UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estudio de propagación de una red de DTV terrestre bajo el estándar DVB-T con recepción fija y móvil en el escenario metropolitano de la ciudad de Bogotá D.C., Colombia.

Luis Carlos Ariza Gordillo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería - Telecomunicaciones

Bogotá D.C., Colombia

2012

Estudio de propagación de una red de DTV terrestre bajo el estándar DVB-T con recepción fija y móvil en el escenario metropolitano de la ciudad de Bogotá D.C., Colombia.

Luis Carlos Ariza Gordillo
Código: 02299916

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Telecomunicaciones

Directora:

Ing. Ingrid Patricia Páez Parra Ph.D.

Televisión Digital Terrestre

Grupo de Investigación de Teleinformática de la Universidad Nacional de Colombia GITUN

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería - Telecomunicaciones

Bogotá D.C., Colombia

2012

A Dios: por darme la oportunidad de disfrutar de este momento tan especial en mi vida. A mis Padres: por el amor que siempre me han brindado, por darme todo el apoyo para poder culminar mis estudios.
A mis Hermanas: con las que siempre puedo contar para todo lo que necesite.
A mi novia quien siempre está a mi lado apoyando mi crecimiento personal y profesional.
Gracias.

Agradecimientos

En primer lugar quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia, al grupo de investigación GITUN, y en especial a mi directora de tesis Ing. Ingrid Patricia Páez por haberme guiado en las fases del desarrollo de esta investigación.

A la empresa TES America Andina Ltda, especialmente al Ing. Daniel Rosas Tapia, por permitirme usar los equipos de medición.

Y a todas las personas que de una u otra forma han contribuido al desarrollo de esta investigación.

Resumen

En esta investigación se realizó un estudio y análisis de propagación de una red de Televisión Digital Terrestre bajo el estándar DVB-T tanto en recepción fija como móvil en el escenario metropolitano de la ciudad de Bogotá D.C., Colombia. Se comenzó con una descripción de la evolución de la DTV, el estándar adoptado en el país y la definición de parámetros relevantes del estándar; luego se comparo el desempeño de los modelos de propagación de Fresnel, ITU-R 525, ITU-R 526 y Okumura-Hata, por medio de la correlación con mediciones realizadas. Con el modelo ITU-R 525 que presento el menor error promedio y desviación estándar en la correlación con las mediciones, se realizaron varias simulaciones de cobertura bajo tres diferentes escenarios de configuración de los dos trasmisores definidos en el estudio (Calatrava y Cruz Verde), se evaluó el desempeño de cada uno de estos en la implementación de una red SFN de TDT en recepción fija, Portable Indoor y móvil en el entorno metropolitano de Bogotá. Se determino que para la recepción fija con potencia de transmisión de 1000W en Calatrava y 500W en Cruz Verde se puede obtener una cobertura casi del 100% de la zona evaluada (Área urbana de Bogotá), Para ofrecer recepción Indoor en un 80% del área evaluada es necesario incrementar la potencia de Calatrava entre 4000W y 6000W, y la de Cruz verde entre 2000W y 4000W dependiendo de la configuración del trasmisor. Para la recepción móvil se observo que al implementar modulación jerárquica y utilizar el flujo de datos HP para la recepción móvil se logró dar cobertura al redor de 90% en las rutas evaluadas, y con la implementación de técnicas como la diversidad de antenas en el receptor en algunos casos se puede llegar al 100% de cobertura. Por último se analizó el impacto en el cambio climático generado por los residuos tecnológicos resultantes de la implementación de la DTV en Colombia.

Palabras clave: DTV, TDT, DVB-T, Modelo de Propagación, Recepción

Abstract

In this investigation, was held the study and analysis of propagation of a Digital Terrestrial Television network using DVB-T, in both fixed and mobile reception, in the urban conditions of Bogotá, D.C., Colombia. It starts with a description of the evolution of Digital Television (DTV), the standard adopted by Colombia and the definition of relevant parameters of the standard; then, a comparison between the performance of the Fresnel, ITU-R 525, ITU-R 526 and Okumura-Hata propagation models was made, using the correlation with field measurements. The ITU-R 525 model had the lowest average error and standard deviation in the correlation with the measurements. Simulations were made in three different configuration scenarios of the two broadcast stations used in the analysis (Calatrava & Cruz Verde), the performance of each station on implementation of a single frequency network (SFN) was evaluated for fixed, portable indoor and mobile reception. The results said that using a 1000W transmitter in Calatrava and 500W transmitter in Cruz Verde, it can be obtained a coverage zone of almost 100% of the urban area of Bogotá for fixed reception. In order to obtain an 80% coverage with portable indoor reception is needed more than 4000W in Calatrava and more than 2000W in Cruz Verde depending on the modulation selection. For mobile reception, the results indicate that using hierarchical modulation and the HP stream, it gives coverage to almost 90% of the routes in study, and with the implementation of antenna diversity on the receptor, in some cases the coverage could be raised to 100%. Finally, there is an analysis of the impact on the climate change generated by technological waste, as a result of the implementation of DTT in Colombia.

Keywords: DTV, TDT, DVB-T, Propagation Models, Reception.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **V**

Lista de figuras ..... **X**

Lista de tablas ..... **XIV**

Lista de abreviaturas ..... **XVI**

Introducción **1**

1. Fundamentos teóricos y caracterización técnica del estándar adoptado en Colombia **4**

1.1 Inicio de la televisión 4
1.2 Transmisión analógica 5
1.3 Televisión digital 6
1.3.1 Imágenes digitales 7
1.3.2 Transmisión digital 9
1.3.3 Modulación digital 10
1.3.4 Modulación OFDM 10
1.3.5 Modulación COFDM 11
1.3.6 Modulación QPSK 11
1.3.7 Modulación QAM 12
1.4 Estándar adoptado en Colombia 13
1.4.1 Estándar DVB-T 14
1.4.2 Capacidad del canal de transmisión 17
1.4.3 Estándar DVB-T2 19
1.5 Propagación electromagnética 20
1.5.1 Ecuación de Friis 20
1.5.2 Propagación en espacio libre 21
1.5.3 Zona de Fresnel 21
1.5.4 Mecanismos básicos de propagación 22
1.6 Modelos de propagación 26
1.6.1 Modelo Fresnel 27
1.6.2 Modelo REC. ITU-R P.525 cálculo de la atenuación en el espacio libre 27
1.6.3 ITU-R P.526 Propagación por difracción 28
1.6.4 Okumura- Hata 30
1.7 Identificación de parámetros del estándar DVB-T 32
1.7.1 Modulación 32
1.7.2 Modelo de canal 32
1.7.3 C/N 33
1.7.4 Numero de portadoras 34

1.7.5 Intervalo de guarda ... 34
1.7.6 Corrección de errores (FEC) ... 36
1.7.7 Condiciones de recepción ... 36
1.7.8 Área de cobertura ... 37
1.7.9 Umbral de recepción ... 37
1.7.10 Sistema Radiante ... 39
1.8 Receptores TDT ... 40
1.8.1 Normatividad a Nivel Mundial ... 41
1.8.2 Normatividad en Colombia ... 41
1.8.3 Receptores en el mercado ... 44
1.9 Resumen receptores TDT ... 45

2. Definición de Parámetros ... 47
2.1 Software de Simulación ... 47
2.1.1 Xirio online ... 47
2.1.2 ICS Telecom ... 48
2.1.3 Cartografía digital ... 48
2.1.4 Clutter ... 49
2.2 Parámetros de los transmisores CCNP y RTVC ... 50
2.3 Parámetros para la selección del modelo de propagación. ... 53
2.3.1 Umbrales de recepción ... 53
2.3.2 Simulaciones en Xirio On-line ... 54
2.3.3 Simulaciones en ICS Telecom ... 57
2.4 Parámetros de la red SFN para la ciudad de Bogotá D.C. ... 61
2.5 Parámetros de las Mediciones realizadas ... 64
2.5.1 Mediciones Fijas ... 64
2.5.2 Drive Test ... 68

3. Resultados de Simulaciones y Mediciones ... 71
3.1 Resultado de las Simulaciones con Xirio-Online con el modelo de propagación ITU-52671
3.2 Resultado de las Simulaciones con ICS Telecom con los modelos elegidos ... 73
3.2.1 Modelo de Fresnel ... 73
3.2.2 Modelo ITU-R 525 ... 74
3.2.3 Modelo ITU-R 526 ... 76
3.2.4 Modelo Okumura - Hata ... 77
3.3 Resultado de las mediciones ... 79
3.3.1 Mediciones Fijas - 20 Puntos de Medición ... 79
3.3.2 Drive Test ... 81

4. Análisis de resultados ... 83
4.1 Comparación de resultados de cobertura para los diferentes modelos de propagación. ... 83
4.1.1 Porcentaje de cobertura recepción Fija ... 84
4.1.2 Porcentaje de cobertura recepción Portable Indoor ... 85
4.1.3 Análisis porcentaje de cobertura obtenido ... 86
4.2 Evaluación de desempeño de los modelos de propagación ... 86
4.2.1 Comparación de las simulaciones con 20 puntos de medición ... 86
4.2.2 Correlación de las simulaciones con las mediciones de Drive Test ... 90
4.3 Selección del modelo para el entorno metropolitano de Bogotá ... 91
4.3.1 Ajuste de las simulaciones ... 91
4.4 Evaluación y Análisis de la Red SFN bajo los escenarios propuestos ... 92
4.4.1 Recepción Fija ... 93
4.4.2 Recepción Portable Indoor ... 97

4.4.3 Recepción Móvil. 102
4.5 Auto-interferencia de Red SFN....108
4.6 Análisis de la potencia del trasmisor....109
4.7 Comparación con otras investigaciones....110

5. Conclusiones y trabajos futuros 111
5.1 Conclusiones 111
5.2 Trabajos Futuros....113

Recomendaciones 114

Bibliografía 115

Anexo A. Análisis del impacto en el cambio climático generado por los residuos tecnológicos resultantes de la implementación de la DTV en Colombia. 121

Anexo B. Porcentaje de Cobertura vs Potencia.... 127

Anexo C. Fotografías Set de Medición (SIMT) – 20 Puntos de Medición.... 130

Anexo D. Mediciones Intensidad de Campo Eléctrico En 20 Puntos de Bogotá D.C.... 140

Lista de figuras

Figura 1-1 Exploración entrelazada [9] 5
Figura 1-2 Espectro de un canal de televisión analógico 6
Figura 1-3. Secuencia de Imágenes digitales y lazos de predicción [18] 8
Figura 1-4 Multicanalización OFDM 10
Figura 1-5 Esquema de la señal modulada COFDM [21] 11
Figura 1-6 Modulador y Demodulador QAM [24] 13
Figura 1-7 Sistema de televisión digital [28] 17
Figura 1-8 Diagrama de bloques para un transmisor DVB-T 18
Figura 1-9 Zonas de Fresnel [36] 22
Figura 1-10 Reflexión especular y reflexión difusa [37] 23
Figura 1-11 Principio de Huygens. [38] 23
Figura 1-12 Efectos de una superficie rugosa en la reflexión, causando dispersión [38] 24
Figura 1-13 Atenuación específica en zona boscosa [40] 25
Figura 1-14 Relación C/N 33
Figura 2-1 Cartografía Disponible para Xirio – Online (Baja Resolución). 48
Figura 2-2 Cartografía Disponible para ICS Telecom (Alta Resolución). 49
Figura 2-3 Cartografía Disponible para ICS Telecom. Izquierda, Alta Resolución. Derecha, Detalle de resolución 49
Figura 2-4 Clutter Uso del Suelo Bogotá D.C. 50
Figura 2-5 Equipo de Monitoreo GoldenEagle 50
Figura 2-6 Escaneo de Canales 51
Figura 2-7 Configuración del Multiplex del Canal 14 – CCNP 51
Figura 2-8 Configuración del Multiplex del Canal 15 – CCNP 51
Figura 2-9 Configuración del Multiplex del Canal 35 – RTVC 51
Figura 2-10 Cartografía disponible para uso gratuito 55
Figura 2-11 Cartografía de Alta resolución disponible con costo asociado 55
Figura 2-12 Parámetros del Transmisor 56

Figura 2-13 Diagrama patrón de radiación....56
Figura 2-14 Propiedades del Método de cálculo....57
Figura 2-15 Parámetros Generales Tx CCNP....58
Figura 2-16 Parámetros Patrón de radiación Tx CCNP....58
Figura 2-17 Parámetros Ubicación del Tx CCNP....58
Figura 2-18 Parámetros Configuración avanzada Tx CCNP....58
Figura 2-19 Parámetros Generales Tx RTVC....58
Figura 2-20 Parámetros Patrón de radiación Tx RTVC....58
Figura 2-21 Parámetros Ubicación del Tx RTVC....59
Figura 2-22 Parámetros Configuración avanzada Tx....59
Figura 2-23 Patrón de radiación elemento unitario H y V....59
Figura 2-24 Diagrama configuración SSRR Tx CCNP....60
Figura 2-25 Patrón de radiación del Arreglo del SSRR Tx CCNP....60
Figura 2-26 Diagrama configuración SSRR Tx RTVC....60
Figura 2-27 Patrón de radiación del Arreglo del SSRR Tx RTVC....60
Figura 2-28 Rutas de Interés Cobertura Móvil....61
Figura 2-29 Ubicación espacial de los sitios de medición en Bogotá D.C....66
Figura 2-30 Software de Monitoreo TESData....67
Figura 2-31 Analizador de espectro HP 8593E y R&S FSP-40....67
Figura 2-32 Cable LRM400 de Baja Pérdida....67
Figura 2-33 Antena SAS-200 Bi-Log....67
Figura 2-34 Mástil Telescópico (Expandible hasta 12 metros)....68
Figura 2-35 Equipo de Medición dispuesto para estudio de Drive Test....69
Figura 3-1 Cobertura Recepción Fija del Transmisor CCNP Canal 15 con receptores a 10m....71
Figura 3-2 Cobertura Recepción Fija del Transmisor CCNP Canal 15 con receptores a 3m....72
Figura 3-3 Cobertura Recepción Portable Indoor del Transmisor CCNP Canal 15....72
Figura 3-4 Cobertura Estación CCNP, Modelo de Propagación Fresnel. Izquierda: Receptores ubicados a 3m, Derecha: Receptores ubicados a 10m....73
Figura 3-5 Cobertura Estación RTVC, Modelo de Propagación Fresnel. Izquierda: Receptores ubicados a 3m, Derecha: Receptores ubicados a 10m....74
Figura 3-6 Cobertura Estación CCNP, Modelo de Propagación ITU-525. Izquierda: Receptores ubicados a 3m, Derecha: Receptores ubicados a 10m....75
Figura 3-7 Cobertura Estación RTVC, Modelo de Propagación ITU-525. Izquierda: Receptores ubicados a 3m, Derecha: Receptores ubicados a 10m....75

Figura 3-8 Cobertura Estación CCNP, Modelo de Propagación ITU-526. Izquierda: Receptores ubicados a 3m, Derecha: Receptores ubicados a 10m. 76
Figura 3-9 Cobertura Estación RTVC, Modelo de Propagación ITU-526. Izquierda: Receptores ubicados a 3m, Derecha: Receptores ubicados a 10m. 77
Figura 3-10 Cobertura Estación CCNP, Modelo de Propagación Okumura-Hata. Izquierda: Receptores ubicados a 3m, Derecha: Receptores ubicados a 10m. 78
Figura 3-11 Cobertura Estación RTVC, Modelo de Propagación Okumura-Hata. Izquierda: Receptores ubicados a 3m, Derecha: Receptores ubicados a 10m. 78
Figura 3-12 Resultados de las Mediciones de Drive Test 82
Figura 4-1 Mascara del Área a Evaluar 84
Figura 4-2 Porcentaje de Cobertura – Recepción Fija 85
Figura 4-3 Porcentaje de Cobertura – Recepción Portable Indoor 86
Figura 4-4 Ubicación de los receptores en ICS Telecom 87
Figura 4-5 Correlación con el modelo Fresnel 90
Figura 4-6 Correlación con el modelo ITU 525 90
Figura 4-7 Correlación con el modelo ITU 526 90
Figura 4-8 Correlación con el modelo Okumura -Hata 90
Figura 4-9 Correlación con el modelo ITU525– Clutter ajustado 92
Figura 4-10 Cobertura Tx Calatrava, Escenario 1, Rx Fija. 94
Figura 4-11 Cobertura Tx Cruz Verde, Escenario 1, Rx Fija. 94
Figura 4-12 Cobertura Tx Calatrava + Cruz Verde, Escenario 1, Rx Fija. 94
Figura 4-13 Cobertura Tx Calatrava, Escenario 2, Rx Fija. 95
Figura 4-14 Cobertura Tx Cruz Verde, Escenario 2, Rx Fija 95
Figura 4-15 Cobertura Tx Calatrava + Cruz Verde, Escenario 2, Rx Fija. 95
Figura 4-16 Cobertura Tx Calatrava, Escenario 3, Rx Fija. 96
Figura 4-17 Cobertura Tx Cruz Verde, Escenario 3, Rx Fija 96
Figura 4-18 Cobertura Tx Calatrava + Cruz Verde, Escenario 3, Rx Fija. 96
Figura 4-19 Cobertura Tx Calatrava, Escenario 1, Rx Portable Indoor. 97
Figura 4-20 Cobertura Tx Cruz Verde, Escenario 1, Rx Portable Indoor 97
Figura 4-21 Cobertura Tx Calatrava + Cruz Verde, Escenario 1, Rx Portable Indoor. 98
Figura 4-22 Cobertura Tx Calatrava, Escenario 2, Rx Portable Indoor. 99
Figura 4-23 Cobertura Tx Cruz Verde, Escenario 2, Rx Portable Indoor 99
Figura 4-24 Cobertura Tx Calatrava + Cruz Verde, Escenario 2, Rx Portable Indoor. 99
Figura 4-25 Cobertura Tx Calatrava, Escenario 3, Flujo LP, Rx Portable Indoor. 100

Figura 4-26 Cobertura Tx Cruz Verde, Escenario 3, Flujo LP, Rx Portable Indoor 100
Figura 4-27 Cobertura Tx Calatrava + Cruz Verde, Escenario 2, Flujo LP, Rx Portable Indoor 100
Figura 4-28 Cobertura Tx Calatrava, Escenario 3, Flujo HP, Rx Portable Indoor 101
Figura 4-29 Cobertura Tx Cruz Verde, Escenario 3, Flujo HP, Rx Portable Indoor 101
Figura 4-30 Cobertura Tx Calatrava + Cruz Verde, Escenario 2, Flujo HP, Rx Portable Indoor..... 101
Figura 4-31 Zonas de Sombra de cobertura..... 102
Figura 4-32 Ruta Portal 80..... 103
Figura 4-33 Ruta Portal del Norte – Portal Usme 103
Figura 4-34 Resultado Ruta Portal 80 desde Tx Cruz Verde 103
Figura 4-35 Resultado Ruta Portal Norte Usme desde Tx Calatrava..... 103
Figura 4-36 Vista de Resultados en Google Earth tramo de la ruta Portal 80 106
Figura 4-37 Tramo Ruta Portal Norte – Portal Usme 106
Figura 4-38 Puntos sin cobertura del Escenario 2 + Diversidad 107
Figura 4-39 Zonas de Interferencia para un modo FFT 2k y IG de 1/4 (75us)..... 108
Figura 4-40 Zonas de Interferencia..... 109

Lista de tablas

Tabla 1-1. Familia DVB [22] ... 14
Tabla 1-2. Capacidad del Canal para 6MHz [27] ... 18
Tabla 1-3. Tabla de atenuaciones por lluvia [42] ... 26
Tabla 1-4 Valores de C/N requeridos por diferentes modulaciones [27] ... 33
Tabla 1-5 Duración específica del Intervalo de guarda para 6MHz [27] ... 35
Tabla 1-6 Distancia de separación máxima entre Tx para una red SFN [51] ... 35
Tabla 1-7 Características elemento unitario. ... 39
Tabla 1-8 Receptores TDT con estándar DVB-T. ... 45
Tabla 2-1 Parámetros del trasmisor de CCNP y trasmisor de RTVC. ... 52
Tabla 2-2. Umbrales de Recepción ... 53
Tabla 2-3 Calculo de Umbrales de Recepción ... 53
Tabla 2-4 Valores y constantes usados en los cálculos de umbral de recepción. [28] y [31] ... 54
Tabla 2-5 Parámetros de los trasmisores Red TDT Bogotá ... 62
Tabla 2-6 Escenarios de Simulación ... 63
Tabla 2-7 Umbral de recepción para los diferentes escenarios y tipo de recepción ... 63
Tabla 2-8 Ubicación 20 Puntos de Medición ... 64
Tabla 3-1. Resultado de las mediciones de Intensidad de Campo Eléctrico – 20 Puntos ... 80
Tabla 3-2. Muestra puntos de medición Drive Test ... 82
Tabla 4-1 Porcentaje de Cobertura recepción Fija ... 84
Tabla 4-2 Porcentaje de Cobertura recepción Portable Indoor ... 85
Tabla 4-3 Comparación entre los valores de Intensidad de campo eléctrico medido y simulado con receptores ubicados a 3 metros de altura. ... 87
Tabla 4-4 Comparación entre los valores de Intensidad de campo eléctrico medido y simulado con receptores ubicados a 10 metros de altura. ... 88
Tabla 4-5. Comparación valor simulado VS valor medido ... 89
Tabla 4-6 Correlación simulaciones VS mediciones de Drive Test. ... 91
Tabla 4-7 Comparación del valor de erro promedio y desviación estándar con clutter ajustado. ... 92

Tabla 4-8 Porcentaje de Cobertura sobre la Calle 80 104
Tabla 4-9 Porcentaje de Cobertura sobre la Ruta Norte-Usme 104
Tabla 4-10 Porcentaje de Cobertura sobre la Calle 80 –Diversidad de Antenas 105
Tabla 4-11 Porcentaje de Cobertura sobre la Ruta Norte-Usme – Diversidad de Antenas 105
Tabla A-1 Valor Porcentual de componentes de la RAEE. 124

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
CCNP	Consorcio de Canales Nacionales Privados
CNTV	Comisión Nacional de Television
DTV	Digital Television
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier transform
IG	Intervalo de Guarda
TDT	Television Digital Terrestre
RTVC	Radio Nacional de Colombia
SFN	Single Frequency Network

Introducción

En el transcurso de la historia humana la sociedad ha sufrido grandes cambios, pero sin dudas uno de los más importantes ha sido el papel tan importante que desempeñan las telecomunicaciones desde su nacimiento, y en la vida diaria de las personas. Se quiere vivir en un mundo donde se pueda tener acceso a la información de forma permanente, sin importar el lugar donde se encuentren, que no importe si estamos en los hogares, autos, transporte público, caminando o en cualquier lugar, lo importante es poder seguir disfrutando de nuestros servicios de telecomunicaciones[1]. La televisión no es ajena a esta necesidad, quien no ha deseado poder ver el programa favorito en el servicio de transporte público o en el auto, mientras llega a casa, y no perderse ni un segundo del programa que más le gusta. Esta es una de las razones de la necesidad de tener un sistema de televisión digital que permita recepción tanto fija como móvil. En la última década la televisión digital se ha convertido en un fenómeno importante para la sociedad de la información en todo el mundo [2].

Las redes de Televisión Digital Terrestre implementadas en países como Francia, España, Italia, Finlandia, Austria, Holanda, entre otros fueron diseñadas exclusivamente para la recepción fija, lo cual ha llevado a los operadores de radiodifusión de televisión a implementar redes dedicadas DVB-H (Digital Video Broadcasting Handheld) para poder prestar el servicio de televisión móvil [3]. Sin embargo, los países como Panamá, Uruguay, India, Egipto, Turquía, Irán, Libia, Polonia, Rumania, Bulgaria, Malasia, Filipinas y Colombia donde hasta ahora se ha adoptado el estándar y apenas esta comenzado la implementación de estas redes [4], se pueden introducir avances tecnológicos que permiten que las redes bajo el estándar DVB-T ofrezcan recepción de televisión tanto fija como móvil. El hecho de poder brindar televisión móvil con la misma red, brinda una mejor oportunidad de negocio a los operadores, ya que se obtienen beneficios económicos al poder reducir y utilizar la misma infraestructura para poder prestar servicio de televisión tanto en terminales fijos como móviles [5] y [6].

El principal propósito de esta investigación es realizar el estudio de propagación de una red de DTV terrestre bajo el estándar DVB-T con recepción fija y móvil en el escenario metropolitano de la ciudad

de Bogotá, a través de la evaluación de desempeño de diferentes modelos de propagación en el entorno determinado por medio de simulaciones y correlaciones con mediciones, así mismo, la identificación de parámetros técnicos y de configuración de una red de DTV terrestre que permitan la recepción tanto fija como en movilidad. Es importante la realización de este tipo de estudios a nivel local (Bogotá, Colombia), ya que en el país se han realizados algunas investigaciones sobre la propagación de redes de televisión digital terrestre bajo el estándar DVB-T con recepción fija y móvil, pero se han desarrollado en ciudades diferentes (Cali, Bucaramanga y Manizales) a la escogida para esta investigación.

Los resultados obtenidos en esta investigación sirven como referencia a los operadores públicos y privados de televisión a la hora de diseñar las nuevas redes de televisión digital terrestre, evidenciando lo importante que es considerar el entorno especifico donde se desea dar servicio, la definición del modo de recepción que se quiere brindar (Fijo, Portable Indoor o Móvil) y la posibilidad de ofrecer servicios de televisión fijos y móviles con la misma red. Este documento sirve como guía a futuras investigaciones relacionadas con la propagación y planificación de redes de televisión digital terrestre.

Este trabajo se dividió en 5 capítulos, en el primero se presenta los fundamentos teóricos del estándar adoptado en Colombia junto con sus características técnicas, descripción de los modelos de propagación a utilizar en la investigación, identificación de los parámetros que influyen en la planificación y recepción de redes de TDT, por último se hace una descripción de las características técnicas de los receptores bajo el estándar DVB-T. En el capítulo 2 se describen las limitaciones, las herramientas de simulación utilizadas, se definen los parámetros de las simulaciones y de los transmisores de RTVC y CCNP de DTV en Bogotá, igualmente se indican los parámetros y los protocolos de las mediciones realizadas. En el capítulo 3 se muestran los resultados de las simulaciones y las mediciones efectuadas en forma de graficas y tablas. En el capítulo 4 se realiza el análisis de los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación, comienza con la comparación de resultados de cobertura con los diferentes modelos de propagación, seguido de una evaluación de desempeño de los modelos de propagación por medio de la correlación con las mediciones, y posterior selección del modelo de propagación más adecuado para el entorno de interés, por último, se realiza el análisis de una red de DTV en configuración SFN con recepción fija y móvil bajo tres diferentes escenarios de configuración. En el capítulo 5 se describen las conclusiones del análisis de los resultados del desarrollo de esta investigación.

En el desarrollo de esta investigación paralelamente se realizó un análisis sobre el impacto en el cambio climático generado por los residuos tecnológicos resultantes de la implementación de la DTV en Colombia; es importante que la población en general conozca el tema y tengan consciencia del impacto ecológico negativo que se causa al tratar los equipos electrónicos como residuos cotidianos, igualmente, los entes reguladores deben comenzar a trabar en políticas que permitan un reciclaje adecuado de los residuos tecnológicos y no solo reglamentar los aspectos técnicos al adoptar una nueva tecnología.

1. Fundamentos teóricos y caracterización técnica del estándar adoptado en Colombia.

En este capítulo se hace una breve descripción de la evolución de la televisión analógica y cómo evoluciona a la televisión digital, se realiza una describe el estándar DVB-T el cual fue adoptado en Colombia y una descripción general de la segunda generación del estándar DVB-T, luego se exponen los fundamentos de radio propagación y modelos de propagación que se utilizaron en la investigación, a continuación se identifican y se da una definición de cada uno de los parámetros que intervienen en el análisis de una red con recepción fija y móvil, por último se especifican las características técnicas requeridas por los receptores para la correcta recepción de la señal de TDT.

1.1 Inicio de la televisión

Televisión es una palabra híbrida entre griego y latín; "Tele" viene del griego lejano y "visión" del latín "Visio" que significa visión o vista, la televisión fue presentada en la feria Mundial de París de 1900 donde se celebró el primer Congreso Internacional de Electricidad. Desde sus inicios ha sido el medio más económico y el sistema del que más dispositivos electrónicos se han vendido en el mundo [7].

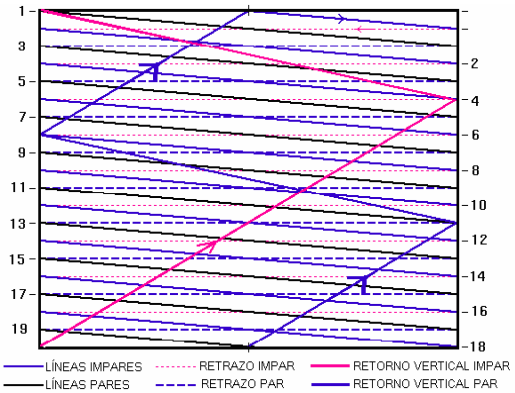
El 13 de Junio de 1954 es inaugurada oficialmente la Televisión en Colombia, como un servicio prestado directamente por el Estado, en el marco de la celebración del primer año de gobierno del General Gustavo Rojas Pinilla se adopto en Colombia el sistema de televisión analógica NTSC de origen americano. El encargado de poner en marcha la transmisión de la televisión en todo el territorio nacional fue el señor Fernando Gómez Agudelo, pero en el transcurso de la implementación surgieron varios problemas, principalmente debidos a la geografía tan abrupta de país, que dificultaba irradiar la señal, conseguir las antenas necesarias para superar este inconveniente en la época no fue tarea fácil, por lo que fue necesario hacer consultas a expertos europeos y estadounidenses para encontrar una solución efectiva, Los equipos escogidos fueron fabricados por la empresa alemana Siemens y se invirtieron cerca de 10 millones de pesos, una suma bastante considerable para la época [8].

Para la radiodifusión de la señal se necesitaban de lugares bastante elevados para lograr la cobertura en la transmisión, en Bogotá se escogió el Hospital Militar que estaba ubicado en los cerros orientales de la ciudad, donde se instalo una antena a 30 metros de altura sobre el hospital. A su vez se ubicaron antenas repetidoras en el cerro Gualí, también se instalaron antenas en el nevado del Ruiz, que cubría Antioquia, Valle del Cauca y Caldas, y otra en el páramo de la Rusia para Boyacá. Entre 1974 y 1979 se estableció la televisión a color, y se implemento paulatinamente en el país. Pero fue solo hasta el primero de diciembre de 1979 donde se hizo la primera transmisión oficial de los primeros programas a color, que en su mayoría fueron franjas extranjeras [8].

1.2 Transmisión analógica

Para la transmisión de televisión se captan el sonido y las imágenes, se obtienen las señales correspondiente, estas señales se modulan dependiendo del sistema y se obtienen las portadoras de audio, video y croma, que se envían por separado en un ancho de banda determinado. La imagen capturada se descompone en un número finito de líneas y se separan por impulsos de sincronismo. Debido a la limitación en el ancho de banda para estas señales, los cuadros de imagen se exploran entrelazadamente Figura 1-1, por lo que se producen 2 campos (par e impar) y se entrelazan en el receptor [9].

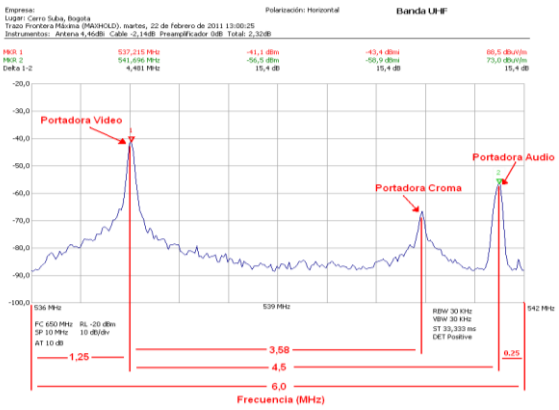
Figura 1-1 Exploración entrelazada [9]



El estándar NTSC a color posee 3 portadoras distribuidas en el espectro y utiliza un ancho de banda de 6 MHz, como se observa en la Figura 1-2. Con el fin de garantizar la compatibilidad con el sistema NTSC en blanco y negro, se mantuvo la señal monocromática en blanco y negro (portadora de video) como componente de luminancia de la imagen en color, mientras que las componentes de crominancia

se modulan en una segunda portadora (portadora de croma); y en una tercera portadora se modulada en FM a señal de audio (Figura 1-2) [9].

Figura 1-2 Espectro de un canal de televisión analógico



1.3 Televisión digital

Actualmente hay 4 grupos principales de estándares de televisión Digital, que se describen a continuación:

Estándar ATSC (Advanced Television System Committee) o Comité de Sistemas de Televisión Avanzados, es una organización internacional sin ánimo de lucro que crea normas voluntarias para la Televisión Digital [10].

El estándar ISDB, un estándar de televisión Digital desarrollado y estandarizado por la Asociación de Industrias de Radio y Negocios (ARIB) y la Asociación Japonesa de Ingenieros de televisión por Cable (JCTEA).[11] De este estándar se deriva el estándar SBTVD (Sistema Brasileño de TV Digital), desarrollado por Brasil y en proceso de implementación [12].

El estándar DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcast) o Transmisión Digital Terrestre Multimedia, Desarrollado por China, originalmente se le llamó DMB-T/H por las siglas en inglés de "Digital Multimedia Broadcast-Terrestrial/Handheld", este permite la recepción en terminales fijo y móviles [13].

El estándar DVB-T (Digital Video Broadcasting-Terrestrial), de origen Europeo, desarrollado bajo el proyecto DVB y estandarizado por el ETSI (European Telecommunications Standards Institute) o

Instituto Europeo de estándares en Telecomunicaciones. DVB-T posee el mayor despliegue de TDT (Televisión Digital Terrestre) en todo el mundo, con servicios al aire en más de treinta países, más de 60 millones de receptores desplegados y alrededor de 121 países en los cinco continentes lo han adatado como estándar de TDT [14].

Para los países desarrollados como España, Francia, Alemania, Italia, Japón, China y Estados Unidos la TDT (Televisión Digital Terrestre) es ya una realidad y cada uno con su respectivo estándar adoptado se ha trazado metas específicas de implantación que no superan el 2012. Por su parte, en Colombia la Comisión Nacional de Televisión CNTV desde el 2004 estuvo trabajando en la definición del estándar a ser utilizado para la difusión de Televisión Digital Terrestre, adoptando el estándar europeo DVB-T el 28 de Agosto de 2008 [15].

1.3.1 Imágenes digitales

Conforme a la recomendación ITU-R BT.601, la señal de video se muestrea a 13.5 MHz para obtener 720 muestras ortogonales en el periodo activo de línea, lo que corresponde a 13.5Mhz x 3 (colores básicos) x 8(nº de bits) = 324 Mbits/s. tal cantidad de bits aumentan los requerimientos de ancho de banda, por lo cual se desarrollaron procedimientos para reducir las muestras de video y eliminar la redundancia [16] y [17].

En el formato de video digital, a las imágenes se consideran formadas por macro bloques de 16 X 16 pixeles formadas por 4 matrices cuadradas de 8 x 8 pixeles y se les toman muestras de luminancia y dos señales de diferencia de color YCbCr (luminancia y los componentes diferencia de color B-Y y R-Y) y con la correspondiente relación 4:4:4. Teniendo en cuenta la percepción del ojo humano, es posible eliminar algunas muestras de color, sin ocasionar pérdidas apreciables a la calidad de la imagen, razón por la cual surgió el formato 4:2:2 y el más comprimido 4:2:0, disminuyendo el tamaño de las muestras [17].

La redundancia se refiere a la repetición de los hechos, la aparición de detalles iguales o muy próximos; existen dos clases: La redundancia espacial se refiere a las muestras de señal de imagen cuyo valor es muy próximo o similar entre sí para poder apreciarlas, lo que permite su supresión durante la codificación; los procedimientos para la compresión espacial se desarrollaron por el grupo de expertos

en fotografía JPEG[1]. La redundancia temporal se produce entre imágenes (campos) sucesivas, la compresión de este tipo es una extensión de la espacial desarrollada por el grupo MPEG[2] [17].

En la redundancia espacial se analiza el histograma de la imagen para hallar y suprimir pixeles que se creen redundantes, que son abundantes en imágenes comunes; en la redundancia temporal se analizan las imágenes sucesivas para transmitir únicamente los cambios observados entre ellas, teniendo en cuenta: los objetos cambian su posición, ubicación o tamaño respecto a la imagen anterior, la aparición de nuevos objetos en la escena o no hay cambios en la escena. [17]

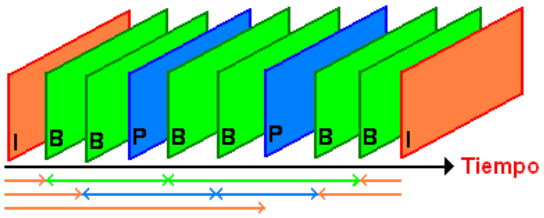
En la compresión se codifican las diferencias entre imágenes; El estándar MPEG señala que la comparación entre las imágenes (n y n+1) genera la diferenciación entre ellas. El estándar MPEG define tres tipos de imágenes que se describen a continuación [18]:

- Tipo I (Intracuadro), generada con referencia a la imagen en curso y contiene la mínima información necesaria a transmitir para poder ser interpretada completamente (entropía); son el inicio de la secuencia de datos, contienen información real y se repiten periódicamente.

- Tipo P (Predictiva Codificada) se forma con la información correspondiente a la imagen actual y una de referencia que puede ser I u otra P, también contiene la información del movimiento producido entre ellas.

- Tipo B (Bidireccional Codificada) predice la imagen teniendo en cuenta las imágenes anteriores y posteriores, que pueden ser I o P; son las de menor flujo de datos.

Figura 1-3. Secuencia de Imágenes digitales y lazos de predicción [18]



En la Figura 1-3 se observa la secuencia de imágenes digitales y sus lazos de predicción.

[1] JPEG, siglas en ingles de "Joint Photographic Expert Group"
[2] MPEG, siglas en ingles de "Motion Picture Experts Group"

1.3.2 Transmisión digital

El desarrollo de procedimientos de modulación digitales permitieron respecto a los analógicos anteriores reducir los valores de ruido para obtener relaciones ganancia/ruido muy favorables y posicionar nuevos servicios en el mismo espacio radioeléctrico, manteniendo el espectro actual [17].

En los sistemas de transmisión digital se utiliza la técnica de aleatorización de la señal para evitar largas cadenas de bits iguales y permitir regenerar el reloj a partir de ella. Una forma de realizar esto es por medio de la interpolación de datos, la cual mezcla el orden secuencial del flujo de datos y dispersa el paquete de datos en el tiempo para minimizar la sensibilidad de la señal transmitida a las interferencias de disparo. El interpolador de datos luego construye paquetes nuevos, incorporando los fragmentos pequeños de muchos paquetes de video diferentes (pre-interpolados). Estos paquetes reconstituidos tienen la misma duración que los paquetes originales; La interpolación de datos se hace de acuerdo con un patrón conocido. El proceso se invierte en el receptor para recuperar el orden correcto de los datos [17].

En toda transmisión digital sobre un canal real es susceptible a la aparición de errores en los bits transmitidos, por lo que se incorporan códigos para proteger la información, detectar y corregir bits erróneos [17], algunos de estos códigos son:

- **Codificación Reed-Solomon**: La codificación Reed-Solomon es una técnica de la corrección progresiva de errores (FEC - Forward Error Correction-) aplicada al flujo de datos entrante; La corrección progresiva de errores es un término general que se le aplica a una variedad de técnicas que son utilizadas para corregir los errores de bit que ocurren durante la transmisión. El ruido atmosférico, la propagación multi-trayectoria, y las no-linealidades del transmisor pueden provocar errores en los bits recibidos. La corrección progresiva de errores puede detectar y corregir estos errores, dentro de un límite razonable. El codificador Reed-Solomon toma los 187 bytes del paquete de video y los manipula matemáticamente como un bloque para crear una "etiqueta de identificación digital" del contenido del bloque. El receptor TVD compara el tamaño del bloque recibido con los bytes de paridad para verificar la validez de los dados recuperados. Si se detectan errores, el receptor determina que la "etiqueta" no corresponde al paquete y busca uno parecido (con unos pocos bits cambiados) que mejor corresponda a la etiqueta recibida [17].

- **Codificación Viterbi:** es una codificación de código convolucional destinado a corregir los errores aleatorios que se presenten. En esta codificación los bits no se generan a partir de otros de manera secuencial, sino que dependen de los anteriores y siguientes, su relación de código indica la cantidad de bits que se agregan [19].

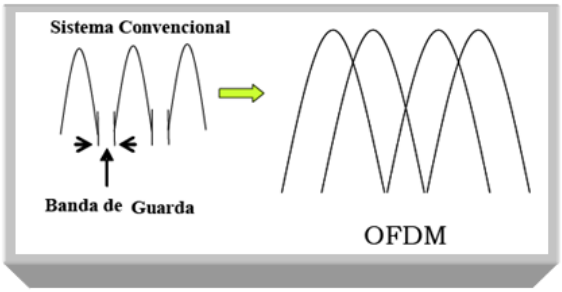
1.3.3 Modulación digital

Las técnicas de modulación digital para comunicaciones inalámbricas son técnicas eficientes para la radiación, propagación y recepción a través de la atmósfera entre algunas técnicas de modulación de señales digitales se puede encontrar: BPSK, QPSK y QAM. La totalidad del sistema debe aportar la mayor eficacia espectral posible, ocupando el mínimo ancho de banda [20].

1.3.4 Modulación OFDM

El sistema OFDM consiste en mandar múltiples portadoras con una frecuencia precisa, las cuales serán ortogonales entre sí, es decir, con un desfasamiento de 90°. Cada una de las portadoras define un canal. Esta propiedad de ortogonalidad entre portadoras evita la interferencia entre ellas mismas y por este hecho no es necesario el empleo de bandas de guarda entre portadoras, Figura 1-4 [20].

Figura 1-4 Multicanalización OFDM

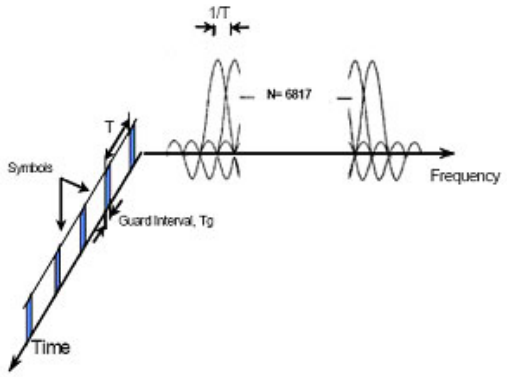


La utilización de estos sistemas de multicanalización, tienen como objetivo el poder transmitir información de varios usuarios en el mismo ancho de banda. Estas técnicas pueden ser divididas en tiempo, frecuencia, código e incluso en sistemas traslapados y evitar la interferencia entre ellos y con los datos de otros usuarios. La técnica de espectro extendido permite mitigar el efecto de interferencia del canal sobre la señal de información [20].

1.3.5 Modulación COFDM

COFDM[3] o modulación de multiplexación por división de frecuencia ortogonal codificada es una técnica de modulación de banda ancha que utiliza múltiples portadoras ortogonales, cada una modulada en amplitud y fase, junto con codificación de canal para detección y corrección de errores. Esta técnica se basa en una distribución tiempo-frecuencia de la información a transmitir en un gran número de señales en paralelo, individualmente moduladas por símbolos de datos de duración Ts, de igual periodo y distanciadas subyacentemente 1/T (Figura 1-5), lo que les da la condición de ortogonalidad [21].

Figura 1-5 Esquema de la señal modulada COFDM [21]



La modulación COFDM permite explotar las trayectorias múltiples que, por la naturaleza de la modulación, son constructivos. Con la adición de un intervalo de guarda en el dominio del tiempo entre símbolos consecutivos se eliminó la posibilidad de perdida a causa de la interferencia multicanal, producida por el retardo de los ecos en la recepción respecto a la señal principal. Es decir que el receptor COFDM «se alimenta» del conjunto de señales que le llegan: cada eco aporta su contribución al mejoramiento de la relación señal-ruido y de la tasa de error [22].

1.3.6 Modulación QPSK

La transmisión por desplazamiento de fase cuaternaria (QPSK) o, en cuadratura PSK, como a veces se le llama, es otra forma de modulación digital de modulación angular de amplitud constante. La QPSK es una técnica de codificación M-ario, en donde M=4 (de ahí el nombre de "cuaternaria", que significa "4"). Con QPSK son posibles cuatro fases de salida, para una sola frecuencia de la portadora. Debido

[3] COFDM, siglas en ingles de "Coded Orthogonal Frequency-Division Multiplexing"

a que hay cuatro fases de salida diferentes, tiene que haber cuatro condiciones de entrada diferentes. Ya que la entrada digital a un modulador de QPSK es una señal binaria (base 2), para producir cuatro condiciones diferentes de entrada, se necesita más de un solo bit de entrada. Con 2 bits, hay cuatro posibles condiciones: 00, 01, 10 y 11. En consecuencia, con QPSK, los datos de entrada binarios se combinan en grupos de 2 bits llamados Dibits. Cada código Dibit genera una de las cuatro fases de entrada posibles. Por tanto, para cada Dibit de 2 bits introducidos al modulador, ocurre un sola cambio de salida. Así que, la razón de cambio en la salida es la mitad de la razón de bit de entrada [23].

Respecto a las consideraciones de ancho de banda para QPSK, los datos de entrada se dividen en dos canales, la tasa de bits en el canal I, o en el canal Q, es igual a la mitad de la tasa de datos de entrada (fb/2). Como resultado, la frecuencia fundamental, más alta, presente en la entrada de datos al modulador balanceado, I o Q, es igual a un cuarto de la tasa de datos de entrada (la mitad de fb/2:fb/4). Como consecuencia, la salida de los moduladores balanceados I y Q, requiere de un mínimo ancho de banda de Nyquist de doble lado, igual a la mitad de la tasa de bits que están entrando (f_N = 2(fb/4) = fb/2). Por consiguiente con QPSK, se realiza una compresión de ancho de banda (el ancho de banda mínimo es menor a la tasa de bits que están entrando) [23].

1.3.7 Modulación QAM

Se Con el propósito de obtener una eficiencia espectral mayor se recurre a métodos de modulación de mayor número de fases. Debido a las prestaciones de tasa de error BER en función de la relación portadora a ruido C/N no es conveniente continuar incrementando el número de fases PSK. La modulación de 16 fases PSK consiste en 16 estados de fase distribuidos en una circunferencia con igual amplitud. Una distribución más acertada es 16QAM donde las fases se distribuyen en un reticulado de acuerdo con la Figura 7. La virtud de 16QAM frente a 16PSK es que las fases se encuentran más separadas una de otra con lo cual admiten una amplitud de ruido mayor [24].

El modulador 16QAM se puede efectuar de 2 formas:

- Mediante un codificador apropiado se disponen de 4 trenes de datos en paralelo y se agrupan de a dos para obtener dos señales analógicas con 4 estados de amplitud cada una (-3,-1,+3,+1). A continuación se efectúa la modulación en cuadratura convencional del tipo 4PSK [24].

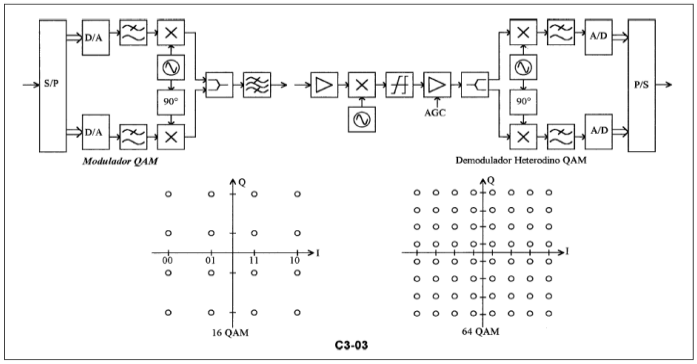
- Mediante 2 moduladores del tipo 4PSK se generan 4 estados de fase en cada uno. Uno de ellos se lo afecta con una atenuación de 6 dB antes de la suma. La modulación 16 QAM

resulta ser una modulación 4PSK por cuadrante, donde los cuadrantes se obtienen mediante la otra modulación 4PSK [24].

La modulación 16QAM permite transmitir una velocidad de 140Mbps (4x34 Mbps) en un ancho de banda de 80MHz. Como la ITU-R tiene definidas también bandas con ancho de 60 MHz se ha introducido la modulación 64QAM.

La modulación 64QAM se muestra en la Figura 1-6. El modulador es una extensión del concepto anterior con 6 trenes de datos en paralelo en lugar de 4. Se administran 2 señales analógicas de 8 niveles de amplitud moduladas en cuadratura o se utilizan 3 moduladores 4PSK con relación de atenuación de 6 y 12 dB. La distribución de códigos a cada fase se realiza siguiendo una codificación cíclica; de tal forma un error de fase introduce en las fases más cercanas solo un error de bit [24].

Figura 1-6 Modulador y Demodulador QAM [24]



1.4 Estándar adoptado en Colombia

En Agosto de 2008 la CNTV, por medio de su presidenta María Carolina Hoyos, hace el anuncio de la adopción del estándar europeo DVB-T[4] como estándar a implementar para la radiodifusión de la televisión digital terrestre en Colombia. En Diciembre de 2010 la junta directiva de la CNTV aprueba el Acuerdo No008[5] en el cual se adopta para Colombia el estándar de televisión digital terrestre DVB-T y se establecen las condiciones generales para su implementación. Ente Acuerdo describe entre otros casas la posibilidad de adelantar el plazo de la transición de analógico a digital (Planteado inicialmente para el 2018), el deber de los concesionarios de televisión abierta de brindar sin costo y de

[4] DVB-T, siglas en ingles de "Digital Video Broadcasting - Terrestrial"
[5] Disponible en: http://www.cntv.org.co/cntv_bop/normatividad/acuerdos/2010/acuerdo_008.pdf

manera simultánea la oferta de contenidos que se emiten bajo el sistema analógico, además la facultad que tiene la CNTV de otorgar concesiones de televisión móvil. También preciso que el sistema para la codificación de video es la Recomendación UIT-T H.264 y que comúnmente se conocida como MPEG-4.

El estándar DVB-T hace parte de la familia del DVB (Tabla 1-1) que es un sistema de televisión digital multiprograma basado en la compresión de datos con procedimientos MPEG para sus contenidos de audio y video; emplea protección de datos basados en el sistema Reed-Solomon entrelazado de sucesión numérica para aumentar la rigidez, aleatorización para reducir al mínimo el ancho de banda y procedimiento de modulación especifico para cada uno de los tres medios de transmisión que admite [22].

Tabla 1-1. Familia DVB [22]

PARAMETRO	DVB-C Transmisión por cable	DVB-S Transmisión por satélite	DVB-T Transmisión por enlaces de tierra
Modo de codificación de Video	MPEG-2 (MP@ML)		
Modo de codificación de Audio	MPEG-1(Capa 2)		
Tamaño de los paquetes de transporte	188 octetos mas los correspondientes a la protección de FEC		
Modo de aleatorización de datos	1 + X^14 + x^15		
Codificación externa para protección de los datos	Código Reed-Solomon de condición (204,188, T=8)		
Modo de entrelazado de datos	Código Forney		
Codificación interna	NO	Rc= ½, 2/3, ¾ ,5/6, 7/8	
Filtrado en coseno	15%	35%	NO
Sistema de modulación	QAM de rango 16 a 64	QPSK	COFDM de 2K U 8K
Ancho de banda	8 Mhz	27-36 Mhz	7-8 Mhz

Para la codificación de audio inicialmente se utilizaba el estándar MPEG-1 Layer 2 (MUSICAM) pero en la actualidad se utiliza el estándar AC-3: Mono, Estéreo o Envolvente; los esquemas de codificación de video y transporte de datos se basan en el estándar MPEG-2 y MPEG-4 [22].

1.4.1 Estándar DVB-T

DVB-T es un estándar desarrollado por el proyecto DVB que especifica la estructura de las tramas, la codificación del canal y modulación para la radiodifusión de la televisión digital terrestre (DTT, por sus siglas en ingles). La primera versión del estándar fue publicada en marzo de 1987 [22].

El sistema de televisión digital denominado DVB-T, y recogido en el estándar ETSI[6] EN 300 744, especifica los procesos de codificación de canal y de modulación para un adecuado funcionamiento cuando se usan los canales de transmisión terrestre. Como en el resto de los estándares DVB, la señal de entrada normalizada es la denominada "MPEG-2 Transport Stream"(TS) o "Flujo de transporte MPEG-2" [22].

DVB-T es un sistema flexible que permite que las redes sean diseñadas para prestar una amplia gama de servicios, desde HDTV (high definition television) hasta multicanales SDTV (standard definition television), recepción fija y móvil especialmente cuando se usa en conjunto con DVB-H). El proyecto DVB se encuentra trabajando en el desarrollo de una siguiente generación del estándar terrestre, DVB-T2, diseñado para encontrar las necesidades de países después de que se presente el apagón analógico total [22].

DVB-T, al igual que todos los sistemas de transmisión digital, usa modulación OFDM. Este tipo de modulación utiliza un gran número de subportadoras, entregando una señal robusta que tiene la habilidad de soportar canales con condiciones extremas. DVB-T tiene características técnicas que lo hacen un sistema muy flexible, estas características son:

- 3 opciones de modulación (QPSK, 16QAM, 64QAM)
- 5 tasas diferentes de FEC (Foward Error Correction)
- 4 opciones de intervalos de guarda (1/32, 1/16, 1/8 y 1/4)
- 2 opción de numero de portadoras FFT (2k o 8k)
- puede operar en canales de ancho de banda de 6, 7 y 8 MHz (con video a 50MHz o 60MHz)

Usando una combinación de los parámetros descritos anteriormente, una red DVB-T puede ser diseñada para cumplir con los requerimientos del operador de red, encontrando el balance entre robustez y capacidad. Estas redes pueden ser diseñadas para ofrecer servicios como SDTV, radio, servicios interactivos, HDTV y encapsulación usando multiprotocolos [22].

Aunque originalmente no fue diseñado para receptores móviles, el rendimiento de DVB-T hace que la recepción móvil no solo sea posible, sino que forma parte de algunos servicios comerciales. Por ejemplo, el uso de un receptor de diversidad con dos antenas da una mejora de 5dB en casa y una reducción de errores del 50% en vehículos [25].

---

[6] ETSI, siglas en ingles de "European telecomunications Standars Institute"

El uso de una determinada FFT con el adecuado intervalo de guarda permite a DVB-T proporcionar a los operadores en forma de implementar redes de frecuencia única SFN (Single Frequency Networks). Una SFN es una red donde un número de transmisores operan en la misma frecuencia. Una SFN puede cubrir un país, o ser usado para dar cobertura a determinadas regiones [26].

DVB-T utiliza modulación COFDM[7] con un total de 1705 (modo 2k) o 6817 portadoras (modo 8k). Esta modulación permite, mediante la utilización de múltiples portadoras que dispersan los datos de la trama a transmitir, operar en escenario con un elevado índice de señales con multitrayectoria. La protección ante este tipo de interferencias se consigue insertando intervalos de guarda entre los datos que, eventualmente, reducen la capacidad del canal. Esta reducción de la capacidad es menor cuando mayor es el número de portadoras utilizadas. Aun así, el aumento del número de portadoras incrementa la complejidad del receptor [27]. El modo 2k está pensado para transmisores simples que cubran áreas geográficas reducidas (potencias reducidas) mientras que el modo 8k puede utilizarse por áreas geográficas extensas con una única frecuencia portadora por canal en toda la red. La fuerte protección del COFDM permite que el sistema pueda operar manteniendo la misma frecuencia portadora en toda una región geográfica extensa (cubierta por diversos radioenlaces). El receptor interpreta la señal procedente del radioenlace más débil como una señal multitrayecto y puede rechazarla. Si los radio enlaces están muy alejados, las diferencias de tiempo de recepción pueden ser considerables y es necesario aumentar los intervalos de guarda entre los datos digitales, perdiendo cierta eficiencia en la transmisión [2] y [17].

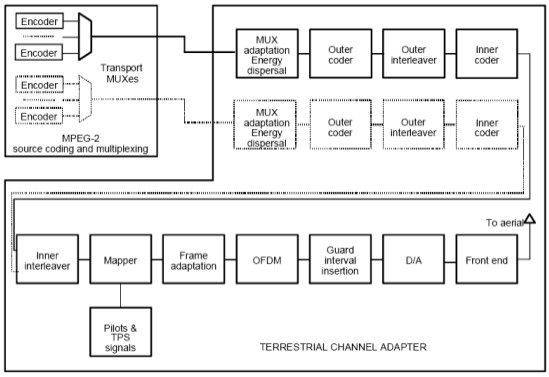
El estándar DVB-T permite transmisiones jerárquicas. En este caso hay dos flujos de transporte, uno de ellos denominada de alta prioridad HP que tiene baja velocidad y por tanto menor calidad de imagen, modula las portadoras con un esquema de modulación muy robusto frente al ruido (QPSK) mientras que el segundo flujo de transporte denominado de baja velocidad LP complementa al anterior en cuanto a velocidad y calidad de imagen y combina su información con el anterior de forma que las portadoras son moduladas finalmente con un esquema más exigente en cuanto a la relación señal/ruido. En el caso de que este ultimo utilice 4 bits por cada 2 bits de alta prioridad, se alcanzaría una constelación total para la señal emitida de 64QAM. En la zona del área de cobertura donde se reciba la señal con buena relación C/N, la imagen recuperada, de alta calidad, corresponderá a la combinación de los flujos (alta y baja prioridad) mientras que en caso contrario la calidad de imagen recibida será peor, correspondiendo solo al flujo de alta prioridad [2] y [17].

---

[7] COFDM, siglas en ingles de "Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing"

En la Figura 1-7, se muestra que el sistema DVB-T se define como un bloque que realiza la función de adaptación de la señal de televisión en banda-base que viene de la salida del multiplexor de transporte MPEG-2 a las características propias del canal terrestre de transmisión.

Figura 1-7 Sistema de televisión digital [28]



1.4.2 Capacidad del canal de transmisión

El modo 2k tiene 1,705 portadoras totales en cada símbolo OFDM, mientras que el modo 8k tiene 6,817 portadoras. No todas las portadoras están moduladas por los datos procedentes de la codificación de canal, solo 1,512 portadoras en modo 2k o 6,048 portadoras en modo 8k son útiles para datos [29].

Llamando F_T al flujo binario total transportado por las portadoras útiles para datos este vendrá dado por:

$$F_T = f_s \cdot v \cdot L \, (bits/seg) \tag{1.1}$$

Donde:

fs: Frecuencia de los símbolos (símbolos/seg) fs = 1/Ts

Ts: Duración del símbolo

v : N. de bit / portadora (función del esquema de modulación)

L: N. de portadoras activas para datos.

La capacidad del canal o flujo binario útil *Fi* resultara de descontar del flujo binario total las redundancias incluidas en la codificación interna y en la codificación Reed-Solomon [29], es decir:

$$F_U = F_T \cdot r \cdot 188/204 \, (bits/seg) \tag{1.2}$$

Donde:

r: la relación de codificación interna.

En la Tabla 1-2 se muestra la capacidad del canal para sistemas no jerárquicos en todos los casos de modulación, intervalo de guarda y relación de codificación interna, para transmisiones en canales radioeléctricos de 6MHz [27].

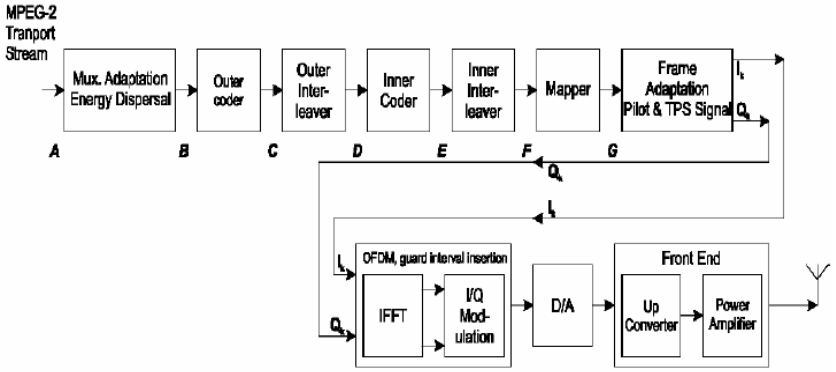
En la Figura 1-8 se muestra el diagrama de bloques de un transmisor DVB-T, donde se observan los bloques correspondientes a la codificación de canal, modulación OFDM, el convertidor al canal de salida y el amplificador de potencia necesario para alcanzar el nivel de señal requerido para la transmisión [27].

Tabla 1-2. Capacidad del Canal para 6MHz [27]

Modulation	Code rate	Guard interval			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	*3,732*	*4,147*	*4,391*	*4,524*
	2/3	*4,976*	*5,529*	*5,855*	*6,032*
	3/4	*5,599*	*6,221*	*6,587*	*6,786*
	5/6	*6,221*	*6,912*	*7,318*	*7,540*
	7/8	*6,532*	*7,257*	*7,684*	*7,917*
16-QAM	1/2	*7,465*	*8,294*	*8,782*	*9,048*
	2/3	*9,953*	*11,059*	*11,709*	*12,064*
	3/4	*11,197*	*12,441*	*13,173*	*13,572*
	5/6	*12,441*	*13,824*	*14,637*	*15,080*
	7/8	*13,063*	*14,515*	*15,369*	*15,834*
64-QAM	1/2	*11,197*	*12,441*	*13,173*	*13,572*
	2/3	*14,929*	*16,588*	*17,564*	*18,096*
	3/4	*16,796*	*18,662*	*19,760*	*20,358*
	5/6	*18,662*	*20,735*	*21,955*	*22,620*
	7/8	*19,595*	*21,772*	*23,053*	*23,751*

NOTE: Figures in italics are approximate values.
For the hierarchical schemes the useful bit rates can be obtained from table E.5 as follows:
HP stream: figures from QPSK columns;
LP stream, 16-QAM: figures from QPSK columns;
LP stream, 64-QAM: figures from 16-QAM columns.

Figura 1-8 Diagrama de bloques para un transmisor DVB-T



1.4.3 Estándar DVB-T2

Los estudios para la segunda generación del estándar DVB-T comenzaron en el año 2006, sin embargo, fue hasta el año 2008 donde el consorcio DVB lanza la segunda generación del estándar DVB-T al mercado, conocido como DVB-T2, este segunda generación ofrece beneficios significativos frente al DVB-T, como por ejemplo una mayor eficiencia espectral lo cual en términos generales se traduce en que podemos emitir un número mayor de programas en el mismo ancho de banda. Actualmente el estándar DVB-T2 esta implementado en 3 países (Suecia, Italia y Finlandia) y ha sido adoptado en Australia, Singapur, Malasia, Tailandia, Kenia, India, Sri Lanka, Sudáfrica Rusia y Ucrania [30].

Para el desarrollo de la segunda generación del estándar DVB-T, se tuvo en cuenta ciertos requerimientos comerciales; estos debían ser contemplados durante el proceso de investigación y desarrollo del DVB-T2, entre los principales requerimientos encontramos [31]:

- DVB-T2 debería poder usar las antenas receptoras domesticas y reutilizar infraestructura existente de trasmisión. Este requisito se descarta si se desea implementar técnicas MIMO.
- DVB-T2 debería centrarse fundamentalmente en los servicios de recepción fija y móvil.
- DVB-T2 debería proporcionar un mínimo de aumento de capacidad de un 30% comparado con DVB-T.
- DVB-T2 debería presentar un mejor desempeño en redes SFN en comparación con DVB-T
- DVB-T2 debería poder proporcionar servicios específicos robustos, es decir que permita dentro de un mismo canal poder brindar servicios fijos y móviles.
- DVB-T2 debería proporcionar flexibilidad en los anchos de banda.
- DVB-T2 debería proporcionar un mecanismo para reducir el P.A.P.R.[8] de la señal de trasmisión y de esta forma reducir los costos de emisión.

Las Principales diferencias entre DVB-T y DVB-T2 Con base en [31] se describen a continuación:

- FEC de nueva generación y esquema de modulación superior (256QAM), lo cual da como resultado un aumento de la capacidad de 25-30%.
- Aumento del número de portadoras OFDM de 8K a 32K.
- Nuevas fracciones de intervalo de Guarda (1/128, 19/256, 19/128).

[8] Por sus siglas en ingles "peak-to-average-power ratio".

- Ampliación del ancho de banda: por ejemplo, para un canal de ancho de banda de 8 MHz, se tienen 7.77 MHz en lugar de 7,61 MHz (2% de ganancia).
- Permite el manejo de tres anchos de banda nuevos: 1.7 MHz, 5 MHz y 10 MHz.
- Nuevas características para mejorar la versatilidad y robustez en condiciones de recepción de la crítica, por ejemplo: Girar las constelaciones, reducción de la PAPR.
- DVB-T2 en su capa física permite el uso de diferentes tubos de capa física que permiten la implementación simultánea de diferentes niveles de robustez.

1.5 Propagación electromagnética

1.5.1 Ecuación de Friis

La potencia recibida en espacio libre por una antena a una distancia *d*, del transmisor está dada por la ecuación de Friis para espacio libre [32].

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \tag{1.3}$$

Donde:

$P_r(d)$: Es la potencia recibida en el punto d

P_t: Es la potencia transmitida

G_t: Es la ganancia de antena transmisora

G_r: Es la ganancia de antena receptora

d: Distancia entre el Tx y el Rx en metros

λ: Longitud de onda

La ganancia de la antena está relacionada con su apertura efectiva Ae, de la siguiente forma [32]:

$$G = \frac{4\pi Ae}{\lambda^2} \tag{1.4}$$

La apertura efectiva está relacionada con el tamaño físico de la antena y λ está relacionada con la frecuencia de la portadora de la siguiente manera [32]:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{w_c} \tag{1.5}$$

1.5.2 Propagación en espacio libre

El caso más básico de un enlace radioeléctrico sucede cuando no existe ninguna obstrucción capaz de alterar la radiación electromagnética entre las antenas de emisión y recepción. A esta situación se le denomina "espacio libre" y se da en la práctica en el rango de frecuencias superiores a 1GHz [33].

La ecuación que describe el comportamiento de las pérdidas de la onda electromagnética en un ambiente de espacio libre es la siguiente [34]:

$$L_{bf} = 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \ (dB) \tag{1.6}$$

Donde:

L_{bf}: pérdidas básicas de transmisión (dB)

d: distancia

λ: longitud de onda

d y λ, expresados en las mismas unidades.

En la siguiente ecuación se muestra la anterior ecuación expresada en función de la frecuencia de la siguiente manera [34]:

$$L_{bf} = 32.4 + 20\log(f) + 20\log(d) \ (dB) \tag{1.7}$$

Donde:

f: frecuencia (MHz)

d: distancia (km)

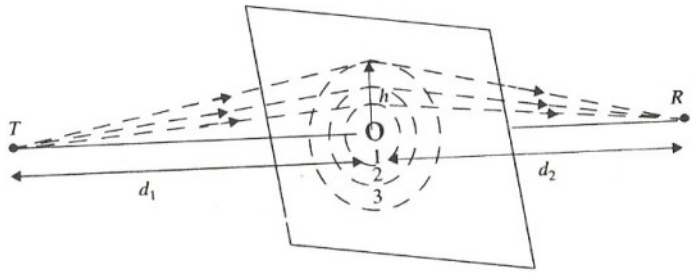
1.5.3 Zona de Fresnel

En comunicaciones por radio o inalámbricas, la zona de Fresnel es una zona de despeje adicional que hay que tener en consideración además de existir una visibilidad directa entre la antena receptora y la transmisora [35].

Este factor deriva de la teoría de ondas electromagnéticas respecto de la expansión de las mismas al viajar en el espacio libre. Esta expansión resulta en reflexiones y cambios de fase al pasar sobre un obstáculo. El resultado es un aumento o disminución en el nivel de intensidad de señal recibido [35].

Las zonas de Fresnel representan regiones sucesivas donde ondas secundarias tienen una trayectoria de transmisor a receptor que es $n\lambda/2$ mayor que el tamaño total de la trayectoria si hubiese línea de vista óptica. La Figura 1-9 muestra un plano transparente ubicado entre el emisor y el receptor [36].

Figura 1-9 Zonas de Fresnel [36]



La sección transversal de la primera zona de Fresnel es circular. Las zonas subsecuentes de Fresnel son anulares en la sección transversal, y concéntricas con las primeras. El concepto de las zonas de Fresnel se puede también utilizar para analizar interferencia por obstáculos cerca de la trayectoria de la señal de radio. La obstrucción máxima permisible para considerar que no hay obstrucción es el 40% de la primera zona de Fresnel, considerándose como Línea de vista (LOS), el caso contrario cuando las obstrucciones son más significativas es considerado como sin línea de Vista (NLOS) [36].
El radio de la n-ésima zona de Fresnel viene dado por la siguiente ecuación, para $d_1, d_2 >> r_n$

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1+d_2}} \tag{1.8}$$

1.5.4 Mecanismos básicos de propagación

1.5.4.1 Reflexión

Ocurre cuando la señal rebota en un obstáculo de dimensiones muchos mayores que la longitud de la onda incidente; al sumarse con la señal original da lugar a fenómenos de multitrayecto que se traducen en superposición de señales que se suman considerando la fase [36].

La expresión más común para la reflexión es el coeficiente de reflexión de Fresnel que es válido para un límite infinito entre dos medios, por ejemplo: aire y concreto; depende de la polarización y de la longitud de onda del campo de la onda del incidente y de la constante dieléctrica y de la conductividad de cada medio. El uso del coeficiente de reflexión de Fresnel es muy popular en herramientas software para simulaciones [36].

Este mecanismo se utiliza principalmente para modelar la reflexión de la superficie de tierra y de las paredes de los edificios; se ha utilizado para interpretar medidas en algunos ambientes particulares tales como zonas densas con edificios altos en el centro de ciudades, micro- células, ambientes indoor y para macro escenarios, haciendo referencia a reflexiones cerca del móvil [36].

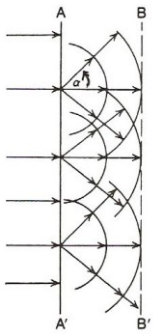
La reflexión sobre superficies lisas es llamada reflexión especular, mientras que la ocurre sobre superficies irregulares se denomina reflexión difusa (Lambertiana) [37].

Figura 1-10 Reflexión especular y reflexión difusa [37]

1.5.4.2 Difracción

Ocurre cuando la trayectoria entre transmisor y receptor se encuentra un obstáculo opaco de dimensiones considerablemente mayores que la longitud de onda de la señal. A frecuencias altas, la difracción, como la reflexión, depende de la geometría del objeto, así como de la amplitud, fase y polarización de la onda incidente en el punto en que se difracta. El fenómeno de difracción se rige por el principio de *Huygens* (Figura 1-11), donde cada elemento de un frente de onda en un instante de tiempo puede ser considerado como el centro de una fuente secundaria, lo cual ocasiona nuevas ondas esféricas y un frente de onda conformado por la suma de las mismas [38].

Figura 1-11 Principio de Huygens. [38]



1.5.4.3 Absorción

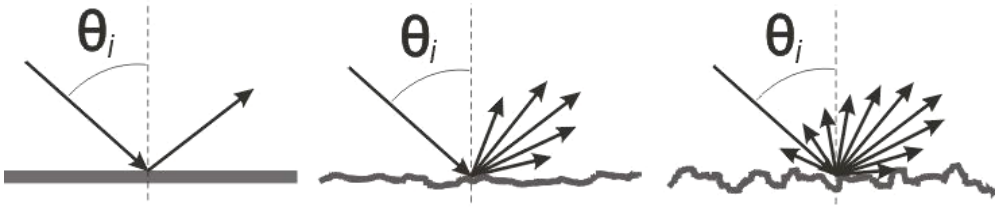
La absorción de las ondas electromagnéticas al viajar por el aire es debido a que el aire no es un vacío, sino que está formado por átomos y moléculas de distintas substancias gaseosas, líquidas y sólidas. Estos materiales absorber energía de las ondas electromagnéticas causando pérdidas por absorción. Cuando la onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricos [39].

Otra causa de este tipo de pérdidas son las ocasionadas por los efectos atmosféricos, tales efectos no son tenidos en cuenta al momento de modelar a bajas frecuencias; sin embargo deben considerarse con importancia cuando se trabajan en frecuencias superiores a los 60 GHz [39].

1.5.4.4 Dispersión

La señal que se recibe en un ambiente de radio móvil, es en realidad, más fuerte de lo que se predice con los modelos de difracción o reflexión. Esto se debe a que cuando una señal pega en un obstáculo irregular, la energía reflejada se esparce en diferentes direcciones debido al fenómeno de dispersión, tal como se observa en la Figura 1-12. Objetos tales como postes de luz o árboles, tienden a esparcir la energía en todas las direcciones, por lo que generan más energía en el punto de recepción. El grado de dispersión depende del ángulo de incidencia y de la rugosidad de la superficie comparada con la longitud de onda (Figura 1-12) [38].

Figura 1-12 Efectos de una superficie rugosa en la reflexión, causando dispersión [38]



Las superficies planas, cuya dimensión es mayor a la de la longitud de onda, pueden ser modeladas como superficies reflectoras. Sin embargo, las irregularidades de este tipo de superficies por lo general inducen efectos de propagación diferentes a la reflexión especular. Las irregularidades del terreno son medidas con el criterio de Rayleigh que define una altura crítica (hc) de protuberancias en la superficie para un ángulo de incidencia dado θi, como se observa en la siguiente ecuación [36]:

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \sin \theta_i} \tag{1.9}$$

Una superficie se considera lisa si la altura de su protuberancia máxima h, es menor a hc. Para superficies irregulares, el coeficiente de reflexión de superficie lisa debe ser multiplicado por el factor de pérdidas de dispersión, ρs, para atenuar el campo obtenido mediante la reflexión [36].

1.5.4.5 Refracción

Cuando una onda electromagnética es transmitida, el efecto que produce la atmósfera en ella, es el de curvarla hacia la tierra, alcanzando así distancias superiores a la de visión directa. Este fenómeno es

debido a que el comportamiento normal de la atmósfera terrestre es que disminuya su índice de refracción con la altura [39].

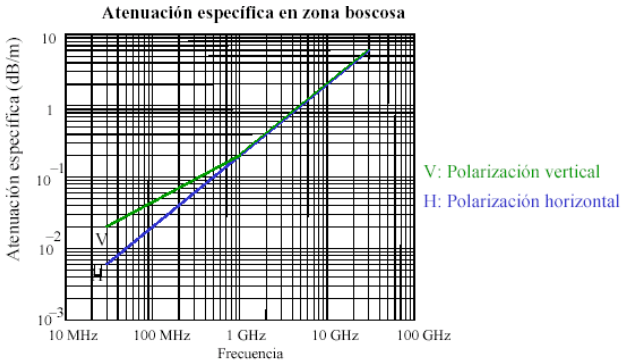
Debido a que normalmente se representa el camino de propagación como una línea recta, para simular el fenómeno de refracción se modifica el radio de la superficie terrestre para alcanzar así un 15 % más de distancia [36].

1.5.4.6 Atenuación por vegetación

En algunas ocasiones, la atenuación producida por la vegetación puede ser importante, tanto en los sistemas terrenales como en los sistemas Tierra-espacio. Pero la gran diversidad de condiciones y tipos de follaje dificultan la elaboración de un procedimiento de predicción general. Además, no existen suficientes datos experimentales verificados [40].

En la Figura 1-13 se muestran los valores típicos de atenuación específica que fueron obtenidos a partir de diferentes mediciones en la gama de frecuencias de 30 MHz a 30 GHz aproximadamente en zona boscosa. Por debajo de 1 GHz las señales polarizadas verticalmente tienen tendencia a experimentar una atenuación superior a la que experimentan las polarizadas horizontalmente, aunque esto es generado por la dispersión causada por los troncos de los árboles [40].

Figura 1-13 Atenuación específica en zona boscosa [40]



1.5.4.7 Atenuación por lluvia

La atenuación especifica por lluvia (f > 6GHz), $\gamma\ dB/km$) se obtiene a partir de la intensidad de lluvia R (mm/h)[41]:

$$\gamma_{(R)} = \kappa R^{\alpha} \tag{1.10}$$

En la Tabla 1-3 se indican los valores de *k* y *a* para polarizaciones horizontales y verticales y trayectos verticales. Para frecuencias entre los valores dados se usa interpolación [42].

Tabla 1-3. Tabla de atenuaciones por lluvia [42]

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
1	0,0000259	0,9691	0,0000308	0,8592
1,5	0,0000443	1,0185	0,0000574	0,8957
2	0,0000847	1,0664	0,0000998	0,9490
2,5	0,0001321	1,1209	0,0001464	1,0085
3	0,0001390	1,2322	0,0001942	1,0688
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
400	1,5860	0,6262	1,5820	0,6256
500	1,5418	0,6253	1,5366	0,6272
600	1,5013	0,6262	1,4967	0,6293
700	1,4654	0,6284	1,4622	0,6315
800	1,4335	0,6315	1,4321	0,6334
900	1,4050	0,6353	1,4056	0,6351
1 000	1,3795	0,6396	1,3822	0,6365

1.6 Modelos de propagación

Los modelos de propagación predicen la perdida por trayectoria que una señal de RF pueda tener entre una estación base y un receptor. Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de radio de un ambiente dado. Generalmente los modelos se pueden clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos o una combinación de estos dos. Los modelos empíricos se basan en mediciones y los modelos teóricos se basan en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio [43].

El desempeño de los modelos de propagación se mide por la veracidad de los resultados en comparación con medidas de campo reales. La aplicabilidad de un modelo depende de varios factores como son: el tipo de terreno (montañoso, ondulado, liso), las características del ambiente de propagación (área urbana, suburbana, abierta), características de la atmósfera (índice de refracción, intensidad de las lluvias), propiedades eléctricas del suelo (conductividad terrestre), tipo del material de las construcciones urbanas entre otras [43].

Al modelar canales de radio teniendo en cuenta las características de la trayectoria entre Tx y Rx, se obtiene la ventaja de poder conocer la viabilidad que puede tener un proyecto que se desee desarrollar

en determinados sectores, de esta manera se puede hacer una estimación acerca de la especificaciones técnicas, necesidad, costos, capacidad de los equipos requeridos y planificación de la red.

1.6.1 Modelo Fresnel

Es un modelo determinantico, proporciona una estimación directa derivada del perfil de ruta entre el transmisor y el receptor. El método de Fresnel proporciona un término adicional de atenuación específica constante de 3.8dB. Esta constante se introduce en la ecuación general de perdidas, esta atenuación adicional fue presentada y justificada teóricamente por Thomson Broadcast Services. Este modelo puede ser utilizado para el cálculo de la intensidad de campo en los márgenes superiores de las bandas de VHF y muestra un buen rendimiento en las bandas de UHF y SHF [44].

Se recomienda usarlo considerando las siguientes opciones [44]:

- Difracción de la geometría: "Deygout 1994"
- Atenuación por subtrayecto: "Coarse integration"

1.6.2 Modelo REC. ITU-R P.525 cálculo de la atenuación en el espacio libre

Es un modelo deterministico, donde la propagación en el espacio libre se calcula de dos formas diferentes, las cuales son adaptas a un tipo particular de servicio [45].

1.6.2.1 Enlaces punto a zona.

Este es el caso de un solo transmisor que provee servicio a varios receptores distribuidos al azar dentro de un área de cobertura (radiodifusión, servicio móvil). El cálculo del campo en un punto situado a una cierta distancia del transmisor se puede calcular mediante la siguiente relación [45]:

$$e = \frac{\sqrt{30p}}{d} \tag{1.11}$$

Donde:

e : intensidad de campo eficaz (V/m)

p : potencia isótropa radiada equivalente (P.I.R.E.) del transmisor en la dirección del punto considerado (W)

d : distancia del transmisor al punto considerado (m)

1.6.2.2 Enlaces punto a punto.

Cuando se trata de un enlace punto a punto, es preferible calcular la atenuación en el espacio libre entre antenas isótropas, denominada también pérdida básica de transmisión en el espacio libre (símbolos: *Lbf* o *A*0) de la siguiente forma [45]:

$$L_{bf} = 20\, log\left(\frac{4\pi\, d}{\lambda}\right) \tag{1.12}$$

Donde:

L_{bf}: pérdida básica de transmisión en el espacio libre (dB)

d : distancia

λ : longitud de onda

(d y λ se expresan en las mismas unidades)

1.6.3 ITU-R P.526 Propagación por difracción

La Recomendación ITU REC.526 es un modelo determinístico, en el cual además de las pérdidas de espacio libre, incluye las pérdidas adicionales debidas a la difracción de la señal en los diferentes obstáculos que encuentra en la ruta entre el transmisor y el receptor. Los métodos descritos en esta recomendación pueden incluir una superficie de la Tierra esférica, o terreno irregular con diferentes tipos de obstáculos. Las pérdidas por difracción son calculadas según lo planteado por el método de J. Epstein y D.W. Peterson, generalizado para el caso de cualquier número de obstáculos [46] y [47].

Cuando el terreno es muy irregular la señal encuentra uno o varios obstáculos, por lo cual para estimar las pérdidas causadas por estos es necesario idealizar la forma de los obstáculos, ya sea asumiendo un obstáculo filo de cuchilla o borde redondeado [46].

1.6.3.1 Tipos de terreno

Dependiendo del valor numérico del parámetro Δb[9] el cual es utilizado para calcular el grado de irregularidades del terreno, se pueden describir tres tipos de terrenos:

a) ***Terreno liso***

La superficie de la Tierra puede considerarse lisa cuando las irregularidades del terreno están alrededor de 0,1*R* o inferiores a ese valor, donde *R* es el máximo valor del radio de la primera

[9] Descrito en la Recomendación UIT-R P.310

zona de Fresnel en el trayecto de propagación. Para este caso, la predicción se basa en la difracción sobre Tierra esférica [48].

b) *Obstáculos aislados*

El perfil del terreno por donde se propaga la onda está compuesto de uno o más obstáculos aislados. Para este caso, dependiendo de la idealización utilizada para caracterizar los obstáculos que aparecen en el trayecto de propagación, se utilizan los siguientes modelos de predicción [48]:

- Obstáculo único en arista en filo de cuchillo
- Obstáculo único de forma redondeada
- Dos aristas aisladas
- Obstáculos múltiples aislados

c) *Terreno ondulante*

El perfil de terreno está compuesto por varias elevaciones pequeñas, donde ninguna de estas representa un obstáculo mayor. Para este tipo de terrenos la Recomendación UIT-R P.1546 es la más adecuada para predecir la intensidad de campo pero no sirve como método de difracción [48]:

1.6.3.2 Intensidad de campo producida por difracción

El valor relativo de la intensidad de campo por difracción, *E*, con respecto a la intensidad de campo el espacio libre, *E*0, viene dado por la fórmula siguiente [48]:

$$20\,log\left(\frac{E}{E_o}\right) = F(d) + H(h_1) + H(h_2) \tag{1.13}$$

Donde:

E: intensidad del campo recibido

*E*0: intensidad de campo en el espacio libre, a la misma distancia

d: distancia entre los extremos del trayecto

*h*1 y *h*2: altura de las antenas sobre la superficie de la tierra esférica.

1.6.3.3 Pérdidas por difracción en trayectos con visibilidad directa (LoS) con difracción de subtrayecto

En este caso, puede utilizarse una interpolación lineal entre el límite de la zona de difracción (un índice libre de obstáculos de 0,6 del radio de la primera zona de Fresnel), donde la atenuación correspondiente al espacio libre es cero. Conforme a este modo, las pérdidas por difracción se calculan en función del radio de la primera zona de Fresnel (*R*1), por medio de la siguiente ecuación [48]:

$$A(dB) = \left[1 - \frac{5}{3}\frac{h}{R_1}\right] A_h \tag{1.14}$$

Donde:

h: trayecto libre de obstáculos entre 0 y 0,6 *R*1

Ah: pérdidas por difracción en el horizonte

1.6.4 Okumura- Hata

El modelo es una formulación empírica, realizada por Masaharu Hata, de los datos de pérdidas de propagación proveídos por el modelo Okumura. Define las características de propagación presentes en el modelo Okumura por medio de ecuaciones matemáticas [49].

El modelo de Okumura es uno de los más ampliamente utilizados para predicción de señales en áreas urbanas. Este modelo es aplicable para frecuencias en el rango de 150 MHz a los 1920 MHz, es decir, comprende la banda de VHF y UHF (sin embargo típicamente es extrapolado para frecuencias arriba de 3000 MHz entrando en la banda de SHF) y distancias de 1 Km a 100 Km. Puede ser usado para alturas de la antena de la estación baso en el rango de 30 m a 1000 m [49].

Hata divide las áreas de predicción categorizadas por el tipo de terreno, llamadas área abierta, urbana y suburbana.

- **Área urbana**: Corresponde a las grandes ciudades con altas edificaciones y casas con 2 o más pisos, o donde existen una gran concentración de casas.

- **Área suburbana**: Ciudades o carreteras en donde hay árboles y casas en forma dispersa, existen obstáculos cerca del usuario pero no provocan congestión.

- **Área abierta**: Son los espacios abiertos sin grandes árboles o edificaciones en el camino de la señal.

La ecuación de pérdidas asociadas a este modelo están dada por [50]:

$$L_{50}(Urbano)(dB) = 69.55 + 26.16logf_c - 13.82logh_{te} - a(h_{re}) + (49.9 - 6.55logd) \quad (1.15)$$

Donde:

fc : Frecuencia de la portadora en MHz

h_{te} : Altura de la antena transmisora en metros para un rango de 30 a 300 metros

h_{re} : Altura de la antena receptora en el rango de 1 a 10 metros

$a(h_{re})$: Factor de corrección por la altura efectiva del móvil que es función del tipo de área de servicio.

d: Distancia entre el transmisor y el receptor en kilómetros.

La variable que se introduce respecto al modelo de Okumura es el factor de corrección por altura efectiva del receptor *a(hre)*, este factor es dependiente de la zona de cobertura. Se pueden definir diferentes valores de *a(hre)* para diferentes ambientes de propagación [50].

El valor $a(h_{re})$ para ciudades pequeñas y medianas es:

$$a(h_{re}) = (1.1logf_c - 0.7)h_{te} - (1.56logf_c - 0.8) \quad (1.16)$$

Para un ambiente suburbano la ecuación para calcular $a(h_{re})$ es:

$$a(h_{re}) = L_{50}(Urbano) - 2[\log(f_c/28)]^2 - 5.4 \quad (1.17)$$

Para áreas rurales se utiliza la siguiente ecuación

$$a(h_{re}) = L_{50}(Urbano) - 4.78(logf_c)^2 + 18.33logf_c - 40.94 \quad (1.18)$$

Para ciudades grandes se utilizan diferentes ecuaciones dependiendo del valor de la frecuencia.

$$a(h_{re}) = 8.29(log1.54h_{re})^2 - 11 \;\; para\; f_c < 300MHz \quad (1.19)$$

$$a(h_{re}) = 3.2(\log(11.75h_{re}))^2 - 4.9 \;\; par > 300MHz \quad (1.20)$$

1.7 Identificación de parámetros del estándar DVB-T

Con el fin de realizar el análisis de propagación y cálculo de coberturas de la red de TDT bajo el estándar DVB-T para los modos de recepción Fija y Móvil, se describe en esta sección los parámetros identificados como relevantes y considerados en el desarrollo de la investigación.

1.7.1 Modulación

El estándar DVB-T permite tres diferentes niveles de modulación: QPSK, 16QAM y 64QAM, lo que permite tener diferentes niveles de robustez, el cambio en la modulación también afecta la tasa de bit disponible del sistema, por ejemplo, si comparamos la modulación QPSK para un mismo código de corrección de errores, la capacidad de datos con una modulación 16-QAM se duplica y al compararla con 64-QAM se triplica. De igual manera el cambio en el esquema de modulación afecta el valor de C/N requerido [27].

El estándar también permite la codificación jerárquica del canal, donde se tiene dos tramas independientes de transporte MPEG, que se denotan como "alta prioridad" y "baja prioridad". Para definir si se va a utilizar modulación jerarquía o no se utiliza el parámetro α que es igual a 1 cuando no se utiliza modulación jerárquica y 2 o 4 para el uso de modulación jerárquica [27].

La transmisión jerárquica permite que por el mismo trasmisor sea posible emitir dos tramas de datos diferentes, una en modulación QPSK que se conoce como trama de Alta Prioridad (HP), la cual permite trasmitir con mayor robustez, que se traduce en un mejor desempeño en canales de recepción difíciles como es la recepción móvil. La otra trama es conocida como Baja Prioridad (LP), esta puede ir con modulación 16QAM o 64QAM, la cual las hace menos robustas pero presentan una mayor tasa de bits siendo apropiadas para recepción Fija. Dependiendo de la instalación de la antena y las condiciones de recepción, el receptor es capaz de decodificar la trama de datos más conveniente [27]

Por último es importante aclarar que existen otros parámetros diferentes de la modulación que también influyen en la robustez del canal.

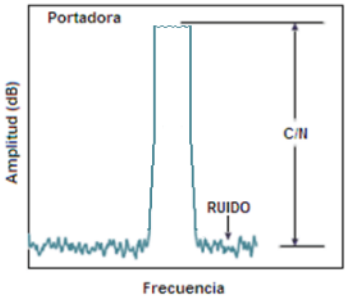
1.7.2 Modelo de canal

Generalmente los análisis para recepción fija outdoor se modelan utilizando el canal Rice (un rayo principal y varios ecos del mismo), para recepción Portable Indoor y móvil se emplea el canal Rayleigh (no existe un rayo principal) [27] y [28].

1.7.3 C/N

Por sus siglas en ingles "Carrier to Noise" o relación de Portadora a Ruido, este valor corresponde a la diferencia en dB entre los niveles de la señal (portadora de TDT) y el ruido del sistema (Figura 1-14) [28].

Figura 1-14 Relación C/N



El C/N mínimo es uno de los parámetros que determina en gran parte la calidad de la señal recibida y que el receptor pueda decodificar la señal, el valor de C/N mínimo requerido para este caso depende únicamente del código FEC escogido y el tipo de modulación [27] y [28]. Los valores mínimos para los diferentes tipos de modulación de las portadoras, para todas posibilidades de codificación, se describen a continuación en la Tabla 1-4:

Tabla 1-4 Valores de C/N requeridos por diferentes modulaciones [27]

Constel-lation	Code rate	Gaussian Channel (AWGN)	Ricean channel (F_1)	Rayleigh channel (P_1)
QPSK	1/2	*3,5*	*4,1*	*5,9*
QPSK	2/3	*5,3*	*6,1*	*9,6*
QPSK	3/4	*6,3*	*7,2*	*12,4*
QPSK	5/6	*7,3*	*8,5*	*15,6*
QPSK	7/8	*7,9*	*9,2*	*17,5*
16-QAM	1/2	*9,3*	*9,8*	*11,8*
16-QAM	2/3	*11,4*	*12,1*	*15,3*
16-QAM	3/4	*12,6*	*13,4*	*18,1*
16-QAM	5/6	*13,8*	*14,8*	*21,3*
16-QAM	7/8	*14,4*	*15,7*	*23,6*
64-QAM	1/2	*13,8*	*14,3*	*16,4*
64-QAM	2/3	*16,7*	*17,3*	*20,3*
64-QAM	3/4	*18,2*	*18,9*	*23,0*
64-QAM	5/6	*19,4*	*20,4*	*26,2*
64-QAM	7/8	*20,2*	*21,3*	*28,6*

El valor de C/N mínima requerida varía dependiendo el tipo de canal que estemos analizando (Rice, Rayleigh).

El valor de C/N mínima requerida por un receptor para poder decodificar la señal tiene una influencia directa sobre el valor de Potencia Radiada Aparente (PRA) del transmisor, a medida que

aumenta el valor de C/N requerido se debe aumentar el PRA del transmisor para mantener una cobertura dada.

La C/N mínima necesaria, incluso para el caso más desfavorable (64 QAM, FEC 7/8), es considerablemente inferior a la que se necesitaría para un canal analógico en estándar NTSC. Esta condición, que en general es inherente a las transmisiones digitales, permite que las potencias de salida de los transmisores puedan ser inferiores a las existentes en la actualidad y obtener una cobertura similar [28].

1.7.4 Numero de portadoras

El estándar DVB-T permite transmitir las señales en dos diferentes modos o número de portadoras, el primer modo es el "2k" en el cual la señal OFDM tiene 1705 portadoras ortogonales entre si y el modo "8k" donde la señal OFDM tiene 6817 portadoras. No todas las portadoras trasmitidas son activas para datos, solo 1512 son activas en el modo 2k y 6048 para el modo 8k, las demás portadoras son utilizadas para sincronización y señalización [27] y [28].

Cuando se configura el trasmisor en modo 8K, se puede utilizar tanto en la implementación de redes SFN de extensiones geográficas grandes, medianas y pequeñas; así mismo, el modo 8k proporciona una tolerancia aceptable al efecto Doppler permitiendo la recepción en movilidad que en la teoría puede pueden llegar hasta los 224km/h[10] [28].

La configuración de los transmisores en el modo 2k es más adecuada para la implementación de redes SFN con extensiones geográficas pequeñas, este modo presenta una mayor tolerancia al efecto Doppler permitiendo la recepción en movilidad a velocidades extremadamente altas que en teoría pueden llegar hasta los 481km/h[11][28].

1.7.5 Intervalo de guarda

El intervalo de guarda esta dado en función del periodo del símbolo, donde el periodo de símbolo corresponde al tiempo total de duración de un símbolo; y a su vez el símbolo se divide en dos partes: una parte corresponde al tiempo del intervalo de guarda y la otra parte al símbolo como tal. Para

[10] Velocidad calculada a una frecuencia de 470MHz y con una configuración del Tx en Modo 8k, QPSK y FEC=1/2 con una tasa de bit de 4.5Mbps.
[11] Velocidad calculada a una frecuencia de 470MHz y con una configuración del Tx en Modo 2k, QPSK y FEC=1/2 con una tasa de bit de 3.7Mbps.

DVB-T se establecen cuatro opciones de duración de intervalo de guarda (¼, 1/8, 1/16 y 1/32). El valor en tiempo del intervalo de guarda se calcula multiplicando la duración de la parte activa del símbolo (1194,6μs para el modo 8K y 298,6μs para el modo 2K) por el valor del intervalo de guarda. En la siguiente tabla (Tabla 1-5) se muestra el valor del intervalo de guarda para los dos modos (2k y 8k) de FFT [27] y [28].

Tabla 1-5 Duración específica del Intervalo de guarda para 6MHz [27]

Mode	**8K mode**				**2K mode**			
Guard interval Δ / T_U	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Duration of symbol part T_U	8 192 × T *1 194,667 μs*				2 048 × T *298,667 μs*			
Duration of guard interval Δ	2 048 × T *298,667μs*	1 024 × T *149,333 μs*	512 × T *74,667 μs*	256 × T *37,333 μs*	512 × T *74,667 μs*	256 × T *37,333 μs*	128 × T *18,667 μs*	64 × T *9,333 μs*
Symbol duration $T_S = \Delta + T_U$	10 240 × T *1 493,3 μs*	9 216 × T *1 344 μs*	8 704 × T *1 269,3 μs*	8 448 × T *1 232 μs*	2 560 × T *373,3 μs*	2 304 × T *336 μs*	2 176 × T *317,3 μs*	2 112 × T *308 μs*
NOTE: Values in italics are approximate values.								

Al incluir el uso de intervalo de guarda en el símbolo se incorporar una inmunidad en los retardos y ecos de la señal debido a la multitrayectoria en la propagación, la cual hace que la señal arribe al receptor en tiempos diferentes, también, permite que las señales provenientes de otros trasmisores que emiten en la misma frecuencia no se interfieran, permitiendo crear redes de frecuencia única (SFN). La distancia máxima entre transmisores para una red SFN está determinada por el intervalo de guarda seleccionado y el número de portadoras, teniendo una distancia máxima de separación entre transmisores de 89.5km para la configuración de 8k e intervalo de guarda de 1/4. Las distancias entre transmisores para las demás configuración se muestran en la siguiente tabla (Tabla 1-6) [27] y [28].

Tabla 1-6 Distancia de separación máxima entre Tx para una red SFN [51]

Distancia Máxima Entre Transmisores	**Modo**	
Intervalo de Guarda	**2k**	**8k**
1/4	22.4km	89.5km
1/8	11.2km	44.8km
1/16	5.6km	22.4km
1/32	2.8km	11.2km

1.7.6 Corrección de errores (FEC[12])

La técnica de corrección de errores "Forward Error Correction" (FEC) se utiliza para asegurar que si existe una pérdida de datos durante la trasmisión el receptor pueda reconstruir la información. La técnica de corrección FEC es ampliamente utilizado en sistemas de televisión digital para la transmisión confiable de audio, vídeo y datos [21] y [27].

El estándar DVB-T para la técnica de corrección FEC utiliza el algoritmo Reed-Solomon, el nivel de robustez de la corrección se puede configurar a través de cinco diferentes opciones del parámetro "Code Rate" que son: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 y 7/8. Siendo 1/2 la opción que presenta mayor robustez frente a los errores presentes en la trama de datos, pero se disminuye considerablemente la tasa de bit de salida del trasmisor [21] y [27].

La corrección de errores FEC tiene como objetivos [21]:

- Habilitar al receptor para poder detectar y corregir automáticamente los errores en la transmisión, sin necesidad de solicitar la retransmisión.
- Adicionar información redundante a los datos trasmitidos.
- Manipulación de los datos para reducir la susceptibilidad a los deferentes tipos de ruido presentes en el medio de trasmisión.
- Optimización del ancho de banda disponible.

1.7.7 Condiciones de recepción

En las áreas de cobertura de recepción de señales de televisión digital terrestre se presenta una rápida transición entre una recepción casi perfecta a no tener recepción en absoluto. Lo cual hace más difícil poder definir las áreas que son cubiertas y cuáles no. También, debido a esta rápida transición trae consecuencias en el diseño de la red cuando se tiene como objetivo cubrir totalmente un área pequeña, ya que generalmente es necesario aumentar considerablemente la potencia del trasmisor o colocar trasmisores complementarios para cubrir las pequeñas áreas sin cobertura [28].

En los reportes técnicos de la ETSI se define diferentes tipos de recepción, los cuales tiene asociados diferentes características, principalmente se considera la recepción Fija, Portable y Móvil.

---

[12] Forward error correction

La recepción Fija se describe como la recepción de la señal proveniente del trasmisor utilizando una antena direccional ubicada en el techo, para el cálculo de intensidad de campo se considera que la antena está ubicada a 10m de altura sobre el nivel del terreno [28].

Para la recepción Portable se definen dos tipos, la recepción Portable Clase A (Outdoor) en la cual el receptor posee una antena incorporada al dispositivo y está ubicado al aire libre a una altura de 1.5m sobre el nivel del terreno. Y la recepción Portable Clase B (Indoor), donde el receptor posee una antena incorporada al dispositivo y está ubicado en el interior de los edificios a una altura no inferior de 1.5m sobre el nivel de la habitación, en este tipo de recepción se presentan variaciones significativas en la recepción dependiendo del número de piso, construcción del edificio, en entre otras. Este tipo de recepción es común en áreas urbanas densas donde la gente vive en torres de apartamentos, por lo general se presenta mejor recepción en los pisos más altos. Para los dos tipos de recepción antes descritos se asume que el receptor no se mueve de su sitio durante la recepción de la señal, ni que objetos de grandes tamaños se mueven cerca a la ubicación del receptor [28].

La recepción Móvil es definida como la recepción de una señal por un receptor que está en movimiento, cuya antena está situada a una altura no inferior de 1,5m sobre el nivel del suelo. El término aplica para las velocidades de movimiento de una persona que va caminando, un automóvil, trenes de alta velocidad, autobuses y otros tipos de trasporte que tengan una velocidad asociada [31].

1.7.8 Área de cobertura

Es el área a la cual un trasmisor o grupo de trasmisores logran dar servicio teniendo en cuenta alguno de los modos de recepción (Fijo, Portable o Móvil). Para el análisis se puede considerar un área de cobertura pequeña que se define como una superficie de 100m x 100m, cuando se hace referencia a una cobertura buena, se refiere al hecho que al menos el 95% de los lugares dentro de esta área están cubiertos y una cobertura aceptable indica que al menos el 70% de los lugares dentro de esta área están cubiertos [28].

1.7.9 Umbral de recepción

Es el nivel de señal mínima que necesita un receptor para poder decodificar una señal, este valor puede expresarse en intensidad de campo (dBμV/m) o potencia (dBm), aunque generalmente se trabaja en términos de intensidad de campo. El umbral de recepción para los receptores de TDT bajo el estándar DVB-T se encuentra definidos en el reporte técnico ETSI 101 190, sin embargo, los

valores presentes en las tablas de dicho documento se encuentran referidos a un ancho de banda del canal de 8MHz, por lo cual es necesario realizar el cálculo para ajustar dichos valores a un ancho de banda de 6MHz, que es el utilizado en Colombia [28].

El umbral de recepción varía dependiendo el entorno de recepción (Fijo Outdoor, Portable Outdoor, Portable Indoor o Móvil), la banda de frecuencias (Banda I, II, III, IV o V) y la configuración seleccionada en el trasmisor (Modulación, FEC e Intervalo de Guarda) [28] y [31]. Para calcular el valor de umbral de recepción, con base en [28] y [31] se realiza el siguiente procedimiento:

1. Se calcula el valor de la potencia de ruido de entrada en el receptor P_n:

$$P_n = F + 10\log\left(K * T_o * B\right) \tag{1.21}$$

Donde:

F = Figura de ruido del receptor = 7dB

K= Constante de Boltzmann = $1{,}38\text{x}10^{-23}$ Ws/K

T_0= Temperatura absoluta = 290ºK

B = Ancho de Banda = 6MHz

2. Se selecciona el valor de C/N requerido dependiendo del tipo de modulación, FEC e Intervalo de guarda.
3. Se calcula el valor del mínimo nivel de señal en el receptor P_{Smin}:

$$P_{Smin} = P_n + C/N \tag{1.22}$$

4. Se determina la Banda de frecuencias (Banda I, II, III, IV o IV), dependiendo el valor de la banda seleccionada cambian los valores de perdida en los feeder (L_f en dB), Ganancia de la antena (Ga en dB) y Apertura de la antena (Aa en dBm^2).
5. Luego se calcula el valor de la Mínima Densidad de Flujo de Potencia Φmin (dBW/m^2):

$$\emptyset_{min} = P_{Smin} - Aa + L_f \quad \text{Para Recepción Fija} \tag{1.23}$$

$$\emptyset_{min} = P_{Smin} - Aa \quad \text{Para Recepción Portable y Móvil} \tag{1.24}$$

6. A continuación se calcula el valor de la Mínima Densidad de Flujo de Potencia Media Φmed (dBW/m^2):

$$\emptyset_{med} = \emptyset_{min} + P_{mmm} + C_I \quad \text{Para Recepción Fija} \tag{1.25}$$

$$\emptyset_{med} = \emptyset_{min} + P_{mmm} + C_I + L_{hhhhhhh} \quad \text{Para Recepción Portable Clase A} \tag{1.26}$$

$$\emptyset_{med} = \emptyset_{min} + P_{mmm} + C_I + L_{hhhhhhh} + L_b \quad \text{Para Recepción Portable Clase B} \tag{1.27}$$

$$\emptyset_{med} = \emptyset_{min} + P_{mmm} + C_I + L_{hhhhhhh} + L_v \quad \text{Para Recepción Móvil} \tag{1.28}$$

Donde:

Pmmm: Tolerancia por ruido hecho por el hombre

C_l: Factor de corrección de localización

L_h : Perdidas por altura

L_b: Perdidas por penetración en edificios

L_v: perdidas introducidas por el vehículo

7. Por último calculamos el valor de intensidad de campo eléctrico (dBμV/m):

$$E_{med} = \emptyset_{med} + 120 + 10 * \log_{10}(120\pi) \quad (1.29)$$

$$E_{med} = \emptyset_{med} + 145{,}8 \quad (1.30)$$

1.7.10 Sistema Radiante

Se conoce como sistema radiante al conjunto de antenas, latiguillos, distribuidores y líneas de trasmisión que se utiliza para radiodifundir una señal. En general se usan varios paneles de antenas colocadas en hileras verticales formando "Caras", que están orientadas en función de la ubicación de los objetivos de cobertura [32].

1.7.10.1 Elemento unitario

En Radiodifusión de señales TDT habitualmente se utilizan antenas tipo panel, es importante conocer como mínimo las características del elemento unitario mostradas en la Tabla 1-7.

Tabla 1-7 Características elemento unitario.

Modelo	Según Fabricante	
Rango de frecuencias	En MHz	
Ganancia Pico	En dB (ref. dipolo de ʎ/2)	
Ancho de haz de 3 dB	Plano E:	Plano H:
Polarización	Horizontal o Vertical	
Patrón de radiación	En Plano E y H	
Impedancia	En Ω	
VSWR	Valor Máximo	
Dimensiones	W x H x D mm	

1.7.10.2 Patrón de Radiación Conjunto

Es la representación gráfica en 2D o 3D de las características de radiación del conjunto de antenas. Esta grafica representa la forma como es radiada la energía por el arreglo de antenas, cuando la representación del diagrama es en 3D se da en coordenadas esféricas con centro en la antena, en algunos casos, no es necesario obtener el patrón de radiación 3D y es suficiente solo con la representación de dos cortes del diagrama que representan el comportamiento del arreglo en los dos planos principales, llamados plano E y plano H. dichos gráficos pueden presentarse tanto en coordenadas Polares como en cartesianas [32].

Los arreglos de antenas permiten generar un patrón de radiación que se ajuste a las necesidades de la planificación de una red, ya que permiten mejorar la directividad y aumentar la ganancia. Los principalmente parámetros que permiten modificar el patrón de radiación resultante del arreglo son: Separación tanto vertical o horizontal entre antenas, fase y amplitud de excitación de cada elemento, numero de antenas, acimut y tilt de cada elemento [32].

1.8 Receptores TDT

Con la llega de la Televisión Digital Terrestre a Colombia y con el posterior apagón analógico, paulatinamente se hará necesario el cambio de nuestros televisores actuales o en su defecto adquirir un caja receptora o STB (Set Top Box) para poder disfrutar de todos los beneficios asociados a la TDT [1], [2] y [15].

Existen diferentes aspectos y características técnicas que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar un nuevo televisor con receptor de TDT en estándar DVB-T incorporado o las cajas receptoras STB, dependiendo de nuestras necesidades particulares, como por ejemplo: si solo queremos recibir la señal de televisión o por el contrario queremos aprovechar al máximo sus ventajas recibiendo y decodificando los datos de interactividad y utilizar algunas opciones adicionales como la grabación de programas o reproducción de un DVD en el mismo STB [1], [2] y [15].

En el mercado internacional se encuentra gran variedad de dispositivos receptores, debido a esta gran diversidad se han establecidos lineamientos a nivel mundial (Europa, Países Nórdicos) y local que se describen en la siguiente sección.

1.8.1 Normatividad a Nivel Mundial

1.8.1.1 Europa

Existen varias especificaciones para las receptores, sin embargo las más relevantes se encuentran descritas en la Especificaciones ETSI, Blue Book del foro DVB y documentos elaborados por cada uno de los países, como es el caso de España con las "Especificación de receptores de televisión digital terrestre para el mercado español[13]" del Foro Técnico de la Televisión Digital. Estos escritos de especificaciones técnicas los cuales describen las características que deben tener los receptores, sirven como referencia a los diferentes fabricantes de receptores para entrar al mercado.

1.8.1.2 Especificaciones NorDig

Las NorDig[14] son un conjunto de especificaciones comunes sobre televisión digital que se utilizan en los países Nórdicos (Dinamarca, Finlandia, Islandia, Noruega y Suecia) y Eire. Dentro del documento de especificaciones "NorDig Unified Requirements - Integrated Receiver Decoders for use in cable, satellite, terrestrial and IP-based networks" versión 2.2.1, en la sección 3.4 "Terrestrial Tuner and Demodulator" se describen las principales características de los receptores de televisión digital terrestre, sin embargo, es importante tener en cuenta que las características están referidas a un ancho de banda del canal de 7MHz y 8MHz.

1.8.2 Normatividad en Colombia

En Colombia la Comisión Nacional de Televisión es el ente encargado de este tema, por lo cual el 08 de Septiembre de 2010 publicó en su página web el documento "REQUISITOS TÉCNICOS MINIMOS DE LOS RECEPTORES DE TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE EN COLOMBIA" donde se establecen los requisitos mínimos que garanticen la compatibilidad de los Televisores y STB con la señal de radiodifusión emitida en Colombia. Adicionalmente, deja abierta la posibilidad de incorporar aplicaciones, especificaciones o dispositivos adicionales a los mínimos establecidos [52].

---

[13] Disponible en: http://www.televisiondigital.es/Terrestre/ForoTecnico/receptor-tdt/Documents/ReceptoresTDT.pdf

[14] http://www.nordig.org/

1.8.2.1 Normatividad Televisores TDT

Las características técnicas descritas a continuación fueron tomadas directamente de [52]

Para los televisores con receptor integrado DVB-T se describen las siguientes características:

- ***OBLIGATORIAS:***
  - *Sintonizador de televisión digital terrestre estándar DVB-T.*
  - *Canalización de 6 MHz.*
  - *Sistema de video digital MPEG-4 (Parte 10) / H.264.*
  - *Sintonizador de televisión analógica estándar NTSC-M.*
  - *Bandas de operación (Para sistemas analógicos y Digital).*
    - *VHF: Banda I,II y III*
    - *UHF: Banda IV y V*
  - *Video: El equipo debe tener la capacidad de recibir las señales con las diferentes resoluciones emitidas por los operadores de televisión digital (se incluye la resolución 1080i, 30fps, 60Hz) y desplegarlas con la resolución propia de la pantalla.*
  - *Ajustable a la pantalla propia del televisor las relaciones de aspecto 4:3 y 16:9.*
  - *Audio:*
    - *Capacidad de decodificación MPEG-1 y/o MPEG-2 Backward Compatible layer I y II en los siguientes modos:*
      - *ISO/IEC 11172-3(9) Single Chanel*
      - *ISO/IEC 11172-3(9) joint stereo*
      - *ISO/IEC 11172-3(9) stereo*
    - *Capacidad de realizar Downmix a par estéreo de audio en formato AC-3.*
  - *Soportar Guía Electrónica de programación (EPG) (ETSI TR 101 211 y EN 300 468).*
  - *Entrada de RF: Conector tipo F de 75Ω.*
  - *Función de Subtítulos: ETSI EN 300 743.*
  - *Capacidad de actualización del sistema OAD (On Air Download): DVB-SSU (ETSI TS 102 006).*
  - *Alimentación: 120V a 60Hz.*

- ***OPCIONALES:***
  - *Commun Interface (Acceso Condicional).*
  - *Decodificación de Audio: Enhanced AC-3, MPEG-4 ACC, MPEG-4 HE-ACC.*
  - *Pass-Through para el formato de audio AC-3.*

- *Interactividad: MHP "Multimedia Home Plataform".*

Al igual que para los televisores en este mismo documento describe los parámetros obligatorios y opcionales para las cajas receptores o STB.

- ***OBLIGATORIOS:***
  - *Sintonizador de televisión digital terrestre estándar DVB-T.*
  - *Canalización de 6 MHz.*
  - *Sistema de video digital MPEG-4 (Parte 10) / H.264.*
  - *Sintonizador de televisión analógica estándar NTSC-M.*
  - *Bandas de operación (Para sistemas analógicos y Digital).*
    - *VHF: Banda I,II y III*
    - *UHF: Banda IV y V*
  - *Video: El equipo debe tener la capacidad de recibir las señales con las diferentes resoluciones emitidas por los operadores de televisión digital (se incluye la resolución 1080i, 30fps, 60Hz) y entregar en su salida como mínimo una señal de video de resolución 480i, 30fps, 60Hz.*
  - *Audio:*
    - *Capacidad de decodificación MPEG-1 y/o MPEG-2 Backward Compatible layer I y II en los siguientes modos:*
      - *ISO/IEC 11172-3(9) Single Chanel*
      - *ISO/IEC 11172-3(9) joint stereo*
      - *ISO/IEC 11172-3(9) stereo*
    - *Capacidad de realizar Downmix a par estéreo de audio en formato AC-3.*
  - *Soportar Guía Electrónica de programación (EPG) (ETSI TR 101 211 y EN 300 468).*
  - *Display o la función OSD (On Screen Display) donde se indique el canal seleccionado.*
  - *Búsqueda de canal automática.*
  - *Entrada de RF: Conector tipo F de 75Ω.*
  - *Salidas:*
    - *Conector F de 75Ω transmodulada NTSC-M en Canal 3 o 4.*
    - *RF Loop-Through.*
    - *Video Compuesto (CVBS).*
  - *Función de Subtítulos: ETSI EN 300 743.*

- *Capacidad de actualización del sistema OAD (On Air Download): DVB-SSU (ETSI TS 102 006).*
- *Alimentación: 120V a 60Hz.*

- ***OPCIONALES:***
  - *Salidas: Video por componentes (YPbPr), HDMI, S-Video.*
  - *Commun Interface (Acceso Condicional).*
  - *Decodificación de Audio: Enhanced AC-3, MPEG-4 ACC, MPEG-4 HE-ACC.*
  - *Pass-Through para el formato de audio AC-3*
  - *Salida de video en resolución: 720p, 60fps, 60Hz y/o 1080i, 30fps, 60Hz.*
  - *Interactividad: MHP "Multimedia Home Plataform"*

1.8.3 Receptores en el mercado

Actualmente, existen diversos fabricantes de televisores y cajas receptoras de TDT en el mercado internacional como: Sony, Toshiba, Panasonic, LG, Samsung, etc; con diversos diseños, características técnicas y precios.

Debido al alto grado de penetración del estándar DVB-T a nivel mundial, se encuentran gran diversidad en equipos receptores, sin embargo, la mayoría de ellos no se pueden utilizar en el país, ya que principalmente están diseñados para la recepción de señales con ancho de banda de 7MHz y 8MHz y con codificación en formato MPEG-2.

1.8.3.1 Receptores DVB-T Móvil

Actualmente existen en el mercado receptores especializados para la recepción de televisión en automóviles, estos implementas técnicas de mejora como la diversidad de antenas, con la cual se reduce la probabilidad de que todas las antenas experimenten un desvanecimiento al mismo tiempo, también se obtienen mejoras como la reducción del umbral de recepción y el aumento de la máxima velocidad permitida por el receptor [25].

1.8.3.2 Receptores disponibles en Colombia

Dado que en el país hasta ahora comienzan las primeras emisiones de TDT (1er Trimestre de 2011), no se encuentran aun en el mercado gran oferta de STB o Televisores con receptor incorporado DVB-T. Adicionalmente, es necesario que los fabricantes realicen receptores para el caso especial de Colombia (Ancho de Banda de 6MHz y codificación MPEG-4), lo cual retrasa aun más la llegada de

estos dispositivos. Sin embargo, en algunas páginas de ventas de productos por internet ya se encuentran publicaciones de estos receptores.

1.9 Resumen receptores TDT

En la Tabla 1-8 se presenta un resumen de los televisores y cajas receptoras que se encuentran disponibles en el mercado mundial y algunos pocos en el nacional, también se describen sus principales características técnicas y costo del producto. Las características y precios mencionados en la siguiente tabla corresponden a datos obtenidos de las páginas de internet: http://www.mercadolibre.com, www.amazon.com, http://www.ebay.co, http://www.alibaba.com

Tabla 1-8 Receptores TDT con estándar DVB-T.

RECEPTORES TDT BAJO EL ESTANDAR DVB-T											
Tipo	Fabricante	Modelo	Características Técnicas								Precio USD
			Básicas						Avanzadas		
			DVB-T	BW de 6MHz	Video MPEG-4	Banda de Operación		Voltaje de Alimentación	MHP	Antenas en Diversidad	
						VHF	UHF				
TV	Samsung	TV LED 40" Full HD	SI	SI	SI	SI	SI	120V@60Hz	NO	NO	$598
	Sony	KDL-40EX607	SI	SI	ND	SI	SI	120V@60Hz	NO	NO	$700
	Sony	KDL-40BX427	SI	SI	ND	SI	SI	120V@60Hz	NO	NO	$500
	Lg	TV 32LK330	SI	SI	ND	SI	SI	120V@60Hz	NO	NO	$380
	Panasonic	TV HD TX-L32X10Y	SI	SI	SI	SI	SI	120V@60Hz	NO	NO	$630
	Philips	TV 40HFL7382A	SI	SI	SI	SI	SI	120V@60Hz	NO	NO	$670
	Sanyo	TV CE32LDY1-C	SI	SI	ND	SI	SI	120V@60Hz	NO	NO	$500
STB para TV	Televés	DTR 7287	SI	ND	NO	SI	SI	ND	NO	NO	$42
	Sunstech	DTB-2500	SI	ND	NO	SI	SI	220V	NO	NO	$40
	Philips	DTR 220	SI	ND	NO	SI	SI	220v	NO	NO	$55
	Sanyo	TU-X700	SI	ND	NO	SI	SI	220V	NO	NO	$51
	Siemens	M270	SI	ND	NO	SI	SI	220V	NO	NO	$60
	Woxter	1600 HD	SI	ND	SI	SI	SI	ND	NO	NO	$52
	Siemens	HD600 T	SI	ND	SI	SI	SI	ND	NO	NO	$95
	Scott	XDT1040 HDR	SI	ND	SI	SI	SI	ND	NO	NO	$52
	Sunstech	DTB-4500 HD	SI	ND	SI	SI	SI	ND	NO	NO	$45
	Astrell	11126 TDT	SI	ND	SI	SI	SI	ND	NO	NO	$64
	Ideal technology	T TR30	SI	SI	SI	SI	SI	120V@60Hz	NO	NO	$70
	Yakumo	DVB-T Receiver	SI	SI	SI	SI	SI	220V	NO	NO	$65
	Skardin	ENGEL TDT 6000I	SI	ND	SI	SI	SI	ND	SI	NO	$110
	Handan	INVES TDT MHP-2300M	SI	ND	SI	SI	SI	ND	SI	NO	$78
	Alticast	HUMAX DTV3808	SI	ND	NO	SI	SI	ND	SI	NO	$70
	Tecatel	TECATEL MHP	SI	ND	SI	SI	SI	ND	SI	NO	$72
STB para PC	Pctv	DVB-T 73E NANO	SI	ND	SI	SI	SI	5V DC	NO	NO	$39
	Avermedia	61A867DV03AL	SI	ND	SI	SI	SI	5V DC	NO	NO	$45
	Hauppauge	WinTV-Duet	SI	ND	SI	SI	SI	5V DC	NO	NO	$47

RECEPTORES TDT BAJO EL ESTANDAR DVB-T											
Tipo	Fabricante	Modelo	Características Técnicas								Precio USD
			Básicas						Avanzadas		
			DVB-T	BW de 6MHz	Video MPEG-4	Banda de Operación		Voltaje de Alimentación	MHP	Antenas en Diversidad	
						VHF	UHF				
	Genius	DVBT-1000	SI	ND	SI	SI	SI	5V DC	NO	NO	$34
	Trekstor	DVB-T Stick Terres	SI	ND	NO	SI	SI	5V DC	NO	NO	$25
	Terratec	Cinergy T Stick Video	SI	ND	SI	SI	SI	5V DC	NO	NO	$55
	Conceptronic	CTVDIGUSB2	SI	ND	ND	SI	SI	5V DC	NO	NO	$20
	Usb dvb-t	TV Tuner Receiver	SI	ND	ND	SI	SI	5V DC	NO	NO	$10
STB Movil	Car mobile dvb-t	EB-DTR03 Car Mobil	SI	SI	SI	SI	SI	12 - 24VDC	NO	SI	$133
	Dvb-t receiver	DVB-T Anti-doppler	SI	SI	SI	SI	SI	12 -24 VDC	NO	SI	$120
	Car HD dvb-t	DVB-T2010HD Car	SI	SI	SI	SI	SI	12 VDC	NO	SI	$125
	Queenly tech	DTR-1203 Mobile SD	SI	ND	SI	SI	SI	12 -24 VDC	NO	SI	$110
	Vcan	DVB-2009HD	SI	SI	SI	SI	SI	12 VDC	NO	SI	$120
	Farview	HD-333	SI	SI	SI	SI	SI	12 VDC	NO	SI	$122
	Digtail tv car box	XZ-DTCAR-162	SI	SI	SI	SI	SI	12 VDC	NO	NO	$52