidad de desarrollar mi proyecto de investigación en sus instalaciones, así como el personal que me ha acompañado en el proceso de desarrollo del proyecto.

A mi tutor el Ingeniero Fabián Amado Tito Luque docente de la materia líneas de transmisión que me ha brindado todos sus conocimientos en el área, durante todo el proceso de elaboración de este documento.

Al ingeniero Víctor Laredo Antezana docente de la materia de proyecto de grado, que fue mi guía como inspiración para el desarrollo de la investigación e implementación del proyecto.

RESUMEN

El presente proyecto muestra modulo radiodifusor digital, proyecto piloto realizado por la línea de investigación del instituto de electrónica aplicada, el sistema de transmisión de señal es realizado con el uso del estándar DRM+ en la banda de frecuencia modulada, controlada mediante softwares (*SPARK,GNURADIO*), ambas destinadas para la realización y codificación de la señal a ser transmitida. La red de transmisión es desarrollada con equipos que cuenta el instituto de electrónica aplicada mismos que son sofisticados y empleados en el ámbito de la radiofrecuencia, además cuenta con la incorporación de un amplificador de radiofrecuencia y una antena tipo gamma match ambos de diseño propio, destinados para lograr una cobertura en la recepción de señal digital dentro del instituto de electrónica aplicada de la Universidad Mayor de San Andrés. El sistema recepción adopta un dispositivo de RF denominada SDR mismo que realiza la recepción de la señal para ser reproducida por el software SODIRA, este programa está diseñado para demodular señales que exista en el espectro radioeléctrico mismo que permite la demodulación del estándar DRM, el software está limitado porque cuenta con una licencia de paga, esto no afecto a la realización del proyecto. Con los resultados encontrados en las pruebas de implementación del sistema en relación a la señal de ruido, los puntos mínimos de recepción SNR estándar (8.5 dB), SNR FAC (2.2 dB), SNR MSC (4.2 dB), demuestran que el sistema está bajo los parámetros de normativa existente. El desarrollo de este proyecto pretende extender la línea de investigación de las señales digitales transmitidas en la banda de frecuencia modulada y reactivar el interés de empresas radiodifusoras a trabajar sobre la banda FM en transmisión digital, con mejores características de calidad en comparación a la radio tradicional.

Palabras clave: *Radiodifusión, DRM, transmisión digital, modulación, SNR*

This project shows a digital radio broadcasting module, a pilot project carried out by the research line of the Institute of Applied Electronics, the signal transmission system is made with the use of the DRM+ standard in the modulated frequency band, controlled by software (*SPARK, GNURADIO*), both intended for the realization and coding of the signal to be transmitted. The transmission network is developed with equipment that has the institute of applied electronics same that are sophisticated and used in the field of radio frequency, also has the incorporation of a radio frequency amplifier and a gamma match antenna type both of own design, designed to achieve coverage in the reception of digital signal within the institute of applied electronics of the Universidad Mayor de San Andrés. The reception system adopts an RF device called SDR, which performs the reception of the signal to be reproduced by the SODIRA software, this program is designed to demodulate signals that exist in the radio spectrum that allows the demodulation of the DRM standard, the software is limited because it has a paid license, this does not affect the realization of the project. With the results found in the system implementation tests in relation to the noise signal, the minimum reception points SNR standard (8.5 dB), SNR FAC (2.2 dB), SNR MSC (4.2 dB), show that the system is under the parameters of existing regulations. The development of this project aims to extend the research line of digital signals transmitted in the FM band and to reactivate the interest of broadcasters to work on the FM band in digital transmission, with better quality characteristics compared to traditional radio

Keywords: *Broadcasting, DRM, digital transmission, modulation, SNR*

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	3
ÍNDICE DE CONTENIDO	4
ACRONIMOS	12
CAPÍTULO 1 ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO	13
1.1. INTRODUCCIÓN	13
1.2. ANTECEDENTES.....	14
1.2.1. SITUACIÓN ACTUAL EN BOLIVIA	15
1.3. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
1.4. PROPUESTA DE LA SOLUCIÓN	15
1.5. OBJETIVOS	16
1.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.6. JUSTIFICACIONES.....	16
1.6.1. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA	16
1.6.2. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA	17
1.6.3. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA	17
1.7. ALCANCE Y LIMITES	17
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	18
2.1. PRINCIPIOS DE LA RADIODIFUSIÓN	18
2.1.1. MODULACION ANALOGICA.....	18
2.1.1.1. AMPLITUD MODULADA AM	18
2.1.1.2. FRECUENCIA MODULADA FM.....	20
2.1.1.2.1. MODULACIÓN DE FRECUENCIA - FM	20
2.1.1.2.2. FUNCIONAMIENTO DE LA FM ESTERO	21
2.1.1.2.3. EFECTO ESTEREOFONICO	22
2.1.1.2.4. LA RADIODIFUSIÓN EN FRECUENCIA MODULADA (FM) EN BOLIVIA.....	23
2.1.2. MODULACIÓN DIGITAL	26
2.1.2.1. MODULACIÓN DE AMPLITUD EN CUADRATURA (QAM)	26
2.1.2.2. MULTIPLEXACION POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA ORTOGONAL (OFDM).....	27

2.1.2.3. MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA ORTOGONAL CODIFICADA (COFDM).....	29
2.2. LA RADIO DIGITAL	30
2.2.1. ¿POR QUÉ DIGITALIZAR LA RADIO?.....	31
2.3. SISTEMAS DE RADIODIFUSION DIGITAL	32
2.3.1. SISTEMA ESTÁNDAR DRM	32
2.3.1.1. ESTÁNDAR DRM 30.....	33
2.3.1.2. ESTÁNDAR DRM+.....	33
2.3.1.3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SISTEMA DRM	33
2.3.1.3.1. CODIFICACIÓN Y MULTIPLEXACIÓN DE CONTENIDO	34
2.3.1.3.2. CANAL DE SERVICIO PRINCIPAL (MSC).....	35
2.3.1.3.3. CANAL DE ACCESO RÁPIDO (FAC).....	35
2.3.1.3.4. CANAL DE DESCRIPCIÓN DE SERVICIO (SDC).....	37
2.3.1.3.5. CODIFICACIÓN DE FUENTE	38
2.3.1.3.6. CODIFICACIÓN DE CANAL Y MODULACIÓN DRM	43
2.3.1.3.7. SUPERTRAMA DE AUDIO.....	49
2.3.1.3.8. REDES DE FRECUENCIA ÚNICA (SFN) Y FRECUENCIA MÚLTIPLE (MFN)	52
2.3.1.3.9. MULTICAST	53
2.3.1.3.10. MULTICAST DRM+	53
2.3.1.4. VENTAJAS DEL ESTÁNDAR DRM	56
2.3.1.4.1. SERVICIOS DE DATOS	57
2.3.1.4.2. METADATOS IMPUESTOS.....	57
2.3.1.4.3. SERVICIOS DE VALOR AGREGADO	58
2.3.1.5. RECEPCIÓN DIGITAL EN DRM+.....	59
2.3.1.6. RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE SDR	60
2.3.6.1. ESTRUCTURA DE HARDWARE SDR.....	60
2.4.6.2. DISPOSITIVOS DE HARDWARE PARA SDR	62
2.3.2. SISTEMA DAB	67
2.3.3. SISTEMA ISDB	68
2.3.4. SISTEMA IBOC - HD RADIO	68
2.4. SOFTWARE SPARK	69
2.4.1. INTERFAZ PRINCIPAL DEL SOFTWARE	70
2.4.2. CONFIGURACIÓN DE TRANSMISIÓN	70
2.4.3. CONFIGURACIÓN DEL ADMINISTRADOR DE CONTENIDO.....	72

2.4.4. CONFIGURACIÓN DE REFERENCIA DE TIEMPO	72
2.5. SOFTWARE GNU RADIO	72
2.6. SOFTWARE SODIRA	73
2.7. AMPLIFICADOR DE POTENCIA.....	74
2.7.1. CLASE A	74
2.7.2. CLASE B	74
2.7.3. CLASE AB	74
2.7.4. CLASE C	75
2.7.4.1. ECUACIONES DE DISEÑO DE UN AMPLIFICADOR EN CLASE C.....	77
2.7.5. RED DE POLARIZACIÓN.....	79
2.7.6. RED DE ADAPTACIÓN.....	79
2.7.6.1. REDES DE ADAPTACIÓN TIPO L	79
2.7.6.1.1. TRANSFORMACIÓN DE IMPEDANCIA UTILIZANDO DOS SECCIONES TIPO L	80
CAPÍTULO 3 INGENIERIA DEL PROYECTO	82
3.1. PLANIFICACION DE TRABAJO.....	82
3.1.1. PLANIFICACIÓN DE ACTIVIDADES.....	82
3.1.2. ÁMBITO DE APLICACIÓN	85
3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES	87
3.3. DESCRIPCION DEL SISTEMA DRM+	90
3.3.1. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DRM+.....	90
3.3.2. PARAMETROS DE CALIDAD DE SEÑAL EN TRANSMISIÓN.....	92
3.3.3. PARAMETROS DE CALIDAD DE SEÑAL EN RECEPCIÓN.....	93
3.4. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DEL MODULO RADIODIFUSOR	94
3.4.1. SOFTWARE DEL SISTEMA	94
3.4.1.1. SOFTWARE SPARK.	94
3.4.1.1.1. INSTALACIÓN DE SOFTWARE DE TRANSMISIÓN (SPARK).....	95
3.4.1.2. SOFTWARE GNURADIO.....	97
3.4.1.2.1. INSTALACIÓN DE SOFTWARE DE TRANSMISIÓN (GNU-Radio)	98
3.4.1.3. SOFTWARE SODIRA	100
3.4.2. HARDWARE DEL SISTEMA.....	100
3.5. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE ELEMENTOS NECESARIOS PARA EL SISTEMA.....	101
3.5.1. DISEÑO DEL AMPLIFICADOR DE RADIODIFUSIÓN.....	101
3.5.1.1. DISEÑO DE LA RED DE POLARIZACIÓN.....	104
3.5.1.2. DISEÑO DE LAS REDES DE ADAPTACIÓN	106

1.5.1.2.1. RED DE ADAPTACIÓN DE ENTRADA	107
1.5.1.2.2. RED DE ADAPTACIÓN DE SALIDA.....	107
3.5.1.3 ELECCIÓN DEL AMPLIFICADOR RF SEGÚN LAS CARACTERISTICAS DE DISEÑO...	109
3.5.1.4. DESCRIPCIÓN DE RECURSOS UTILIZADOS	112
3.5.1.5. CONSTRUCCIÓN DEL AMPLIFICADOR DE RADIODIFUSION	113
3.5.2. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA ANTENA.....	114
3.5.2.1. DESCRIPCION DE RECURSOS UTILIZADOS	115
3.5.2.2. DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ANTENA	116
3.5.2.3. CONSTRUCCION DE LA ANTENA.....	117
3.6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISION EN EL IEA	120
3.6.3. ALIMENTACIÓN Y CONEXIÓN DEL USRP CON PC	120
3.6.4. COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL USRP Y LA PC.....	121
3.6.5. CONEXIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN.....	122
3.6.6. DESARROLLO DE LA TRANSMISION DRM+	123
3.7. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RECEPCIÓN	124
3.7.1. INSTALACIÓN DE SOFTWARE DE RECEPCIÓN	124
3.7.2. CONFIGURACIONES Y AJUSTES DEL SISTEMA RTL-SDR.....	126
3.8. PRUEBAS DE CONTROL DE LA SEÑAL.....	126
CAPÍTULO 4 PRUEBAS, RESULTADOS Y EVALUACIÓN.....	128
4.1. PRUEBAS TÉCNICAS DE FUNCIONALIDAD	128
4.1.1. PRUEBAS AL AMPLIFICADOR	128
4.1.2. PRUEBAS DE TRANSMISIÓN	129
4.1.3. PRUEBAS DE RECEPCION	132
4.1.4. COMPARACION DE RESULTADOS.....	143
4.1.4.1. GRAFICAS COMPARATIVAS	144
CAPÍTULO 5 RECOMENDACIONES, CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFIA	146
5.2. CONCLUSIONES	146
5.1. RECOMENDACIONES.....	147
5.3. BIBLIOGRAFIA	147
ANEXOS A.....	149
ANEXOS B.....	151
ANEXOS C.....	153
ANEXOS D.....	161

INDICE DE TABLAS, ILUSTRACIONES, FIGURAS.

TABLAS

Tabla 1: Cuadro de atribución de bandas de frecuencias 495 – 2.107 KHz	19
Tabla 2: Canalización Grupo 4.de FM en Bolivia	24
Tabla 3: Canalización Grupo 3. de FM en Bolivia	24
Tabla 4: Canalización Grupo 1 de FM en Bolivia	25
Tabla 5: Parámetros del canal y parámetros de servicio	36
Tabla 6: Longitud del campo de datos del SDC	38
Tabla 7: Modos de transmisión de DRM	47
Tabla 8: Modos de robustez definida por el estándar DRM	47
Tabla 9: Tiempos de los modos de robustez	48
Tabla 10: Duración de transmisión del sistema DRM	50
Tabla 11; Esquemas de correlación de MSC.	71
Tabla 12: Tabla 14: esquemas de asignación de SDC	71
Tabla 13: Actividades necesarias para el desarrollo del proyecto	83
Tabla 14: Características USRP N200	87
Tabla 15: Características del computador para la transmisión	88
Tabla 16: Parámetros de un equipo de servidor de contenido del sistema de transmisión DRM	91
Tabla 17: Parámetros de un equipo de modulación para el sistema de transmisión DRM	91
Tabla 18: Parámetros de un equipo transmisor para el sistema de transmisión DRM.....	92
Tabla 19: Requerimientos del sistema e transmisión DRM+	92
Tabla 20: Señal ruido mínimo para diferentes modelos de recepción	93
Tabla 21: Información del programa Sodira y valores óptimos según la norma.	94
Tabla 22: Características del ordenador para la transmisión	95
Tabla 23: Características técnicas de amplificadores RF.....	109
Tabla 24: Recursos utilizados para la construcción del amplificador.....	112
Tabla 25: Recursos utilizados para la construcción de la antena del proyecto	115
Tabla 26: Pruebas del sistema de transmisión en el software SPARK resultado de la implementación del sistema Med 1	130
Tabla 27: Pruebas del sistema de transmisión en el software GNURadio resultado de la implementación del sistema Med 2	131
Tabla 28: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 3.....	133
Tabla 29: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 4.....	133
Tabla 30: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 5.....	134
Tabla 31: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 6.....	135
Tabla 32: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 7.....	136
Tabla 33: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 8.....	136
Tabla 34: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 9.....	137
Tabla 35: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 10.....	137
Tabla 36: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 11	138
Tabla 37: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 12.....	138
Tabla 38: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 13.....	139

Tabla 39: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 14	139
Tabla 40: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 15	140
Tabla 41: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 16	140
Tabla 42: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 17	141
Tabla 43: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 18	141
Tabla 44: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 19	142
Tabla 45: Pruebas del sistema de recepción resultado de la ejecución del sistema Med 20	142
Tabla 46: Cuadro comparativo de resultados	143

ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Señal moduladora vs señal portadora	20
Ilustración 2: Banda de Radiodifusión de FM Estéreo	22
Ilustración 3: Ubicación de los parlantes en el sistema de 5.1 canales	23
Ilustración 4: Gráfica de separación entre portadora en la banda de FM	24
Ilustración 5: Gráfica de separación entre portadora en la banda de FM para el grupo 1 y 2	25
Ilustración 6: Diagrama de Constelación 4QAM y 16QAM	27
Ilustración 7: Diagrama de bloques OFDM	28
Ilustración 8: Diagrama de bloques COFDM	29
Ilustración 9: Señal COFDM de salida	30
Ilustración 10: Bandas de uso del sistema DRM.	32
Ilustración 11: Codificador de fuente de audio DRM	41
Ilustración 12: Grafico de trama DRM+	50
Ilustración 13: Receptor SDR utilizado.	65
Ilustración 14: Logo DAB radio.	67
Ilustración 15: Logo HD Radio digital.	68
Ilustración 16: Ventana principal SPARK.	70
Ilustración 17: Interfaz principal GNU-Radio en Windows.	73
Ilustración 18: Ventana principal del software SODIRA	73
Ilustración 19: Diagrama general de un amplificador de Potencia.	74
Ilustración 20: Polarización de un amplificador Clase C	75
Ilustración 21: Esquemático simple de un amplificador Clase C	75
Ilustración 22: Ciclos de conducción de las diversas clases de amplificadores	76
Ilustración 23: Zona de operación de las diversas clases de amplificadores	76
Ilustración 24: Formas de Onda en un Amplificador de Potencia en Clase C	76
Ilustración 25: Configuración de Redes tipo L	79
Ilustración 26: Dos Secciones de Tipo L en cascada	80
Ilustración 27: Transformador de $\lambda/4$	80
Ilustración 28: Plano de áreas de la planta baja del Instituto de investigación Aplicada	85
Ilustración 29: Plano de áreas del primer piso del Instituto de investigación Aplicada	86
Ilustración 30: Tarjeta USRP N200	87
Ilustración 31: Computadora completa instalada con Windows 7	88
Ilustración 32: STLSDR dispositivo de adquisición propia	88
Ilustración 33: DG8SAQ VNA equipo	89
Ilustración 34: Cable coaxial para la conexión del amplificador con la antena	89
Ilustración 35: Cable coaxial de conexión del equipo de transmisor (USRP) con el amplificador rf	89
Ilustración 36: Cable RJ45 sirve para la conexión vía Ethernet Gigabit de la PC con la USRP	89

Ilustración 37: Elaboración de la señal con el software SPARK	95
Ilustración 38: Interfaz de instalación Spark.....	96
Ilustración 39: Términos y condiciones del software Spark	96
Ilustración 40: Instalación de los archivos para su ejecución de Spark	96
Ilustración 41: Interfaz gráfica del software de SPARK.....	97
Ilustración 42: Interfaz del software GNURADIO	98
Ilustración 43: interfaz del GNURadio 3.7	98
Ilustración 44: interfaz del GNURadio 3.7	99
Ilustración 45: interfaz del GNURadio 3.7	99
Ilustración 46: interfaz de instalación del GNURadio 3.7	99
Ilustración 47: Recepción de señal DRM+ con el software SPARK.....	100
Ilustración 48: Curvas de Potencia de Salida Vs Potencia de Entrada	103
Ilustración 49: Diagrama de bloque del diseño del Módulo de Potencia.....	104
Ilustración 50: Esquema de la red de Polarización.	105
Ilustración 51: Red de Polarización del Amplificador de Potencia.	106
Ilustración 52: Diseño de la Red de Adaptación de Entrada.....	107
Ilustración 53 Diseño de la Red de Adaptación de Salida	108
Ilustración 54: Diseño de la Red de Adaptación de Salida tipo L	108
Ilustración 55: Diseño de la Red de Adaptación de Salida tipo T	108
Ilustración 56: Diseño final de la Red de Adaptación de Salida.....	109
Ilustración 57: Circuito amplificador RF armado	114
Ilustración 58: Diagrama de la antena Gamma match con el software MMANA-GAL	118
Ilustración 59: Patrón de radiación de la antena Gamma match.....	119
Ilustración 60: Antena Gamma Match Armado	119
Ilustración 61: Dirección IP para la conexión del sistema de transmisión y la estación	121
Ilustración 62: Verificación del estado de conexión de la USRP	121
Ilustración 63: Modulación con el software SPARK.....	123
Ilustración 64: Señal construida en transmisión DRM.	123
Ilustración 65: Configuración RTL-SDR.....	124
Ilustración 66: Configuración RTL-SDR.....	125
Ilustración 67: Configuración RTL-SDR.....	125
Ilustración 68: Configuración RTL-SDR.....	125
Ilustración 69: Amplificador Lodestar	128
Ilustración 70: Ancho de banda y potencia de señal obtenido	132
Ilustración 71: Plano de cimientos del IEA para control de cobertura	149
Ilustración 72: Plano de sitios y techos del IEA	150
Ilustración 73: Hoja de datos del equipo de transmisión utilizado	151
Ilustración 74: Hoja de datos del integrado utilizado para la construcción del amplificador	153
Ilustración 75: Prueba de transmisión sin amplificador.....	161
Ilustración 76: diagrama de la placa del dispositivo USRP	161
Ilustración 77: Transmisión de la señal DRM+ captada con el software Sharp	162
Ilustración 78: Transmisión de la señal DRM+ captada con el software Sharp en la sala de computación del IEA	162

FIGURAS

Figura 1: Arquitectura del sistema de transmisión estándar DRM	34
--	----

Figura 2: Canal FAC.....	35
Figura 3: Canal de descripción de servicio SDC	37
Figura 4: Codificador de fuente de audio DRM	42
Figura 5: Diagrama de bloques de un modulador DRM.....	43
Figura 6: Trama AAC con SBR.....	51
Figura 7: Trama AAC con MPS	51
Figura 8:: Trama AAC + MPS + SBR.....	52
Figura 9: DRM+ junto la señal de FM.....	53
Figura 10: Relación de potencias analógica y digital en simulcast para DRM+.	54
Figura 11: Relación de potencias analógica y digital en simulcast para DRM+ en dos canales FM.	55
Figura 12: Relación de potencias analógica y digital en simulcast para DRM+.	55
Figura 13: Diagrama de bloques de recepción señal para el estándar DRM.	59
Figura 14: Diagrama de bloques funcionales de SDR.	60
Figura 15: Digital Up Converter.	61
Figura 16: tarjeta SDR HackRF.....	62
Figura 17: diagrama de bloques de Hack RF One	63
Figura 18: diagrama de bloques USRP N200	64
Figura 19: Diagrama demodulador RTL2832U.....	66
Figura 20: Diagrama del sintonizador R820T.....	67
Figura 21: Estructura de trabajo para el desarrollo del proyecto de grado	82
Figura 22: Cronograma del proyecto	84
Figura 23: Esquema de diseño del sistema	90
Figura 24: Proceso de transmisión del sistema DRM+.....	100
Figura 25: Proceso de transmisión del sistema DRM+.....	101
Figura 26: Circuito amplificador de Radio frecuencia.....	114
Figura 27: Esquema elemental de un dipolo abierto con adaptador Gamma (Gamma Match)	116
Figura 28: Tubo irradiante (antena gamma match).....	117
Figura 29: Conductor coaxial (antena gamma match).....	117
Figura 30: Tubo Gamma (antena gamma match)	118
Figura 31: Separación del irradiante y el tubo Gamma (antena gamma match).....	118
Figura 33: Conexión de la estación DRM con el equipo de transmisión.....	120
Figura 33: Sistema de radiodifusión DRM+	122
Figura 34: SNR est comparativo de datos obtenidos	144
Figura 35; SNR FAC comparativo de datos obtenidos.....	144
Figura 36: SNR MSC comparativo de datos obtenidos	144
Figura 37: intensidad de señal (dBFS) comparativo de datos obtenidos	145

ACRONIMOS

DRM: *Digital Radio Mondiale*/ Radio Digital Mundial.

FM: *Frequency Modulation*/Frecuencia Modulada.

AM: *Amplitude Modulation*/Amplitud Modulada

HF: *High Frequency*/Alta Frecuencia.

OC: Onda Corta

MF: *Medium Frequency*/Frecuencia Media. **OM:** Onda Media

LF: *Low Frequency*/Baja Frecuencia.

OL: Onda Larga

ITU/UIT: *International Telecommunication Union*/ Unión Internacional de Telecomunicaciones.

VHF: *Very High Frequency*/ Muy Alta Frecuencia.

DAB: *Digital Audio Broadcasting*/ Radiodifusión de Radio Digital. **IBOC:** *In-Band On-Chanel* / Canal Dentro de Banda.

ISDB-T: *Integrated Service Digital Broadcasting-Terrestrial*/ Servicios Integrados de Radiodifusión Integral-Terrestre.

DMB: *Digital Multimedia Broadcasting*/ Radiodifusión Multimedia Digital **RDS:** *Radio Data System*/ Sistema de Radiodifusión de Datos

UE: *European Union*/ Unión Europea.

ETSI: *European Telecommunications Standards Institute*/ Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones.

MPEG: *Moving Pictures Experts Group*/ Grupo de Expertos en Movimiento de Fotos.

AAC: *Advanced Audio Coding*/ Codificación de Audio Avanzada. **SFN:** *Single Frequency Network* / Redes de Frecuencia Única. **MFN:** *Multiple Frequency Network* / Redes Multi-Frecuencia.

CELP: *Code Excited Linear Prediction*/ Predicción Lineal con Excitación por Código

HVXC: *Harmonic Vector Excitation Coding*/ Codificación por Excitación de Vector Armónico

SBR: *Spectral Band Replication*/ Replicación de Banda Espectral. **PS:** *Parametric Stereo*/ Estéreo Paramétrico. **AE**

MPS: *MPEG Surround*/ MPEG Envolvente.

UEP: *Unequal Error Protection*/ Protección de Error Desigual. **VER:** *Bit Error Rate* / Tasa de Error de Bit.

CRC: *Cyclic Redundancy Check*/ Comprobación por Redundancia Cíclica. **SAC:** *Spatial Audio Coding*/ Codificación de Audio Espacial.

AFS: *Alternative Frequency Switching*/ Conmutación de Frecuencia Alternativa.

QAM: *Quadrature Amplitude Modulation*/ Modulación de Amplitud en Cuadratura.

SNR: *Signal to Noise Ratio* / Relación Señal a Ruido.

COFDM: *Codec Orthogonal Frequency Division Multiplexing*/ Multiplexación

Por División de Frecuencia Ortogonal Codificada.

FEC: *Forward Error Correction*/ Corrección de Errores hacia Adelante. **FFT:** *Fast Fourier Transform*/ Transformada Rápida de Fourier

IFFT: *Inverse Fast Fourier Transform*/ Transformada Rápida de Fourier Inversa **EEP:** *Equal Error Protection*/ Protección Igual de Error.

SM: *Standard Mapping* / Mapeo Estándar.

HMSym: *Symmetrical Mapping Hierarchical* / mapeo Jerárquico Simétrico.

HMmix: *Mixed Mapping Hierarchical* / Mapeo Jerárquico Mixto.

SDI: *Service Interface Distribution*/ Interfaz de Distribución de Servicio.

MDI: *Multiplex Distribution Interface* / Interfaz de Distribución de Multiplexor. **MCI:** *Modulator Control Interface* / Interfaz de Control de Modulador.

DCP: *Distribution & Communication Protocol*/ Protocolo de Comunicación y Distribución.

SCE: *Service Component Encoder*/ Codificador de Componente de Servicio.

SNMP: *Simple Network Management Protocol* / Protocolo Simple de Administración de Red.

CAPÍTULO 1 ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO

1.1. INTRODUCCIÓN

El proyecto tiene el propósito de aumentar de eficiencia en la transmisión de información, mejorar la calidad del servicio de la banda FM, a través de la implementación del servicio digital, aclarando que la radiodifusión sonora digital transmite información con el uso de las ondas de radio (*espectro radioeléctrico*), codificadas de forma digital y no haciendo uso de la red de internet. Proporcionando así resultados que puedan satisfacer las necesidades de los usuarios cada vez más exigentes.

DRM¹ permite el aumento del número de estaciones de radiodifusión, dentro de la banda, actualmente asignada para radiodifusión FM y AM. Las estaciones que actualmente transmiten en las bandas de onda media y onda corta, mejorarán de manera significativa la calidad de audio, transmisión de datos, ahorro del espectro radioeléctrico. Y en la banda de frecuencias FM podrán operar con el sistema Surround 5.1; además con la norma DRM es posible transmitir diapositivas, textos, páginas web, e incluso videos en vivo con baja definición a receptores que cuenten con tales opciones.

El sistema DRM brinda la opción de recibir señales a través de frecuencias de OC (*onda corta*), OM (*onda media*) bajo el estándar DRM30 hasta la banda de VHF². Sin embargo, el estándar DRM+ (*radio digital mundial plus*), es el sistema que abarca la gama de frecuencias más amplia para radio digital en el mundo; además es el único estándar que no está protegido por derechos de propiedad intelectual, soporta la transmisión de mensajes de texto e imágenes, permite la transmisión de un solo canal de audio con excelente calidad o varios canales en la misma frecuencia, con menor calidad.

DRM+ es el estándar para el espectro de radio de VHF entre 30 MHz y 300 MHz, principalmente usado en la banda I (*de 47 MHz a 68 MHz*) y la banda II (*de 87,5 MHz a 108 MHz*) correspondiente a la banda comercial de FM. (*digital radio mondiale, 2016*)³. En Bolivia la banda de FM comercial es de 88 a 108 MHz.

El proyecto se enfoca en la implementación de un módulo radiodifusor digital desarrollada con la aplicación del estándar DRM+, siendo así un trabajo piloto de investigación, empleando el estándar DRM+ para el Instituto de Electrónica Aplicada en la Universidad Mayor de San Andrés, mismo que se efectuará mediante herramientas de software libre así como el análisis de distintas etapas de transmisión. El Dispositivo de Radio Definido por Software USRP⁴ es un transceptor periférico de radio por software universal para la generación de prototipos de sistemas de comunicación inalámbrica. Ofrece rangos de frecuencias hasta 6 GHz en un ancho de banda instantánea (*Ambitiously*)⁵, dispositivo que actualmente posee el Instituto de Electrónica Aplicada.

Para construir y transmitir la señal se utilizará el USRP⁶, junto al estándar DRM+, utilizando frecuencias de la banda FM, se analizan las emisiones de señales facilitando su manipulación

¹ DRM: Digital Radio Mondiale Radio digital mundial

² VHF: Very high frequency muy alta frecuencia

³ Fuente: <https://www.drm.org/>

⁴ USRP: Universal Software Radio Peripheral

⁵ <https://www.ni.com/es-cr/shop/select/usrp-software-defined-radio-device>

⁶ USRP: Universal Software Radio Peripheral

mediante las interfaces de usuarios, posteriormente se adapta lo obtenido en las computadoras personales, para la recepción mediante el SDR (*Software Defined Radio*) aparato básico conformado por un computador equipado con una tarjeta de sonido y un conversor analógico-digital, precedido por el USRP. Esta configuración permite cambiar los protocolos y formas de onda requeridos por el estándar DRM+, para así poder dar inicio a un sistema cerrado como es el Instituto de Electrónica Aplicada.

1.2. ANTECEDENTES

Debido a la creciente necesidad mundial de desarrollar un sistema digital de radiodifusión, diversas empresas al final del siglo XX y principios del siglo XXI, se lanzaron en la búsqueda de un sistema que pudiera ser útil y rentable, basándose en distintas filosofías de creación.

En Latinoamérica, podemos decir que distintos países cuentan con la utilización del estándar DRM. Sin embargo, la implementación del DRM+ en el mundo es considerado mayormente por países europeos, no obstante en lugares como Ecuador, México entre otros mayormente utilizan el estándar DRM, y como un segundo estándar utilizan DAB (Transmisión digital de audio).

El consorcio que diseña el estándar DRM realizó diferentes pruebas en varios lugares del mundo entre ellos se encuentra Ecuador, donde se buscó adaptarlo a condiciones climáticas extremas. Es importante mencionar que a inicios del 2005, se realizaron pruebas con el estándar DRM en la Ciudad de México, en el cual las primeras transmisiones en la banda de onda corta comenzaron el año 2004 (Signo y pensamiento, 2008)⁷, destacando que los primeros receptores datan de ese mismo año, pero sus precios aún son excesivos.

Estudios recientes en Ecuador, realizaron pruebas de factibilidad para la implementación del servicio de radiodifusor digital DRM, con resultados destinados a distintas alternativas de implementación.

Europa lleva hoy la delantera en el desarrollo y la operacionalización de estándares de radiodifusión digital terrestre, pero los modelos de negocio de la radio digital satelital estadounidense, se han mostrado mucho más exitosos.

A inicios del año 2017 Noruega ha comenzado a apagar sus emisiones de radiodifusión analógica en la banda de FM, planificando la sustitución de la misma por la tecnología DRM. Esto unido a que otros países europeos como Suiza, han anunciado el apagón analógico de la FM en 2020.

España acaba de experimentar el estándar DRM (Digital Radio Mondiale), basado en la digitalización de emisiones en la banda de ondas medias, largas y cortas. Esta primera gran prueba piloto ha contado con la participación de la cadena SER (Operadores telecomunicaciones)⁸, Vimesa⁹, Axió¹⁰ y la Universidad del País Vasco. La emisión se realizó entre mayo y octubre del 2007, pero hasta ahora no se ha presentado oficialmente. (La radio ensaya nuevas tecnologías para entrar en el mundo digital)¹¹

⁷ http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-48232008000100009

⁸ CADENA SER: Operadores de telecomunicaciones Europeos
https://cadenaser.com/tag/operadores_telecomunicaciones/a/

⁹ VIMESA: Fabricante de equipos para radiodifusión <https://www.vimesa.es/>

¹⁰ AXION: Operador de infraestructura de telecomunicaciones

¹¹ https://elpais.com/diario/2008/04/14/radiotv/1208124002_850215.html

1.2.1. SITUACIÓN ACTUAL EN BOLIVIA

Bolivia es una de las naciones con mayor cantidad de radioemisoras por habitante. Actualmente, el país cuenta con 847 radioemisoras, de las cuales 638 se encuentran en frecuencia modulada (FM), 35 en onda corta (OC) y 174 en amplitud modulada (AM)¹². Es importante mencionar que en nuestro país, solo existen distintas investigaciones sobre la transmisión de radio digital, pero no se ha llegado a la implementación de esta tecnología.

La Facultad de Ingeniería de la UMSA¹³ cuenta con un prototipo de transmisión digital basado en el estándar DRM30, que se utiliza para realizar estudios basados en el estándar DRM+ así como para la creación de un diseño factible e implementable en beneficio para las personas involucradas en la radiodifusión.

Algunas de las siguientes investigaciones son referentes en el desarrollo de este proyecto entre ellas está la publicación de la Universidad Católica Boliviana, sobre un análisis comparativo entre estándares de radio digital terrestre con IBOC y DRM en la banda de FM, estudio que fue aplicado en las ciudades de La Paz y El Alto.

La investigación bajo la normativa de radio digital de onda media y estrategias de implementación descrita por *Silva Torrez Aroa (2003)*; El estudio de factibilidad para la implementación de radiodifusión digital con el estándar DRM en Bolivia anunciada por *Rodrigo Erik Chipana (2013)*, proyectos que resaltan los estándares para una transmisión digital.

1.3. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

De manera convencional y tradicional se utilizan equipos sofisticados de alto costo, para transmitir señales digitales y hasta ahora no se conocen implementaciones sobre las construcciones de señales digitales para la radiodifusión sonora digital en nuestro ámbito, es necesario tener un prototipo de laboratorio que sirva como evaluación para considerar criterios de estudio dando la oportunidad de elección de estándares que se complementen a distintas estaciones de radiodifusión. Se requiere un dispositivo receptor capaz de decodificar según un estándar específico. Cuando se utiliza la transmisión digital para implementar un sistema de radio. Por lo tanto, existen diferentes deficiencias en la implementación de sistemas de radio digital.

El instituto de electrónica aplicada de la UMSA¹³ desea dar a conocer la línea de investigación para bandas comerciales en radiodifusión digital, aplicando el estándar DRM+, considerando como base la ejecución previa de un prototipo experimental de transmisión de radio en las bandas menores a 30 MHz, en radio digital dentro del estándar DRM30. Y para completar la línea de investigación como su funcionalidad, es importante incorporar una antena, así como un amplificador de radiofrecuencia para tener una cobertura demostrativa de la transmisión de datos en radiofrecuencia.

1.4. PROPUESTA DE LA SOLUCIÓN

La implementación del módulo en radiodifusión digital en este proyecto considera la manipulación de un sistema de radio definida por software, a través de un computador para el control y amplificación de señal que asegure el funcionamiento óptimo del mismo, sin la necesidad de contar con una infraestructura especial o específica para este estándar.

¹² <http://worldradiomap.com/bo/la-paz>

¹³ UMSA: Universidad Mayor de San Andrés /Universidad estatal en La Paz-Bolivia

El Instituto de Electrónica cuenta con equipos sofisticados para ejecutar proyectos de transmisión de señal, que se utilizará para la elaboración de un módulo de transmisión digital dedicado a la banda de frecuencia FM comercial.

El sistema en radiodifusión digital puede realizar la recepción de señal mediante un dispositivo SDR, este componente ayudará simplificando el trabajo de adquirir equipos sofisticados laborados de alto costo, cabe resaltar que existe una pérdida insignificante en la precisión de mediciones de la señal recibida por este dispositivo.

El estándar estudiado permite ejecutar tareas mediante herramientas de software libre y radio definida por software, de esta manera se conocen los detalles en cuanto a la construcción de señal, facilitando su desarrollo como implementación. En síntesis y conclusión una aplicación del estándar DRM+ es más factible mediante radio definida por software.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

- Implementar un módulo radiodifusor digital mediante el estándar DRM+ (*Digital Radio Mondiale plus*) utilizando radio definida por software para una línea de investigación del Instituto de Electrónica Aplicada de la Universidad Mayor de San Andrés.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer el diseño de la red de comunicación para el proceso de transmisión.
- Realizar pruebas técnicas en el sistema de transmisión sin amplificador ni antena.
- Definir los parámetros necesarios para el funcionamiento del sistema de transmisión.
- Diseñar y construir una antena y un amplificador para la radiodifusión digital, para alcanzar una señal dentro del Instituto de Electrónica Aplicada de la Universidad Mayor de San Andrés.
- Implementar el amplificador de radiodifusión y la antena para realizar pruebas de transmisión en el área de estudio.
- Verificar y evaluar de los parámetros de transmisión en DRM+, comprobando la funcionalidad del sistema.
- Presentar el sistema de transmisión de radio digital y resultados funcionales, basado en el estándar DRM+, para el Instituto de Electrónica Aplicada en la UMSA¹³.

1.6. JUSTIFICACIONES

1.6.1. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

El proyecto pretende implementar contribuir y fortalecer la investigación en el área de digitalización de ondas de radio a través del uso de herramientas de software libre, con el estándar DRM+ como base para el diseño de un sistema una radio definida por software, orientado a computadoras personales, que reduce el costo de infraestructura para equipo sofisticado de forma tradicional,.

La implementación de una radiodifusora digital, es uno de los primeros proyectos de investigación que estará basado en la radio digital de banda FM; la cual es más utilizada analógicamente y su radiodifusión será ejecutada con ayuda de los equipos con los que cuenta el Instituto de Electrónica Aplicada en la Universidad Mayor de San Andrés.

1.6.2. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

El proyecto propuesto es una demostración y ejecución de temas de la ingeniería electrónica dentro del área de telecomunicación como: modulación en QPSK¹⁴, DQPSK¹⁵ y QAM¹⁶, multiplicación OFDM¹⁷, formas de dispersión de energía, supertramas de audio, particionamiento, atenuación, codificación, entrelazado de tramas y amplificadores de RF¹⁸ específicos, todos ellos nos acercan conceptualmente a nuestro objetivo, además se considera el estudio previo que se realizó a través de un prototipo de transmisión digital de radio para las bandas de AM, que se pretende complementar en el rango de transmisión radio digital. Por otro lado el diseño y construcción del amplificador y la antena, se basan en los conocimientos adquiridos en el transcurso de estudio de la carrera universitaria así como en la experiencia y sugerencias de docentes calificados.

1.6.3. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

Con respecto al área económica el nivel de costos para la ejecución de este proyecto es reducido como factible, debido a que no requiere de infraestructura adicional para la generación de ondas de radio digital, porque es una radio definida mediante software, misma que no es utilizada en el mercado local existente, consecuencia de la falta de información de la existencia y funcionamiento de esta alternativa digital.

Es importante destacar que el Instituto de Electrónica Aplicada cuenta con los recursos necesarios para el desarrollo y ejecución del proyecto de investigación a realizar, fomentando el desarrollo de la ciencia en la facultad de ingeniería de la UMSA.

1.7. ALCANCE Y LIMITES

La implementación del proyecto bajo el estándar DRM+ sobre la banda de FM para una transmisión digital efectiva es un sistema que considera la difusión de señal planificada para el interior de las instalaciones del Instituto de Electrónica Aplicada de la UMSA¹⁰, mediante un dispositivo SDR el cual realizará la transmisión de señal con la ayuda del programa [GNU Radio], con la construcción de la señal sobre el software libre SPARK, por otra parte se debe considerar que nuestro estudio no contempla a los enlaces de radiodifusión externos por estar en un ambiente cerrado. Una vez finalizado el trabajo investigativo a nivel teórico como práctico, a través de la implementación y pruebas piloto, con fines académicos y demostrativos para el proyecto; el funcionamiento de la radio digital solo podrá ser permanente y funcional cuando la entidad encargada de la regulación de frecuencias ATT emita la licencia adecuada para el funcionamiento, además se debe considerar la inversión económica en otros equipos sofisticados requeridos para un óptimo rendimiento.

¹⁴ QPSK: Quadrature phase shift keying

¹⁵ DQPSK: Digital Quadrature phase shift keying

¹⁶ QAM: Quadrature amplitude Modulation

¹⁷ OFDM: Orthogonal frequency division multiplex

¹⁸ RF: Radiofrecuencia

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1. PRINCIPIOS DE LA RADIODIFUSIÓN

La radiodifusión aparece para brindar información oportuna a un conjunto de personas, término que designa el servicio de emisión de señales de radio y televisión para uso público generalizado. *Broadcasting (comunicación abierta)* termino en inglés usado como sinónimo.

Antes de la radiodifusión sonora existieron distintos métodos para transmitir información a lugares cercanos y distantes, como el telégrafo inalámbrico. La mayoría de los métodos de transmisión tenían la desventaja de no poder enviar voz, debido a restricciones propias de la época; gracias a las técnicas de modulación y al avance de la tecnología, se encontró la manera de irradiar una señal que contuviera la información en sí, no una representación o código de la misma, es decir, la voz. Las técnicas para la transmisión de voz, por medio de ondas electromagnéticas, fueron las de la modulación en amplitud (AM), para luego pasar a la modulación por frecuencia. Dichas técnicas permiten manipular las ondas de manera tal, que la información de audio pudiera enviarse a su destino, superando problemas como el ancho de banda necesario para la transmisión o la distancia a cubrir de las mismas, es decir, la cobertura de la señal radiada.

A principios de la década de los 1900, Reginald Fessenden, a partir de los experimentos realizados por Marconi años atrás con su telégrafo inalámbrico, logra el 23 de diciembre de 1900 transmitir el primer audio de manera inalámbrica, desde Rock Point, Maryland, Estados Unidos, a una distancia aproximada de 2.57 Km. Con estos experimentos se convirtió en el padre de la radiodifusión actual.

Revisando la historia de la radiodifusión boliviana hay diferentes versiones, respecto a la primera radio en Bolivia; se habla de la primera experiencia de los sacerdotes jesuitas del Colegio San Calixto de la ciudad de La Paz, y la otra del P. Clerc en 1897. Después de finalizada la guerra del Chaco, en 1937, Radio Illimani pasa a poder del Estado, desde ahí se denomina Radio Illimani "La Voz del Estado Boliviano". En ese mismo año, apareció en la ciudad de La Paz "Radio La Paz", y dos años más tarde, el 2 de febrero de 1939, "Radio Fides" (*La Voz Católica de Bolivia*). A partir de este último año y pasando por los años cuarenta y cinco, se inició el crecimiento cuantitativo de radioemisoras por todo el país (Reyes, 1990).¹⁹

2.1.1. MODULACION ANALOGICA

2.1.1.1. AMPLITUD MODULADA AM

Considerada una técnica de modulación, diseñada para la transmisión de información a través de ondas hertzianas. La modulación en amplitud (AM) tiene como función la variación de amplitud de la señal transmitida en relación con la información que se envía.

Para obtener la transmisión de voz empleando el espectro radioeléctrico, se hicieron varios intentos y varias ideas surgieron. Se planearon y se probaron varios métodos, es decir, se intentó con varios tipos de modulaciones. Pero uno de los moduladores ya probados era la modulación de amplitud modulada, empleada en los sistemas telefónicos alrededor de la década de 1870, técnica llamada en un principio como Corrientes Ondulantes. Este es el método más factible, pero no el más eficiente. Para poder enviar la señal a través de dicho medio hay que adecuarla a

¹⁹ FUENTE: Periódico "la patria" del año 2011 redactado por Donato Ayma Rojas

este, lo cual se logra modulando la señal, ya que de no hacerlo sería imposible llegar a las distancias que se requieren. La señal a enviar se hará oscilar a una frecuencia fija y la amplitud de ésta se propagará, en relación a la señal de voz que queremos transmitir. La señal que sujeta al mensaje será denominada Moduladora, debido a que ésta modula la señal que se encarga de llevar la información; la señal que interactúa con la moduladora será la Portadora, ésta es la señal oscilante. El resultado de esta interacción, es decir, la señal radiada será conocida como Modulada. Dicha señal es la que se propagará grandes distancias (por su tipo de propagación terrestre) y es en donde se lleva el mensaje a su destino, para después ser interpretada por los receptores y poder recrear el mensaje original.

En el estado plurinacional de Bolivia la banda de 535 a 1.625 kHz, está atribuida en forma exclusiva al servicio de radiodifusión en Amplitud Modulada. La asignación de estos canales se sujetó a las normas y planes necesarios para la implementación de la Radio Digital Terrestre.²⁰ En el departamento de La Paz se han establecido 53 canales separados cada uno con 10 KHz. La separación entre frecuencias de una misma zona es de 20 kHz. El Plan Nacional de Frecuencias establece las bandas que son atribuidas al servicio de Radiodifusión Sonora en Amplitud Modulada (535 – 1605 kHz), tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Cuadro de atribución de bandas de frecuencias 495 – 2.107 KHz

ATRIBUCIÓN A LOS SERVICIOS		
REGIÓN 2 - U.I.T.	ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA	NOTAS
495 - 505 kHz MÓVIL MARÍTIMO	495 - 505 kHz MÓVIL MARÍTIMO	
505 - 510 kHz MÓVIL MARÍTIMO 5.79	505 - 510 kHz MÓVIL MARÍTIMO 5.79	
510 - 525 kHz MÓVIL MARÍTIMO 5.79A 5.84 RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA	510 - 525 kHz MÓVIL MARÍTIMO 5.79A 5.84 RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA	
525 - 535 kHz RADIODIFUSIÓN 5.86 RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA	525 - 535 kHz RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA	
535 - 1.605 kHz RADIODIFUSIÓN	535 - 1.605 kHz RADIODIFUSIÓN	BOL 1
1.605 - 1.625 kHz RADIODIFUSIÓN 5.89 5.90	1.605 - 1.625 kHz RADIODIFUSIÓN 5.89 5.90	BOL 1
1.625 - 1.705 kHz FIJO MÓVIL RADIODIFUSIÓN 5.89 5.90 Radiolocalización	1.625 - 1.705 kHz FIJO MÓVIL Radiolocalización	BOL 2
1.705 - 1.800 kHz FIJO MÓVIL RADIOLOCALIZACIÓN RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA	1.705 - 1.800 kHz FIJO MÓVIL RADIOLOCALIZACIÓN RADIONAVEGACIÓN AERONÁUTICA	BOL 5
1.800 - 1.850 kHz AFICIONADOS	1.800 - 1.850 kHz AFICIONADOS	
1.850 - 2.000 kHz AFICIONADOS FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico RADIOLOCALIZACIÓN RADIONAVEGACIÓN 5.102	1.850 - 2.000 kHz AFICIONADOS FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico RADIOLOCALIZACIÓN RADIONAVEGACIÓN 5.102	
2.000 - 2.065 kHz FIJO MÓVIL	2.000 - 2.065 kHz FIJO MÓVIL	
2.065 - 2.107 kHz MÓVIL MARÍTIMO 5.105 5.106	2.065 - 2.107 kHz MÓVIL MARÍTIMO 5.105 5.106	

Fuente: Plan nacional de frecuencia del Estado Plurinacional de Bolivia

²⁰ Plan nacional de frecuencia del Estado Plurinacional de Bolivia – 2012. ministerio de obras públicas, servicios y vivienda viceministerio de telecomunicaciones

La tercera columna “NOTAS” está destinada para la relación y numeración de las Notas Nacionales con siglas alfanuméricas (ejemplo: BOL1, BOL2, BOL3, entre otras), estas notas expresaran las atribuciones en el marco de soberanía en materia de administración del espectro radioeléctrico dentro el Estado Plurinacional de Bolivia²¹.

2.1.1.2. FRECUENCIA MODULADA FM

Así como la frecuencia modulada se encargaba de transmitir por medio de la variación de amplitud, transmitiendo información a través de una onda portadora variando su frecuencia. En este tipo de modulación la variación se produce en los saltos de frecuencias.

Las características principales de la frecuencia modulada generalmente son: su modulación y su propagación por ondas directas como consecuencia de su ubicación en la banda de frecuencia de VHF, en ella se crean bandas laterales cuya extensión dependerá de la amplitud de la onda moduladora, estas bandas laterales hacen que el ancho de banda que se utiliza en esta modulación sea más grande que el tradicionalmente en la onda media.

La modulación de frecuencia (FM) tiene utilidad en las bandas de VHF es decir; muy alta frecuencia para radiodifusión de la música, voz y de audio en televisión analógica. Además, se utiliza para enviar señales al espacio.

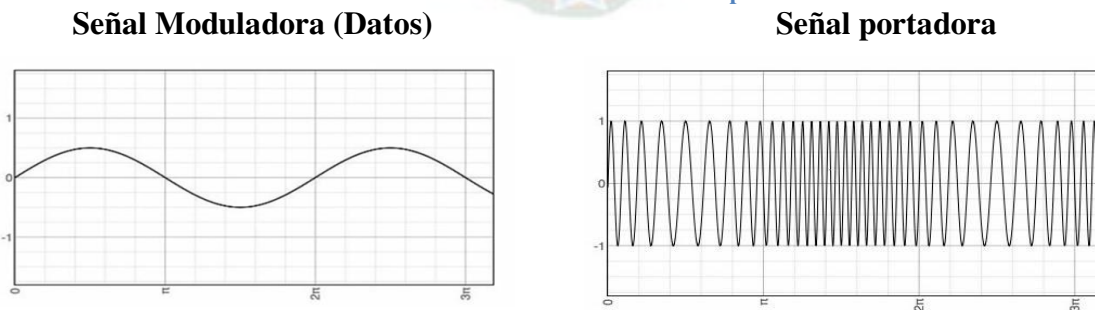
Este método de modulación tiene un mejor rechazo a la interferencia electromagnética que AM, también se utiliza en las frecuencias de audio para sintetizar sonido. Está técnica, conocida como síntesis FM, fue popularizada en los principios de los sintetizadores digitales y se convirtió en una característica estándar para varias generaciones de tarjetas de sonido en computadores personales. Dentro de los avances más importantes que se presentan en las comunicaciones, el mejoramiento de un sistema de transmisión y recepción en características como la relación señal ruido, sin duda es uno de los más importantes, pues permite una mayor seguridad en las mismas.

Es así como el paso de modulación en amplitud, a la Modulación en Frecuencia (FM), establece un importante avance no solo en el mejoramiento que presenta la relación señal ruido, sino también en la mayor resistencia al efecto del desvanecimiento y a la interferencia, tan comunes en A.M.

2.1.1.2.1. MODULACIÓN DE FRECUENCIA - FM

La señal modulada mantendrá fija su amplitud y el parámetro de la señal portadora que variará es la frecuencia, y lo hace de acuerdo a cómo varía la amplitud de la señal moduladora.

Ilustración 1: Señal moduladora vs señal portadora



FUENTE: <https://www.textoscientificos.com/>

La expresión matemática de la señal portadora está dada por:

$$vp(t) = Vp \text{ sen}(2\pi fp t) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde Vp es el valor pico de la señal portadora y fp es la frecuencia de la señal portadora en función al tiempo.

Mientras que la expresión matemática de la señal moduladora está dada por:

$$vm(t) = Vm \text{ sen}(2\pi fm t) \quad \text{Ecuación 2}$$

Siendo Vm el valor pico de la señal moduladora y FM su frecuencia ambas en función al tiempo.

De acuerdo a lo dicho anteriormente, la frecuencia f de la señal modulada variará alrededor de la frecuencia de la señal portadora de acuerdo a la siguiente expresión

$$f = fp + \Delta f \text{ sen}(2\pi fm t) \quad \text{Ecuación 3}$$

Por lo tanto la expresión matemática de la señal modulada resulta

$$vp(t) = Vp \text{ sen}[2\pi (fp + \Delta f \text{ sen}(2\pi fm t))t] \quad \text{Ecuación 4}$$

Se denomina Δf desviación de frecuencia y es el máximo cambio de frecuencia que puede experimentar la frecuencia de la señal portadora. A la variación total de frecuencia desde la más baja hasta la más alta, se la conoce como oscilación de portadora.

De esta forma, una señal moduladora que tiene picos positivos y negativos, tal como una señal senoidal pura, provocará una oscilación de portadora igual a 2 veces la desviación de frecuencia.

Una señal modulada en frecuencia puede expresarse mediante la siguiente expresión.

$$v(t) = Vp \text{ sen}[2\pi fp t + \frac{\Delta f}{fm} \cos(2\pi fm t)] \quad \text{Ecuación 5}$$

Se denomina índice de modulación a

$$mf = \frac{\Delta f}{fm} \quad \text{Ecuación 6}$$

Se denomina porcentaje de modulación a la razón entre la desviación de frecuencia efectiva respecto de la desviación de frecuencia máxima permisible.

$$\text{Porcentaje modulación} = \frac{\Delta f \text{ efectiva}}{\Delta f \text{ máxima}} * 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

Al analizar el espectro de frecuencias de una señal modulada en frecuencia, observamos que se tienen infinitas frecuencias laterales, espaciadas en FM , alrededor de la frecuencia de la señal portadora fp ; sin embargo la mayor parte de las frecuencias laterales tienen poca amplitud, lo que indica que no contienen cantidades significativas de potencia.

El análisis de Fourier indica que el número de frecuencias laterales que contienen cantidades significativas de potencia, depende del índice de modulación de la señal modulada, y por lo tanto el ancho de banda efectivo también dependerá de dicho índice.

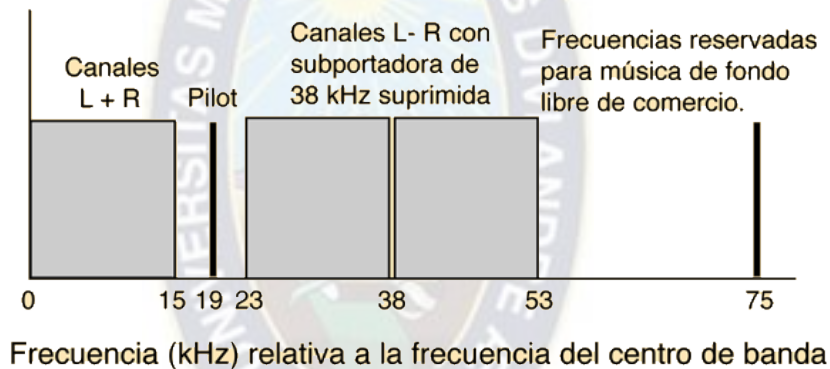
2.1.1.2.2. FUNCIONAMIENTO DE LA FM ESTERO

La generación de la señal estero de la modulación por frecuencia ocurre con las señales de audio producidos por el micrófono nombrándose como L y R(Left y Righth) izquierdo y derecho respectivamente, las cuales se aplican a un circuito que realiza la unión de las señales, con lo cual se generan 2 nuevas señales, una de ellas corresponde a la suma instantánea de los valores de las señales L y R, y se le da el nombre de señal L + R; la otra es la señal L - R, y es

determinado a la diferencia instantánea de las dos señales antes ingresadas. La señal L - R se usa para modular en amplitud una sub - portadora de 38 KHz, la cual produce como consecuencia bandas laterales de frecuencias superiores e inferiores a los 38 KHz.; esto permite que después de la modulación se pueda suprimir la frecuencia sub - portadora central de 38 KHz, Para ahorrar espacio, se transmitirá la portadora principal. Por lo tanto, solo las bandas laterales AM generadas por el procesamiento de señal anterior L - R y la portadora de 28 KHz se aprovechan para modular en frecuencia a la portadora principal en conjunto con la señal L + R.

Las señales L y R siendo de audiofrecuencia tienen un ancho de banda reducido, siendo este de 0 a 15 KHz. Las frecuencias superiores a 15 KHz se suprimen por medio de filtros capaces de eliminar las frecuencias no deseadas. Por lo mismo, la señal L + R que se transfiere a la portadora de FM tiene un ancho de banda de 15 KHz. De las 2 bandas laterales que resultan de la modulación de la sub - portadora auxiliar por la señal L - R, la inferior se ubica de 23 a 38 KHz. y la superior de 38 a 53 KHz, entonces la información que contiene la otra señal L + R queda separada por 8 KHz de la información que contiene la otra señal L - R, gracias a esto se pueden distinguir y separar fácilmente en el detector del receptor, después que se transmite.

Ilustración 2: Banda de Radiodifusión de FM Estéreo



Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Audio/radio.html>

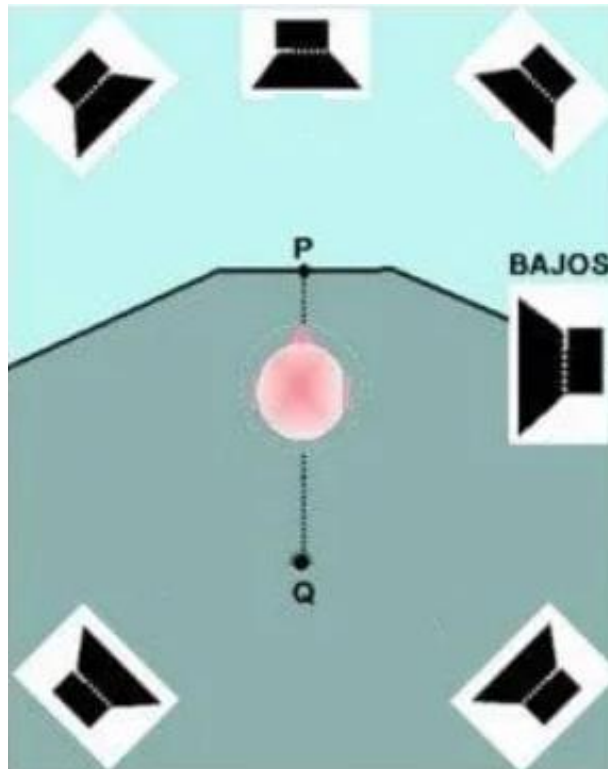
2.1.1.2.3. EFECTO ESTEREOFONICO

Debido al acrónimo de sonido izquierdo y derecho, la señal enviada al altavoz generalmente se llama I y R esto, lo que puede indicar que no es conveniente aumentar la potencia de dos canales para aumentar el sentido de potencia, pero sí una nueva señal generado. La suma de los dos canales y se alimenta a un amplificador equipado con altavoces especiales para bajas frecuencias llamado buffer, colocado en cualquier lugar del ambiente los bajos no son direccionales.

Solo en el sistema de sonido envolvente más moderno (sonido envolvente en inglés) equipado con 6 altavoces se puede lograr la verdadera sensación de sonido emitido 360 ° alrededor del usuario. Cinco son bandas de frecuencia completa y una es banda de baja frecuencia o búfer, por lo que el sistema se conoce como 5.1 canales para abreviar. La ubicación de los altavoces se muestra en la ilustración 3, pero el bajista se puede colocar en cualquier lugar del ambiente.

Los sistemas de transmisión de radio de FM, solo contemplan la transmisión de estereofonía de dos canales aunque muchos equipos de calidad como por ejemplo los Home Theater generan señales de 5.1 canales, combinando las señales I y D en un sistema llamado surround virtual.

Ilustración 3: Ubicación de los parlantes en el sistema de 5.1 canales



Fuente: <https://electronicaCompleta.com/que-es-el-sonido-stereo/>

2.1.1.2.4. LA RADIODIFUSIÓN EN FRECUENCIA MODULADA (FM) EN BOLIVIA

El servicio de radiodifusión en frecuencia modulada mencionado anteriormente, es un sistema de transmisión de radio en el que la onda portadora se modula de forma que su frecuencia varíe según la señal de audio transmitida.

En Bolivia la banda de frecuencias en FM es de 88 a 108 MHz (según la canalización del grupo), atribuida exclusivamente al servicio de radiodifusión en frecuencia modulada, distribuida en frecuencias de la banda de Frecuencia Modulada, para las Áreas de Servicio de las ciudades de La Paz - El Alto, Cochabamba y Santa Cruz de la Sierra.

Se considera por grupo hasta diecisiete frecuencias en la banda de Frecuencia Modulada - FM (88 a 108 MHz), donde se tiene canalización de 66 frecuencias, considerando el total de frecuencias disponibles a partir de la canalización establecida por la Resolución Ministerial de telecomunicaciones N° 294, contabilizando las asignaciones efectuadas de acuerdo a los planes de asignación de frecuencias, debiendo quedar el total de asignaciones por sector de la siguiente manera: cinco (5) frecuencias para el Estado, cuatro (4) para Pueblos Indígenas Originario Campesinos y diez (10) frecuencias para el sector Social Comunitario²¹.

Para áreas de servicio en ciudades capitales y áreas de servicio adyacentes se considera la canalización del grupo 3:

²¹ Telecomunicaciones Bolivia: Resolución Ministerial N° 317, 30 de abril de 2018

Tabla 2: Canalización Grupo 4.de FM en Bolivia

Nº	Frecuencia [MHz]	Nº	Frecuencia [MHz]	Nº	Frecuencia [MHz]	Nº	Frecuencia [MHz]
1	88,2	18	93,3	35	98,4	52	103,5
2	88,5	19	93,6	36	98,7	53	103,8
3	88,8	20	93,9	37	99,0	54	104,1
4	89,1	21	94,2	38	99,3	55	104,4
5	89,4	22	94,5	39	99,6	56	104,7
6	89,7	23	94,8	40	99,9	57	105,0
7	90,0	24	95,1	41	100,2	58	105,3
8	90,3	25	95,4	42	100,5	59	105,6
9	90,6	26	95,7	43	100,8	60	105,9
10	90,9	27	96,0	44	101,1	61	106,2
11	91,2	28	96,3	45	101,4	62	106,5
12	91,5	29	96,6	46	101,7	63	106,8
13	91,8	30	96,9	47	102,0	64	107,1
14	92,1	31	97,2	48	102,3	65	107,4
15	92,4	32	97,5	49	102,6	66	107,7
16	92,7	33	97,8	50	102,9		
17	93,0	34	98,1	51	103,2		

Fuente: Plan Nacional de Frecuencias Estado Plurinacional de Bolivia - 2012

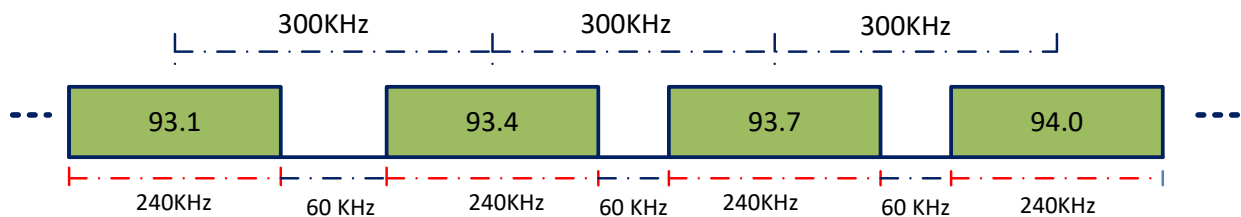
Tabla 3: Canalización Grupo 3. de FM en Bolivia

Nº	Frecuencia [MHz]	Nº	Frecuencia [MHz]	Nº	Frecuencia [MHz]	Nº	Frecuencia [MHz]
1	88,3	35	98,5	18	93,4	52	103,6
2	88,6	36	98,8	19	93,7	53	103,9
3	88,9	37	99,1	20	94,0	54	104,2
4	89,2	38	99,4	21	94,3	55	104,5
5	89,5	39	99,7	22	94,6	56	104,8
6	89,8	40	100,0	23	94,9	57	105,1
7	90,1	41	100,3	24	95,2	58	105,4
8	90,4	42	100,6	25	95,5	59	105,7
9	90,7	43	100,9	26	95,8	60	106,0
10	91,0	44	101,2	27	96,1	61	106,3
11	91,3	45	101,5	28	96,4	62	106,6
12	91,6	46	101,8	29	96,7	63	106,9
13	91,9	47	102,1	30	97,0	64	107,2
14	92,2	48	102,4	31	97,3	65	107,5
15	92,5	49	102,7	32	97,6	66	107,8
16	92,8	50	103,0	33	97,9		
17	93,1	51	103,3	34	98,2		

Fuente: Plan Nacional de Frecuencias Estado Plurinacional de Bolivia – 2012

La separación entre portadoras es de 300KHz y el ancho de banda de cada portadora es de 240 KHz según el Plan Nacional de Frecuencias, para el Servicio de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Moduladas FM donde se establece el cambio de la frecuencia y con el cambio del ancho de banda a radioemisoras en Frecuencia Modulada FM, con el fin de dar paso a nuevas frecuencias que serán otorgadas a organizaciones sociales.

Ilustración 4: Gráfica de separación entre portadora en la banda de FM



Fuente: Elaboración propia según el plan nacional de frecuencia.

Para el sector rural se considera ocho (8) frecuencias en la banda de Frecuencia Modulada - FM (88 a 108 MHz), por área de servicio donde la canalización sea de 49 frecuencias, distribuidas de la siguiente manera: dos (2) para el Estado, dos (2) para Pueblos Indígenas Originarios Campesinos, dos (2) para el sector social comunitario y dos (2) para el sector comercial en función a la disponibilidad de frecuencias en estas áreas de servicio y respetando la distribución establecida por la Ley N° 164 de 08 de agosto de 2011, General de Telecomunicaciones, Tecnologías de Información y Comunicación¹⁹.

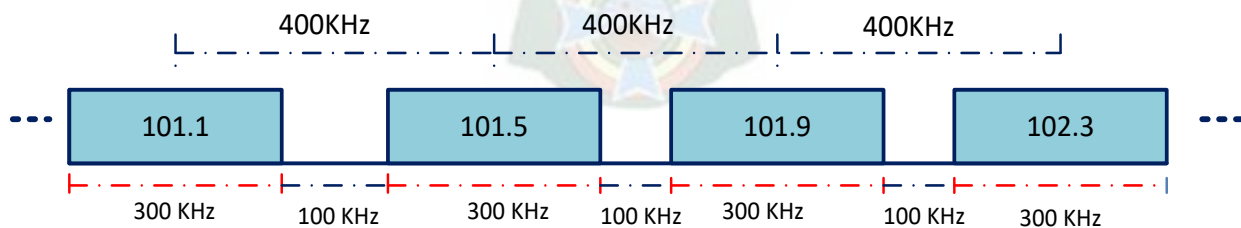
Tabla 4: Canalización Grupo 1 de FM en Bolivia

Nº	Frecuencia [MHz]	Nº	Frecuencia [MHz]	Nº	Frecuencia [MHz]	Nº	Frecuencia [MHz]
1	88,3	14	93,5	27	98,7	40	103,9
2	88,7	15	93,9	28	99,1	41	104,3
3	89,1	16	94,3	29	99,5	42	104,7
4	89,5	17	94,7	30	99,9	43	105,1
5	89,9	18	95,1	31	100,3	44	105,5
6	90,3	19	95,5	32	100,7	45	105,9
7	90,7	20	95,9	33	101,1	46	106,3
8	91,1	21	96,3	34	101,5	47	106,7
9	91,5	22	96,7	35	101,9	48	107,1
10	91,9	23	97,1	36	102,3	49	107,5
11	92,3	24	97,5	37	102,7		
12	92,7	25	97,9	38	103,1		
13	93,1	26	98,3	39	103,5		

Fuente: Plan Nacional de Frecuencias Estado Plurinacional de Bolivia – 2012

La separación entre portadora es de 100 KHz el ancho de banda es de 300KHz y la separación entre estación a estación es de 400KHz como se muestra en la ilustración 5. Este esquema se considera para la canalización de los grupos de 1 y 2 del plan nacional de frecuencias diseñadas en el año 2012 según la Autoridad de regulación y fiscalización de telecomunicaciones y transporte.

Ilustración 5: Gráfica de separación entre portadora en la banda de FM para el grupo 1 y 2



Fuente: Elaboración propia según el plan nacional de frecuencia.

El ancho de banda para este servicio es de 240 kHz, para un modo de transmisión estereofónico. La asignación de estos canales se sujetará a las normas y planes necesarios para la implementación de la Radio Digital Terrestre.

2.1.2. MODULACIÓN DIGITAL

2.1.2.1. MODULACIÓN DE AMPLITUD EN CUADRATURA (QAM)

La modulación de amplitud en cuadratura, en inglés Quadrature Amplitude Modulation (QAM), Es una nueva tecnología de modulación digital que es requerida para transmitir datos, esta tecnología puede modular información en amplitud y fase, y modificará la señal portadora en estas dos variables. En otras palabras, tanto la amplitud como la fase de la portadora de transmisión contienen información digital. Esto se logra modulando la misma portadora, cambiando la fase y amplitud en 90°.

La suma de las señales ASK (Amplitude Shift Keying) y PSK dan como resultado una señal de modulación QAM. Estas señales pueden operar en un mismo canal sin percibir interferencia puesto a que sus portadoras tienen un desfase como ya antes mencionado una de las cuales es una onda portadora y la otra es una señal de datos.

Este estilo de modulación QAM permite que dos señales de dos fuentes independientes pero con características de ancho de banda similares ocupen el mismo ancho de banda de transmisión, y se pueden separar en el extremo receptor, ahorrando así el uso del ancho de banda disponible.

Es decir, si dos señales I (t) y Q (t) modulan dos señales portadoras de la misma frecuencia, utilizando un modulador de producto (multiplicando la señal por la portadora), una está desfasada con respecto a la otra en 90 °. La señal resultante se expresará matemáticamente:

$$s(t) = a_n \cos(wt) + b_n \sin(wt) \quad \text{Ecuación 8}$$

La modulación QAM tiene como entrada un flujo de datos binarios, el cual es dividido en grupos de tantos bits como se requieran para generar N estados de modulación, de allí que se hable de N-QAM.

Si queremos generar, una modulación 8-QAM, cada tres bits de entrada, que proporcionan ocho valores posibles es decir que van desde 0 hasta el 7 número de bits, estos se alteran la fase y la amplitud de la portadora para derivar ocho fases de modulación únicos. En concreto, en N-QAM, cada grupo de m-bits genera la ecuación

$$2^m = N \text{ estados de modulación, } m \text{ número de bits}$$

Para representar los estados de modulación posibles en los distintos tipos de modulación digital, como la QAM Cuantizada, se utiliza el llamado diagrama de constelación esto para poder referenciarlos gráficamente

Los puntos de la "constelación" o mapeo están uniformemente separados en un plano cartesiano con un distanciamiento simétrico vertical y horizontal, aunque son posibles otras configuraciones. Puesto que en el ámbito de las telecomunicaciones digitales los datos son binarios, el número de puntos del diagrama es generalmente una potencia de 2. Ya que el número de estados de modulación en QAM es generalmente un número cuadrado, las formas más comunes son de 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM. Al cambiar a una constelación de orden superior, es posible transmitir más bits por símbolo.

Sin embargo, si la "energía promedio" de la constelación sigue siendo la misma, estos puntos deben estar más cerca, por lo que son más susceptibles al ruido y la distorsión, lo que da como resultado tasas de error de bits más altas, etc. Comparado con QAM de orden bajo, QAM de orden alto proporciona menor confiabilidad de datos.

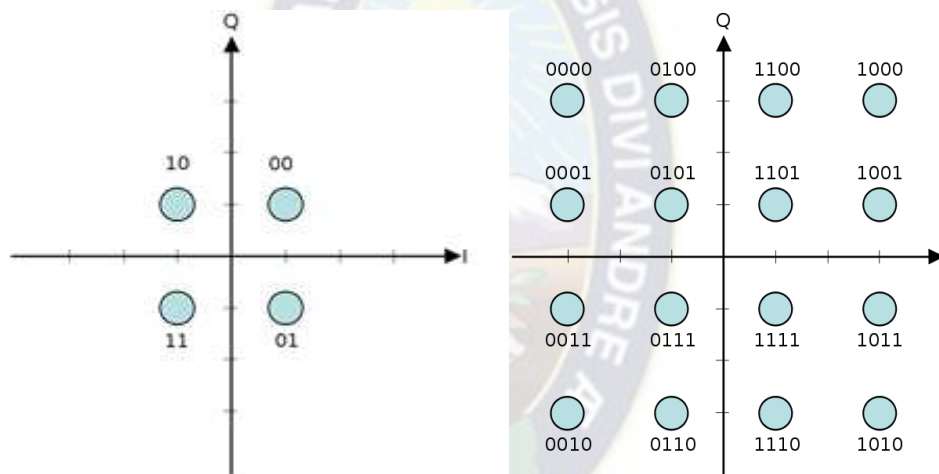
Si son necesarias velocidades de datos más allá de los valores ofrecidos en el esquema de modulación 8-PSK, lo más usual es cambiar a la modulación QAM ya que se obtiene una mayor distancia entre puntos adyacentes en el plano I-Q mediante la distribución de los puntos de manera más uniforme.

Una desventaja en este caso es que los puntos ya no tienen la misma amplitud, por lo que el demodulador debe detectar correctamente la fase y amplitud. Los modos 64-QAM y 256-QAM se utilizan a menudo en la televisión digital terrestre y por cable y los módems de cable.

En los Estados Unidos, estos son los esquemas de modulación digital obligatorios para televisión por cable aprobados por SCTE en la norma ANSI/SCTE 07 2000.7²²

La norma europea de televisión digital terrestre DVB-T utiliza las modulaciones 16-QAM y 64-QAM al igual que las normas ISDB-T e ISDB-Tb, también conocida como SBTVD. La modulación de 256-QAM está prevista en el Reino Unido para la televisión en alta definición.

Ilustración 6: Diagrama de Constelación 4QAM y 16QAM



Fuente: https://es.wikiversity.org/wiki/CC3A1lculo_de_la_probabilidad_de_error_para_las_diferentes_modulaciones

Los sistemas de comunicación diseñados para alcanzar niveles muy altos de eficiencia espectral suelen emplear constelaciones QAM muy densas. Por ejemplo, los dispositivos actuales de 500 Mbps para comunicación por cables de energía eléctrica usan las modulaciones 1024-QAM y 4096-QAM, así como los dispositivos bajo el futuro estándar de ITU-T denominado GHN Gigabit Home Network (Red Doméstica Gigabit) para redes sobre el cableado existente en casa (cable coaxial, líneas telefónicas y líneas eléctricas). Otro ejemplo, es la tecnología VDSL2 de pares de cobre trenzado, cuya constelación tiene un tamaño que abarca hasta los 32.768 puntos, que equivale al esquema de 15-QAM.

2.1.2.2. MULTIPLEXACION POR DIVISION DE FRECUENCIA ORTOGONAL (OFDM)

OFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal) Este es un método de modulación en el que el espectro de frecuencia asociado con cada segmento de datos es una pequeña parte del ancho de banda total, dividido en N sub canales. Cada sub canal se modula con un símbolo y una frecuencia multiplexada. Para evitar el uso de una gran cantidad de

²² <https://es.fmuser.net/content/?1604.html>

moduladores y filtros en el transmisor, mientras se utilizan filtros complementarios y demoduladores en el receptor, se utilizan técnicas modernas de procesamiento de señales digitales como la transformada rápida de Fourier. Para generar OFDM, se deben considerar varios parámetros, tales como: el número de subportadoras, el esquema de modulación y el intervalo de guarda a utilizar.

El número de subportadoras N se determina basándose en el ancho de banda del canal, la velocidad de datos y la duración del símbolo útil. Las portadoras están separadas por el inverso de la duración efectiva del símbolo (para ser ortogonales):

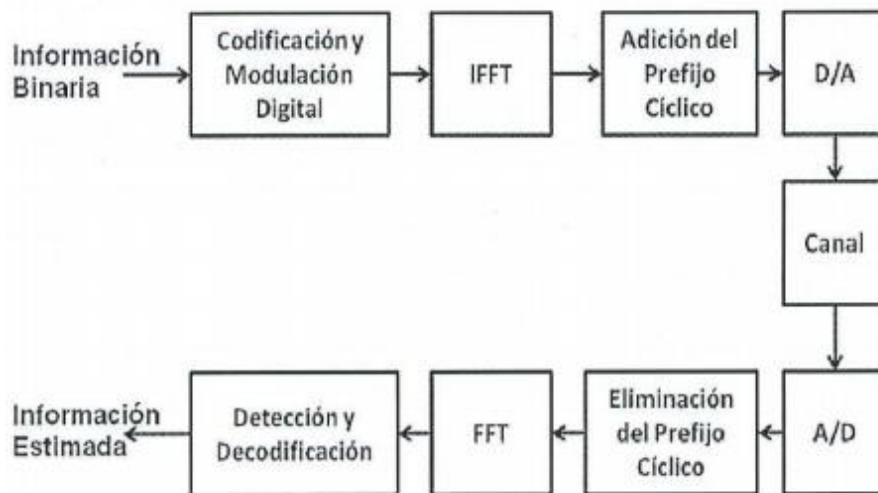
$$N = 1/T$$

El número de portadoras corresponde al número de puntos complejos que son procesados por la FFT. Se pueden utilizar subportadoras del rango de varias miles, así como ajustar la velocidad de datos y el intervalo de guarda dependiendo de la aplicación.

En la ilustración 7 se muestra el diagrama de bloques para el sistema OFDM, donde el primer paso para generar una señal OFDM es codificarla, luego de este paso se modula con alguna técnica puede ser PSK o QAM, luego el tren de símbolos resultante de la modulación se convierte de serie a paralelo, lo cual genera N trenes de pulsos de menor velocidad (N veces menor). A cada uno de estos trenes de pulsos de baja velocidad se les realiza la transformada inversa de Fourier, para pasarlos del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo y cada una de las frecuencias resultantes deben ser ortogonales entre sí de ahí viene el nombre de la multiplexación.

Generalmente se cumple la condición de ortogonalidad solo con que sean frecuencias armónicas unas de otras. Es decir, que una frecuencia sea múltiplo de otra. El siguiente paso es agregar el prefijo cíclico y finalmente sumar las frecuencias ortogonales y modularlas en una sola portadora, que es la frecuencia a la que se transmitirá. En el receptor se realiza el proceso inverso del diagrama de bloques.

Ilustración 7: Diagrama de bloques OFDM



Fuente: Análisis de desempeño de OFDM como medio de transporte en redes SFN para transmisión en broadcast de video móvil elaborado por Viridiana Gomez Barron.

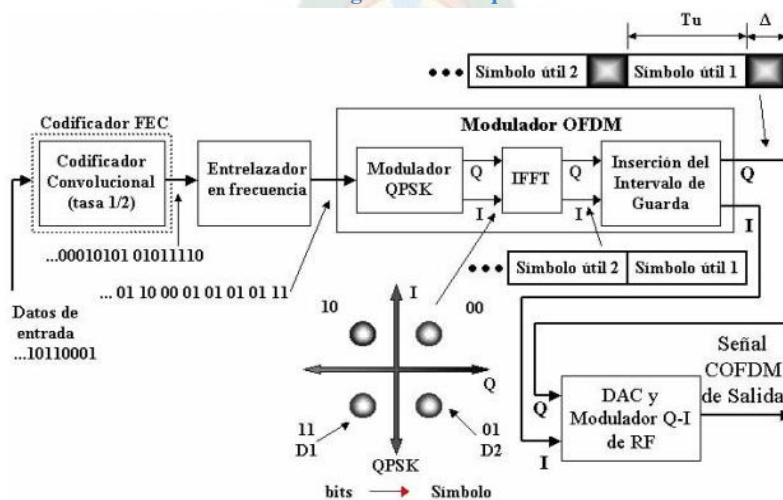
2.1.2.3. MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE FRECUENCIA ORTOGONAL CODIFICADA (COFDM)

Es una compleja tecnología de modulación de banda ancha para transmisión de información digital de alta velocidad a través de canales de comunicación. Emplea un sofisticado método de codificación, junto con el procesamiento de entrelazado. Además de utilizar la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), Cada portador se superpone entre sí para lograr una alta eficiencia espectral. De esta forma se obtiene una modulación diseñada específicamente para contrarrestar el efecto de interferencia y múltitrayecto y otros tipos que pueden afectar a los receptores.

En la ilustración 8 se observa el modelo simplificado en diagrama de bloques de un sistema COFDM con el que se desea transmitir determinados bits, la información ingresa al codificador FEC (Forward Error-Correction: Corrector de error Frontal) el codificador convolucional da redundancia a los bits transmitidos posibilitando la corrección de errores en el demodulador, luego se asocian varios bits en el entrelazador de frecuencia para causar un desorden pseudoaleatorio con el fin de repartir los bits de datos entre las portadoras dentro de un símbolo OFDM para así optimizar el desempeño del decodificador de Viterbi en el demodulador COFDM. Luego los bits de información codificados y entrelazados en frecuencia se dirigen al modulador OFDM que tiene como objetivo tomar de a un par de bits para modularlo con QPSK sucesivamente pasando de bits a símbolos de datos, posteriormente se realiza la IFFT (Transformada rápida de Fourier inversa) que consisten en agrupar 8 símbolos que corresponde a 8 puntos que va procesar la IFFT a la vez para luego generar un símbolo útil formado por 8 muestra con duración “ T_u ” constituido por 8 portadoras ortogonales entre sí (separadas en frecuencia en múltiplos de $1/T_u$) al cabo del proceso se inserta un intervalo de guarda que tiene como función eliminar la protección contra interferencias de intersímbolos, siendo este una extensión de IFFT que genera un solo símbolo que es denominado símbolo OFDM. El cual está compuesto por un determinado símbolo útil y un intervalo de guarda.

Luego que realiza todo el proceso la señal a transmitir se debe ajustar debido a que aún se encuentra en banda base, la salida Q-I es todavía digital por este motivo es recurrente convertirla a una señal análoga usando dos convertidores digital-análogo (DAC), posteriormente ser modulada en radiofrecuencia usando un modulador en cuadratura.

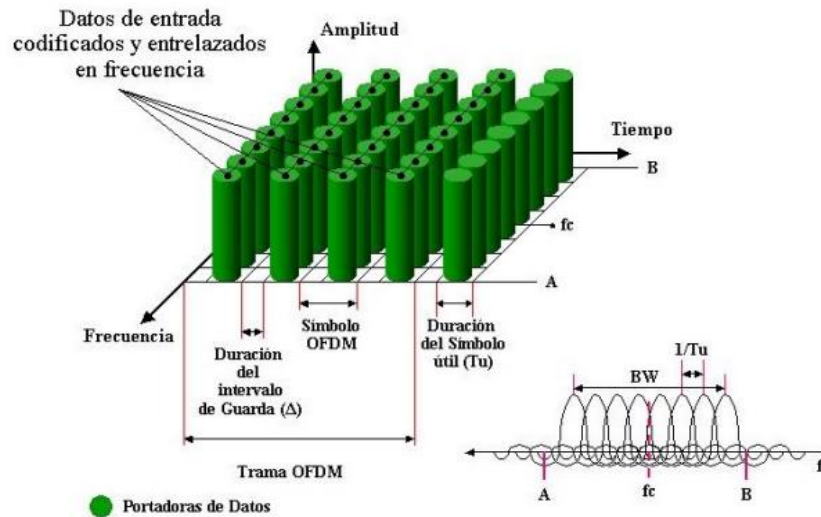
Ilustración 8: Diagrama de bloques COFDM



Fuente: Multiplexación por división de frecuencia ortogonal codificada (COFDM), Alfonso Efraín Jara Cárdenas 2005 Chile

La señal COFDM de salida que se aprecia en la ilustración 9 se observa que hay 8 portadoras que son ortogonales entre sí que están centradas a una frecuencia central “FC” con un ancho de banda (BW), donde una trama OFDM está constituida por 4 símbolos OFDM generado por la IFFT.

Ilustración 9: Señal COFDM de salida



Fuente: Multiplexación por división de frecuencia ortogonal codificada (COFDM), Alfonso Efraín Jara Cárdenas 2005 Chile

2.2. LA RADIO DIGITAL

La radio digital es la nueva forma de transportar señal radiofónica siendo una conversión, que en lugar de enviar señales de forma analógica, se emplearán modulaciones digitales especificadas, las cuales suelen ser mucho más complejas y robustas en su implementación e interpretación que las analógicas. Un transmisor de radio digital procesa sonidos convirtiéndolos en patrones numéricos o de “dígitos” de ahí deriva el término “radio digital”. Por el contrario, las radios analógicas tradicionales procesan sonidos, transformándolos en patrones de señales eléctricas que se asemejan a ondas de sonido.

En este sentido, lo que es enviado, son bits. Estos bits son los mismos que se emplean al grabar un Compact Disc, al escribir un documento en un procesador de textos o al ver un video desde internet. Es decir, al realizar esta conversión a lo digital, no habrá diferencia en la naturaleza de la señal, proporcionará una claridad de sonido en AM, equivalente a la calidad de sonido standard de la radio FM analógica.

La forma correcta al referirnos sobre la radio digital es denominada “Radio Digital Terrestre”. No es lo mismo Radio en Internet que, si bien, transmite en digital, no tiene que ver con este formato. Esta nueva modalidad de transmisión lo que cambia es la manera en que enviamos la información, es decir, la señal moduladora. La portadora seguirá siendo una onda electromagnética de baja frecuencia o alta frecuencia, siendo la información que lleve en su interior será digital.

En la nueva Radio Digital Terrestre la señal que sale de los estudios de radio y lleva la música y la voz estará convertida en valores lógicos de voltaje 1 y 0. El formato va a depender del estándar que usemos en cada país, debiendo ser audio comprimido de gran calidad. Es muy

importante señalar que el modo de compresión generalmente será el MPEG-4 (AAC)²³ se termine imponiendo por su alta tasa de compresión.

Ya no se modula en frecuencia o amplitud, sino en nuevos sistemas digitales. El estándar europeo DAB, por ejemplo, usa el sistema de modulación COFDM (Múltiplex por división de frecuencias ortogonales). Estas modulaciones incorporan sistemas de corrección de errores con lo que está garantizada una óptima recepción de la señal. La señal de audio digital podrá ser, además, multiplexada. Podremos “montar” en la frecuencia de la portadora varias señales, es decir, varios canales cada uno con su programación independiente.

2.2.1. ¿POR QUÉ DIGITALIZAR LA RADIO?

Al emplear la señal digital terrestre, de forma innovadora se pueden aprovechar distintas tecnologías de codificación y compresión de audio y video, además de otros sistemas, para la emisión de la radiodifusora.

Las ventajas de este nuevo sistema las podríamos agrupar en dos tipos: La primera; aquellas que benefician al radioescucha y segunda; aquellas que benefician a las radiodifusoras y a sus respectivos dueños y socios.

Los beneficios para el radioescucha, entre las de mayor importancia se encuentran las siguientes:

- El multicasting o transmisión múltiple de señales es una de las mayores ventajas frente a la transmisión analógica. Los canales de FM están separados entre sí por 300 KHz según el plan nacional de frecuencia de Bolivia. Este ancho de banda permite enviar una sola señal analógica. Como los datos digitales ocupan menos espacio, por ese mismo ancho de banda enviaremos 3, 5, 9 o más señales, dependiendo del estándar elegido, la regulación de cada país y la calidad de la transmisión.
- Igual cobertura con menor potencia con esto lograremos la misma cobertura de la señal con menos watts. Esto supondrá una reducción de los costos de consumo eléctricos.
- Configuración de redes en frecuencia única. Es posible la creación de una red con la misma frecuencia, para proporcionar cobertura a una región amplia o complicada geográficamente, una diferencia notoria respecto a la FM y la AM.
- Servicios adicionales. En la pantalla de los nuevos receptores digitales aparecerá información meteorológica, sobre tráfico, noticias de última hora, cotizaciones de bolsa y etc. Se pueden difundir datos, habrá mayor interactividad y, sobre todo, más publicidad.
- Garantizar la recepción en dispositivos móviles. Debido a la técnica empleada, varios efectos físicos como el multitrayecto o los desvanecimientos, no causan grandes perjuicios en la señal recibida.
- Optimización del espectro radioeléctrico. Debido a que se emplean señales comprimidas, se pueden enviar varias emisiones a la vez en el mismo canal o frecuencia de operación.

Imaginemos que radio Panamericana, de Bolivia, ya transmite digitalmente en los 96.1 FM. Antes, solamente ofrecía una programación. Pero ahora, con el nuevo sistema digital, por el canal A de los 96.1 transmite noticias, por el B deportes y por el C programas juveniles.

²³ AAC: advanced audio coding “codificación de audio avanzada”

Estas ventajas actualmente ya son ofrecidas por diversos estándares y organismos a nivel mundial. El fin de cada uno es el mismo, digitalizar la radio para ofrecer nuevos y mejores servicios, las diferencias radican en el tipo de tecnología empleado. Todos los estándares funcionan de la misma manera, al menos en cuanto al concepto. La señal analógica de audio, es digitalizada y luego comprimida (para esto utilizan algún códec de audio, el cual permite reducir considerablemente la tasa de bits empleada en la transmisión, sin perder calidad de audio; esto es lo que hace posible la multiplexación de varias señales en el mismo canal) luego la señal es radiada y recibida por el usuario, para después poder ser reconstruida y recuperar el mensaje original así como la tecnología móvil.

2.3. SISTEMAS DE RADIODIFUSION DIGITAL

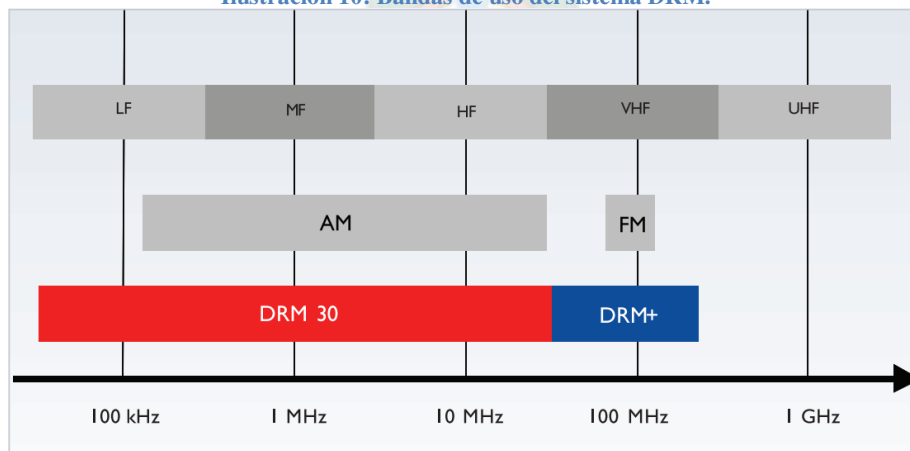
2.3.1. SISTEMA ESTÁNDAR DRM

El estándar DRM es un sistema de transmisión de audio digital universalmente estandarizado para las frecuencias especialmente en las bandas OC, AM, y FM. Proporciona una alternativa digital para reemplazar la transmisión analógica de la radio común. El sistema DRM utiliza las bandas de frecuencia e infraestructura existente con modificaciones en los transmisores que se utiliza para la transmisión de frecuencias en las bandas de radiodifusión.

Como medio digital, DRM transmite otros datos además de los canales de audio. En DRM se pueden operar con diferentes configuraciones de red, desde un modelo de AM de un solo servicio con un solo transmisor hasta un modelo de múltiples transmisores y hasta cuatro servicios, ya sea como una red SFN (Red de frecuencia única) o MFN (Red de frecuencia múltiple). También es posible la operación híbrida, donde el mismo transmisor ofrece un servicio analógico y DRM simultáneamente, además DRM incorpora características de advertencia de emergencia que pueden anular otra programación y activar radios que están en espera para recibir transmisiones de emergencia.

DRM ofrece una alternativa digital a la transmisión de radio analógica existente. El beneficio del estándar DRM es su capacidad de adaptarse al plan existente de transmisión de AM. Ofrece una calidad de sonido similar a la de FM en todas las bandas de frecuencia utilizadas para la transmisión de radio. El consorcio DRM propuso el uso alternativo de la banda de 26 MHz para la radiodifusión local realizándose ensayos para validar el mismo.

Ilustración 10: Bandas de uso del sistema DRM.



Fuente: <https://www.edn.com/understanding-drm-digital-radio-mondiale/>

Como se observa en la ilustración 10, el sistema DRM puede operar en varias bandas del espectro radioeléctrico, estos tipos de operación pueden ser divididos en dos grupos DRM30 sistema que trabaja en las bandas de AM y DRM+ sistema que trabaja en las bandas de FM.

2.3.1.1. ESTÁNDAR DRM 30

Denominados como modos de transmisión A, B, C, y D, son aquellos que fueron diseñados específicamente para la radiodifusión por debajo de los 30 MHz, es decir en las bandas en las que se emplea la modulación en amplitud (AM): onda larga (LW, 150 kHz a 529 kHz), onda media (MW, 530 kHz a 1710 kHz) y onda corta (SW, 1711 kHz a 30 MHz).

El sistema (DRM30) puede operar con canales de 9 o 10 kHz, o múltiplos y submúltiplos de estos. Las diferencias radican en que tanto el flujo de bits está destinado para el audio, para la protección y corrección de errores o para la transferencia de datos multimedia.

La estructura del sistema se puede dividir en subsistemas, cada uno con un propósito específico, como la codificación del contenido, la compresión del audio, la generación de la señal o la parte de radiofrecuencia.

2.3.1.2. ESTÁNDAR DRM+

El estándar DRM+ es una ampliación de los estándares DRM con respecto al rango de frecuencias útil, el sistema es capaz de digitalizar radiodifusión sonora en VHF. Este estándar fue desarrollado como un estándar de radiodifusión sonora digital para uso en todo el mundo en frecuencia modulada. La iniciativa para extender DRM comenzó con una votación en la Asamblea General de 2005 para comenzar el diseño, verificación y prueba de los parámetros necesarios para permitir que DRM funcione en las bandas de transmisión VHF entre; principalmente Banda I y Banda II.

Sus parámetros de uso del espectro se determinan a partir de las normas acordadas internacionalmente en la banda FM (88 a 108 MHz). Por lo tanto, tiene un ancho de banda ocupado de 96 kHz y una red de frecuencia de 100 kHz.

DRM+ proporciona velocidades de bits de 35 kbps a 185 kbps a SNR de 2 dB a 14dB y, como DRM, permite hasta cuatro servicios. Por lo tanto, es una solución flexible que permite transmitir un número único o pequeño de servicios de audio juntos. Las frecuencias requeridas están expuestas a condiciones de propagación muy variables. En este rango de frecuencias, las ondas resultan afectadas por la ionosfera y se ven reflejadas según la hora del día, la época del año y el número relativo de manchas solares. El proceso de diseño comenzó poco después y se tomaron decisiones clave para garantizar que la extensión compartiera completamente la exitosa filosofía de diseño de DRM: es "DRM pero a frecuencias más altas"²⁴. Por lo tanto, tiene:

- ✓ El mismo esquema multiplex y señalización.
- ✓ El mismo diseño OFDM como el que tiene DRM30 (con nuevos parámetros).
- ✓ Los mismos códecs de audio.

2.3.1.3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SISTEMA DRM

En este presente apartado daremos a conocer las características importantes que presenta el sistema. En la primera etapa describiremos los tres canales lógicos de información con los que

²⁴fuente <https://www.drm.org/drm/>

Para más detalle revisar la sección de Acrónimos en la pág. 7

dispone el sistema para transportar los datos generados en función del tipo de información sea audio o datos, seguidamente se presentan los métodos de codificación de audio a detalle que cuenta el sistema.

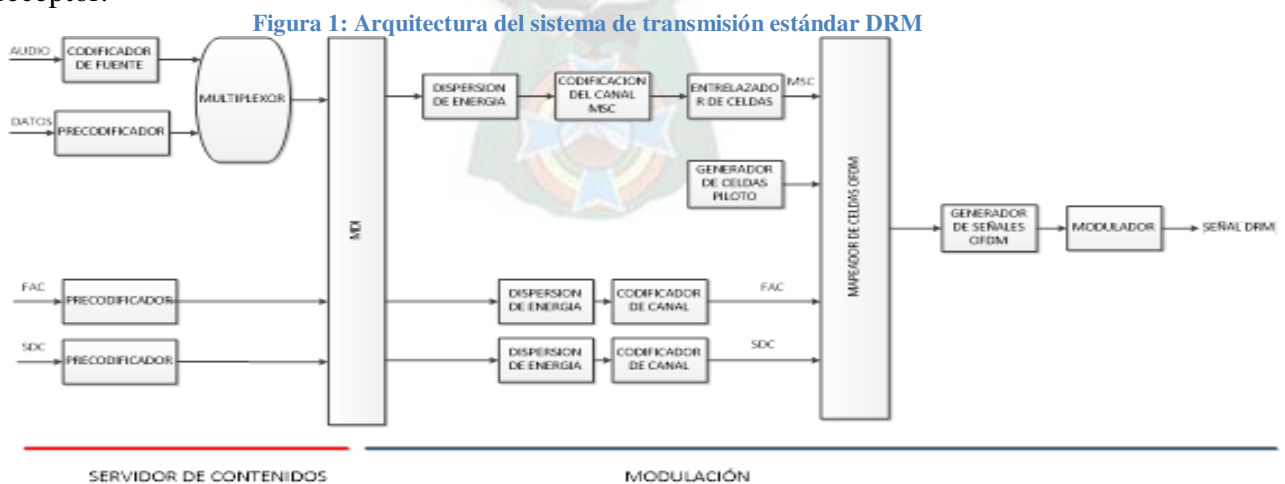
El sistema emplea codificación de audio avanzada (AAC)²⁵, integrada con replicación de banda espectral (SBR)²⁶. Para la codificación y modulación de canal se utiliza multiplexión por división ortogonal de frecuencia (OFDM) y modulación de amplitud en cuadratura (QAM), aleado con corrección de errores sin canal de retorno (FEC), basada en un código convolucional.

Posteriormente se detallará los métodos de modulación y codificación de canal de la información. En este caso, DRM cuenta con 5 modos de robustez (4 para DRM30 y 1 para DRM+), estos distintos modos de robustez se diferencian por el ancho de banda, diferentes constelaciones para su modulación y niveles de robustez adaptándose a diferentes condiciones de transmisión dependiendo de la banda de frecuencias que se esté utilizando para la radiodifusión. Luego se muestra la distribución de los datos de los tres diferentes canales a lo largo de la trama de transmisión conocida como multiplex.

A continuación se detallaran sobre las características que admiten el sistema DRM al utilizar las redes de frecuencia única (SFN) y las redes de frecuencia múltiple (MFN). Posteriormente, se presenta la característica simulcast del sistema, que permite la coexistencia híbrida de la señal digital con las transmisiones analógicas actuales; se presentan también todas las características relacionadas con el espectro de la señal, los canales de transmisión utilizados, anchos de banda de las señales y máscaras de transmisión.

2.3.1.3.1. CODIFICACIÓN Y MULTIPLEXACIÓN DE CONTENIDO

Existen dos tipos de información de entrada, la primera entrada son de datos y de audio que son transmitidos por el canal de servicio principal y la segunda entrada es la información que se transmitirá a través del Canal de Acceso Rápido (FAC) y a través del Canal de Descripción de Servicio (SDC). Estos dos últimos canales comunican información de identificación, de los servicios, información de selección de los parámetros de transmisión, también son encargados de asegurarse de que los parámetros de decodificación adecuados se seleccionan correctamente en el receptor.



Fuente: Elaboración propia en función a la investigación

²⁵ AAC: advanced audio coding “codificación de audio avanzada”

²⁶ SBR: spectral band replication “replicación de banda espectral”

2.3.1.3.2. CANAL DE SERVICIO PRINCIPAL (MSC)

Este canal contiene todos los datos principales para el servicio que otorga el sistema, y proporciona hasta cuatro servicios, cada servicio puede tener audio o datos o ambos a la vez, la tasa de bits del canal de servicio principal (MSC) está sujeto del ancho de banda del canal DRM y del modo de transmisión.

La MSC tiene entre hasta cuatro secuencias, divididas cada una en tramas lógicas; estas secuencias están compuestas de audio comprimido llevando mensajes de texto, pueden además componerse de 4 sub-secuencias formadas por paquetes de datos que definen un servicio, los servicios que se pueden tener: servicio de audio que tiene una secuencia de audio y opcionalmente una secuencia o sub-secuencia de datos o un servicio de datos compuesto por una secuencia o sub-secuencia de datos. Un ejemplo puede ser, tener un servicio de alta calidad con música y voz, junto con un servicio de voz de baja velocidad, o también un grupo de cuatro canales de voz de baja velocidad transportando noticias en cuatro idiomas dependiendo del radiodifusor.

Una trama lógica generalmente está dividida en dos partes con su propio nivel de protección, la longitud de estas partes es independientemente asignadas, el UEP (Protección Desproporcionada contra Errores) para una secuencia está dada para diferentes niveles de protección a las dos partes, las tramas lógicas duran 400ms y estas son mapeadas junto con las tramas multiplex de la misma duración para posteriormente ser tratadas por el codificador de canal. Las tramas multiplex son las que se construyen tomando datos de la parte más protegida correspondiente a la trama lógica de la primera secuencia (secuencia 0 sin modulación jerárquica²⁷ y secuencia 1 con modulación jerárquica), y estos datos se ponen al inicio de la trama multiplex, después se pone la parte más protegida de la trama lógica de la segunda secuencia y este proceso continúa hasta que todas las secuencias sean transmitidas, después de esto se colocan las partes menos protegidas de la trama lógica de la primera secuencia, después de la segunda y así sucesivamente, para la descripción del multiplex se le asigna la letra A para la parte más protegida y la letra B para la menos protegida. Una condición que hay que cumplir es que la capacidad de la trama multiplex debe ser igual o mayor que la suma de todas las tramas lógicas de las cuales está formado, cuando la capacidad es mayor, los espacios vacíos deben rellenarse con ceros, también no debe haber bits de relleno entre la parte A y B.

Cuando se usa modulación jerárquica es cuando existen tramas jerárquicas, éstas son construidas tomando los datos de la trama lógica de la secuencia 0 y ubicadas al inicio de la trama jerárquica, al igual que en las tramas multiplex, las tramas jerárquicas deben ser igual o mayor que la suma de todas las tramas lógicas de las cuales está formado y para cuando la capacidad es mayor, los espacios vacíos deben rellenarse con ceros, los cuales son ignorados en recepción.

2.3.1.3.3. CANAL DE ACCESO RÁPIDO (FAC)

Este canal es usado para facilitar información de parámetros requeridos para la demodulación, contiene información de servicios que soporta el receptor, información de ancho de banda, profundidad de entrelazado, etc.

Figura 2: Canal FAC



Fuente: Elaboración propia

²⁷ Sistema de modulación que permite la transmisión de dos flujos de datos de distinta prioridad (alta y baja)

La información de este canal es la primera en ser decodificada debido a que lleva los datos más importantes que determina la modulación más robusta, este canal no se entrelaza en el tiempo lo que permite reducción en el tiempo de decodificación, el canal está constituido de 64 bits (parámetros del canal + parámetros de servicio) seguido del código CRC de 8 bits, esto se muestra en la Figura 2.

Los parámetros de servicio son transportados en tramas FAC sucesivas, necesariamente debe ser un servicio por trama, si varios servicios son los que se lleva en el multiplex DRM entonces se requiere varios bloques FAC.

Los 20 bits correspondientes a los parámetros del canal y los 44 bits correspondientes a los parámetros de servicio se detallan en la tabla 5.

Tabla 5: Parámetros del canal y parámetros de servicio

PARÁMETROS DE SERVICIO		PARÁMETROS DEL CANAL	
Descripción del campo	Número de bits	Descripción del campo	Número de bits
Identificador de servicio	24	Bandera básica / mejorada	1
Identificador abreviado	2	Identidad	2
Indicación de acceso condicional (CA)	1	Bandera RM	1
Idioma	4	Ocupación del espectro	3
Bandera audio / datos	1	Bandera de profundidad de entrelazado	1
Descripción de servicio	5	Modo MSC	2
Indicador de datos CA	1	Modo SDC	1
Bits reservados para uso futuro	6	Número de servicios	4
TOTAL	44 bits	Índice de reconfiguración	3
		Bandera de alternar	1
		Bits reservados para uso futuro (Rfu)	1
		TOTAL	20 bits

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

Dando a conocer los bits correspondientes a los parámetros canal tenemos:

- **Identificador de servicio.**- Campo único necesario para un identificador de un servicio.
- **Identificador abreviado.**- Señala el nombre breve determinado a un servicio y se utiliza como referencia para el canal de descripción del servicio.
- **Indicación de acceso condicional (CA).**- Utiliza este tipo de bits para verificar si usa el acceso condicional o no en la secuencia de audio.
- **Idioma.**- Indica el idioma (ejemplo: 0001 = árabe, 1110 = español, etc.)
- **Bandera audio / datos.**- Indica si es servicio de audio (0L) o servicio de datos (1L).
- **Descripción de servicio.**- Es nombrado para señalar el tipo de programación que será transmitida (ejemplo: 0001 = entretenimiento, 0100 = informativo, etc.).
- **Indicador de datos CA.**- Indica si el servicio de acceso condicional (CA)
- **Bits reservados para uso futuro.**- Generalmente es utilizado para aplicaciones futuras, al no tener alguna aplicación se mantiene en cero.

- **Bandera básica / mejorada.-** Utiliza un solo bit y este señala si la transmisión puede ser codificable para todos los receptores que operen en el sistema (0L) o si es posible decodificar solo por algunos receptores con capacidad de capa mejorada (1L).
- **Identidad.-** Muestra el bloque FAC dentro de la supertrama y también valida los índices del campo SCD- AFS (Conmutación de Frecuencia Alternativa).
- **Bandera RM.-** indica el modo de robustez que maneja el sistema (0L = DRM30 y 1L = DRM+)
- **Ocupación del espectro.-** Detalla el tipo de ancho de banda de la señal transmitida y concorde a la bandera.
- **Bandera de profundidad de entrelazado.-** Revela la profundidad del tiempo de entrelazado y va ligado a la bandera RM.
- **Modo MSC.-** Lleva la información del tipo de modulación que se utilizará ligado a la bandera RM.
- **Modo SDC.-** Indica si posee el servicio de SDC.
- **Número de servicios.-** Muestra el número de servicios de audio y datos, (como 0000 = 4 servicios de audio, 0011 = 3 servicios de datos, 1000 = 2 servicios de audio, etc.)
- **Índice de reconfiguración.-** Indica el estado y tiempo de reconfiguración del múltiplex.
- **Bandera de alternar.-** Indica que la trama de transmisión puede contener el inicio de la siguiente supertrama de audio.
- **Bits reservados para uso futuro.-** Para aplicaciones futuras, reservado para el sistema.

Para la parte de CRC se lo hace como se mencionó en la parte de supertramas de audio AAC descrita anteriormente.

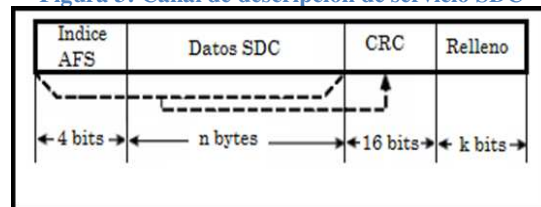
2.3.1.3.4. CANAL DE DESCRIPCIÓN DE SERVICIO (SDC)

Este canal ofrece información necesaria para la decodificación MSC, cómo encontrar fuentes alternativas de los mismos datos y da atributos a los servicios dentro del múltiplex DRM, da información como acceso condicional, información de frecuencia y de horario de frecuencia, soporte de anuncios identificador de la región de cobertura, información de fecha y hora. Utiliza codificación no tan compleja con el objetivo de realizar una decodificación a un bajo SNR (Relación Señal a Ruido) que es necesario para decodificar el MSC.

El contenido de este tipo de canal depende de acuerdo a la ocupación del espectro y de otros parámetros, alternativamente puede extenderse su capacidad al utilizar el servicio de AFS relacionada con la conmutación de frecuencia alternativa. Este canal es tratado como un canal único de datos, la cantidad de datos necesarios a enviar puede requerir más de un bloque SDC, tiene un índice AFS que le permite conocer al receptor cuando se transmitirá las próxima ocurrencia del bloque SDC actual para poder hacer uso de la función AFS para conmutación a una frecuencia alternativa, esta función será validada o no usando un campo de los parámetros de canal del FAC descritos anteriormente; sobre el AFS se detallará más adelante.

El canal de descripción de servicio según la figura 3 la longitud es variable, esta trama está constituido por: Bits de retenidos para un uso de aplicaciones en el futuro de cuatro bits, el índice AFS de cuatro bits, datos SDC número de bits dependiendo de la información a transmitir y CRC con dieciséis bits.

Figura 3: Canal de descripción de servicio SDC



FUENTE: Valores descritos en MSC

- **Índice AFS.-** Los 4 bits correspondientes manejan 16 combinaciones, cuya finalidad es indicar el número de supertramas de transmisión que separa un bloque SDC del siguiente, estos tendrán idéntico contenido cuando el campo Identidad del FAC esté seteado en 00.
- **Datos SDC.-** Este tipo de datos del canal van dependiendo del modo de robustez y de la ocupación del espectro, la Tabla 6 indica esta relación.

Tabla 6: Longitud del campo de datos del SDC

Modos de robustez	Modo SDC	Longitud del campo de datos en bytes					
		Ocupación del espectro					
		0	1	2	3	4	5
A	0	37	43	85	97	184	207
	1	17	20	41	47	91	102
B	0	28	33	66	76	143	161
	1	13	15	32	37	70	79
C	0	-	-	-	68	-	147
	1	-	-	-	32	-	72
D	0	-	-	-	33	-	78
	1	-	-	-	15	-	38
E	0	113	-	-	-	-	-
	1	55	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

- **CRC.-** Tiene asignado 16 bits calculados sobre el Índice AFS y los Datos empleando el siguiente polinomio generador

$$G8(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1. \quad \text{Ecuación 9}$$

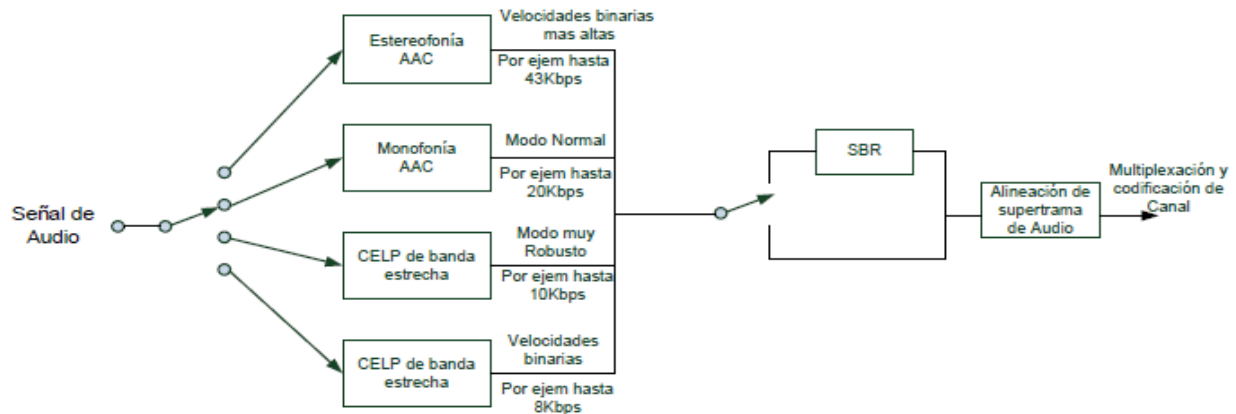
- **Relleño.-** Tiene la capacidad de tener 0 a 7 bits, este valor depende del modo de robustez, del modo SDC y de la ocupación del espectro, estos bits no son tomados en el receptor.

2.3.1.3.5. CODIFICACIÓN DE FUENTE

El sistema DRM utiliza de forma básica 3 códecs (AAC, CELP, HVXC) pertenecientes al estándar MPEG4²⁸, como se muestra en la Figura 7. La codificación de fuente esta entrelazado con la digitalización de la información de entrada (voz y audio) bajo requerimientos permitidos, la cual posteriormente se multiplex con información auxiliar puede ser datos, que permite su correcto procesamiento hasta la recepción. La velocidad de transmisión disponible para la codificación de fuente en un sistema DRM30 cuyas características de radiodifusión en las regulaciones para frecuencias bajo los 30MHz está en el rango de 8 kbps a 20 kbps, y para el sistema DRM+ la velocidad de transmisión es de 80 kbps

El codificador de fuente de audio y los pre-codificadores de datos aseguran y dan soporte a la adaptación de los trenes de datos en la entrada y constituyen a un formato de transmisión digital apropiado. Para el caso de un codificador de fuente de audio, esta funcionalidad incluye las técnicas de compresión de audio. Conjuntamente con estos tres códec antes mencionados el sistema DRM emplea MPS y PS. El rendimiento de todos estos códecs se puede mejorar mediante el uso de la codificación por Réplica de Banda Espectral (SBR). Se dará a conocer cada uno de estos codificadores antes mencionados.

Figura 7: Arquitectura del sistema de transmisión estándar DRM



FUENTE: L. Vargas Reinoso, Diseño de una radiodifusora digital en base al estándar DRM (Digital Radio Mondiale).

CODIFICACIÓN MPEG-4 AAC (Codificación de Audio Avanzado)

Este tipo de codificación es un formato informático de procesamiento de señal digital de audio establecido en un algoritmo de compresión con pérdida, es decir en este procesamiento se excluyen algunos de los datos de audio para con el fin de realizar el mayor grado de compresión, resultando en un archivo en audio de salida. El formato AAC corresponde al estándar internacional “ISO/IEC 13818-7” como una extensión de MPEG-2: un estándar creado por MPEG²⁹. Debido a su excepcional rendimiento y la calidad, la codificación de audio avanzada (AAC) está en el núcleo del MPEG-4, 3GPP y 3GPP2.

El codificador cuenta con herramientas de robustez frente a errores de sonido monofónico y estereofónico, considera características estrictas necesarias del oído humano. El flujo de datos es de hasta 72 Kbps estéreo para aplicaciones de voz y música, con frecuencias de muestreo de 24 kHz o 12 kHz sin SBR y 48 kHz o 24 kHz utilizando SBR.

- ✓ Las características AAC para los estándares DRM Y DRM+ son:
- ✓ Velocidad del sistema: De 20 bps para DRM y 80 bps para DRM+.
- ✓ Frecuencia de muestreo: De 12 KHz y 24 KHz para estándar DRM30 y 24 KHz y 48KHz para el estándar DRM+.
- ✓ Longitud transformada.- Una trama de audio corresponde a 80ms o 40ms en el tiempo, requisito para armonizar longitudes de trama CELP y AAC y así permitir la combinación de un número entero de tramas de audio para formar una supertrama de audio de 400ms (tramas de 40ms o 20ms y supertramas de 200ms para el modo E).
- ✓ Robustez frente al error.- Usa herramientas adicionales MPEG-4 para mejorar la robustez frente al error de la secuencia de bits AAC en canales propensos a error.
- ✓ Supertrama de audio.- Las tramas de audio en las supertramas son codificadas juntas, de tal manera que cada supertrama tiene longitud constante, es decir que el intercambio de bits de audio entre las tramas solo es posible dentro de la supertrama, una supertrama siempre es colocada en una trama lógica (colocada en dos tramas lógicas para modo E), en estas condiciones no se necesita ninguna sincronización adicional para la codificación; la identificación de los límites de la trama y provisiones UEP (Protección de Error Desigual) se las considerada cuidadosamente también dentro de la supertrama.

²⁹MPEG: Moving Pictures Expert Group “Grupo de expertos en imágenes en movimiento”

- ✓ UEP.- Ofrece mejores características frente a la degradación y opera mejor en presencia de un alto BER (Tasa de Error de Bit), el UEP se lo aplica al flujo de bits AAC.

CODIFICACIÓN MPEG-4 CELP (Predicción Lineal con Excitación por Código)

El codificador CELP, es un algoritmo de codificación creado para voz que aporta una calidad excelente a diferencia a algoritmos codificadores de audio de bajo bitrate existente. Es actualmente el algoritmo de codificación más ampliamente usado, además es utilizado en la codificación de voz MPEG-4. Este codificador se usa comúnmente como un término genérico para una clase de algoritmos y no para un códec determinado. Posee protección frente al error de sonido monofónico y bitrate de 4 a 20 kbps con codificador de tipo paramétrico para aplicaciones de voz solamente.

El codificador realiza transmisiones simulcast en lugar de tener un programa de audio de 20 kbps a 24 kbps, el canal contiene dos o tres señales de voz de 8 Kbps a 10 Kbps cada una, permitiendo transmisiones de voz simultáneas.

Las características básicas de la codificación MPEG CELP son:

- ✓ Frecuencia de muestreo de 8KHz o 16KHz.
- ✓ Velocidad binaria entre 4 kbps y 20kbps.
- ✓ Robustez frente al error.
- ✓ Composición de un número entero de tramas CELP para la formación de una súper trama de audio.

CODIFICACIÓN MPEG-4 HVXC (Codificación por Excitación de Vector Armónico)

El sistema de codificación HVXC es un codificador de voz, algoritmo especificado en MPEG-4 Parte 3 (MPEG-4 Audio), estándar para muy baja tasa de bits de codificación de voz. HVXC soporta velocidades de bits de 2 y 4 kbit/s en la fija y tasa de bits variable. También opera a velocidades de bits inferiores, tal como 1.2 a 1.7 kbit/s, usando una técnica de tasa de bits variable. El algorítmico total de retardo para el codificador y el decodificador es de 36 ms.

MPEG-4 de codificación de voz natural del sistema de herramienta utiliza dos algoritmos: HVXC y CELP (predicción lineal excitada por código). HVXC se utiliza a una velocidad de bits baja de 2 o 4 kbit / s. Tasas de bits superior a 4 kbit / s, además de 3,85 kbit / s están cubiertos por CELP. Cuenta además con protección frente al error de sonido monofónico con muy baja velocidad de transmisión, óptimo para aplicaciones de base de datos. Las características de la codificación MPEG HVXC son:

- Frecuencia de muestreo de 8KHz
- Velocidad binaria de 2kbps y 4kbps para una velocidad de codificación fija.
- Modificación de la escala temporal de cantidades arbitrarias.
- Usa CRC (Comprobación de redundancia Cíclica) para mejorar la resistencia a los errores de flujo de los bits HVXC.
- Constituido de un número entero de tramas HVXC para la formación de una súper trama de audio.

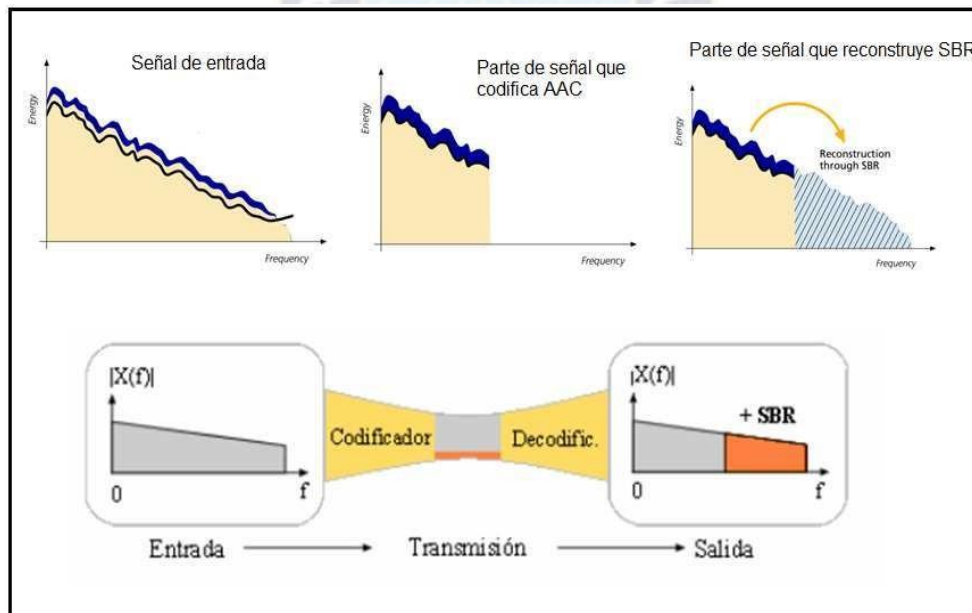
REPLICACIÓN DE BANDA ESPECTRAL SBR

Los algoritmos de codificación de fuente y audio monofónico necesitan un determinado ancho de banda y operar a baja frecuencia de muestreo, en estas condiciones el SBR permite aumentar la calidad a bajas velocidades binarias permitiendo el uso todo el ancho de banda de audio a baja velocidad de transmisión.

La principal función del SBR es de recrear la banda de frecuencias altas que no se codificaron, para llevar a cabo esta técnica, la información (altas frecuencias) debe ser transmitido de alguna manera en el flujo de bits principal, después el SBR reconstruye la información de frecuencias altas basándose en un análisis de las frecuencias más bajas, esta reconstrucción necesita información auxiliar contenida en el flujo de bits de audio, es decir, de una señal de audio se puede codificar las frecuencias más altas con AAC y mediante técnicas de SBR en recepción se puede reconstruir la señal completa, como muestra la ilustración 11.³⁰

Existen dos interpretaciones de SBR: Replicación de banda espectral de alta calidad que utiliza un conjunto de filtros complejos y Replicación de banda espectral de bajo consumo que utiliza un conjunto de filtros con valores reales, es menos complejo que el anterior sin comprometer significativamente la calidad.

Ilustración 11: Codificador de fuente de audio DRM



Fuente: Comparación de tecnologías de radio digital para su aplicación en México

MPEG SURROUND (MPS)

Denominado también codificación MPEG Envoltante o MPEG Panorámica, es accesible para procesar sonido estéreo y monofónico compatible para codificación multicanal, el estándar de codificación MPS detalla las siguientes características:

³⁰ DRM Consortium, «DRM Introduction and Implementation Guide» Marzo 2013. [En línea]. Available: <http://www.drm.org/wp-content/uploads/2013/09/DRM-guide-artwork-9-2013-1.pdf>. [Último acceso: 4 Enero 2014].

- ✓ Codificación de señales multicanal, establecida en una señal downmixed³¹ ofrece la más baja tasa de datos posible para la codificación de señales multicanal, así como una inherente señal reducida mono o estéreo incluida en el flujo de datos, lo que quiere decir que una señal puede ser expandida a múltiples canales por una muy pequeña sobrecarga de datos.
- ✓ Decodificación de dos canales un flujo de MPEG Envolvente, permitiendo un modo matriz mejorado que permite un Upmix³² multicanal de una señal estéreo
- ✓ Una señal estéreo con un modo matriz mejorado admitiendo un Upmix multicanal.

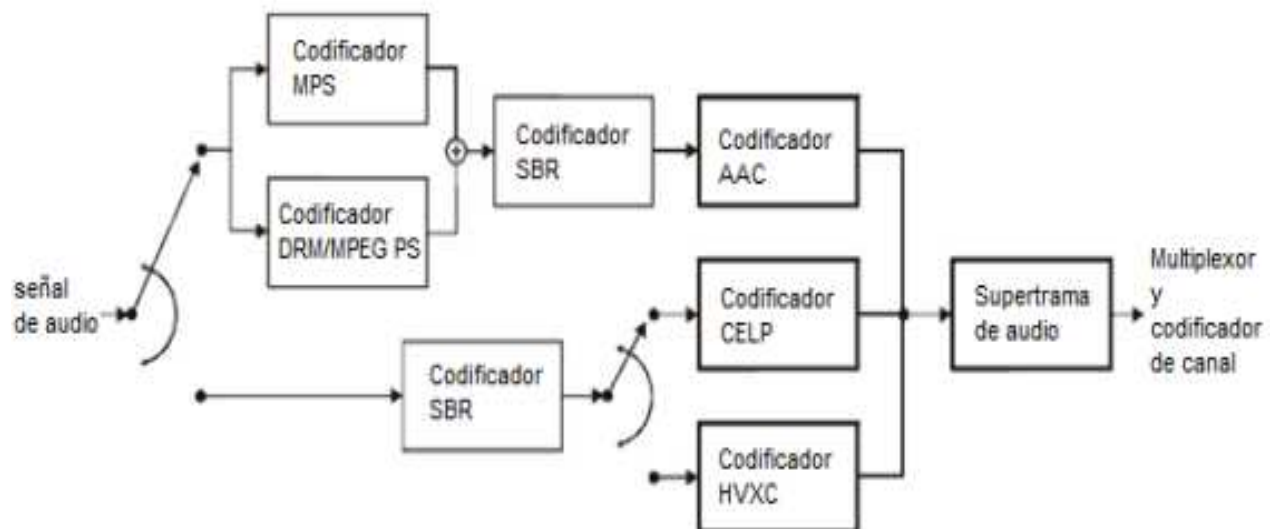
ESTÉREO PARAMÉTRICO PS

Es una técnica de compresión de audio con pérdida incluida dentro de la especificación MPEG-4. Permite la codificación de estéreo a bajas velocidad de transmisión usa sobre la configuración AAC + SBR, el objetivo general es enviar la información estéreo junto con la información monofónica, la información estéreo debe ser muy concisa de tal modo que requiera una pequeña fracción de velocidad binaria permitiendo tener a la señal monofónica la mayor calidad posible.

El esquema de multiplexación y señalización mencionada anteriormente utiliza el sistema DRM+ permitiendo el mismo diseño COFDM con distintos parámetros, tanto en modulación de portadora de 4QAM o 16QAM con los mismos códecs de audio.

En la figura 4 se ilustra la operación de los tres códecs básicos (AAC, CELP, HVXC) de acuerdo a la capacidad de transmisión de los modos DRM más comunes.

Figura 4: Codificador de fuente de audio DRM



Fuente: L. Vargas Reinoso, Diseño de una radiodifusora digital en base al estándar DRM (Digital Radio Mondiale).

Para generalizar los datos a transmitir tanto el audio, los datos asociados al servicio y los parámetros asociados a la transmisión sin necesidad de utilizar un gran ancho de banda, DRM ha

³¹ downmixed: es el proceso por el cual múltiples sonidos grabados se combinan dentro de uno o más canales, por ejemplo estéreo de 2 canales.

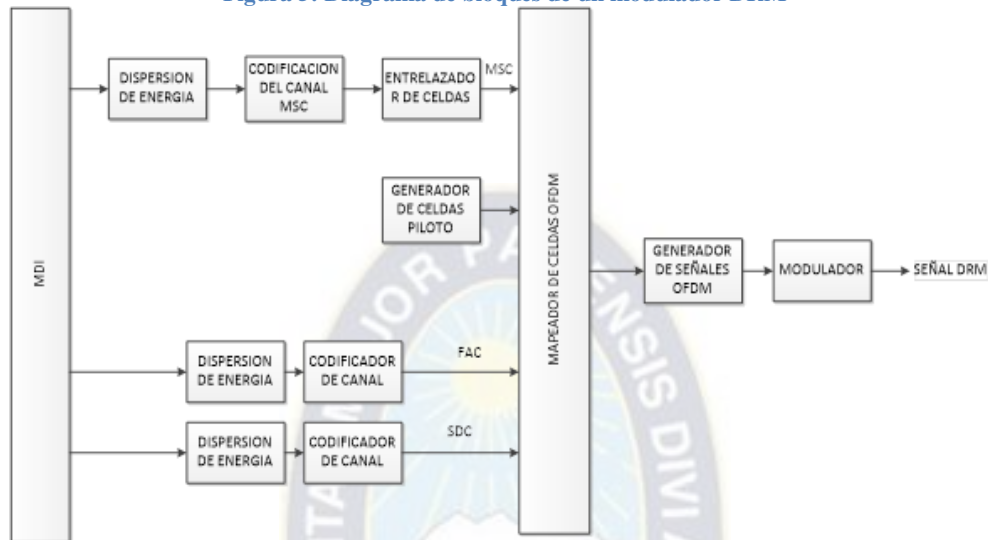
³² La tecnología Upmix utiliza un algoritmo único que extrae el ambiente del sonido directo y se diferencia de otros enfoques para la mezcla ascendente a través de su naturaleza adaptativa convirtiéndose en sonido 5.1.

sonido 5.1: es el nombre común para los sistemas de sonido envolvente multicanal de seis canales. Utiliza cinco canales de ancho de banda completos y uno de mejora de baja frecuencia de banda estrecha.

detallado un método eficaz para articular todos estos datos en un solo flujo (multiplex) conocido como Interfaz de Distribución del Múltiplex (MDI) y el Protocolo de Comunicaciones y Distribución (DCP).

2.3.1.3.6. CODIFICACIÓN DE CANAL Y MODULACIÓN DRM

Figura 5: Diagrama de bloques de un modulador DRM



Fuente: Elaboración propia

En la figura 5 se muestra el diagrama de bloques del modulador DRM, ahora detallaremos las funciones.

El sector MDI Interfaz de distribución multiplex es un protocolo permite conexiones espaciales remotas entre servidores de contenido DRM y moduladores de banda base (receptores MDI) a través de Ethernet. Por lo tanto, la señal de banda base analógica se puede generar muy cerca del transmisor y no se requiere una conexión de HF de larga distancia, lo que puede agregar mucho ruido a la señal de salida. Los bits de precodificación FAC, SDC y MSC y alguna información especial del modulador se envían en el flujo de paquetes de datos DCP-PFT [3]. Si se utiliza Ethernet como medio físico, el protocolo utilizado en la capa 4 puede ser TCP o UDP. El uso de multidifusión permite brindar servicios a diferentes clientes MDI en la LAN a través de paquetes MDI.

El objetivo del bloque de dispersión de energía es seleccionar un número determinado y selectivo de bits con el propósito de reducir la posibilidad de generar errores en la transmisión. Es decir enlaza e inserta bits para reducir secuencias erróneas.

El bloque codificador de canal inserta bits de redundancia en la información para generar una herramienta que corregirá y dará protección a errores. Por otra parte el bloque es capaz de definir el mapeo de la información de la modulación QAM (Modulación de Amplitud en Cuadratura).

En este punto se realiza una comparación entre codificador de fuente y codificador de canal, por un lado el codificador de fuente reduce la tasa de bits al usar por técnicas de compresión y por otro lado la codificación de canal incrementa la tasa de bits al agregar bits.

El objetivo del bloque de entrelazado de celdas es reordenar la secuencia de bits. El fin de una transmisión estándar es tener una transmisión robusta en canales dispersivos en tiempo y frecuencia.

Si se obtiene un error que afectan a varias celdas consecutivas, cuando estas son desentrelazadas en recepción las celdas con error quedan separadas y por lo tanto es identificable para la corrección de error, es decir, la idea del entrelazado es desacomodar los bits continuos de la señal para que el posible desvanecimiento en recepción al ordenar los bits estos no estén dañados.

El bloque generador de pilotos añade portadoras codificadas con celdas QAM determinadas para facilitar la sincronización en recepción, esto permite obtener información del estado del canal, permitiendo una demodulación coherente de la señal.

El bloque de mapeo de celdas OFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal) tiene como objetivo agrupar las diferentes celdas QAM de información (datos útiles y canales auxiliares) generados por el canal de servicio principal, canal de acceso rápido y el canal de descripción de servicio y colocarlas en las portadoras para distribuirlas en la grilla de tiempo-frecuencia, se pone una celda por cada portadora y se colocan los pilotos en otras.

El bloque generador de señal OFDM transforma todas las portadoras pertenecientes a un mismo símbolo de esta representación en frecuencia a una representación temporal (usa la transformada inversa de Fourier), siendo al final un símbolo OFDM un conjunto de tonos a diferentes frecuencias, amplitudes y fases; al final el símbolo OFDM en el dominio del tiempo se obtiene insertando un intervalo de guarda necesario para protección de errores multitrayecto durante la propagación.

Finalmente el bloque modulador convierte la representación digital de la señal OFDM obtenida del bloque generador de señal OFDM en una señal analógica en el aire, esta operación incluye la conversión digital-analógica y el filtrado que debe cumplir de acuerdo a los requerimientos del espectro.

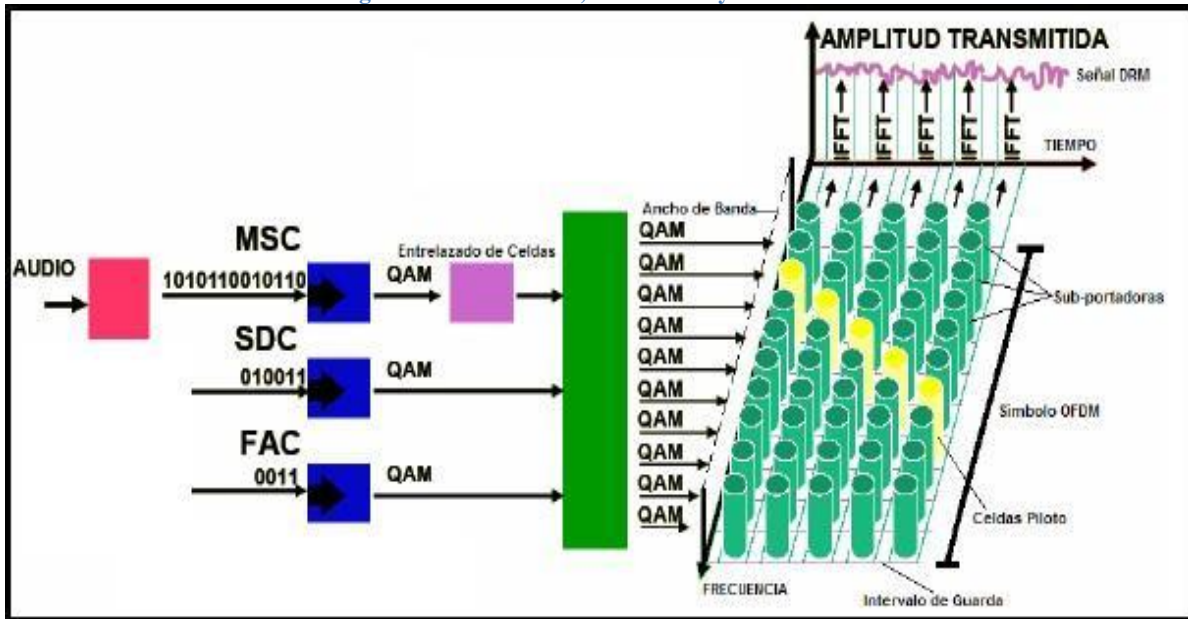
CODIFICACIÓN DE CANAL

El sistema codificación/modulación emplea la técnica COFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal Codificada), el cual combina la modulación OFDM con la codificación de nivel múltiple, de esta técnica solamente hace uso de la FEC (Corrección de Errores hacia Adelante) proporcionando redundancia útil para resistir al ruido, eliminar el desvanecimiento, etc., fundamentadas en la codificación multinivel.

La técnica COFDM transmite datos codificados sobre un número de subportadoras que cuentan con la modulación OFDM, llevando solamente una cierta información que será transmitida, el número de subportadoras varía desde 88 a 458 variando según el modo de robustez y ancho de banda. Para el sistema es muy importante esta característica debido a que determinan la robustez del sistema DRM ya que perder una subportadora (un símbolo) es insignificante, sin embargo perder una portadora en una transmisión AM es importante.

El comportamiento COFDM en el sistema se muestra en la Figura 11.

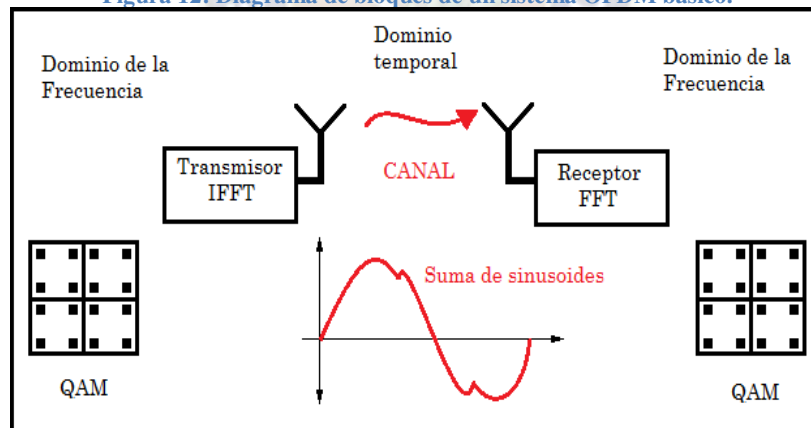
Figura 11: Codificación, entrelazado y transmisión.



Fuente: diseño de una radiodifusora digital en base al estándar DRM- Lenin patricio Vargas reinoso.

El proceso de la modulación del sistema se realiza utilizando la técnica de transformada inversa de Fourier (IFFT)³³ y la demodulación se realiza con la técnica de la transformada de Fourier (FFT) siguiendo básicamente el diagrama. Figura 12.

Figura 12: Diagrama de bloques de un sistema OFDM básico.

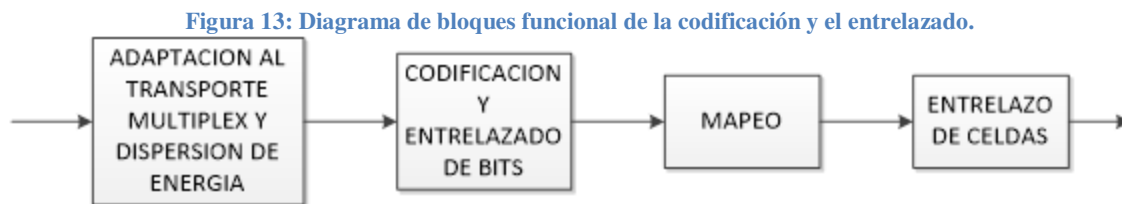


Fuente: diseño de una radiodifusora digital en base al estándar DRM- Lenin patricio Vargas reinoso.

Las subportadoras del sistema utilizan la modulación QAM, y los esquemas de QAM (n-QAM) utilizados dependen del canal y del modo de robustez al cual trabaja el sistema, también estará sujeto a si el canal usa UEP (protección de error desigual) o EEP (Protección Igual de Error), para EEP se usa una única tasa de código para la protección de los datos, siendo esto obligatorio para los canales FAC y SDC; mientras que para UEP puede usar dos tasas de código para cada parte protegiendo así los datos.

³³FFT e IFFT son algoritmos que permiten calcular la transformada de Fourier discreta y su inversa respectivamente utilizando algoritmos para pasar al dominio de la frecuencia para obtener información que no es evidente en el dominio del tiempo

Los procesos que involucran al inicio son: adaptación al transporte multiplex, dispersión de energía, codificación y entrelazado de bits, mapeo en celdas QAM y entrelazado de celdas, esto se muestra en la Figura 13.



Fuente: elaboración propia

Para la modulación de cada una de las sub portadoras OFDM vimos que el sistema utiliza la modulación de amplitud en cuadratura (QAM), y según el tipo robustez de la señal que se desee, se manipulara un tipo de constelación dependiendo de la modulación que llevará la información dentro de las sub portadoras; es así que en el caso de DRM30 se emplea 64QAM (para una gran calidad de audio) y 16QAM (para una señal más robusta pero de menor calidad); y, en el caso de DRM+ se emplea 16QAM y 4QAM.

MODULACIÓN Y PARÁMETROS DE CODIFICACIÓN

La codificación del sistema se basa en esquemas de codificación multinivel, emplea técnicas de codificación y modulación para obtener un buen resultado en la transmisión, y la técnica consiste en usar constelaciones QAM con más protección para aquellos bits más vulnerables; la codificación requiere de procesos previos como el mapeo en constelaciones QAM. Como antes ya mencionamos el sistema DRM ofrece una gran ventaja al modificar los parámetros OFDM de la transmisión para obtener un gran rendimiento en las bandas de frecuencia empleadas.

I) MODOS DE TRANSMISIÓN

Las medidas correspondientes al modo de transmisión para el estándar son: el ancho de banda del canal y la eficiencia de la transmisión.

II) ANCHO DE BANDA DEL CANAL

La canalización para radiodifusión terrestre bajo los 30MHz es de 9KHz y 10KHz, bajo estas condiciones el estándar DRM trabaja de la siguiente manera:

- ✓ Mitad de anchos de banda nominales (4.5KHz y 5KHz) para difusión híbrida.
- ✓ Doble de anchos de banda nominales (18KHz y 20KHz) para mayor capacidad de transmisión.

Para el estándar DRM+ (frecuencias mayores a los 30 MHz) su ancho de banda ocupado aumenta a 96 kHz y se canaliza a 100 KHz, proporcionando velocidades de transmisión de datos de entre 35 kbps a 185 kbps para una relación señal/ruido (SNR) de entre 2 dB a 14 dB, al igual que DRM30 pero no recomendado, permite que se transmiten juntos hasta cuatro servicios en un mismo canal.

III) EFICIENCIA DE LA TRANSMISIÓN

Dentro de los parámetros OFDM (técnica de modulación del sistema) con los modos de robustez, el cual clasifica estos modos de transmisión dependiendo las condiciones relacionadas con la propagación; a un ancho de banda dado los diferentes tipos de robustez ofrecen diferentes velocidades de datos. Al hablar de robustez, se hace referencia a que tan bien la señal soporta problemas como el ruido, multitrayectos, desvanecimientos, etc. Los modos de transmisión no

son la única manera de determinar esta robustez, ya que parámetros como el ancho de banda, la compresión de audio o el nivel de entrelazado también influyen.

Para poder optimizar el funcionamiento del sistema, los parámetros de la señal OFDM, deben ajustarse a los del canal de RF. El sistema DRM ha sido diseñado para poder operar en medios ionizados y no-ionizados, sobre un amplio rango de frecuencias que llega hasta los 300 MHz.

Tabla 7: Modos de transmisión de DRM

MODO	MSC QAM	ANCHO DE BANDA (KHz)	Uso referencial	
A	16, 64	4,5,9,10,18,20	LF y MF ondas de superficie, banda de 26 MHz, línea de vista	Modo DRM30
B	16, 64	4,5,9,10,18,20	HF y MF onda ionosférica	
C	16, 64	10,20	Canales complicados por onda de tierra en HF	
D	16, 64	10,20	Onda de cielo de incidencia casi vertical	
E	4, 16	100	VHF transmisión en las bandas mayores a los 30 MHz	MODO DRM+

Fuente: Elaboración Propia en función a la investigación

La tabla 7 agrupa las diferentes configuraciones de modos de transmisión que se logra con la técnica de modulación.

1. **Modo A:** Se obtiene la mayor tasa de datos posible siempre y cuando la transmisión sea por onda terrestre o con línea de vista.
2. **Modo B:** Primera opción al tratarse de ondas celestes
3. **Modo C y D:** Cuando la propagación sea por onda celeste y la señal tenga que irradiar una larga distancia o tenga muchos saltos, incluso cuando la incidencia de la señal sea casi vertical.
4. **Modo E:** Para transmisiones arriba de los 30 MHz en VHF y hasta la Banda III

Se puede decir que el modo A es empleado para su símil analógico de AM convencional durante el día, el modo B durante la noche y junto con los modos C y D para las transmisiones de Onda Corta, las cuales pueden llegar a ser internacionales. Finalmente el modo E es empleado para las transmisiones de FM maneja uno de los códec más importantes en la compresión de audio y es configurable para soportar hasta cuatro canales en la transmisión.

Tabla 8: Modos de robustez definida por el estándar DRM

MODOS DE ROBUSTEZ	CONDICIONES DE PROPAGACIÓN TÍPICA
A	Canales Gaussianos, con menor desvanecimiento.
B	Canales selectivos de tiempo y frecuencia, con dispersión por retardo más largo.
C	Como modo B, pero con dispersión Doppler más alta.
D	Como modo B, pero con retardo severo y dispersión Doppler.
E	Canales selectivos en tiempo y frecuencia

Fuente: Elaboración Propia

Respecto a los modos podemos decir básicamente que el modo A está diseñado para entregar la velocidad binaria más alta posible aplicada sobre onda de superficie, el modo B tiene los mismos criterios que el modo anterior pero este aplicado sobre onda ionosférica, respecto al modos C y D aplican en escenarios donde se presentan trayectos largos, saltos múltiples, incidencia casi vertical, presencia importante de reflexiones y para el modo E se aplica para frecuencias

superiores a 30MHz. Los modos más robustos tienen como consecuencia reducir la velocidad binaria y por lo tanto la calidad.

La señal transmitida comprende una sucesión de símbolos OFDM, cada símbolo tiene un intervalo de guarda seguido de la parte útil, cada símbolo es la suma de k porciones iguales de ondas sinusoidales (celdas) espaciadas en frecuencia, y son transmitidos con una amplitud y fase dada correspondiente a una posición de la portadora, cada portadora está referenciada por un índice k , estando k dentro del intervalo entre k_{min} y k_{max} ($k=0$ corresponde a la frecuencia de referencia de la señal transmitida).

Los parámetros relacionados con el tiempo de los símbolos OFDM, son expresados en múltiplos del periodo elemental T , donde $T=831/3$ y estos son:

- T_u : tiempo útil del símbolo [ms].
- $1/T_u$: espaciamiento entre portadoras [Hz].
- T_g : duración del intervalo de guarda [ms].
- T_s : duración total del símbolo ($T_s = T_u + T_g$) [ms].

Un cierto número de celdas en cada símbolo OFDM son transmitidas con un valor predeterminado de amplitud y fase, con el objeto de usar como referencia para el proceso de demodulación, estas son denominadas “referencias piloto” y representan una parte del número total de las celdas.

Tabla 9: Tiempos de los modos de robustez

Modo	T_u [ms]	$1/T_u$ [Hz]	T_g [ms]	T_s [ms]
A	24	41.6667	2.66	26.66
B	21.33	46.8823	5.33	26.66
C	14.66	68.2128	5.33	20
D	9.33	107.1811	7.33	16.66
E	2.25	444.4444	0.25	2.5

Fuente: Elaboración Propia

El rango de velocidades disponibles para los distintos niveles de robustez de la señal y anchos de banda del canal va especificado en la tabla 10. La velocidad mínima de transmisión que permite el sistema DRM es de 4.8 kbps, en la configuración: modo B, 16QAM, robustez máxima, ancho de banda de 4.5 kHz; mientras que la velocidad máxima de transmisión es de 186 kbps en la configuración: modo E, 16QAM, robustez mínima, ancho de banda de 100 kHz.

Tabla 10: Velocidades de transmisión para cada modo del sistema DRM

Modo	Modulación del MSC [nQAM]	Nivel de robustez	Ancho de banda nominal de la señal [kHz]						
			4.5	5	9	10	18	20	100
			Velocidad de transmisión [kbps]						
E	16	Min.							186.3
		Max.							99.4
	4	Min.							74.5
		Max.							37.2
A	64	Min.	14.7	16.7	30.9	34.8	64.3	72.0	
		Max.	9.4	10.6	19.7	22.1	40.9	45.8	
	16	Min.	7.8	8.8	16.4	18.4	34.1	38.2	
		Max.	6.3	7.1	13.1	14.8	27.3	30.5	
B	64	Min.	11.3	13.0	24.1	27.4	49.9	56.1	
		Max.	7.2	8.3	15.3	17.5	31.8	35.8	
	16	Min.	6.0	6.9	12.8	14.6	26.5	29.8	

		Max.	4.8	5.5	10.2	11.6	21.2	23.8	
C	64	Min.				21.6		45.5	
		Max.				13.8		28.9	
	16	Min.				11.5		24.1	
		Max.				9.2		19.3	
D	64	Min.				14.4		30.6	
		Max.				9.1		19.5	
	16	Min.				7.6		16.2	
		Max.				6.1		13.0	

Fuente: <http://www.drm.org/wp-content/uploads/2013/09/DRM-guide-artwork-9-2013-1.pdf>. [Último acceso: 4 Enero 2014].

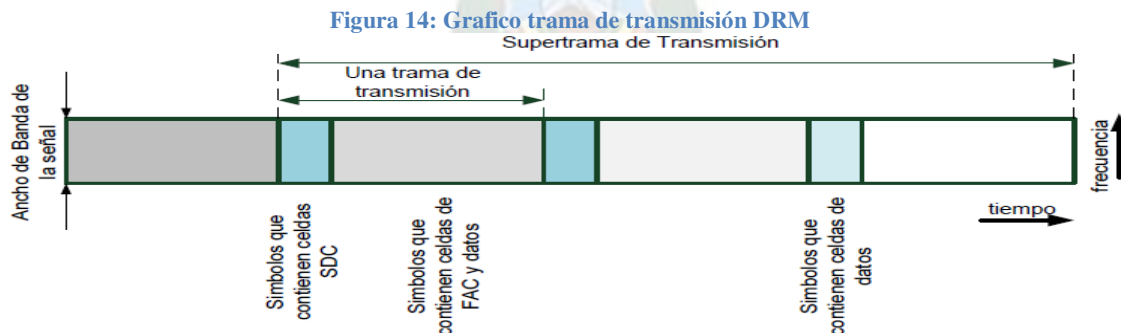
IV) MAPEO DE CONSTELACIONES QAM Y SÍMBOLOS OFDM

La estrategia de mapeo para cada celda OFDM depende del canal y los modos de robustez utilizados, estos pueden ser 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM, recordemos que el sistema DRM+ utiliza 4-QAM, 16-QAM. Los símbolos OFDM están constituidos por subportadoras transmitidas durante un tiempo T_s dato obtenido de sumar una parte útil (T_u) más un intervalo de guarda (T_g), la función del tiempo de guarda es que consiste en una continuación cíclica de la parte de guarda (T_u), evitando problemas de multitrayecto y permitiendo que la mayor parte de las señales se suman, es decir que favorezcan al sistema, esto es muy útil para aplicaciones en (SFN) Redes de Frecuencia Única. Recordemos que el sistema se divide en distintos modos de transmisión A, B, C, D y E modos que aplican a onda de superficie (ondas hectométricas) donde el ruido eléctrico es el factor más influyente (este modo aplica sobre la radiodifusión en AM actual), así como en ondas ionosféricas (ondas decamétricas); los tiempos asociados a la duración del símbolo OFDM en función de los modos se muestra en la Tabla 7.

2.3.1.3.7. SUPERTRAMA DE AUDIO

La información que se encuentra en el sistema DRM está concentrada en supertramas. Una supertrama de transmisión en el sistema DRM30 está formada por tres tramas de transmisión, cada una de estas tramas contiene símbolos OFDM. Esos símbolos a su vez contienen datos e información de referencia. El número de símbolos (N_s) depende del modo de transmisión, para los modos A y B $N_s=15$, en el modo C es $N_s=20$ y en el más robusto el modo D $N_s=25$.

Concretando, la trama de transmisión del sistema OFDM contiene celdas de datos, celdas de control y celdas piloto, las celdas de control son las FAC y SDC. Las celdas piloto facilitan la sincronización y recepción.



Una supertrama en el estándar DRM+ dura 400 ms y contiene 4 tramas de 100 ms de duración, cada trama contiene 40 símbolos OFDM.

Para una transmisión para este sistema cada símbolo OFDM tiene una duración $T_s = 2,5$ ms y está constituido por un conjunto de $K=213$ portadoras espaciadas a través del ancho de banda DRM+ (96 KHz) con una separación de 444,44 Hz entre cada una de ellas.

La duración de un símbolo OFDM es la suma de la duración de la parte útil de un símbolo (2,25ms) y la duración de un intervalo de guarda correspondiente a 0,25 ms. El intervalo de guarda consiste en la continuación cíclica de la parte útil (T_u) y se inserta antes de ella.

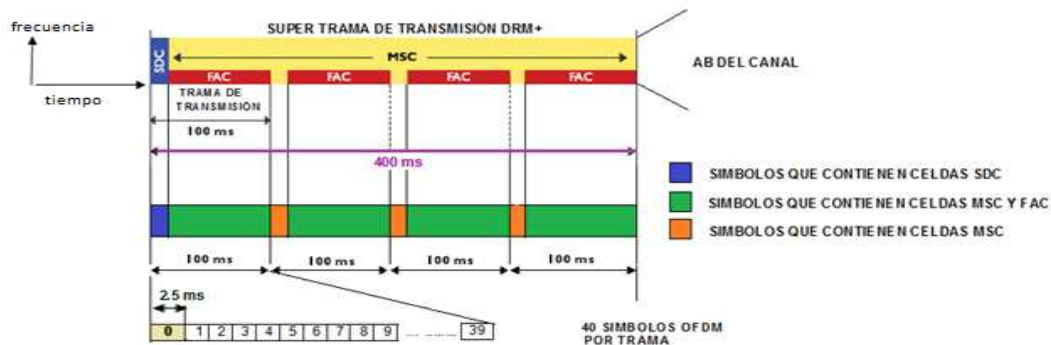
Tabla 10: Duración de transmisión del sistema DRM

Periodo de tiempo elemental T	83 1/3 us
Duración de la parte (ortogonal) útil $t_u=27*t$	2.25 ms
Duración de tiempo de guarda $T_g=3*T$	0.25 ms
Duración de símbolo $T_s=T_u+T_g$	2.5 ms
T_g/T_u	1/9
Duración de la trama de transmisión T_f	100 ms
Numero de símbolos por trama N_s	40
Anchura de banda de canal B	96 KHz
Separación de portadora $1/T_u$	444 4/9 Hz
Espacio de numero de portadora	$K_{min}=-106;$ $K_{max}=106$
Portadora no utilizadas	NINGUNA

Fuente: Elaboración Propia

En la señal OFDM se percibe varias subportadoras moduladas por separado, cada símbolo puede a su vez considerarse dividido en celdas y cada celda corresponde a la modulación aplicada a una subportadora durante un símbolo, el número de bits transmitidos por cada subportadora depende de la clase de modulación QAM utilizada.

Ilustración 12: Grafico de trama DRM+



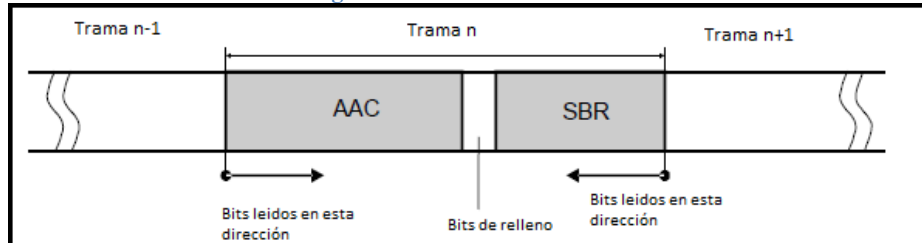
Fuente: Elaboración Propia

Como vemos en la figura anterior observamos que el sistema DRM+ la duración de la trama FAC es de 100 ms. Además, a diferencia del MSC y el SDC, la información que lleva el FAC no está entrelazada en tiempo y es mapeada en grupos específicos de sub portadoras OFDM para que el receptor tenga un proceso factible y consecuentemente rápido en acceso a los parámetros del canal; requeridos por el receptor para la demodulación del multiplex; y, a los parámetros del servicio, necesarios para un rápido escaneo y sintonización. Otro motivo por el cual el FAC no está entrelazado, es que, al transmitir la señal DRM en un canal diferente al empleado por la señal analógica, la sintonización de las distintas estaciones se realiza por el nombre de las mismas, y debido a que la información del nombre difunde en este canal, es necesario tener un rápido acceso a ella para posibilitar una rápida sintonización.

La trama del SDC como ya antes mencionado contiene información de cómo demodular los datos del MSC, cómo encontrar transmisiones alternativas que contengan los mismos datos y da atributos a los servicios que se encuentran dentro del múltiplex; se transmite a lo largo de todas las sub portadoras con una duración de dos símbolos al inicio de cada súper trama; esta información normalmente es estática y repetitiva, y es justo esta periodicidad la que permite al receptor el cambio a frecuencias alternativas; dicha periodicidad corresponde a la longitud de la súper trama de transmisión (1200 o 400 ms), dependiendo del modo DRM que se esté usando³⁴.

D) SUPERTRAMA DE AUDIO AAC + SBR

Figura 6: Trama AAC con SBR



Fuente: Elaboración Propia

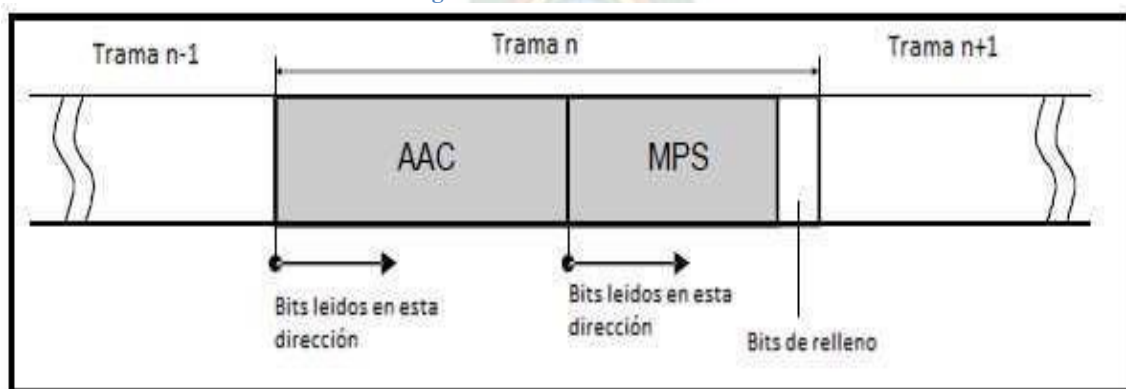
La trama que comprende el códec AAC y SBR va ordenado de la siguiente manera: la parte del SBR está ubicada al final de la trama de tal manera que el códec AAC está el primer bit y para el SBR el bit de la izquierda corresponde al último bit, separados por bits de relleno, esta distribución permite que siempre se encuentren de manera fácil los puntos de partida de las respectivas partes, debido a que la frecuencia de muestreo del SBR es el doble de la frecuencia de muestreo del códec AAC la Figura 6 muestra lo descrito.

El uso de SBR es importante para tasas de bits que superen los 20 Kbps, la cantidad de bits que maneja la trama no son constantes de trama a trama y la forma que utiliza el SBR es similar a cuando no se utiliza SBR.

II) SUPERTRAMA DE AUDIO AAC + MPS

Si el códec no incluye SBR, puede incluir los datos MPS que se encuentran ubicados después de los datos AAC, recordemos que MPS tiene tres bits, si la secuencia de bits es diferente a 000 estará habilitado en la trama, los bits de relleno están en la parte final de la trama.

Figura 7: Trama AAC con MPS

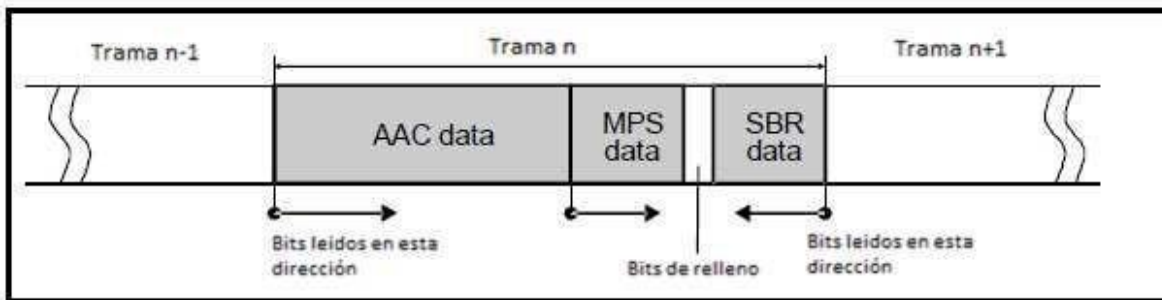


Fuente: Elaboración Propia en función a la investigación

³⁴ DRM Consortium, DRM Introduction and Implementation Guide, Marzo 2013. <http://www.drm.org/wp-content/uploads/2013/09/DRM-guide-artwork-9-2013-1.pdf>. [Último acceso: 4 Enero 2014].

Si los datos del códec AAC llevan datos de SBR y datos MPS estos dos últimos datos se encontrarán en la parte final de la trama separada con bits de relleno.

Figura 8:: Trama AAC + MPS + SBR



Fuente: Elaboración Propia en función a la investigación

2.3.1.3.8. REDES DE FRECUENCIA ÚNICA (SFN) Y FRECUENCIA MÚLTIPLE (MFN)

En las redes de frecuencia única (SFN) todos los transmisores radian a idéntica frecuencia al ser previamente modulados por la misma señal de forma simultánea. De este modo, y debido a la capacidad de recepción del multitrayecto de los sistemas de transmisión multiportadora (COFDM), las prestaciones de recepción son mejoradas gracias a la interferencia constructiva de diversas componentes de señal procedentes de los distintos transmisores³⁵.

Al referirnos a redes de frecuencia múltiple podemos afirmar que está definido por la intensidad de campo eléctrico necesaria para lograr una adecuada recepción, garantizando que no existan interferencias desde y hacia otras estaciones en las mismas frecuencias, en canales adyacentes o en frecuencias relacionadas armónicamente entre sí.

Esta red de frecuencia múltiple no requiere ningún tipo de sincronismo entre los distintos transmisores de la red, además tiene la posibilidad de realizar desconexiones. Cada transmisión tiene la posibilidad de transmitir un programa

El sistema DRM tiene como ventaja el uso de redes SFN siendo una configuración en la que ciertos transmisores pueden emitir señales DRM utilizando la frecuencia recibida. Esta gran ventaja que adopta SFN es de dar cobertura a grandes extensiones territoriales utilizando una sola frecuencia y una red de varios transmisores, para que los radiodifusores sean más conocidas por su frecuencia de operación manteniendo la misma frecuencia, en incluso un país entero, más importante que esto último, se vuelve la idea de lograr un uso más eficiente del espectro, al no tener que por ejemplo asignar varias frecuencias a una misma estación que desee cubrir una amplia zona, otra ventaja que es importante señalar; es el control sistemático, gestión y entretenimiento que ofrece la frecuencia.

En lugares donde no sea posible desplegar redes SFN, se pueden utilizar también las MFN; en este tipo de redes, las señales transmitidas también son idénticas, pero la frecuencia empleada en cada transmisor es diferente, de esta manera, cuando se abandona una zona de cobertura y se ingresa en otra, el receptor debe conmutar a otra frecuencia en la que se esté transmitiendo el mismo servicio.

La señal DRM ofrece un breve período durante el cual no se transmiten datos del MSC. Esto no es audible para el oyente, pues los datos son re-programados en el receptor para asegurar la

³⁵ <https://robertocallos2.wordpress.com/2018/10/04/5-7-tipologias-de-redes-sfn-mfn-y-mpe/>

llegada continua de los datos al decodificador de audio. Sin embargo, este período ofrece un corto intervalo de tiempo, durante el cual el receptor puede sintonizar a una frecuencia alternativa que lleva el mismo programa, con el fin de determinar la calidad de la señal. Si la calidad de la frecuencia alternativa es mejor, el receptor puede cambiar a esta frecuencia, si no se puede volver a la frecuencia original. Sin embargo esta operación sólo funcionará sin problemas si las señales en las frecuencias alternativas se sincronizan con precisión en el receptor. La operación de redes MNF se basa en el uso de la señalización de frecuencia alternativa (AFS) ³¹.

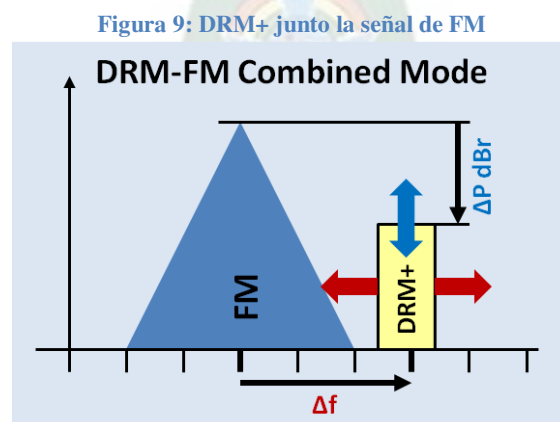
2.3.1.3.9. MULTICAST

El sistema DRM tiene la ventaja del Simulcast (transmisión simultánea), una de las características principales del estándar que permite a las distintas señales digitales DRM coexistir con las transmisiones analógicas actuales; esta característica es físicamente útil para permitir una transición digital menos brusca, en este sentido brinda a los radiodifusores la capacidad de ofrecer servicios tanto para receptores analógicos como para receptores digitales. De esto último, los principales beneficiados son los receptores, los cuales no se ven obligados a migrar de manera tajante de lo analógico a lo digital, pues al poder seguir recibiendo el servicio de radio analógico, esta migración digital se vuelve más comprendida por los radioescuchas. No obstante, los usuarios pueden verse limitados al momento de introducir la señal DRM, porque para poder transmitirla se necesita de un canal de frecuencia adyacente al empleado por la señal analógica y en muchas zonas se vuelve muy complicado solicitar un nuevo canal.

2.3.1.3.10. MULTICAST DRM+

En el sistema DRM+, es decir modo E, se puede colocar la señal DRM muy próxima a la señal FM analógica: durante esta etapa las señales analógica y digital van a coexistir siendo una independiente de la otra y una vez que la transmisión analógica ya no sea necesaria simplemente se puede dejar de utilizar y darle paso a la DRM+ que puede re-utilizar el espectro de FM liberado para sus servicios.

En el espectro de frecuencias la señal DRM+ se puede colocar cerca de la señal FM como se ve en la figura 9. Esta señal se puede implementar ya sea a su derecha o izquierda de modo que se garantice los niveles de protección requeridos por DRM+ así como también se asegure la calidad de audio de la señal FM.



Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DRM-FM_Combined_Mode

Para asegurar los niveles de protección mínimos así como la calidad de audio de la señal de FM, la distancia entre frecuencias portadoras (Δf) y la diferencia de los niveles de potencia (ΔP) entre

ambas señales puede ser establecida de acuerdo a las necesidades del radiodifusor. Es así que un valor de $\Delta f \geq 150$ kHz, es recomendable; mientras que el valor de $\Delta P > 6$ dB, será la diferencia mínima de potencias cuando $\Delta f = 150$ kHz.

Según la figura 10 podemos detallar lo siguiente:

La curva de color negro muestra la máxima relación de potencia en DRM+ que no afectará a la señal analógica más allá de los criterios de protección recomendados.

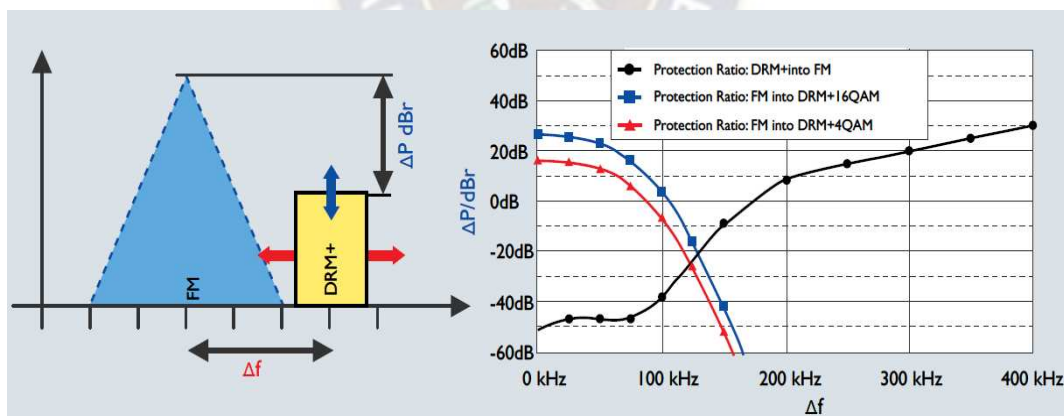
- La curva azul muestra la relación de potencia mínima para 16QAM DRM+ en presencia de una fuente de interferencia de FM analógica.
- La curva roja muestra la relación de potencia mínima para 4QAM DRM+ en presencia de una fuente de interferencia de FM analógica.
- En el sistema DRM+ son posibles dos configuraciones de transmisión:
- Las señales analógicas y digitales pueden ser combinadas y transmitidas a través de la misma antena; o
- Las dos señales pueden transmitirse usando diferentes antenas.

El sistema también permite diferentes configuraciones para la señal DRM.

- La señal de DRM puede tener el mismo programa que el servicio de FM,
- Un programa diferente o el mismo programa y programas adicionales.

Si el mismo programa está disponible a través de DRM y FM, la señalización de AFS se debe enviar en el SDC.

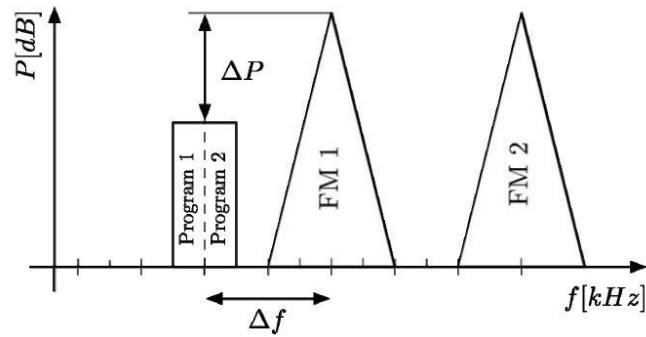
Figura 10: Relación de potencias analógica y digital en simulcast para DRM+.



Fuente: http://www.etsi.org/deliver/etsi_es/201900_201999/201980/04.01.01_60/es_201980v040101p.pdf.

En la Figura 11 se muestra un ejemplo de una posible configuración que permite el sistema DRM+, en el modo de robustez E. En esta configuración se muestra el caso en el cual se están transmitiendo dos programas diferentes tanto en sistema analógico como a través del sistema digital DRM+ en modo de robustez E.

Figura 11: Relación de potencias analógica y digital en simulcast para DRM+ en dos canales FM.

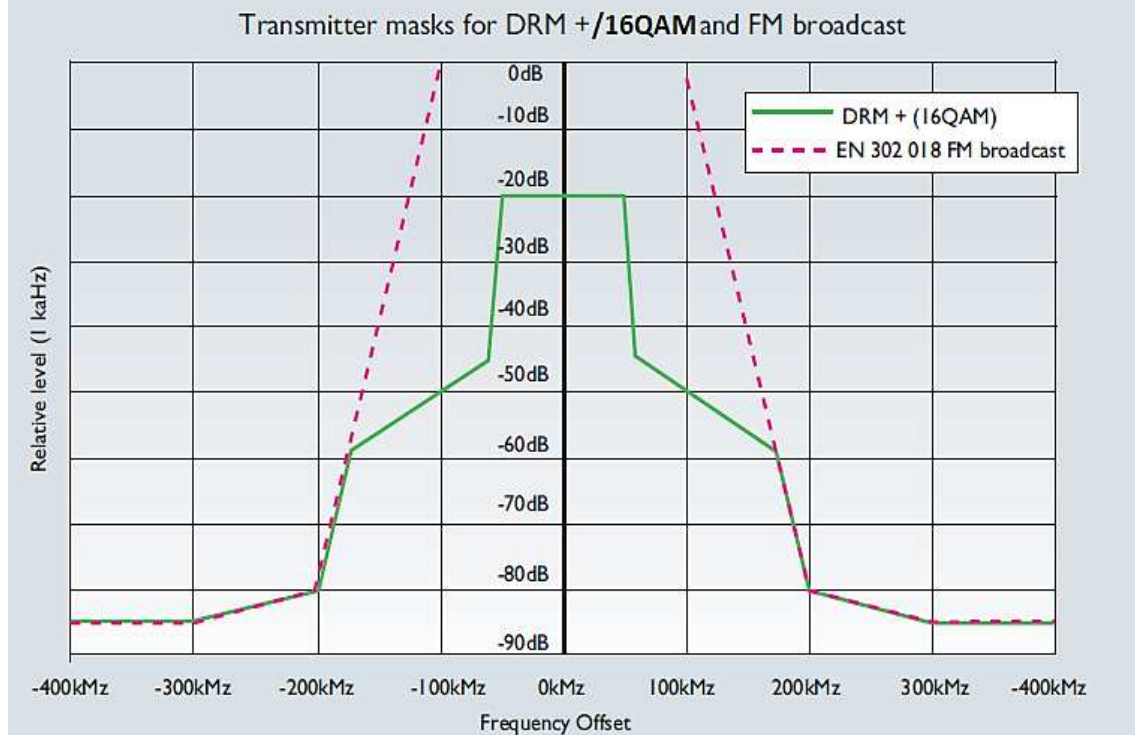


Fuente: Future possibilities for the digitalization of band ii (87.5 - 108 MHz) St. Petersburg may 2010

Para efectuar las transmisiones bajo el sistema DRM+ en las bandas de frecuencias que actualmente existente, de manera conjunta con otras transmisiones, los niveles de protección y la máscara de transmisión aún no han sido estandarizados por parte de los creadores del sistema, sin embargo, para no causar interferencias en las transmisiones analógicas existentes, se han adoptado los lineamientos técnicos existentes, concretamente se utiliza la máscara definida en la Figura 12, la cual se basa en la máscara establecida por la ETSI EN 302 018-114 para las transmisiones analógicas de FM.

Figura 12: Relación de potencias analógica y digital en simulcast para DRM+.

A transmitter mask for this signal is not standardized, but from the intention not to overshoot the existing mask for FM broadcast from ETSI EN 302 018-1, the following mask was used:



Fuente: http://www.contelec.com/manuals/drm_broadcast_manual.pdf.

Conjuntamente en la figura 12, se muestran las máscaras definidas por la ETSI tanto para FM como para DRM+.

Tabla 12: Valores de las máscaras de transmisión para FM y DRM+ definidas por ETSI.

Máscara definida por la ETSI para FM		Máscara definida por la ETSI para DRM+		
Offset	rel level (1kHz)	Offset	rel level (1kHz)	Attenuation
-400kHz	-85.0 dB	-400.00kHz	-85.0 dB	-65.0 dB
-300kHz	-85.0 dB	-300.00kHz	-85.0 dB	-65.0 dB
-200kHz	-80.0 dB	-200.00kHz	-80.0 dB	-60.0 dB
-100kHz	0.0 dB	-172.00kHz	-53.0 dB	-39.0 dB
100kHz	0.0 dB	-60.00kHz	-45.0 dB	-25.0 dB
200kHz	-80.0 dB	-50.00kHz	-20.0 dB	0.0 dB
300kHz	-85.0 dB	50.00kHz	-20.0 dB	0.0 dB
400kHz	-85.0 dB	60.00kHz	-45.0 dB	-25.0 dB
		172.00kHz	-59.0 dB	-39.0 dB
		200.kHz	-80.0 dB	-60.0 dB
		300.00kHz	-85.0 dB	-65.0 dB
		400.00kHz	-85.0 dB	-65.0 dB

Fuente: http://www.contelec.com/manuals/drm_broadcast_manual.pdf

2.3.1.4. VENTAJAS DEL ESTÁNDAR DRM

Un adicional frente a los demás estándares de radiodifusión digital es que es un estándar abierto, es decir que ningún país o marca es propietario del sistema, esto implica una disminución en los costos de la implementación del sistema, ya que no se debe pagar a nadie regalías de ningún tipo, convirtiéndose esta en una ventaja económica para los radiodifusores.

El uso de la misma asignación espectral convierte en una ventaja al estándar además de ser el único sistema que permite la radiodifusión en todas las bandas de AM (LW, MW, SW) y también en la banda de FM, pero aparte de estas características sobresalientes, existen otras puntuales como las que se mencionan a continuación:

- Superior calidad de audio tanto en las transmisiones de AM (calidad parecida a la de la FM actual) como en FM (posibilidad de transmitir sonido envolvente, calidad similar a un CD).
- DRM permite la transmisión simultánea de la señal digital y analógica, conocido como simulcast, o también llamado modo híbrido.
- En la banda de FM, DRM+ ofrece la posibilidad de transmitir hasta 4 programaciones diferentes dentro de un mismo canal de transmisión.
- Reduce considerablemente el consumo de potencia durante la transmisión (aproximadamente 40% o 50%), ya que la transmisión de la señal digital se hace con menor potencia para obtener la misma zona de cobertura.
- DRM permite el uso de redes de frecuencia única (SFN), donde varios transmisores pueden usar la misma señal y en el mismo canal, esto haría que la misma radio sea sintonizada a la misma frecuencia en toda el área geografía en la que determinada radiodifusora opere, en el caso analógico cada radiodifusora requiere una frecuencia diferente para cada transmisor, estas son Redes de Frecuencia Múltiple (MFN); el estándar también permite la opción de cambio automático de frecuencia, aquí el receptor DRM dispone de un medio automático para conmutar la frecuencia de recepción a otra con la misma programación de una forma transparente para el usuario. En la banda de FM, DRM+ posibilita el envío de información adicional como:

Información de identificación del servicio como: tipo de programa, idioma y país de origen proporcionando servicios de datos.

2.3.1.4.1. SERVICIOS DE DATOS

El estándar plantea además la posibilidad de seleccionar entre una variedad de modos de transmisión permitiendo un equilibrio entre capacidad del sistema y robustez de la señal, de acuerdo a las necesidades y a las condiciones ambientales garantizando siempre una buena calidad en el sonido.

En el sentido de garantizar una excelente calidad del sonido que conforman la señal DRM también se agregan contenidos de información; metadatos impuestos por el sistema y servicio de datos que los radiodifusores pueden incluir o no en la transmisión estos datos no son obligatorios, como por ejemplo estados climáticos o informativos.

2.3.1.4.2. METADATOS IMPUESTOS

Todos los datos que serán mencionados, son incluidos de forma obligatoria en el sistema DRM:

- *Identificador de servicio:* El identificador de servicio es asignado a cada programa, siendo único a nivel mundial su función es la de realizar el funcionamiento de la Señalización de Frecuencia Alternativa (AFS) y permitir al receptor encontrar e identificar el programa seleccionado por el usuario, aun cuando la frecuencia cambie. El identificador de servicio es especialmente asignado por las autoridades de cada país que adopte el sistema, y es utilizado únicamente por el receptor de forma interna, el radioescucha selecciona un programa por el nombre del programa que aparece en la pantalla de su receptor.
- *Etiqueta de servicio:* Con el identificador de servicio, el usuario selecciona la programación de su gusto mediante el nombre del programa, el cual se muestra gracias a la etiqueta de servicio, esta es la herramienta primaria del radioescucha para la identificación y selección del programa. La etiqueta del servicio DRM puede contener cualquier carácter de la escritura mundial, con un máximo de 16 caracteres, uno de los usos más prácticos que se le podría dar a esta etiqueta, es que las estaciones que sean más conocidas por su frecuencia de transmisión, puedan enviar esta información como parte de la señal DRM.
- *Tipo de programa:* La selección de un programa se realizará por el tipo de programa, por ejemplo: noticias, música, informativo, etc. Por ejemplo una emisora que está transmitiendo “Música Rock” y se muestra la leyenda “Finance/Business”, esta leyenda haría referencia a una emisora en la que se están tratando temas de información sobre la bolsa de valores o de las cotizaciones de las diferentes divisas. DRM soporta la señalización opcional de 29 tipos de programas para los servicios de audio.
- *Idioma del servicio:* El oyente podrá tener la posibilidad de seleccionar el idioma de los programas que quiere recibir en la radio. En las regiones con distintos idiomas, será útil para evitar la sintonización de los servicios que no son entendibles por el usuario o no son simplemente de su gusto. DRM soporta la señalización opcional de todos los idiomas en todo el mundo mediante el uso de sus respectivos códigos establecidos.
- *País de origen:* En la transmisión puede opcionalmente indicarse el país de origen de un servicio DRM particular. Esta información se refiere al sitio donde se encuentra el estudio, no el transmisor. De esta manera un receptor puede permitir al oyente buscar programas procedentes de un país en particular, por ejemplo, para identificar fácilmente

el programa nacional de noticias mientras está de vacaciones. Los países que adopten este sistema pueden señalizarse con sus respectivos códigos establecidos por la norma.

2.3.1.4.3. SERVICIOS DE VALOR AGREGADO

El servicio de valor agregado que tiene el sistema es el de permitir la ejecución de distintas aplicaciones usando datos. La aplicación más concurrente es un servicio de texto con baja velocidad de bits que acompaña al audio transmitido, o permitir el uso de toda la capacidad del canal de servicio principal (MSC) para servicios de datos de tipo multimedia. En general, las aplicaciones de texto simples pueden ser usadas para transmitir datos asociados a un programa, tales como noticias, deportes y servicios de información meteorológica, junto con el servicio de audio principal.

El sistema generalmente puede entregar servicios de multimedia más complejos incluyendo imágenes, sin embargo el sistema DRM30, que realiza procesos con velocidades de transmisiones menores, el envío de datos o actualizaciones requeridas pueden verse restringidas. Por esta razón, es recomendable que en cualquiera de los modos dentro de DRM30, los servicios de texto ocupen únicamente de 2 Kbps a 4 Kbps de la capacidad del MSC ya que la mayoría de su capacidad será utilizada por los servicios de audio.

- **Mensajes de texto DRM:** Este servicio que ofrece a los radiodifusores es la capacidad de transmitir una secuencia de mensajes de texto cortos de hasta 128 caracteres de longitud siendo este el máximo. El servicio de mensajes de texto DRM, admite distintos tipos de escritura del mundo, a través de codificación UTF-8³⁶, con 1 a 4 bytes para codificar un carácter (de un total de 128 bytes disponibles por mensaje). Estos mensajes están siempre asociados al programa de audio (título de la canción actual, nombre del artista, nombre del programa, noticias de la estación, etc.)
Cada actualización que se realiza en la pantalla del receptor es controlada por el radiodifusor encargado; por lo tanto, se debe respetar un retraso mínimo de 10 a 20 segundos entre cada actualización, con el fin de no inquietar al usuario móvil o estacionado.
- **Servicio de información de texto Journaline:** Este es un servicio de información de texto asociado al programa de audio. El usuario tiene acceso a una lista de varios temas, donde el usuario puede seleccionar los temas de su interés. La estructura del servicio y los elementos de información que se muestran al usuario están definidos completamente y explícitamente por el radiodifusor, y toda la información de este servicio se presenta como páginas de texto, listas y/o tablas o mensajes. En total, un servicio de Journaline puede estar compuesto por más de 65000 páginas individuales, cada una conteniendo hasta 4 Kbyte de contenido textual. En operación, Journaline puede trabajar con velocidades de transmisión muy bajas, de hasta 200 bps.³⁷
- **IPG (Interactive Programme Guide):** En español “guía de programa interactiva” es una guía digital de la programación que pone a disposición el radiodifusor; el contenido es desplegado en la pantalla del receptor, esta guía interactiva puede ser controlado por un control remoto, un teclado u otros dispositivos de entrada del receptor dando la facilidad de navegar, seleccionar y descubrir el contenido mediante el horario, título, canal, género, etc.

³⁶ UTF-8.- (8-bit Unicode Transformation Format) es un formato de codificación de caracteres Unicode e ISO 10646 utilizando símbolos de longitud variable. UTF-8 fue creado por Robert C. Pike y Kenneth L. Thompson.

³⁷ El mensaje de texto es una parte básica de DRM y consume sólo 80 bps en los modos de robustez A, B, C y D y 320 bps en modo de robustez E. Esta capacidad puede ser ahorrada si el proveedor de servicios no utiliza la mensajería de texto.

Además, la IPG permite también la grabación de los programas de interés, ya sea por medio del receptor DRM, o mediante un grabador digital.

- **TMC (Traffic Message Channel):** En español canal de mensajes de tráfico, es un tipo de servicio para enviar informes de tráfico vehicular en un tiempo real. Esta información es dada a conocer al usuario en varias formas, la más usual es a través de un sistema de navegación que pueda estar incluida a la guía dinámica alertando al conductor sobre los problemas en la ruta planeada y calculando una ruta alternativa para evitar los incidentes.

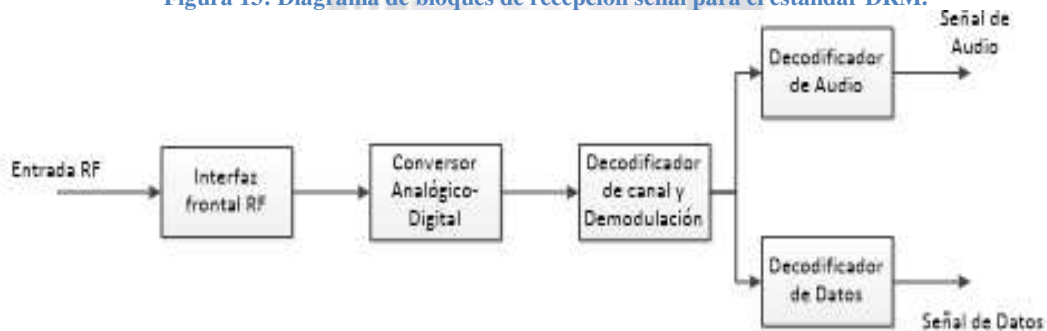
2.3.1.5. RECEPCIÓN DIGITAL EN DRM+

Al ser un modo digital, evidentemente, la recepción de estas emisiones resultan algo más complejas que las que hacemos comúnmente en modulación de amplitud o en frecuencia modulada.

Según las especificaciones técnicas del consorcio DRM las características mínimas de un receptor DRM brindan las condiciones adecuadas de recepción garantizando:

- Proveer una guía sobre las cualidades técnicas mínimas del receptor a los fabricantes.
- Garantizar a la estación de transmisión que su emisión puede recibirse por todos los receptores del mercado.
- Brindar a las estaciones asistencia para planificar sus redes.
- Garantizar a los consumidores que todas las características DRM importantes son soportadas y que todas las emisiones DRM son recibidas.

Figura 13: Diagrama de bloques de recepción señal para el estándar DRM.



Fuente: Elaboración Propia

Generalmente un receptor digital realiza la recepción analógica de radio frecuencia una conversión analógica digital, una decodificación de canal y decodificación de audio y datos, la **figura 23** muestra el funcionamiento básico que tiene el receptor de la señal con el estándar DRM+. En el estado actual de la técnica la señal DRM se trata de una señal de transmisión en RF, mientras que, la decodificación se realiza mediante programas (software) de PC.

Para la recepción de la señal, existen dos programas que realizan el proceso. Por una parte, el programa profesional DRM de la empresa “Open digital radio” que trabaja en el sistema operativo Linux y, por otra, el programa (bajo las condiciones) “Sodira” desarrollado por el ingeniero Bernd Reiser. Este segundo programa “colgado de la red” queda a disposición de todo el mundo habiendo sufrido diversas mejoras realizadas por el propio autor y otros profesionales aficionados al tema, de manera que actualmente exhibe unas características y prestaciones excelentes y, además, el autor facilita, de forma totalmente gratuita, toda una gama de información de alto nivel profesional.

2.3.1.6. RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE SDR

Desde que comenzó la transmisión y recepción de frecuencias en las bandas permitidas para realizar radiodifusión han existido mejoras en los diseños electrónicos. Estos ofrecieron distintos diseños de circuitos eficientes con excelentes resultados, los avances siempre se reflejaron en equipos físicos (Hardware).

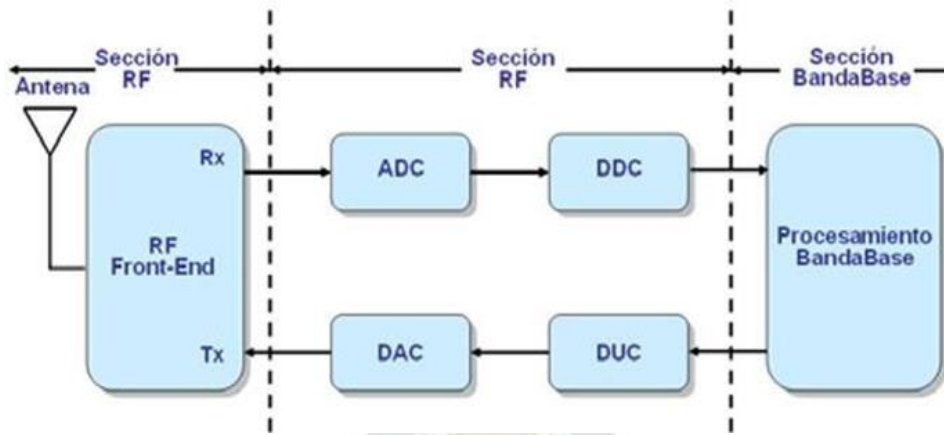
La tecnología SDR proporciona una solución eficiente y de bajo costo ante implementaciones que requieran construir o desarrollar dispositivos inalámbricos multimodo, multiportadora, cultivando y multifuncionales que puedan ser actualizados o mejorados a través de optimizaciones de software.

2.3.6.1. ESTRUCTURA DE HARDWARE SDR

Las funciones analógicas que posee el sistema son limitadas a aquellos aparatos que no pueden ser mejoradas digitalmente como por ejemplo: antena, filtrado RF, combinación RF, pre amplificación en recepción, transmisión de potencia de amplificación y generación de frecuencia de referencia.

Toda esta operación antes mencionada se encarga de realizar la parte analógica. La idea de la arquitectura es que las etapas de conversión analógico/digital estén lo más cercanas posible a la antena, de hecho, la separación de portadoras y la conversión de frecuencias up/down son desempeñadas por los recursos de procesamiento digital, al igual que la codificación de canal y las modulaciones.

Figura 14: Diagrama de bloques funcionales de SDR.



Fuente: B. Fette, Cognitive Radio Technology, Burlington, MA: Elsevier, 2006.

2.3.6.1.1. FRONT-END DE RF

Este bloque cuenta con dispositivos electrónicos analógicos que adaptan el nivel de las señales de entrada para que sea adecuado en las siguientes etapas del SDR. En el transmisor, se produce una amplificación de la señal entregada por las etapas de procesamiento hasta el nivel de potencia suficiente para su transmisión por el medio físico.

El bloque de frecuencia intermedia (FI) realiza la selectividad y ganancia del receptor, se procesa la señal para la transmisión a una frecuencia inferior para luego convertirla al valor final y amplificarla hasta el nivel de aplicación a la antena.

El oscilador local genera las frecuencias apropiadas para convertir la frecuencia de RF en la frecuencia intermedia FI, mediante una mezcla no lineal que produce frecuencias imagen. Se

selecciona la frecuencia deseada mediante filtros analógicos para su amplificación en los amplificadores de frecuencia intermedia correspondientes.³⁸

2.3.6.1.2. CONVERTIDORES ANALÓGICO/DIGITALES

Al efectuar una serie de transmisiones se debe a una serie de señales analógicas sin embargo el procesamiento del transceiver es estrictamente digital dando así una característica de conversión analógica/digital en el receptor y digital/analógica en el transmisor.

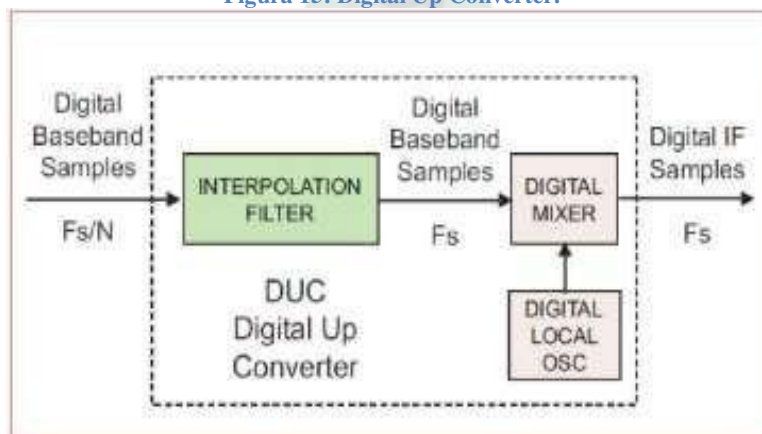
Un dispositivo que es capaz de convertir una señal analógica de voltaje a una señal de voltaje lógico se denomina conversor analógico/digital (ADC). Un dispositivo que realiza el proceso contrario es el conversor digital/analógico (DAC). Estas particularidades involucran los siguientes procesos:

- *Muestreo*: esta etapa radica en tomar valores periódicos de la amplitud de la señal original, con una cierta velocidad denominadas frecuencia de muestreo
- *Cuantificación*: en este proceso se mide los niveles de voltaje de cada muestra dándole un margen de valor a un único valor de salida, al no coincidir el valor de salida con la de entrada se crea una distorsión que generalmente es denominada ruido de cuantificación
- *Codificación*: en este proceso la tarea es de convertir los valores obtenidos en la cuantificación a código binario
- *DDC*: El conversor digital down-convert se encarga de convertir una señal digital de frecuencia intermedia (FI) en una señal de banda base.

El DDC se compone de un mezclador digital, un oscilador local digital y un filtro digital pasa bajos. El mezclador y el oscilador trasladan las muestras digitales de FI en banda base. El filtro limita el ancho de banda de la señal realizando la función de declinación de muestras a un rango menor de muestreo.

DUC es un conversor que traslada la señal de banda base en frecuencia digital intermedia IF. Esta señal es transformada en FI analógica por el convertidor digital analógico (DAC) y esta señal es a su vez convertida en señal RF por el transmisor.³²

Figura 15: Digital Up Converter.



Fuente: Elaboración propia

³⁸ M. Peralta y A. Sócolo, Desarrollo de Sistemas de Comunicaciones usando tecnología libre de Radio Definida mediante Software

El mezclador y el oscilador local trasladan las muestras de banda base a frecuencia FI. El filtro de interpolación resuelve la diferencia entre la frecuencia de muestreo del oscilador (F_s) y la frecuencia de entrada de la señal en banda base (F_s/N).

La sección de banda base se encarga de digitalizar la señal de IF mediante un convertidor analógico digital, de trasladarla a banda base mediante un módulo DDC (del inglés Digital Down Converter) y de disminuir (diezmar) su tasa de muestreo para adaptarla a la capacidad de transmisión de datos del bus que comunica con la siguiente sección, la sección de procesado.

2.4.6.2. DISPOSITIVOS DE HARDWARE PARA SDR

2.4.6.2.1. TRANSMISOR/RECEPTOR HACKRF ONE

Es un dispositivo capaz de realizar una transmisión y una recepción de señales de radio desde 1 MHz hasta 6 GHz diseñado por Great Scott Gadgets. Fue creado para realizar un testeo de tecnologías de comunicación basados en radiofrecuencia, este desarrollo se realizó con el fin de obtener un hardware libre de licencias para radioaficionados, cuenta con una entrada periférica USB y un programa para operar de forma autónoma.

Figura 16: tarjeta SDR HackRF



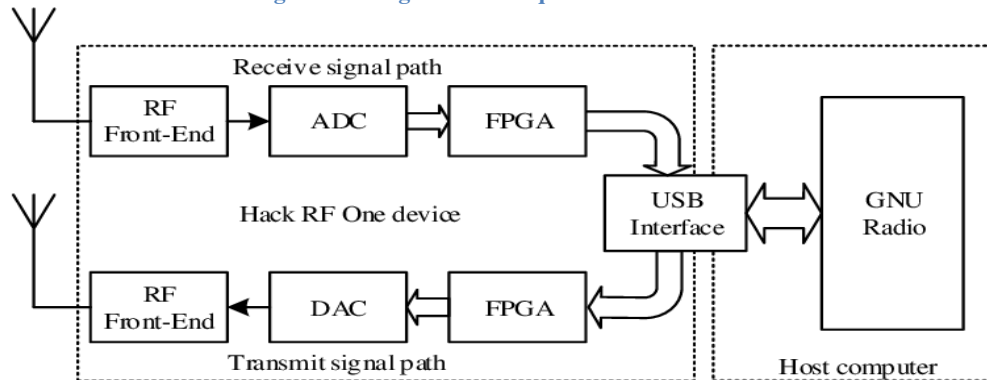
Fuente: <https://www.nooelec.com/store>

Las características del dispositivo son las siguientes:

- Es compatible con los programas de SDR tanto en Windows como Linux.
- Es un sistema transmisor receptor tiene una operación half-duplex.
- Tiene una tasa de muestreo de 21 millones de muestras por segundo con un controlador de USB variable
- Muestreo de las señales con 8 bits en cuadratura, donde 8 bits serán para la componente en fase I y 8 serán para la componente en cuadratura Q.
- Cabeceras de pines internos para una posible expansión de la placa usando shields.
- Tiene filtros virtuales básicos de banda base que se pueden configurar vía software, con un máximo de ancho de banda de señal de 28 MHz, y con una caída de 3 dB hasta 30 MHz.
- Permite controlar vía software la potencia suministrada al puerto de la antena, con hasta 50 mA a 3.3 V.

- Un conector SMA hembra para sincronizar el reloj, tanto a la entrada como a la salida, lo que permite conectar varios HackRF One y hacerlos trabajar conjuntamente, reduciendo los problemas de jitter³⁹.

Figura 17: diagrama de bloques de Hack RF One



Fuente: <https://www.researchgate.net/Block-diagram-of-GNU-Radio-software-and-HackRF-One-hardware>

Como podemos apreciar en la figura 17 el dispositivo cuenta con dos antenas una de transmisión y la otra de recepción cada una de estas antenas están ligadas a los RF Front End y luego van a los respectivos conversores de señal digital para luego estar en las tarjetas FPGA's que tiene el dispositivo controlado por el software más empleado en los SDR denominado GNURadio.

2.4.6.2.2. TRANSMISOR/RECEPTOR USRP

El USRP por sus siglas denominado *universal software radio Peripheral* es un dispositivo que genera distintos tipos de señal desarrollados por software soportados principalmente por el software de desarrollo GNU Radio. Este equipo fue diseñado por la empresa de tecnología Ettus Research, dicha compañía fue fundada en el 2004 y se encuentra ubicada en Mountain View, California. A partir del 2010 Ettus Research es en su totalidad propiedad de National Instruments.

Este equipo cuenta con distintas versiones N200, N210, N330 etc., permitiendo diseñar sistemas de radio contruidos por software ideal para aplicaciones que requieren alto rendimiento en RF y gran ancho de banda. Estas aplicaciones incluyen prototipos de capa física, acceso dinámico de espectro y radio cognitiva, monitoreo del espectro, grabación, radar, reproducción e incluso despliegue del dispositivo conectado a la red.

La familia de los USRP se conecta mediante una computadora por el puerto Ethernet enlace de alta velocidad, entrelazada a un programa para el control del hardware USRP y transmitir o recibir datos. En algunos equipos integran la funcionalidad general de una computadora host con un procesador incorporado que permite que el dispositivo USRP funcione de manera independiente. La ventaja de los USRP fue creada para tener accesibilidad completa, así como el hardware de código abierto. En la estructura del dispositivo USRP posee una placa que proporciona los siguientes subsistemas: FPGA, ADC, DAC, generación y sincronización de reloj, regulación de energía e interfaz de procesador de host estos componentes son necesarios para realizar el procesamiento de la señal en banda base. Un front-end denominado *placa hija* que generalmente se utiliza para operaciones analógicas como conversión ascendente /

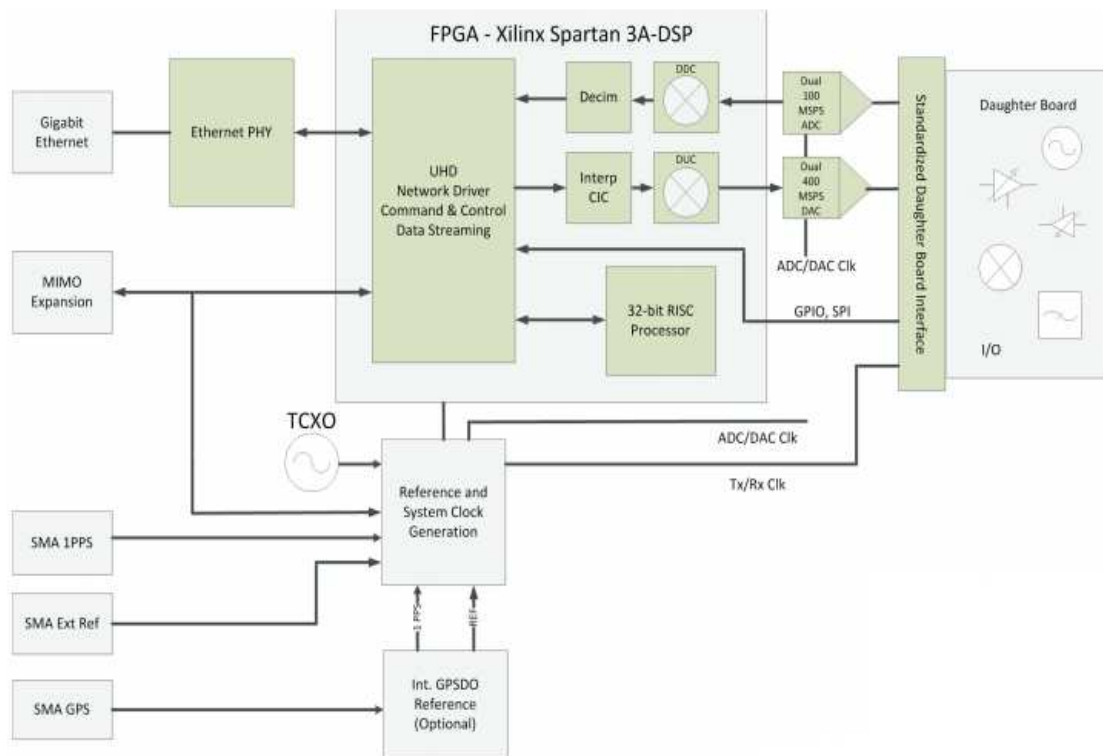
³⁹ Se denomina jitter o fluctuación del retardo a la variabilidad temporal durante el envío de señales digitales, una ligera desviación de la exactitud de la señal de reloj.

descendente, filtrado y otro acondicionamiento de señal, mientras la tarjeta madre del USRP realiza y controla la digitalización de la señal.

En la figura 28 se ve la estructura de la serie USRP N200 que proporciona capacidad de procesamiento de alto ancho de banda y alto rango dinámico. La arquitectura del producto incluye un FPGA Xilinx® Spartan® 3A-DSP 1800, 100 MS/s de doble ADC, 400 MS/s de doble DAC y conectividad Gigabit Ethernet para transmitir datos a los procesadores host. Un puerto de expansión permite que múltiples dispositivos de la serie USRP N200 se sincronicen y usen en una configuración MIMO⁴⁰. El USRP N200 puede transmitir hasta 50 MS/s desde y hacia aplicaciones host, y los usuarios pueden implementar funciones personalizadas en el tejido FPGA que además ofrece el potencial de procesar hasta 100 MHz de ancho de banda de RF en las direcciones de transmisión y recepción. El firmware FPGA se puede recargar a través de la interfaz Gigabit Ethernet.⁴¹

La función del FPGA es realizar el procesamiento y enviar muestras a la tarjeta hija. En su interior conduce el procesamiento digital de señales controlando la tasa de muestras que se envía a la computadora. Cuando el sistema trabaja en modo de recepción la función que realiza es controlar la conversión digital de bajada (DDC) junto con la declinación. Si el sistema trabaja en modo de transmisión la tarjeta realiza la conversión digital de subida (DUC) y la interpolación para una señal con mayor cantidad de muestras. Los conversores realizan la conversión o generan la señal analógica para luego ser transmitida. En modo transmisión convierten muestras digitales en señales analógicas mediante el DAC sin embargo en recepción proporcionan muestras digitales discretas para su procesamiento en la tarjeta mediante el convertor ADC.

Figura 18: diagrama de bloques USRP N200



Fuente: <https://www.ettus.com/all-products/un200-kit/>

⁴⁰ MIMO: configuración de antenas de Múltiple entrada y múltiple salida

⁴¹ <https://www.ettus.com/all-products>

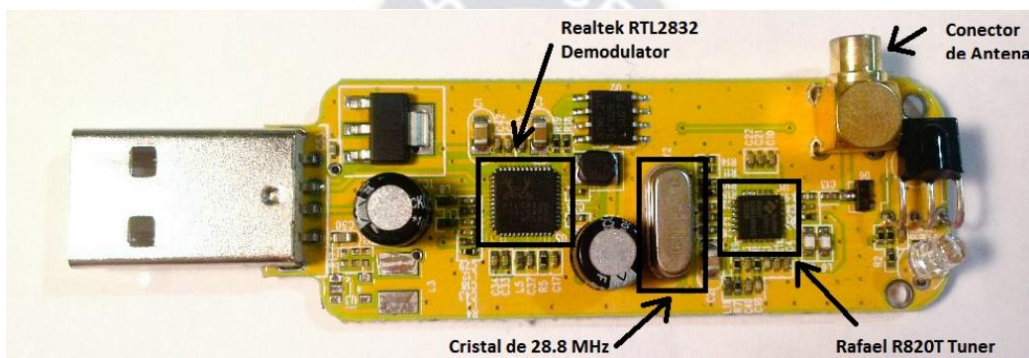
2.4.6.2.3. RECEPTOR RTL-SDR

Es un dispositivo pequeño que al ser conectado mediante una computadora aporta una operación de escáner de radio permite experimentar en el amplio mundo del espectro radioeléctrico, recibe señales de radiofrecuencia en una determinada área, gracias a su fácil manejo pueden recibir frecuencias desde los 500 KHz hasta 1.75 MHz. El uso de este aparato es de forma abierta.

Uno de los RTL-SDR más utilizados es el RTL2832U expone muestras I/Q de 8 bits, la tasa de muestreo más alta teóricamente del dispositivo es de 3.2 MS/s (Mega muestras por segundo), sin embargo la tasa de muestras con controladores USB que se ha probado es de 2.4 MS/s.

Como se puede apreciar en la ilustración 13 se ve la estructura del RTL-SDR que comprende un chip demodulador RTL2832U, un sintonizador R820T, un conector de antena hembra o entrada SMA hembra, un conector USB 2.0.

Ilustración 13: Receptor SDR utilizado.



Fuente: <https://www.researchgate.net/publication/315044350>

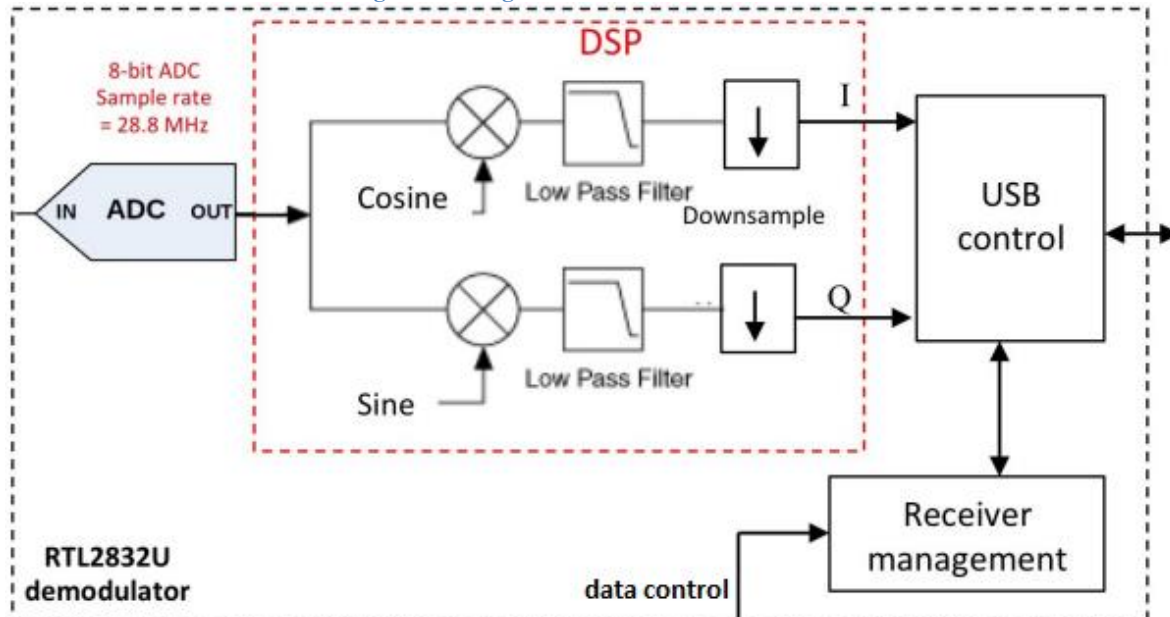
El componente RTL2832U diseñado por la empresa *Realtek Semiconductor Corp.* es un demodulador COFDM, técnica de modulación con el objetivo de realizar transmisión de información digital, por este asunto se utiliza para la recepción de radio digital terrestre bandas altas, televisión digital, telefonía GSM.

La interfaz que presenta este chip es de USB 2.0 con conexión directa hacia un ordenador de ahí proviene el nombre U. Entre sus características son:

- Soporta la recepción de señales de muestras en cuadratura I/Q.
- Detecta automáticamente los principales parámetros de modulación y admite los esquemas de modulación 4QAM, 16QAM, 16QAM.
- Soporta diferentes frecuencias intermedias utilizando un oscilador de cristal sencillo de bajo coste de 28.8 MHz que genera una señal de reloj de ± 100 ppm, manteniendo así la estabilidad en la recepción. De este modo soporta los siguientes sintonizadores: IF (36.125 MHz), baja-IF (4.57 MHz) y Zero-IF (conversión directa o 0 Hz).

En la figura 19 se muestra el diagrama de bloques del chip modulador RTL2832U, dividiéndose en el conversor analógico digital ADC y el procesador digital de señales DSP.

Figura 19: Diagrama demodulador RTL2832U.



Fuente: <https://www.researchgate.net/publication/315044350>

Como vemos en el diagrama podemos observar que tiene un módulo ADC, la función principal es de medir el nivel de señal RF recibido para después poder convertirla a una señal digital con una resolución eficaz de 8 bits, para este propósito se toman muestras en periódicos intervalos dados por el reloj de la señal a 28.8 MHz.

La cuantificación del sistema se realiza con una resolución de 8 bits, la tasa de datos de salida de 3.2 MS/s (millones de muestras por segundo), que equivale a una frecuencia de 3.2 MHz. y el Throughput⁴² de 25.6 Mbps.

El procesador digital de señales DSP está compuesto por: conversión digital IF, filtros, re muestreo de señal y envío de datos.

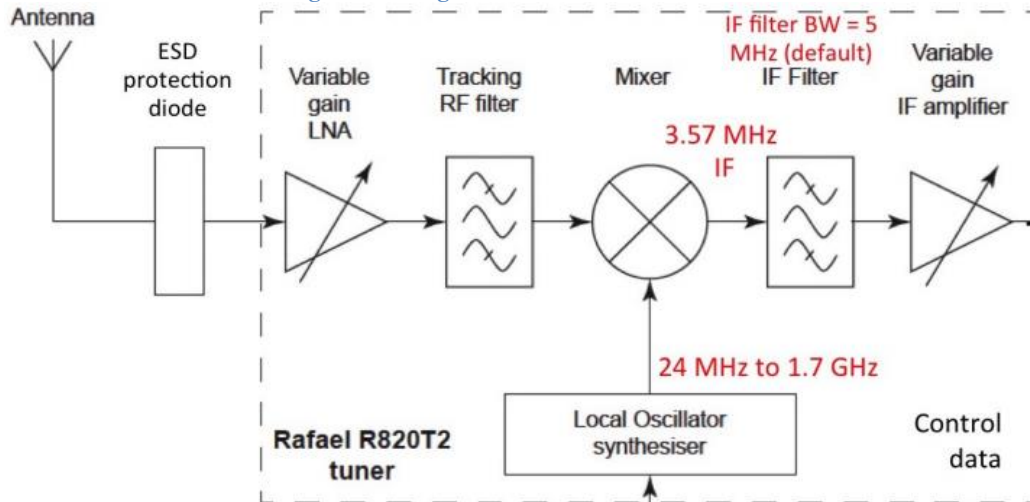
La conversión digital IF a banda base está compuesta por un módulo AGC, un oscilador de cristal de 28.8 MHz y dos mezcladores para conseguir la componente de fase I y la cuadratura de la señal Q desfasada en 90°.

La tarea del filtro pasa bajo se encarga de filtrar la señal para eliminar las componentes a frecuencia elevada para quedarse únicamente con la señal banda base pasando luego al re muestreo de la señal a una frecuencia de 2.4 MHz para una mejor resolución espectral y por último, se envían la señal banda base como un número complejo con las componentes en fase y cuadratura a través de la interfaz USB 2.0 con una resolución de 8 bits.

El sintonizador R820T actual como RF front-end está diseñado para la recepción de las señales de RF con muy poco consumo de energía. El componente proporciona un excelente servicio en cuanto a la sensibilidad y linealidad.

⁴² Throughput: tasa promedio de éxito en la entrega de un mensaje sobre un canal de comunicación

Figura 20: Diagrama del sintonizador R820T.



Fuente: <https://www.researchgate.net/publication/315044350>

El chip lleva incorporado un amplificador de bajo nivel de ruido (LNA) un mezclador, un PLL (Phase locked Loop), un amplificador de ganancia de voltaje un regulador de voltaje y un filtro de seguimiento, eliminando la necesidad de utilizar alguno externamente.

Al recibir la señal de la antena esta es amplificada con el amplificador de bajo ruido para luego ser filtrada para eliminar la frecuencia imagen. Después de todo este proceso el mezclador se encarga de transportar la señal recibida RF a una frecuencia intermedia de 4.57 MHz para luego utilizar un filtro centrado de 7/8 MHz de ancho de banda para luego ser llevada al demodulador.

2.3.2. SISTEMA DAB

DAB (Digital Audio Broadcasting) o Radiodifusión de Audio Digital es el pionero de los estándares para la transmisión digital. Su primer nombre fue EUREKA-147⁴³. El proyecto de desarrollo comenzó en 1980, 15 años más tarde en 1995, fue aprobado como el estándar para Europa. Prácticamente, todas las grandes empresas radiofónicas del viejo continente tienen transmisiones simultáneas en analógico y digital.

Ilustración 14: Logo DAB radio.



Fuente: www.worlddab.org/

Este sistema, en desacuerdo de otros, no funciona en las bandas de la radio analógica, sino que se desempeña en la Banda III (174 MHz – 240 MHz) y en Banda L (1,452 MHz – 1,492 MHz) y además, soporta no solo la difusión de radio digital terrestre, sino también satelital.

Este sistema de transmisión utiliza el códec MPEG-1 Audio Layer II (MP2) para enviar el audio, un sistema de codificación que funciona descartando sonidos que no serán percibidos por el oído humano. Cuando hay dos señales muy cercanas en frecuencia y una de ellas es más fuerte que la otra, la señal que tiene nivel inferior normalmente queda disimulada y no es posible oír. Además, el oído tiene un umbral de ruido por debajo del cual no oye los sonidos. Lo que realiza

⁴³ EUREKA-147 fue creado como estándar europeo del DAB. Su funcionamiento se inició en el Reino Unido en el 1995 en Suecia, más tarde Alemania y otros países europeos

este sistema es eliminar todo aquello que el oído no va a percibir. De esta forma se consigue disminuir el ancho de banda que se necesita para transmitir. Es un sistema muy parecido al MP3 pero necesita menor capacidad de procesamiento que éste.

2.3.3. SISTEMA ISDB

El ISDB (International Services Digital Broadcasting) es un estándar japonés tanto para televisión como para radio digital creado por el DiBEG (Digital Broadcasting Expert Group). Dependiendo de cómo se transmite la señal, existen variantes del estándar. Una de las ventajas de este sistema, es que facilita la implementación de redes en frecuencia única o SFN.

ISDB-S, hace referencia a la transmisión satelital de televisión; ISDB-C especifica la transmisión mediante el uso de un medio guiado o cable; mientras que el ISDB-T especifica la transmisión terrestre, esta variante rige en cuanto a especificaciones tanto a la televisión (DTV) como al radio digital. Es decir que trabajan y conviven en la misma banda de frecuencias de operación. Se emplea la modulación de multiplexación por división de frecuencias ortogonales u OFDM.

ISDB-Tsb (Terrestrial Sound Broadcasting) es la variación del estándar general que explica y define de manera precisa cómo enviar señales digitales de radio. En ISDB-T la señal se divide en 13 segmentos o bloques, para poder suministrar los servicios de radio digital se emplean solo 3 de estos segmentos. La banda de operación del sistema es en lo que actualmente es el canal 7 en televisión analógica, 188 MHz - 192 MHz en VHF; al igual que DAB pero a diferencia de los demás sistemas, la transmisión de las señales analógicas de AM y FM aún continúan. ISDB-T ha sido adoptado ampliamente en Centro y Sudamérica, con algunas excepciones; Brasil fue el primero en hacerlo con una ligera modificación al estándar.

2.3.4. SISTEMA IBOC - HD RADIO

La tecnología IBOC, In Band On Channel (en-banda, en-canal). Fue desarrollada en los Estados Unidos por el consorcio iBiquity y seleccionada por la FCC (Federal Communications Commission) como el estándar americano para radio digital. A pesar de tener calidad inferior al DAB esto en audio, muchos apuestan por este estándar frente al europeo, ya que HD Radio transmite en la misma banda de frecuencias analógicas.

Ilustración 15: Logo HD Radio digital.



Fuente: <https://electronics.howstuffworks.com/hd-radio.htm>

La principal característica de este sistema es que permite la transmisión en modo Híbrido o Simulcast, es decir, la convivencia de la señal analógica con la señal digital en la misma frecuencia. Esto es una ventaja ya que permite la adopción del sistema de manera paulatina y de manera muy amigable con los usuarios finales.

Este sistema no obliga a cambiar de transmisor, sino que una computadora con un software especial procesa el audio para la nueva transmisión digital que puede hacerse al mismo tiempo que la analógica.

Otra cualidad notable de este sistema es la posibilidad de Multicast, es decir, el envío de varias emisiones sobre el mismo canal.

Al ser un estándar privado, cada estación que quiera emplear el sistema debe pagar una tarifa al consorcio iBiquity por uso de la tecnología. Todo el sistema está comercializado bajo la marca de HD Radio, nombre que da la idea de un audio de mucha mayor calidad.

El sistema contempla tanto la banda de AM convencional, o de onda media; así como la de FM. Se suelen presentar algunas interferencias con los canales adyacentes al emplear el modo híbrido, sin embargo estos desaparecerán al adoptarse por completo el sistema digital.

La señal analógica de FM emplea un ancho de banda de 200 kHz, su contraparte digital emplea una señal con un ancho de banda de 400 kHz.

HD-radio permite transmitir una señal digital de alta calidad. Aunque podría pensarse que las letras HD se refieren a High Definition (Alta Definición), esto no es así. Realmente son las siglas de Hybrid Digital (Híbrido Digital). Para los oyentes que tienen un receptor de HD Radio o un software para computadoras especializadas en procesamiento de audio, los beneficios son:

- Radio FM que suena casi tan bien como un CD
- Radio AM que suena tan bien como FM tradicional
- No más estática, interferencias, desvanecimientos ni ruido de fondo.
- No hay que pagar por ella.
- Información en pantalla del nombre de la emisora, su frecuencia y eslogan, nombres de artistas y títulos de canciones, estado del tiempo, reporte del tráfico y alertas de emergencia.
- Aumento de las opciones de escucha gracias a la emisión de varios canales por una misma frecuencia.

2.4. SOFTWARE SPARK

Este software fue diseñado para realizar modulación en tiempo real basados en el sistema DRM, DRM30 y DRM+ específicamente, realiza una coordinación con el servidor de contenido y las capacidades de modulación mediante una radio definida por software. Posee una interfaz gráfica que permite al usuario realizar configuraciones de parámetros de la señal DRM, fuentes y destinos de transmisión además de información del servicio.

Cuenta a la vez con una interfaz de distribución multiplex (MDI) con el fin de transmitir contenido multiplex a través del puerto Ethernet. El software es capaz de obtener señales de audio de la entrada de línea de una tarjeta de sonido de un computador, archivos de formato WAV., o archivos de formato MP3.

La interfaz gráfica puede ingresar directamente mensajes de texto utilizando el teclado del ordenador en la entrada en el diálogo de la secuencia de audio.

Se pueden enviar varios mensajes de texto cíclicamente (carrusel de texto) con una repetición ajustable para cada mensaje. *Mensaje de Texto* admite la reconfiguración de mensajes durante la transmisión.

El software adquiere automáticamente el tiempo por uno del protocolo de tiempo de red (NTP) servidores especificados en el cuadro de diálogo de entrada de tiempo durante la modulación. Si no hay un servidor NTP disponible, el reloj del BIOS del PC en el que se está ejecutando el software puede ser utilizado.

Los requisitos del hardware Spark dependen en gran medida de la configuración de software. Los requisitos mínimos de este hardware los cumple una PC con una CPU de 800 MHz y con 128 MB de RAM dedicados al solicitante.

Como los componentes principales de Spark están escritos en Java, la aplicación está en Plataforma general independiente. Sin embargo, debido al soporte de la biblioteca nativa, que se utiliza para el FFT, el codificador AAC y los dispositivos de entrada y salida nativos, la gama de sistemas operativos para ejecutar Spark se limita a Microsoft Windows y plataformas Linux. Aunque es posible proporcionar soporte nativo para otros sistemas operativos, el soporte para bibliotecas de terceros (por ejemplo, Dolby AAC +) pueden no ser garantizadas.⁴⁴

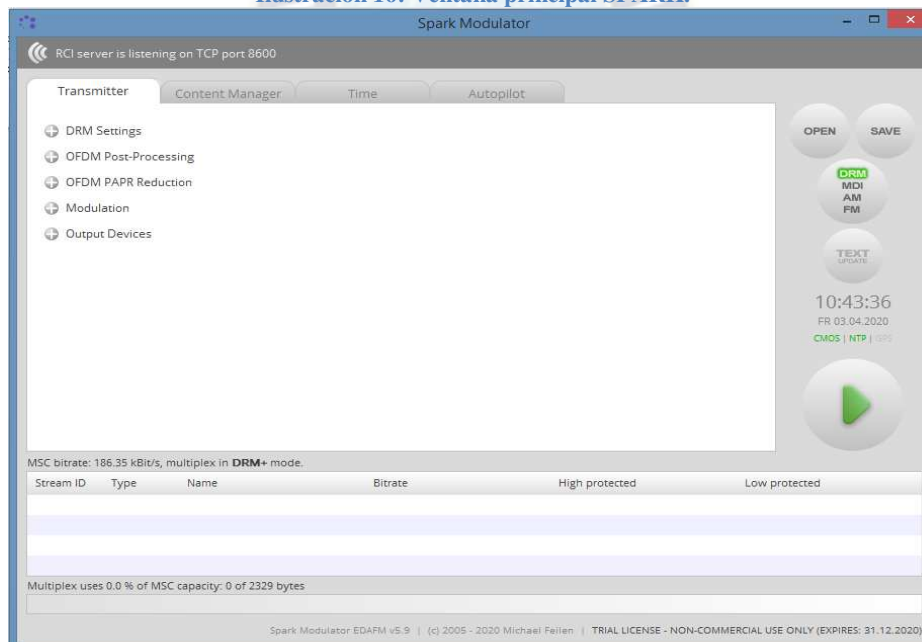
2.4.1. INTERFAZ PRINCIPAL DEL SOFTWARE

Como vemos en la ilustración 15 representa la ventana principal del software SPARK, en la cual existen cuatro importantes bloques de configuración: El bloque de configuración de transmisión, bloque de configuración de administrador de contenido, bloque de configuración de hora de tiempo y bloque de configuración de piloto automático, este último realiza una demodulación automática abriendo un archivo SPARK antes ya configurado.

2.4.2. CONFIGURACIÓN DE TRANSMISIÓN

El bloque de configuración de transmisión se encarga de construir la señal y darle los parámetros de configuración para la modulación. Está compuesto por cinco submenús, de los cuales detallaremos los más importantes:

Ilustración 16: Ventana principal SPARK.



Fuente: Captura de la ventana principal al instalar el software

- a) **Configuración de DRM:** el submenú de configuración de DRM contiene la configuración de opciones del modo de robustez que emplea la modulación recordemos que el sistema DRM tiene cinco modos de robustez; cuatro de ellos son para DRM30 y solamente uno para DRM+.

Los parámetros de mapeo de MSC y de SDC define el mapeo de los bits de salida de varios niveles codificador de canal sobre una célula QAM.

⁴⁴ Manual de usuario “SPARK Software Modulator for Digital Radio Mondiale (DRM)”

En DRM se distingue entre mapeo estándar (SM) y mapeo jerárquico, donde el mapeo jerárquico se subdivide en una mixta jerarquía de mapeo (HmMix) y mapeo jerárquico simétrico (HmSym). Cuando se utiliza HmSym, la modulación jerárquica se realiza en ambos, la fase (I) y el componente de cuadratura (Q), respectivamente, mientras que solo en el caso de HmMix la componente de fase se modula jerárquicamente. MSC solo está disponible en el modo 64 QAM para modulaciones en DRM30. Para el sistema DRM+ solo se encuentra el mapeo estándar no existe para este sistema una mapeo jerárquico, entonces la MSC está disponible en el modo 16QAM y 4QAM. Los esquemas de mapeo MSC y SDC disponibles se enumeran en la Tabla 11 y la Tabla 12, respectivamente³⁷.

Tabla 11; Esquemas de correlación de MSC.

ESQUEMA DE ASIGNACIÓN	MODO DE RESOLUCIÓN DE DRM
Mapeo estándar	4 QAM DRM +
Mapeo estándar	16 QAM DRM, DRM +
Mapeo estándar	64 QAM DRM
Simétrica jerárquica (I y Q) 64 QAM DRM	64 QAM DRM

Fuente: Manual de usuario “SPARK Software Modulator for Digital Radio Mondiale (DRM)”

Tabla 12: Tabla 14: esquemas de asignación de SDC

Esquema de asignación	Esquema de asignación	DRM mode
Mapeo estándar	4 QAM	DRM, DRM+
Mapeo estándar	16 QAM	DRM

Fuente: Manual de usuario “SPARK Software Modulator for Digital Radio Mondiale (DRM)”

El nivel de protección refleja la tasa de código para la parte respectiva del MSC o el flujo de bits SDC. Cuanto menor sea la tasa de código, mayor será la información de redundancia en el proceso de codificación de canales. Aunque una tasa de menor código aumenta la robustez de la información transmitida esto disminuye el número de datos de bits utilizables en la información.

Con respecto al MSC, DRM distingue entre la parte protegida más baja (LPP), la parte protegida más alta (HPP) y la parte fuerte más alta (VSPP). Si los niveles de protección para LPP y HPP son iguales, se dice que MSC usa protección contra errores igual (EEP). Si los niveles de protección son a diferencia del MSC, se dice que usa protección de error desigual (UEP). El nivel de protección VSPP define la tasa de código para la parte de datos jerárquicos. El VSPP solo está presente cuando se utiliza la modulación jerárquica³⁷.

- b) **OFDM post-procesamiento:** en este bloque se encuentra con el botón de filtro FIR si es activado será utilizado para dar forma a la señal de OFDM con el fin de reducir las emisiones de banda lateral, además es habilitada la supresión de banda lateral que define la atenuación de la señal de salida desde el principio hasta el final de la región de transición.

Al Habilitar la corrección de la ganancia automática AGC es de llegar a la resolución del dispositivo de salida máxima PCM. Cuando la salida de AGC se desactiva la potencia de la señal OFDM por portadora es igual a la fuerza dada en la DRM específico de cationes, es decir, se ignora el valor de ganancia del dispositivo de salida.

- c) **Ajustes de salida:** esta parte el software indica a qué formato será guardada la modulación, el medio que será transmitido y la resolución que tendrá los datos modulados.

2.4.3. CONFIGURACIÓN DEL ADMINISTRADOR DE CONTENIDO

El administrador de contenido multiplexa los datos proporcionados por las diferentes secuencias de MSC y gestiona los servicios que se asignan a las secuencias. Los servicios que brinda el sistemas DRM son la de audio y datos, al referirnos al servicio de audio este presenta una subcorriente denominada AAC que gestiona el archivo de entrada definiendo la tasa de bits y agregando datos dependiendo del usuario además es agregado el lenguaje de comunicación que será transmitida.

2.4.4. CONFIGURACIÓN DE REFERENCIA DE TIEMPO

En la pestaña TIME, se encuentran servidores de protocolo de hora de red (NTP), así como el servidor local el desplazamiento del tiempo medio de Greenwich (GMT). Esto se puede especificar como referencia de tiempo para transmitir. Además del servidor NTP y los campos de entrada GMT, la encuesta NTP puede especificar el intervalo en milisegundos.

2.5. SOFTWARE GNU RADIO

Es un sistema virtual de bloques para realizar procesamiento de señal de propósito general como filtros, re-samplers, moduladores y demoduladores analógicos y digitales. Estos bloques pueden ser combinados para lograr diferentes sistemas de comunicación.

Agrupando distintas herramientas bajo el lenguaje de programación Python y C++, proporciona bloques de procesamiento de señal de código abierto y gratuito con el fin de ser implantado por radios de software. GNU Radio trabaja sobre las distintas plataformas como Linux, Mac y Windows y es utilizado generalmente por aficionados, académicos y comerciales para realizar un estudio más a profundidad de las comunicaciones inalámbricas existentes

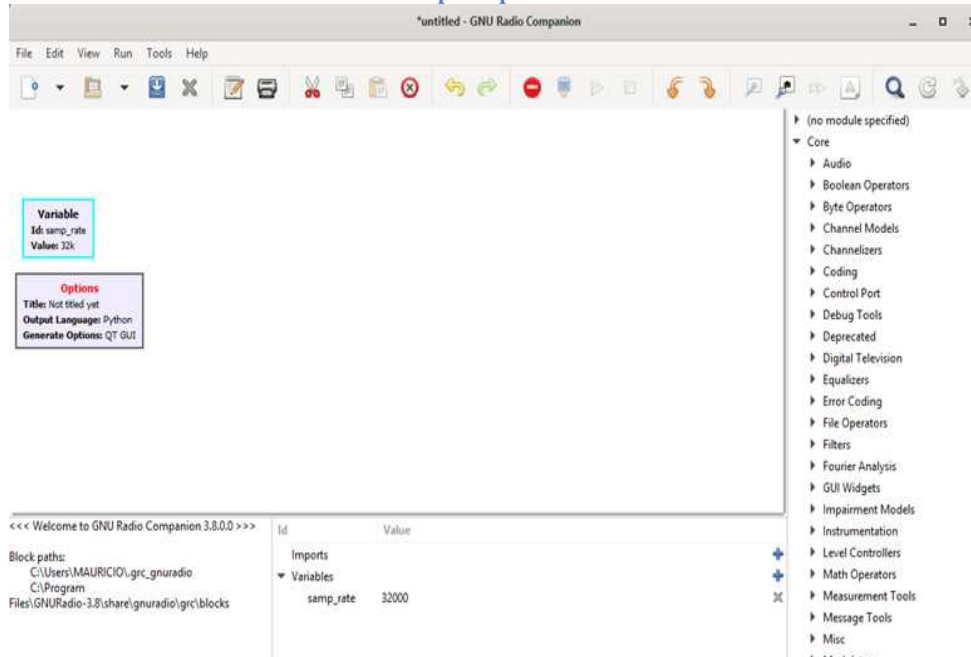
El desarrollo de un programa en el software requiere de un conjunto de pasos reflejados en bloques, que se unen para realizar una tarea especificada, muchos de los bloques tienen un puerto de entrada y salida en algunos casos solo puerto de entrada o de salida, generalmente el resultado de la operación de la tarea a realizar se muestra en una gráfica.

El entorno gráfico del programa, como se observa en la ilustración 17 es denominada *GNU Radio Companion (GRC)* que permite realizar todo el proceso antes ya mencionado permitiendo generar códigos fuentes del flujo gráfico.

Para añadir un bloque esquemático bastará con realizar un clic al botón en la tarea que deseara efectuar y para interconectar bloques, será necesario seleccionar los bloques a unir en secuencia del orden que vaya.

Todo este proceso con el fin de integrar distintos bloques de manera continúa realizando tareas de sistemas de comunicación.

Ilustración 17: Interfaz principal GNU-Radio en Windows.

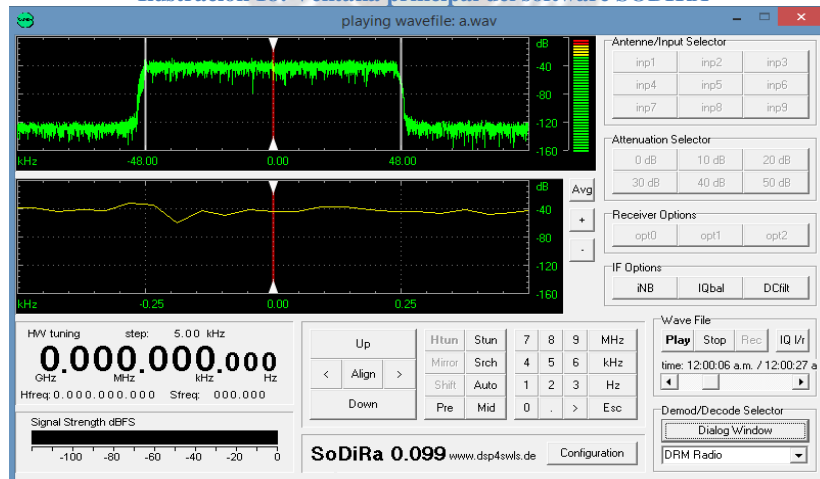


Fuente: Captura de pantalla del software después de la instalación

2.6. SOFTWARE SODIRA

El programa es un receptor de señal que trabaja por radio definida por software, puede decodificar distintas señales digitales de radio AM y FM + RDS, así como también DRM / DRM +. El software admite el uso de RTL-SDR mediante un adaptador de sintonizador *ExtIO_RTL2832.dll*.

Ilustración 18: Ventana principal del software SODIRA



Fuente: elaboración propia

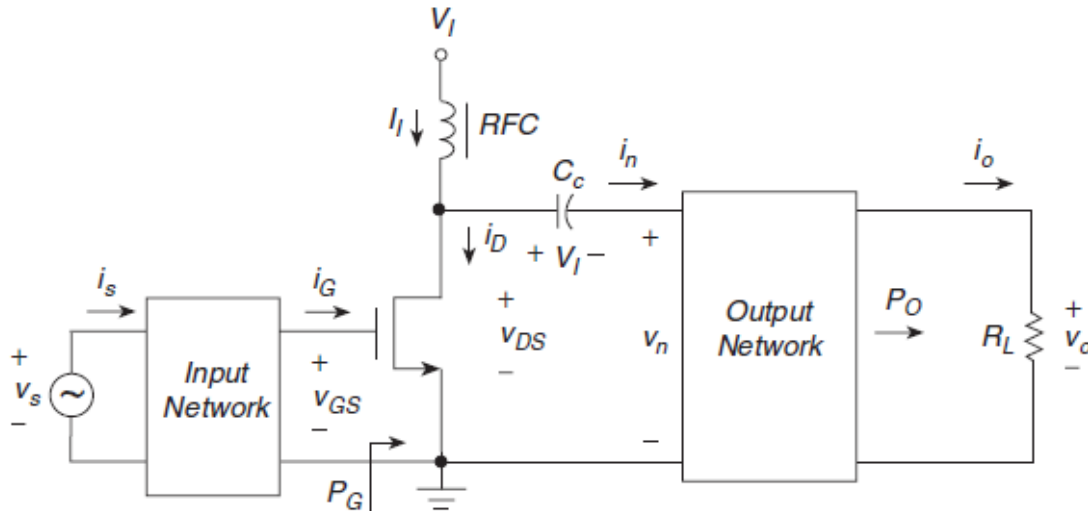
El procesamiento digital de señal del software se divide en tres etapas, la primera etapa realiza un escáner de frecuencias de muestreo, una supresión de ruido impulsivo, un control de equilibrio I/Q, cálculo del espectro para la visualización gráfica. En la segunda etapa realiza la demodulación y especifica el tipo de módulo que se utilizará (FM, AM, RDS, DRM, DRM+). Y finalmente realiza el procesamiento de audio ejecutando el control automático de ganancia para ser reproducido.

2.7. AMPLIFICADOR DE POTENCIA

Un amplificador de potencia es un dispositivo que convierte la energía de una fuente de corriente continua (Polarización V_{cc} de un circuito con transistores) en una señal de potencia de salida la cual se controla utilizando una señal de entrada.

Éstos pueden ser de diversas clases como son: clase A, clase B, clase AB y clase C. cada uno de estos posee características distintas de eficiencia y distorsión, razón por la cual tienen distintas aplicaciones en diversas áreas.

Ilustración 19: Diagrama general de un amplificador de Potencia.



Fuente: Marian K. Kazimierzuc. RF Power Amplifiers. Wiley., 2008.

2.7.1. CLASE A

En clase A, el amplificador se polariza de manera que la corriente por el colector fluya durante un ciclo completo de la señal de entrada. En éste modo, el dispositivo opera por encima de su característica de transferencia lineal. Esta clase proporciona la menor distorsión de forma de onda pero también la menor eficiencia, la cual generalmente se encuentra por el orden de 50 %. Estos amplificadores muestran una baja distorsión de intermodulación, lo que los hace muy adecuados para aplicaciones donde la linealidad es de interés primordial.

2.7.2. CLASE B

Para la clase B, se hace fluir la corriente del colector durante medio ciclo de la señal. El amplificador se polariza de forma tal que el transistor se active sólo durante la mitad del ciclo entrante, la otra mitad del ciclo se amplifica por otro transistor de modo que en la salida se reconstruye la onda completa.

Mientras que cada transistor funciona claramente en un modo no lineal, la onda de entrada total se replica directamente en la salida; por tanto, el amplificador de clase B se clasifica como un amplificador lineal. En este modo, el dispositivo trabaja en las afueras de su característica de transferencia lineal. Esta clase proporciona una mayor eficiencia a expensas de una cierta distorsión de forma de onda.

2.7.3. CLASE AB

Es una variación de la clase B, la corriente del colector abarca un ciclo menor a

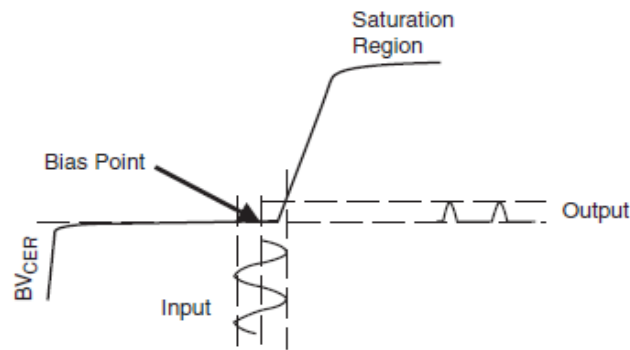
360° pero mayor a 180°. La característica de transferencia para un amplificador que funciona en este modo es entre la clase A y clase B.

2.7.4. CLASE C

El funcionamiento del amplificador de clase C se caracteriza por la elección de un punto de operación en el que la corriente fluye por menos de la mitad del tiempo de la onda de entrada, en otras palabras, el ángulo de conducción es menor a 180°, convirtiéndolo en un amplificador no lineal ya que no replica directamente la señal de entrada. Esto se traduce en una significativa distorsión en la señal amplificada cuya forma de onda son impulsos.

Los amplificadores Clase C logran alcanzar altos valores de eficiencia, hasta un 90 %, por esta razón son adecuados para aplicaciones que no requieran ningún nivel de linealidad y son muy utilizados en alta potencia.

Ilustración 20: Polarización de un amplificador Clase C

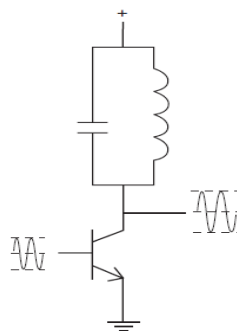


Fuente: Alan Davis and Krishna Agarwal. Radio Frequency Circuit Design. John Wiley and Sons, Inc., 2001.

En la ilustración 20 puede verse que la salida es solo una porción de la onda senoidal de entrada y en la figura 21 se muestra que una parte clave del amplificador Clase C, es el circuito LC o circuito tanque, el cual filtra la distorsión no deseada en la salida, de forma que, la señal de salida es reconstruida.

El amplificador clase C puede ser considerado básicamente como una fuente de alimentación, un circuito conmutado y un circuito sintonizado. El transistor es encendido y apagado como un interruptor que produce una señal de tipo pulso que contiene gran cantidad de armónicos. Para obtener una onda sinusoidal completa en la salida, es necesario el circuito tanque, el cual debe tener un Q alto para filtrar todos los armónicos no deseados.

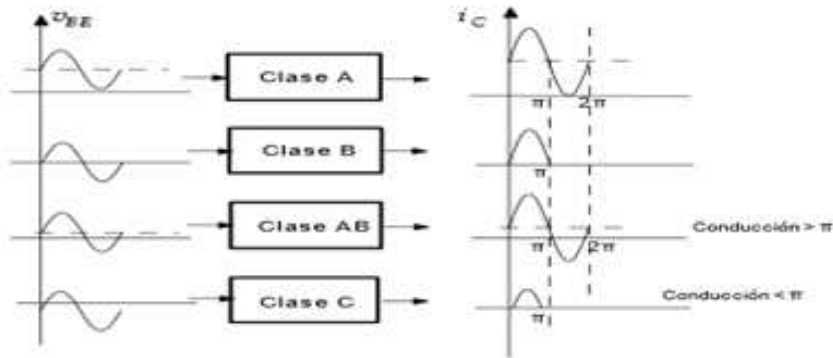
Ilustración 21: Esquemático simple de un amplificador Clase C



Fuente: Alan Davis and Krishna Agarwal. Radio Frequency Circuit Design. John Wiley and Sons, Inc., 2001.

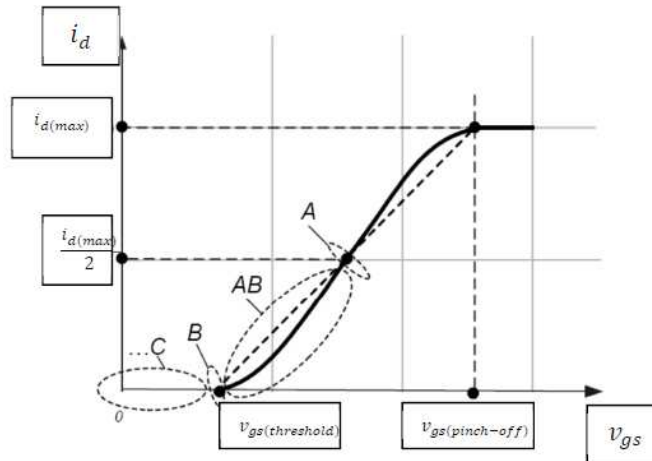
Para lograr que el ángulo de conducción de la corriente del drenaje sea menor a 180° , el punto de operación del transistor debe localizarse en la región de corte, por ende, se debe garantizar que no haya polarización dc en la compuerta del dispositivo, o en su defecto, que ésta sea menor al voltaje umbral; haciendo que su implementación sea muy sencilla.

Ilustración 22: Ciclos de conducción de las diversas clases de amplificadores



Fuente: Feven YohannesWorku. Bias circuit for rf power amplifiers. Trabajo de grado, Chalmers University Of Technology, 2011.

Ilustración 23: Zona de operación de las diversas clases de amplificadores



Fuente: Feven YohannesWorku. Bias circuit for rf power amplifiers. Trabajo de grado, Chalmers University Of Technology, 2011.

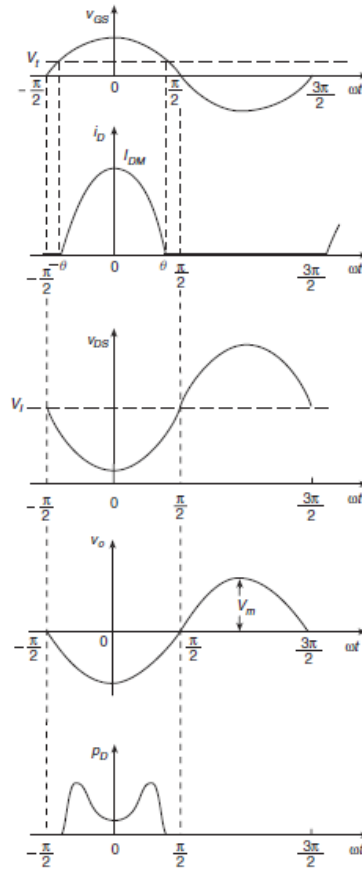
Dónde:

VGS: Voltaje aplicado a la compuerta del transistor.

ID: Corriente de drenaje.

VGS (Threshold): Voltaje mínimo necesario para que el transistor conduzca.

Ilustración 24: Formas de Onda en un Amplificador de Potencia en Clase C



Fuente Marian K. Kazimierzuc. RF Power Amplifiers. Wiley., 2008

Dónde:

Vt: VGS (Threshold).

IDM: Corriente de drenaje máxima.

VDS: Voltaje drenaje-fuente.

VI: Voltaje de alimentación.

Vm: Amplitud de la componente fundamental de voltaje drenaje-fuente.

PD: Potencia disipada en el transistor.

2.7.4.1. ECUACIONES DE DISEÑO DE UN AMPLIFICADOR EN CLASE C

En este apartado se exponen las ecuaciones que se utilizan al momento de realizar un diseño de un amplificador en clase C.

La forma de onda de la corriente de drenaje para cualquier ángulo de conducción ya sea para Clase A, Clase B, Clase AB o Clase C, viene dada por las siguientes:

La forma de onda de la corriente de drenaje está dada por:

$$I_D = I_I * \frac{\Pi(\cos(\omega t) - \cos(\theta))}{\sin(\theta) - \theta \cos(\theta)}; -\theta \leq \omega t < \theta \quad \text{Ecuación 10}$$

La forma de onda del voltaje drenaje-fuente es:

$$V_{DS} = V_I - V_m \cos(\omega t) = V_I \left(1 - \frac{V_m}{V_I}\right) * \cos(\omega t) \quad \text{Ecuación 11}$$

La forma de onda normalizada de la potencia disipada en el transistor para $-\theta \leq \omega t \leq \theta$ es:

$$\frac{P_{D(\omega t)}}{P_I} = \frac{\Pi(\cos(\omega t) - \cos(\theta))}{\sin(\theta) - \theta \cos(\theta)} - \left(1 - \frac{V_m}{V_I} \cos(\omega t)\right) \quad \text{Ecuación 12}$$

Potencia dc de alimentación:

$$P_I = I_I * V_I = \alpha_0 I_{DM} I_I \quad \text{Ecuación 13}$$

La potencia de salida es:

$$P_O = \frac{1}{2} I_m * I_m = \frac{1}{2} \alpha_1 I_{DM} V_m \quad \text{Ecuación 14}$$

La potencia disipada en el transistor es:

$$P_D = P_I - P_O = \alpha_0 I_{DM} I_I - \frac{1}{2} \alpha_1 I_{DM} V_m \quad \text{Ecuación 15}$$

El voltaje drenaje-fuente mínimo es:

$$V_{DSmin} = V_{GS} - V_{TH} \quad \text{Ecuación 16}$$

La amplitud de la componente fundamental del voltaje drenaje-fuente es:

$$V_m = V_I - V_{DSmin} \quad \text{Ecuación 17}$$

La eficiencia viene dada por:

$$\eta_D = \frac{P_O}{P_I} = \frac{1}{2} \frac{I_m V_m}{I_I V_I} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$\eta_D = \frac{\theta - \sin(\theta) \cos(\theta)}{2(\sin(\theta) - \theta \cos(\theta))} \left(1 - \frac{V_{DSmin}}{V_I}\right) \quad \text{Ecuación 19}$$

La eficiencia del drenaje η_D es una función del ángulo de conducción, cuando $\theta \rightarrow 0 \therefore \eta_D \rightarrow 100\%$

El máximo voltaje drenaje-fuente es:

$$V_{DSm} = V_I - V_m = 2V_I \quad \text{Ecuación 20}$$

La máxima corriente de drenaje es:

$$I_{DM} = \frac{I_m}{\alpha_1} \quad \text{Ecuación 21}$$

La resistencia de carga viene dada por:

$$R = \frac{V_m^2}{2P_O} \quad \text{Ecuación 22}$$

El factor de calidad es:

$$Q_L = \frac{f}{BW} \quad \text{Ecuación 23}$$

Las reactancias del circuito resonante son:

$$X_L = X_C = \frac{R}{Q_L} \quad \text{Ecuación 24}$$

2.7.5. RED DE POLARIZACIÓN.

El propósito de la red de polarización es seleccionar un ciclo de trabajo apropiado y mantenerlo constante cuando cambian los parámetros del transistor y la temperatura. Esto determina la salida de potencia, la cantidad de distorsión, la eficiencia, la ganancia de la etapa y la categoría de operación (A, B, AB o C). Para algunos tipos de amplificadores de potencia, también se espera que la red de polarización ayude a suprimir los armónicos más altos. La elección del mejor punto de polarización a veces puede resultar difícil, porque dependerá de los requisitos de la etapa de amplificación. La red se compone de un conjunto de elementos de circuito dispuestos alrededor del dispositivo activo para garantizar que el dispositivo activo funcione en un punto estacionario.

2.7.6. RED DE ADAPTACIÓN.

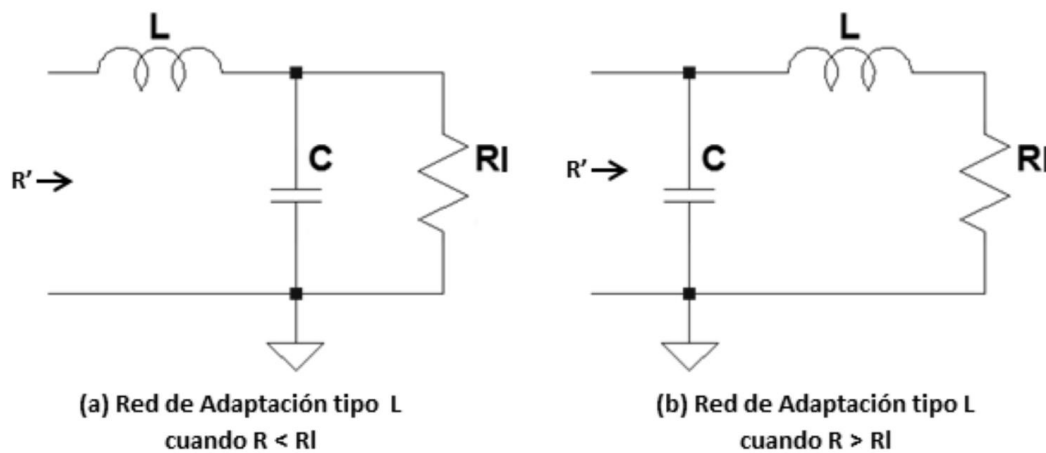
En el diseño del amplificador de potencia es muy importante incorporar una red de adaptación de impedancias para optimizar el diseño y obtener la máxima transmisión de potencia, que se obtiene cuando la resistencia de carga es igual al conjugado de la impedancia del generador. Esto puede evitar pérdidas causadas por ajustes incorrectos.

Esta puede ser con elementos concentrados o con líneas de transmisión. Existen varias configuraciones de redes de adaptación con elementos concentrados como las redes de 2 elementos o redes tipo L y las redes de 3 elementos como las de tipo T.

2.7.6.1. REDES DE ADAPTACIÓN TIPO L

Esta técnica utiliza solamente elementos reactivos y recibe este nombre ya que la orientación de los mismos se asemeja a la forma de una L.

Ilustración 25: Configuración de Redes tipo L



Fuente: Chris Bowick, Jhon Blyler, and Cheryl Ajluni. RF Circuit Design. Newnes, 2007.

Para componentes paralelos se tiene:

$$X_P = \frac{R_P}{Q} \quad \text{Ecuación 25}$$

Y para componente en serie:

$$X_S = R_S Q \quad \text{Ecuación 26}$$

2.7.6.1.1. TRANSFORMACIÓN DE IMPEDANCIA UTILIZANDO DOS SECCIONES TIPO L

Para anchos de banda grandes, se pueden usar múltiples redes de dos elementos al mismo tiempo, por ejemplo, usando dos secciones tipo L es posible ajustar desde el valor más bajo a un valor intermedio de resistencia y luego desde el valor intermedio al valor de resistencia más alto. De esa manera, hay una diferencia menor entre la carga o resistencia de la fuente y la resistencia intermedia, por lo que la Q total es menor y el ancho de banda es más amplio. El beneficio máximo se obtiene cuando cada sección tipo L tiene la misma Q.

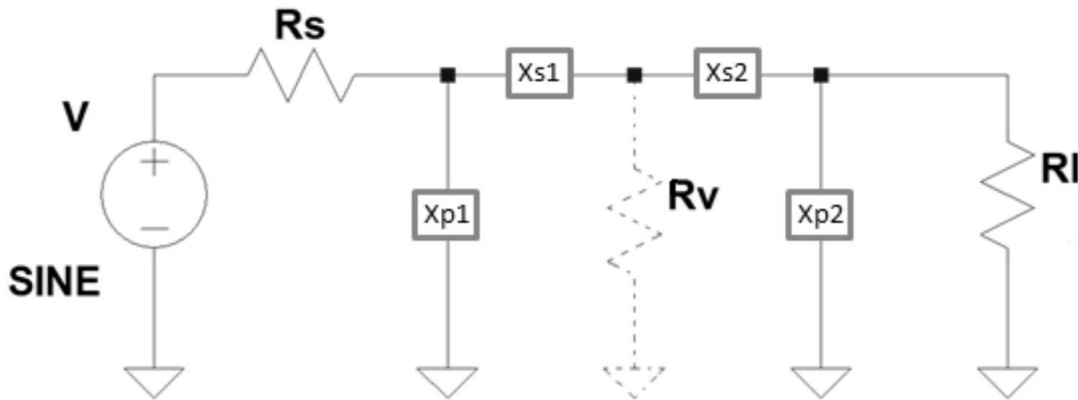
$$Q = \frac{f}{BW} \quad \text{Ecuación 27}$$

Dónde:

F: Frecuencia de diseño.

BW: Ancho de banda del sistema.

Ilustración 26: Dos Secciones de Tipo L en cascada



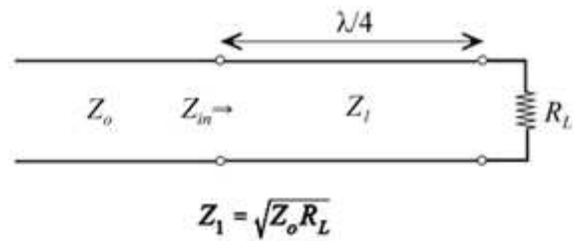
Fuente: Chris Bowick, Jhon Blyler, and Cheryl Ajluni. RF Circuit Design. Newnes, 2007.

Donde Rv es un valor abstracto de resistencia virtual intermedia que viene dado por:

$$R_{int} = \sqrt{R_L * R_S} \quad \text{Ecuación 28}$$

Esta resistencia se asemeja al comportamiento que tiene un transformador de $\frac{\lambda}{4}$, ya que es el valor requerido para transformar la impedancia de entrada a la de salida.

Ilustración 27: Transformador de $\frac{\lambda}{4}$.



Fuente: Chris Bowick, Jhon Blyler, and Cheryl Ajluni. RF Circuit Design. Newnes, 2007.

Cuando se diseña una red de adaptación de dos elementos en cascada, no se puede elegir el ancho de banda resultante. Al conocerse el valor de la resistencia de carga y la de la fuente, el Q de cada brazo de la red queda determinado por:

$$Q_1 = Q_2 = \sqrt{\frac{R_P}{R_S} - 1} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$Q_1 = \frac{X_S}{R_S} = \frac{R_P}{X_P} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$X_S = Q R_S \quad \text{Ecuación 31}$$

$$X_S = R_S \sqrt{\frac{R_P}{R_S} - 1} \quad \text{Ecuación 32}$$

$$X_S = \sqrt{\frac{R_S^2 (R_P - R_S)}{R_S}} \quad \text{Ecuación 33}$$

$$X_S = \sqrt{R_S R_P - R_S^2} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$X_P = \frac{R_P R_S}{Q R_S} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$X_P = \frac{R_P R_S}{X_S} \quad \text{Ecuación 36}$$

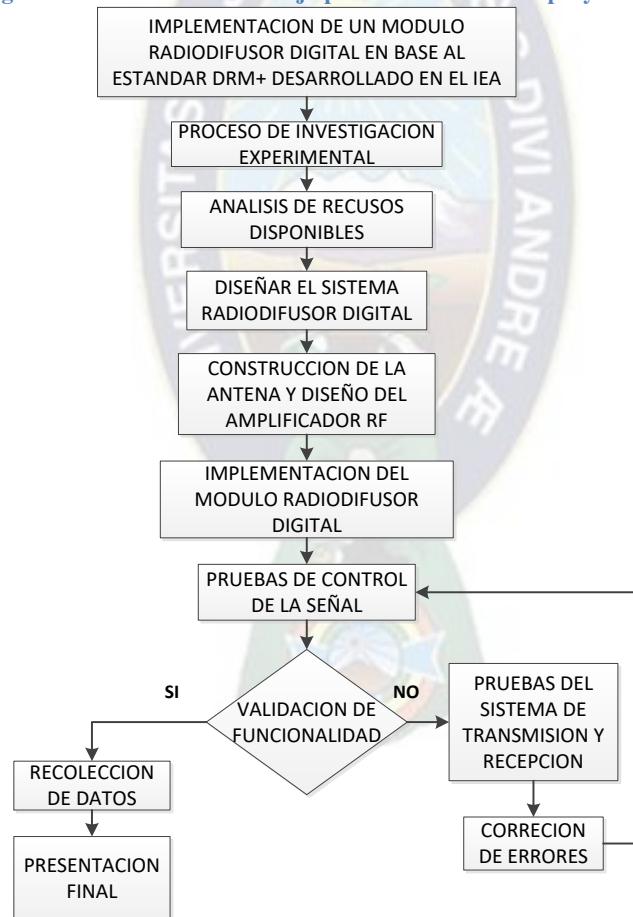
CAPÍTULO 3 INGENIERIA DEL PROYECTO

Este capítulo describe el desarrollo práctico del proyecto de grado, las herramientas a utilizar, el análisis y diseño para el proceso de transmisión del módulo radiodifusor, así como los resultados de las pruebas funcionales durante la implementación. Toda la información es descrita en detalle, además de presentar diagramas que muestran la forma de interacción de los distintos componentes y softwares. También es importante mencionar que toda la investigación desarrollada en el capítulo anterior forma parte de la Ingeniería que opta el sistema, además de utilizar bases y lineamientos aprendidos durante la época universitaria.

3.1. PLANIFICACION DE TRABAJO

El plan de trabajo para la *“Implementación de un módulo radiodifusor digital en base al estándar DRM+ en la banda de FM para el instituto de electrónica aplicada”* sigue la siguiente estructura, mostrada en la figura:

Figura 21: Estructura de trabajo para el desarrollo del proyecto de grado



Fuente: Elaboración propia

3.1.1. PLANIFICACIÓN DE ACTIVIDADES

A continuación se muestran las actividades principales para la realización del proyecto en el instituto de electrónica aplicada (IEA), el mismo está dividido en tres fases, la primera (I) está referida al estudio e investigación previa para el diseño del modelo de transmisión de radiodifusión. La segunda fase (II) está enfocada al diseño, construcción e implementación del

amplificador de radiodifusión y la antena, componentes necesarios para un buen alcance de transmisión radial. Y por último la fase (III) está referida a la verificación de la funcionalidad y evaluación del sistema previa entrega de los componentes al IEA.

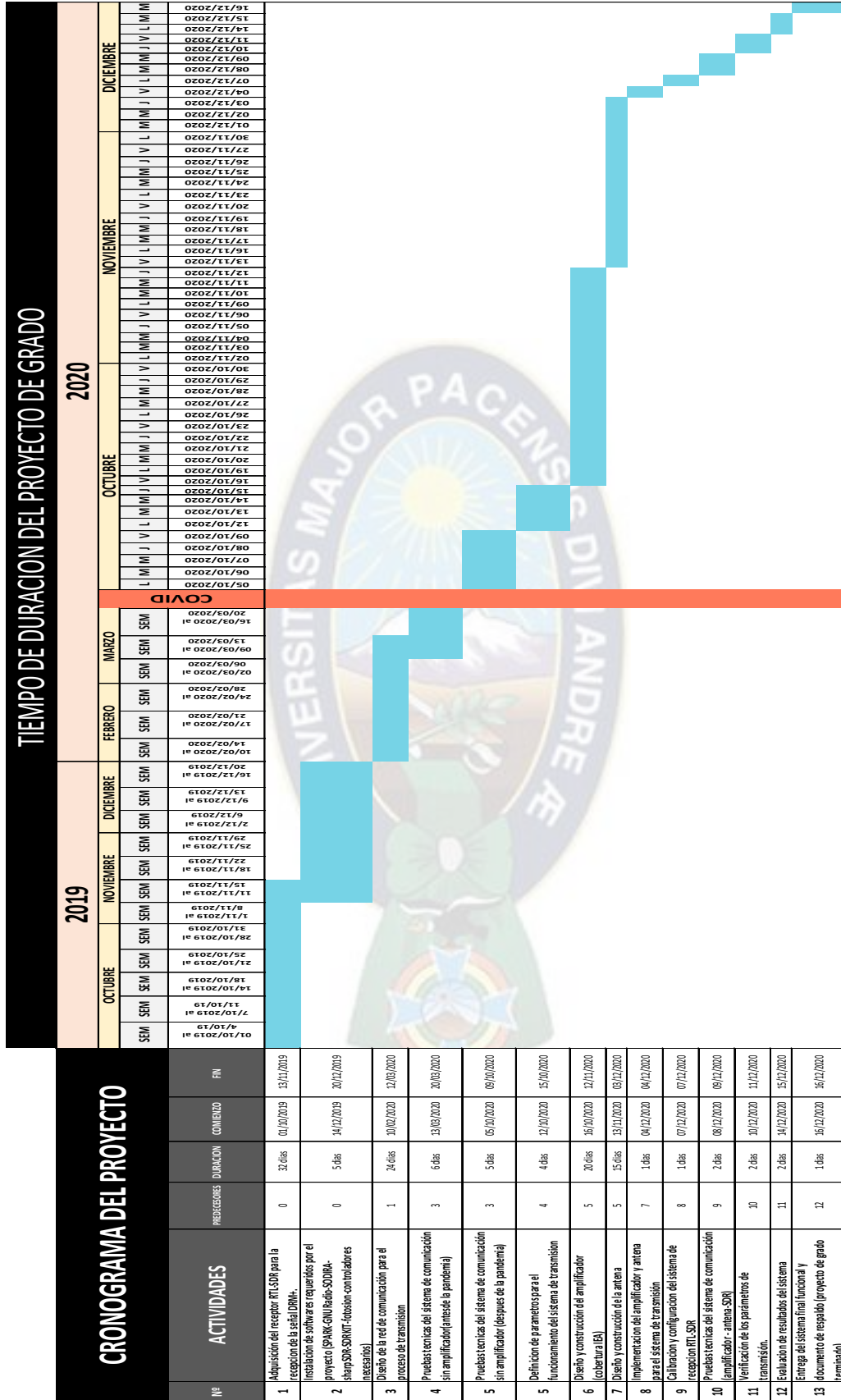
Tabla 13: Actividades necesarias para el desarrollo del proyecto

FASES	Nº	ACTIVIDADES
I	1	Adquisición del receptor RTL-SDR para la recepción de la señal DRM+.
	2	Instalación de softwares requeridos por el proyecto (SPARK-GNURadio-SODIRA-sharpSDR-SDRKIT-controladores necesarios)
	3	Diseño de la red de comunicación para el proceso de transmisión
	4	Pruebas técnicas del sistema de comunicación sin amplificador(antes de la pandemia)
	5	Pruebas técnicas del sistema de comunicación sin amplificador (después de la pandemia)
	5	Definición de parámetros para el funcionamiento del sistema de transmisión
II	6	Diseño y construcción del amplificador (cobertura IEA)
	7	Diseño y construcción de la antena
	8	Implementación del amplificador y antena para el sistema de transmisión
	9	Calibración y configuración del sistema de recepción RTL-SDR
	10	Pruebas técnicas del sistema de comunicación (amplificador - antena-SDR)
III	11	Verificación de los parámetros de transmisión.
	12	Evaluación de resultados del sistema
	13	Entrega del sistema final funcional y documento de respaldo (proyecto de grado terminado)

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra un mapa cronológico planificado para el desarrollo del proyecto, contemplando que la fecha de inicio fue el 1 de Octubre de 2019 y está planificado para concluir el 16 de diciembre de 2020, con la entrega del material como el documento. Además en el mismo se muestra una franja de color naranja que refleja el tiempo de espera o estático sin desarrollar actividades en el instituto de electrónica aplicada por la pandemia del COVID. En la imagen se visualiza la duración de cada una de las tareas involucradas para la ejecución del proyecto.

Figura 22: Cronograma del proyecto

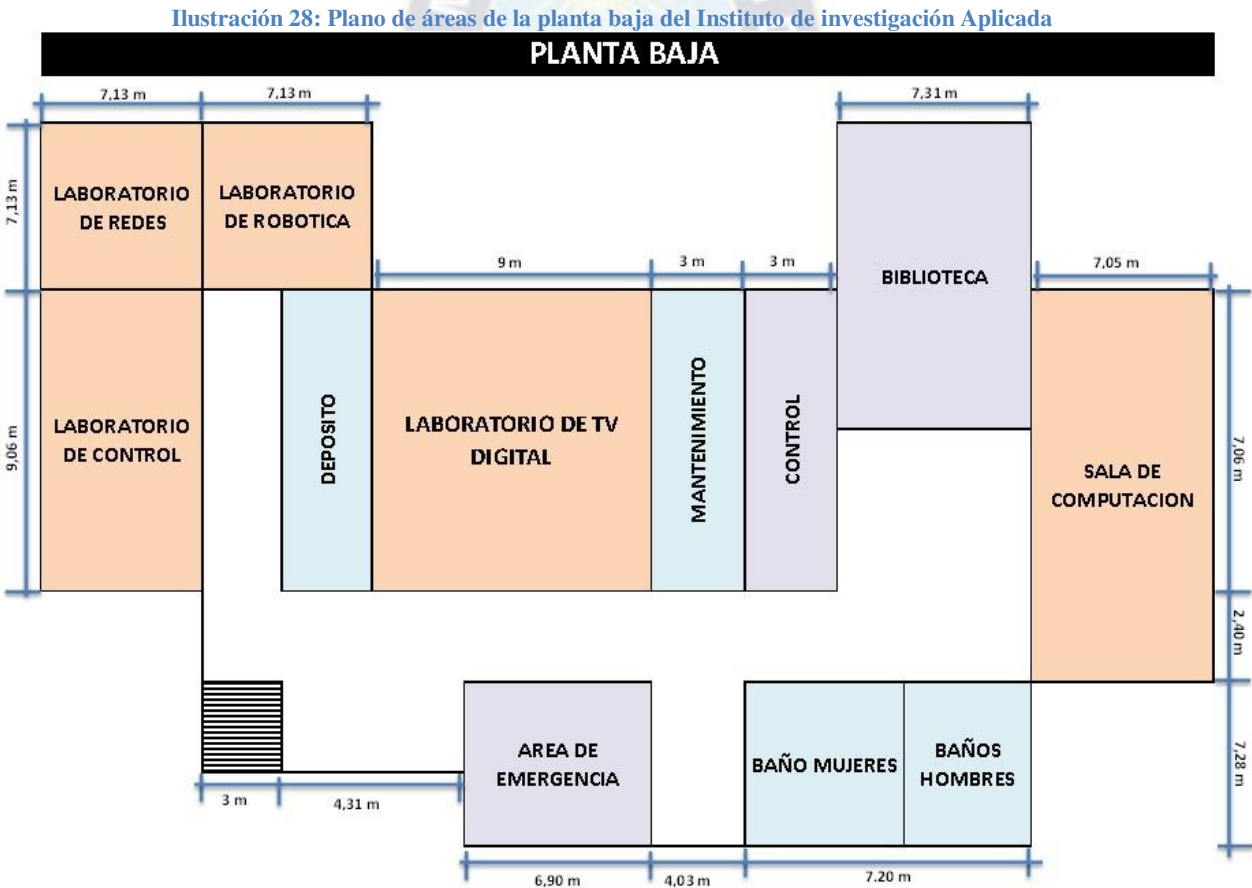


Fuente: Elaboración propia

3.1.2. ÁMBITO DE APLICACIÓN

Para el proyecto se planificó tener una cobertura de transmisión y recepción de señal dentro del instituto de electrónica aplicada, cubriendo una superficie total de 793,69 m² de acuerdo a los planos de construcción del instituto, mismos que están en la sección de anexos de este documento. Asimismo se contempla las áreas del instituto involucradas en la siguiente ilustración 28.

Al realizar una transmisión en la banda de frecuencia modulada es imprescindible obtener una licencia de funcionamiento emitida por la autoridad de Regulación y Fiscalización de Telecomunicaciones y Transportes (ATT) de la ciudad de La Paz, no obstante este es un proyecto académico experimental que está limitado a una cobertura no mayor al área de trabajo en el instituto de electrónica aplicada, es decir una cobertura promedio de 739.69 metros cuadrados en la planta baja y 660.33 metros cuadrados en la planta del primer piso de acuerdo a los planos de construcción de las instalaciones, graficas que se encuentran en la sección A de los anexos de este documento. En base a esa información se realizó un mapa de las áreas involucradas para el estudio y evaluación de transmisión, como se ve a continuación en las ilustraciones.



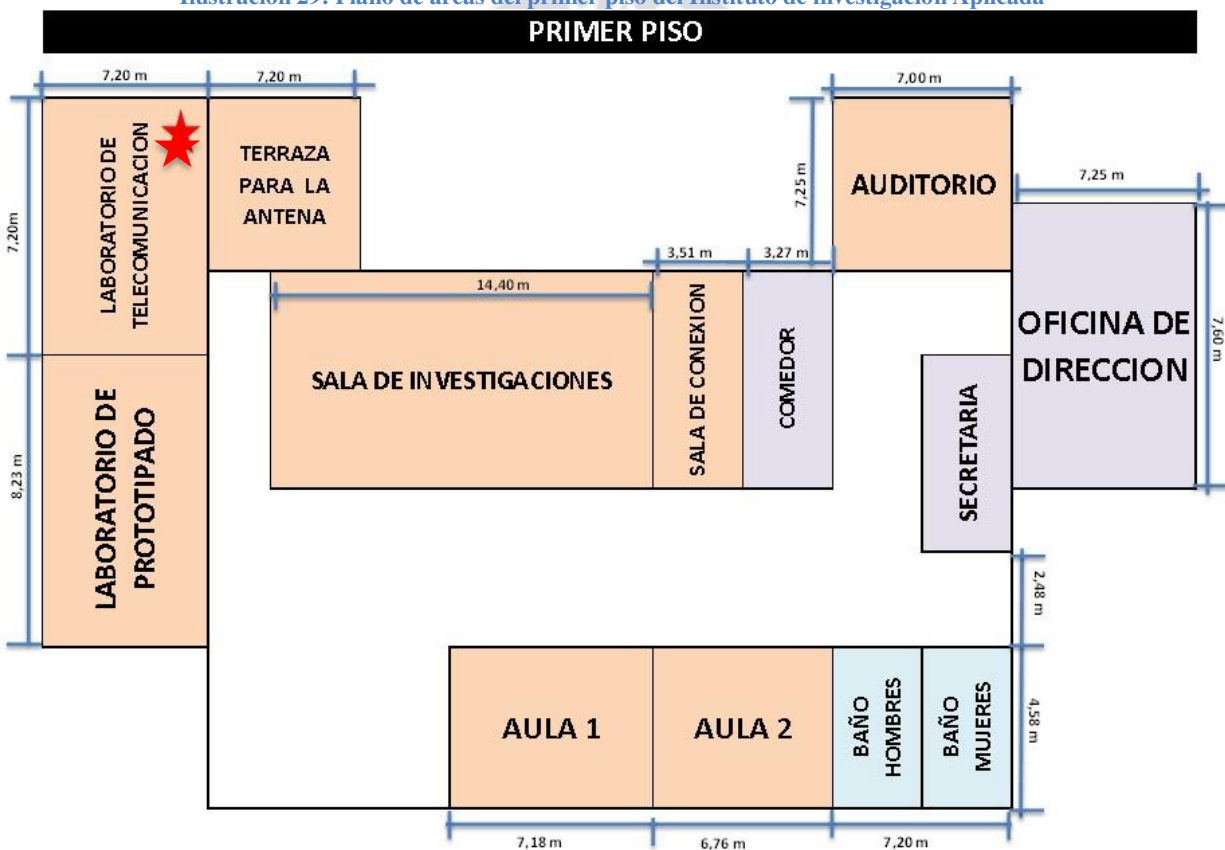
Fuente: Elaboración propia en base a los planos arquitectónicos del IEA-UMSA

La planta baja contempla las siguientes áreas mostradas a continuación, donde se procederá a medir la recepción de señal dentro del instituto de electrónica aplicada.

:

- Laboratorio de redes
- Laboratorio de robótica
- Laboratorio de control
- Laboratorio de TV Digital
- Sala de computación
- Biblioteca
- Mantenimiento
- Control
- Deposito
- Área de emergencia
- Baños

Ilustración 29: Plano de áreas del primer piso del Instituto de investigación Aplicada



Fuente: Elaboración propia en base a los planos arquitectónicos del IEA-UMSA

Las áreas que comprenden el primer piso son:

- Laboratorio de telecomunicación
- Laboratorio de prototipo
- Sala de investigaciones
- Sala de conexión
- Aula 1
- Aula 2
- Comedor
- Oficina de dirección

- Secretaria
- Baños

Es importante mencionar que los equipos de transmisión de señal estarán ubicados en el primer piso del Instituto, específicamente en el laboratorio de telecomunicaciones, marcado con el símbolo rojo, espacio que transmitirá la señal, con la ayuda de una antena, teniendo un alcance general en el IEA.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES

En esta sección muestran los elementos necesarios para el desarrollo del proyecto, así como las características técnicas, ilustraciones de los equipos y su importancia.

• TARJETA USRP N200

Las tarjetas USRP pueden conectarse a computadores a través de un enlace cuya velocidad es relativamente alta, el único enlace importante es el puerto Ethernet mediante el cual los ordenadores pueden controlar el software de las tarjetas USRP permitiendo así la transmisión de datos. Además posee una antena propia del equipo USRP que trabaja en un ancho de banda de 400 a 1000MHz.

Ilustración 30: Tarjeta USRP N200



Fuente: Fotografía del equipo en el instituto de electrónica aplicada

La USRP N200 se puede conectar al computador mediante un convertidor Ethernet-USB de puerto USB 3.0, pero si el computador solo cuenta con puertos USB 2.0 la tarjeta podrá ser reconocida pero la velocidad de transferencia de datos será menor. En la Tabla 14 se muestran algunas de las características de la tarjeta USRP N200 que será empleada para el desarrollo del presente trabajo.

Tabla 14: Características USRP N200

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Frecuencia (GHz)	0.07 – 6
Ancho de Banda	56 MHz
Velocidad máxima	50 Mbits/s
Transmisión/Recepción	2 TX & 2 RX, Half duplex o full duplex
Entrada/Salida	MIMO 2x2
FPGA	LFTX
Interfaz	ETHERNET
Configuración	GNU RADIO

Fuente: elaboración propia en base a la investigación previa

Esta tarjeta es importante para el proyecto porque es el equipo de transmisión del sistema DRM+, colaborando en la construcción de la señal modulada para el sistema deseado.

● COMPUTADORA

Se requiere la necesidad de una computadora para efectuar la transmisión controlando la tarjeta USRP N200, las características principales que posee la computadora para poder trabajar en conjunto con las USRP se aprecian en la Tabla 15.

El computador es importante porque realizara la tarea de transmisión, almacenamiento y centro de control de todos los softwares utilizados en el proyecto.

Ilustración 31: Computadora completa instalada con Windows 7



Fotografía básica de un ordenador

Tabla 15: Características del computador para la transmisión

Característica	Descripción
Sistema operativo	Windows 7
Software requerido	Spark- GNURadio

Fuente: elaboración propia en función a la investigación previa

● RTL-SDR

Este dispositivo es uno de los elementos más importantes porque su función principal es recibir señales que serán transmitidas. Debido a que el instituto no contaba con uno, se realizó la adquisición propia del dispositivo exclusivamente para el desarrollo del proyecto.

El módulo RTL-SDR no pasa por ningún tipo de configuración, solo se requiere conocer los diferentes valores de ganancia, reconocimiento del computador y el software GNU Radio Companion, detalles de configuración que se describen más adelante.

Ilustración 32: STLSDR dispositivo de adquisición propia



Fuente: Fotografía tomada del dispositivo

- **DG8SAQ VNWA**

El analizador de redes vectoriales DG8SAQ de 1,3 GHz de bajo costo. La importancia de este radica en la necesidad de medir la onda reflejada y la impedancia de la antena a construir.

Ilustración 33: DG8SAQ VNWA equipo



Fuente: Fotografía tomada del equipo propio del IEA

- **ELEMENTOS ADICIONALES**

Los siguientes materiales son utilizados para la conexión del sistema entre dispositivos.

Ilustración 34: Cable coaxial para la conexión del amplificador con la antena



Fuente: Fotografía tomada en el IEA

Ilustración 35: Cable coaxial de conexión del equipo de transmisor (USRP) con el amplificador rf



Fuente: Fotografía tomada en el IEA

Ilustración 36: Cable RJ45 sirve para la conexión vía Ethernet Gigabit de la PC con la USRP



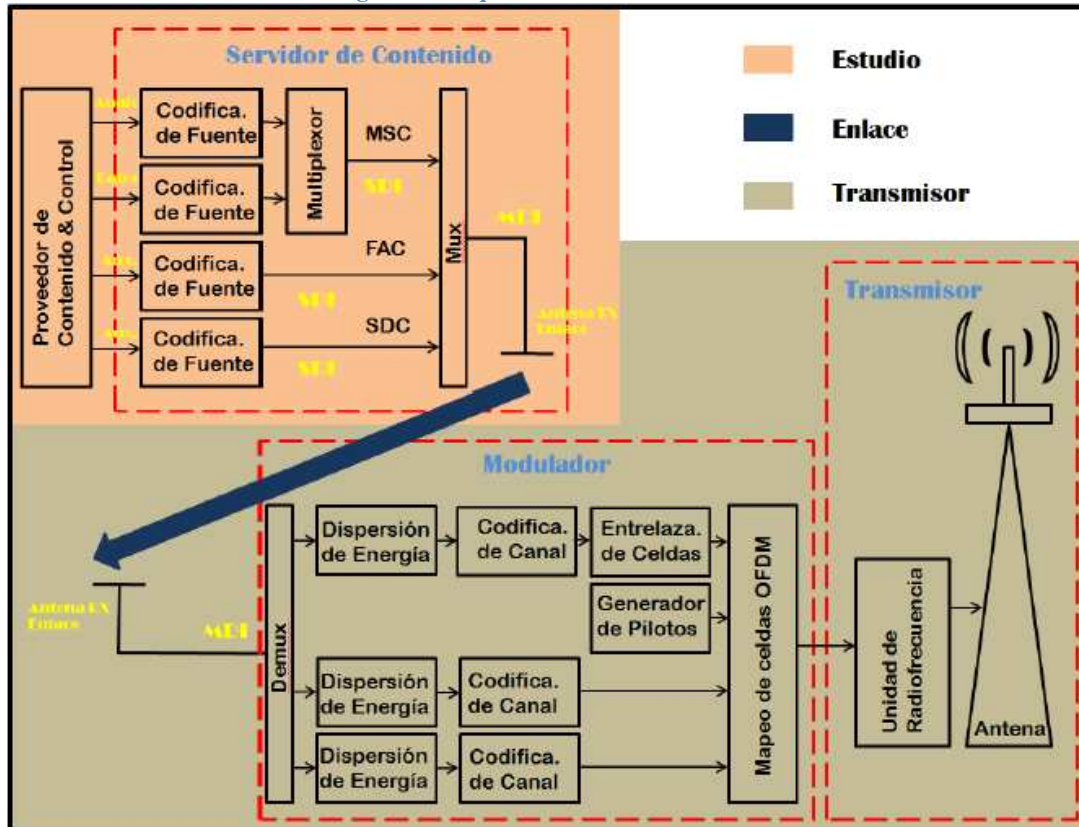
Fuente: Fotografía tomada en el IEA

3.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DRM+

3.3.1. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DRM+

El sistema de radiodifusión digital en el estándar DRM+ incluye procesos de implementación y ejecución. Mediante un esquema de diseño básico del sistema, en la figura 23 se pueden ver los diferentes equipos disponibles en el mercado, incluidos servidores de contenido, moduladores y transmisores.

Figura 23: Esquema de diseño del sistema



Fuente: Migración de la Radiodifusión Analógica a la Radiodifusión Digital. Escuela Politécnica Nacional

La parte del estudio de una estación DRM incluye fuentes de audio y sonido (*micrófonos, reproductores de audio, teléfonos, etc.*), claramente se ven dos bloques que son: el proveedor de contenido y servidor de contenido.

Los proveedores de contenido y control administran y controlan las fuentes de sonido y audio en este bloque, también ejecuta arreglos de señal y mezclas. En cuanto al servidor de contenido, este incluye un codificador fuente para la compresión de audio además del DRM Multiplex, que define los canales necesarios y hasta cuatro opciones de servicio configurables.

El Modulador se encarga de hacer todo el proceso COFDM, es decir usa la técnica OFDM pero de información previamente codificada para añadir redundancia, dentro de la técnica OFDM. El Modulador definirá el tipo de constelación utilizado (n -QAM), considerando que un “ n ” alto establece mayor capacidad y un “ n ” bajo mayor robustez

Por otro lado, antes de colocar la señal en el medio de transmisión a través del sistema de radiación, el transmisor completa la adaptación final de la señal, lo que implica una etapa de amplificación de potencia. El sistema de radiación, refiriéndonos al sistema de antenas posee un ancho de banda y características de radiación que deben ser observadas para asegurar la

cobertura del diseño. El bloque transmisor está constituido por el Modulador, el Transmisor y el Sistema radiante (antena).

En la Figura 23 se pudo observar que los diagramas de bloques hacen una distinción entre Servidor de Contenido, Modulador y Transmisor, que normalmente forman tres dispositivos diferentes para el desarrollo de la transmisión, dependiendo del fabricante el Transmisor y el Modulador ensamblado pueden estar en un solo equipo.

Además, los parámetros de un equipo Servidor de Contenido tienen que adoptar las siguientes funcionalidades mostradas en la tabla para poder emplear el estándar DRM.

Tabla 16: Parámetros de un equipo de servidor de contenido del sistema de transmisión DRM

PARÁMETRO	DRM	DRM+
Compresión de datos	AAC, HVXC y CELP	AAC
Modos de robustez	A, B, C y D	E
Anchos de banda	4.5, 5, 9, 10, 18 y 20KHz	100KHz
MSC con modos	16-QAM y 64-QAM	16-QAM y 64-QAM
SDC con modos	4-QAM y 16-QAM	4-QAM y 16-QAM
EEP y UEP	SI	SI
Protocolo MDI/DCP	SI	SI
Soporta SFN	SI	SI
Sonido monofónico, estéreo, estéreo paramétrico	SI	SI
Administración, configuración y provisión de datos remota por Ethernet	SI	SI
Tratamiento digital de audio AES/EBU1	SI	SI
Configuración y monitoreo remoto vía web	SI	SI
Display de configuración	SI	SI

Fuente: Elaboración propia en función a investigación del estándar DRM+ y DRM

Las características principales de los equipos de modulación para el sistema DRM se detallan en la tabla 17, a continuación.

Tabla 17: Parámetros de un equipo de modulación para el sistema de transmisión DRM

PARÁMETRO	DRM	DRM+
Manejo de canales FAC, SDC y MSC.	SI	SI
Modos de robustez.	A, B, C y D	E
MSC con modos	64-QAM y 16-QAM.	64-QAM y 16-QAM.
SDC con modos	16-QAM y 4-QAM	16-QAM y 4-QAM

Anchos de banda de.	4.5, 5, 9, 10, 18 y 20KHz	98 KHz
Procesos de intercalado cortó y largo.	SI	SI
EEP y UEP	SI	SI
Opción para MFN y SFN con GPS para sincronización	SI	SI
Entrada MDI con Ethernet.	SI	SI
Display de configuración	SI	SI

Fuente: Elaboración propia en función a investigación del estándar DRM+ y DRM

Las características generales del equipo transmisor se ven detalladas en la tabla 18.

Tabla 18: Parámetros de un equipo transmisor para el sistema de transmisión DRM

PARÁMETRO	DRM	DRM+
Entrada MDI	SI	SI
Incluye todos los parámetros DRM.	SI	SI
Opción de SNF con GPS incluido.	SI	SI
Asistencia por web para control remoto.	SI	SI
50 Ω de impedancia de salida.	SI	SI
Aplica a potencia de diseño	SI	SI

Fuente: Elaboración propia en función a investigación del estándar DRM+ y DRM

Los Transmisores son independientes de un estándar en particular, excepto por algunas características variables, no obstante, existen transmisores analógicos que pueden ser adaptados para que funcionen en transmisión digital haciendo algunas modificaciones en la potencia de transmisión.

3.3.2. PARAMETROS DE CALIDAD DE SEÑAL EN TRANSMISIÓN

El estándar actual ETSI ES 201-980 muestra los parámetros esenciales para un sistema de transmisión DRM +, su ancho de banda ocupado aumenta a 96 kHz y se canaliza a 100 KHz, velocidades de transmisión de datos de 35 kbps a 185 kbps para una relación señal / ruido (SNR) entre 2 dB y 14 dB y una antena de transmisión aproximada a 10 metros para realización de pruebas. Ver la tabla19.

Tabla 19: Requerimientos del sistema de transmisión DRM+

SISTEMA DRM+	
ANCHO DE BANDA	96 KHz
VELOCIDAD DE TRANSMISION	35 Kbps-185Kbps
RELACION SEÑAL RUIDO (SNR)	2dB-14dB
SEPARACION DE PORTADORA	444 Hz
DURACION DE TRAMA DE TRANSMISION	100ms

MODULACION	4-QAM, 16-QAM
-------------------	---------------

Fuente: Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification ETSI ES 201 980

3.3.3. PARAMETROS DE CALIDAD DE SEÑAL EN RECEPCIÓN

Con base en las recomendaciones de la UIT-R BS.1660-3, para una transmisión del sistema DRM + decodificable en un receptor digital, es necesario alcanzar ciertos parámetros de calidad.

Según la norma mencionada, para el monitoreo de la señal se debe emplear un receptor software, con un receptor analógico como front-end junto a un decodificador de PC que cuente con al menos la salida FI de 12 kHz. El decodificador puede ser implementado técnicamente en una computadora portátil, logrando así realizar un seguimiento básico y la comprobación de la señal transmitida. La recepción por medio de un receptor portátil con alimentación por batería y una antena incorporada debe estar a no menos de 1,5 m sobre el nivel del suelo.

De acuerdo con las recomendaciones de la UIT el estándar DRM da un requisito de señal ruido, para lograr una tasa de error de bit codificado promedio debe ser un $BER = 10^{-4}$. Los efectos del sistema de banda estrecha, como el desvanecimiento rápido se incluyen en los modelos de canal dando lugar a valores calculados de señal ruido mínimos.

Se han asignado tres modelos de canales a los modos de recepción dados que dan las medidas de señal ruido mínimas, visualizables en la tabla 20.

Tabla 20: Señal ruido mínimo para diferentes modelos de recepción

MODO DE RECEPCION	MODELO DE CANAL	Señal ruido en dB	
		4-QAM	16-QAM
Recepción fija	AWGN	1.3	7.9
Recepción portátil	Zona urbana	7.3	15.4
Recepción móvil	Zona montañosa	5.5	12.8

Fuente: Base técnica para la planificación de terrestres
Difusión de sonido digital en la banda VHF: Recomendación ITU-R BS.1660-5

El sistema de recepción SDR realiza una lectura mostrando parámetros de señal de recepción, esta señal recibida muestra características del desempeño de la señal. Para el proyecto las lecturas de señal se verificarán mediante el dispositivo SDR tomando en cuenta las características y recomendaciones técnicas de la UIT y del estándar DRM.

Existe un rango mínimo en el receptor según el estándar DRM y las recomendaciones de la UIT, de las cuales es necesario validar el dispositivo para el desempeño del proyecto. En la tabla 21 muestra el rango mínimo que debe tener un dispositivo receptor para el estándar DRM.

Una dinámica de lectura es la escala de los dBFS⁴⁵ (decible escala completa) atribuido al software SDR-Sharp, parámetro que es válido para cuantificar la relación señal ruido de la recepción y mostrará las referencias de amplitud de señales de audio originadas desde el dispositivo SDR.

⁴⁵ dBFS (Decibels relative to Full Scale): decibelios relativos a escala completa. Esta escala se utiliza para los niveles de amplitud en los sistemas digitales 0 dB FS es el nivel máximo. La escala se refiere a la amplitud de una señal comparada con el máximo que un dispositivo puede manejar antes de que saturar.

El escenario de difusión digital implementada mediante SDR tiene una serie de limitaciones respecto a la precisión, la medida de la señal digital en relación señal ruido no es suficiente para caracterizar la señal.

El receptor SDR no cuenta con una medida de BER, sin embargo se puede determinar la calidad de recepción empleando el audio reproducido por el emisor. La norma según la UIT establece valores de SNR para una buena recepción de señal digital con un valor BER menor a los 10^{-4} que oscilan entre 1.3 a 7 dB. En la tabla 20 se dan los valores SNR que la norma establece en las configuraciones de canal empleando 4-QAM.

El receptor SDR-RTL tiene como base la medida de relación ruido, medida que se considera como un parámetro base para la detección de la señal. El software “Sodira” considera la relación señal ruido para la detección de señal, medio que trabaja desde la entrada de audio en formato WAV en uno o dos canales según las condiciones del archivo generado, es importante mencionar que para una óptima funcionalidad el dispositivo RTL-SDR tiene que estar conectado y configurado según a la modulación del audio recibido.

El receptor DRM cuenta con otros parámetros adicionales a la medición, el detalle de los mismos se encuentra en la tabla 21, porque los parámetros de medida permiten verificar una buena recepción de señal en las condiciones de un espacio reducido en interiores.

Tabla 21: Información del programa Sodira y valores óptimos según la norma.

PARÁMETRO	Valor Óptimo	Unidades
SNR	7.3	dB
SNR MSC	2-14	dB
SNR SDC	2-14	dB
Retardo	1-2	ms
Doppler	0.1	Ms
Modo DRM	-	E
Ancho de banda	98	KHz
Interespaciado	0.2	s
Modulación MSC	4,16	N-QAM
Modulación SDC	4,16	N-QAM

Fuente: Elaboración propia

3.4. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DEL MÓDULO RADIODIFUSOR

3.4.1. SOFTWARE DEL SISTEMA

El sistema desea transmitir señales adoptadas en el estándar DRM+, para este propósito es necesario contar con programas encargadas en la operación y construcción de señales digitales.

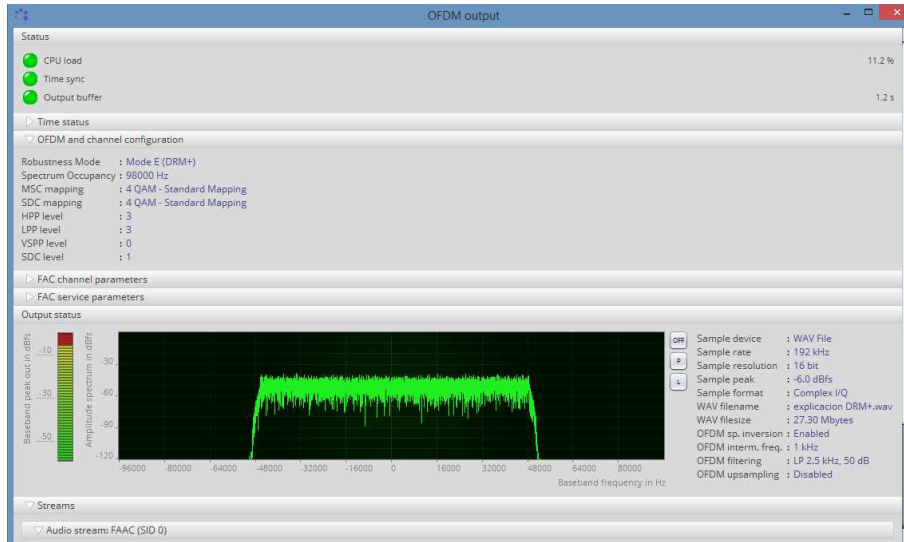
3.4.1.1. SOFTWARE SPARK.

Es un software modulador en tiempo real diseñado específicamente para la transmisión digital terrestre que utiliza el estándar DRM además de FM y AM analógicas. El software proporciona una interfaz gráfica de usuario para configurar los parámetros de la señal DRM (por ejemplo, velocidad de bits de audio, modo de transmisión, espectro ocupación), las fuentes y destinos de

la transmisión (por ejemplo, tarjeta de sonido o archivo) e información de servicio (por ejemplo, etiqueta de la estación).

El programa realizará las funciones de construcción de señales digitales dándole parámetros con las características del estándar DRM+, estas características están descritas anteriormente en el punto 3.3.1. El software nos permitirá elegir el modo de entrada de datos, logrando ser mediante la entrada de tarjeta de audio, un archivo WAV. o bien un archivo de formato mp3. Asimismo se podrá cambiar la tasa de muestreo según al formato de entrada, el software guardará el proceso en un archivo WAV. para luego ser enviada por el dispositivo USRP.

Ilustración 37: Elaboración de la señal con el software SPARK



Fuente: Captura de imagen en el momento de la elaboración de la señal DRM.

Los requerimientos mínimos del sistema para el software SPARK a tomar en cuenta son los siguientes:

Tabla 22: Características del ordenador para la transmisión

Requerimientos	
Lenguaje de programación y utilidades	Java Runtime Environment (JRE) 6.0 o superior
Sistema de Operativo	Windows Vista / XP / 2000 (32 / 64bit) o superior

Fuente: elaboración propia según el manual del software

3.4.1.1.1. INSTALACIÓN DE SOFTWARE DE TRANSMISIÓN (SPARK)

EL software creado por Michael Feilen presenta dos tipos de versiones, una de ellas presenta la versión con licencia que está disponible para Windows y Linux y se lo obtiene mediante un link de descarga⁴⁶ o mediante un CD. La segunda versión que presenta SPARK es de prueba, viene de forma gratuita y en esta versión no están activadas algunas funciones.

⁴⁶ El link de descarga del software Spark: <http://www.drm-sender.de/>

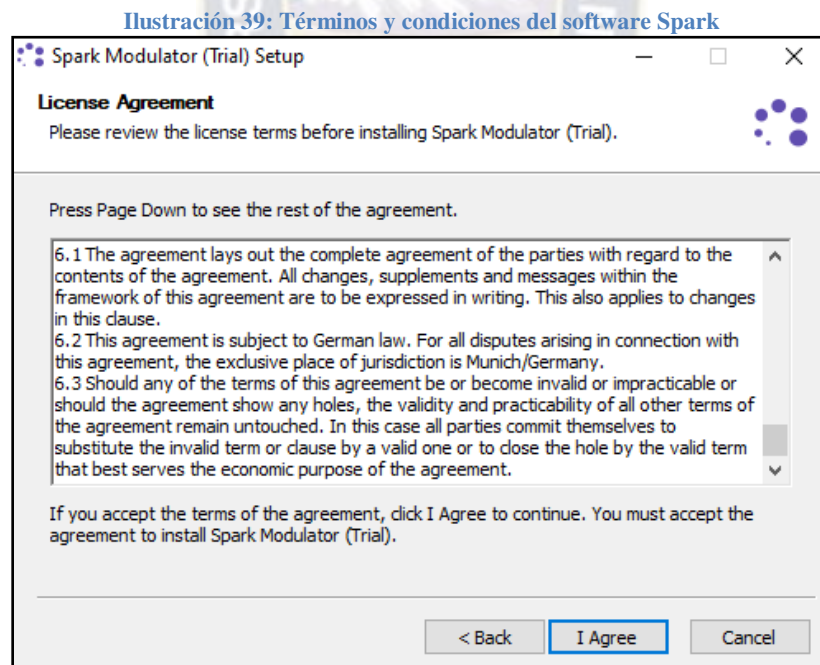
La versión que se utiliza en el proyecto es de prueba, adquirida mediante un enlace de descarga⁴⁷, una vez en el enlace se despliega un cuestionario para el uso del software, estos datos son enviados al correo electrónico del creador del software Michael Feilen, una vez enviada la información, la compañía otorga un link de descarga al correo electrónico que se suscribió conteniendo el software SPARK.

El archivo de descarga es denominado *Spark Trial Installer*, al ejecutarlo se presenta la interfaz de instalación como se ve en la Ilustración 38, es recomendable seguir las instrucciones de instalación, adjuntas en el correo para trabajar junto al sistema operativo de Windows, que debe tener el ordenador controlador y así poder trabajar con el software sin problema alguno.



Fuente: Captura del instalador en el momento de la instalación

Después de la aparición de la interfaz se presentarán los términos y condiciones que opta el software, donde detalla el derecho del cliente al utilizar el software, las garantías que brinda el desarrollador, la confidencialidad del uso del programa y la responsabilidad que se pueda presentar al desarrollar algún percance.

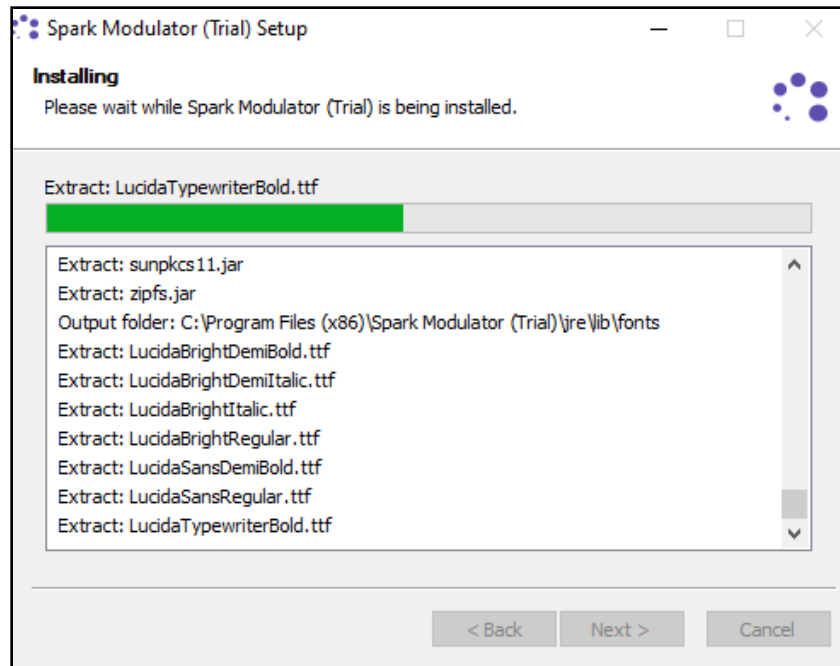


Fuente: Captura del software al momento de la instalación

El idioma de presentación y trabajo del software SPARK es el inglés y después de aceptar los términos y condiciones mostrados (*marcar I agree*) aparece la ubicación en el equipo para ser descargado los archivos que realizarán el funcionamiento del programa.

Ilustración 40: Instalación de los archivos para su ejecución de Spark

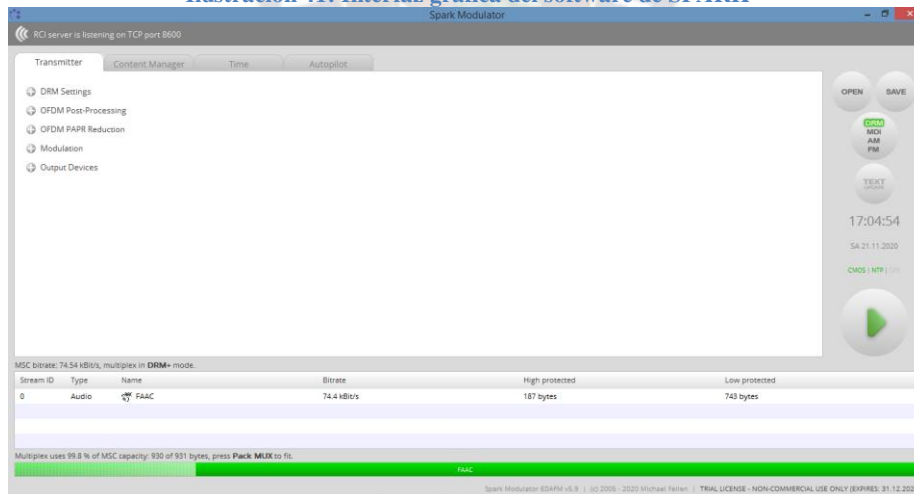
⁴⁷ Link de descarga del software Spark (versión de prueba): <http://www.drm-sender.de/>.



Fuente: Captura del software al momento de la instalación

Una vez seleccionado el lugar para el almacenamiento del software e instalados los archivos y las dependencias del software se creará un icono de ejecución, en la pantalla de escritorio, lugar donde es posible abrir el programa y ejecutar el software.

Ilustración 41: Interfaz gráfica del software de SPARK



Fuente: Captura del software al momento de la instalación

3.4.1.2. SOFTWARE GNURADIO

El software GNURADIO es una herramienta de desarrollo con licencia pública, que nos permitirá realizar la simulación de sistemas de comunicación a través de bloques de procesamiento de señales, que se implementaron con la ayuda de radios programables misma que tomará como dato de entrada el archivo en formato WAV. creado por el anterior programa, el programa realizable hará la combinación de elementos hardware y software mismo que nos permitirán la creación de un esquema de comunicación a partir de un único dispositivo hardware,