

**MODELO DE TRÁFICO PARA TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE BASADO
EN UN MODELO COMPLEJO**

DIEGO ENRIQUE BALAGUERA CAMARGO

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA SAN MARTÍN
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ
2011 II**

**MODELO DE TRÁFICO PARA TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE BASADO
EN UN MODELO COMPLEJO**

**DIEGO ENRIQUE BALAGUERA CAMARGO
CÓDIGO 052005
DB052005@INGENIERIA.SANMARTIN.EDU.CO**

MONOGRAFÍA

**ASESOR TÉCNICO
JOAQUÍN FERNANDO SÁNCHEZ CIFUENTES
MODELAMIENTO DE TRÁFICO**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA SAN MARTÍN
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ
2011 II**

Nota de aceptación

Joaquín Fernando Sánchez Cifuentes
Asesor

Jorge Alberto Arévalo Aldana
Jurado 1

Antonio Ricardo Gonzales
Jurado 2

Bogotá (Diciembre 13 de 2011)

Dedico este trabajo a Dios sobre todas las cosas, ya que gracias a él es quien me ha dado la fortaleza y sabiduría necesaria para afrontar todas las actividades que realizo en mi vida.

A mis padres, hermanas y novia que me han apoyado en todo este proceso.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la fortaleza y sabiduría y por brindarme la oportunidad de poder culminar mi carrera.

A mis padres, gracias por su apoyo incondicional.

A mi novia por su comprensión y colaboración.

A la Ingeniera Nardely Mesa, quien me dio fortaleza y apoyo para afrontar todo este proceso.

Al Ing. Joaquín Sánchez, quien me apoyo desde el principio en este proceso con sus conocimientos y consejos que me permitieron afrontar y terminar esta etapa.

A mis amigos Juan Manuel Muegues y Jaime Andrés Romero, por todo su interés en el desarrollo de la investigación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. PROBLEMA	17
2. JUSTIFICACIÓN	18
3. OBJETIVOS	19
3.1 OBJETIVO GENERAL	19
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4. MARCO REFERENCIAL	20
4.1 MARCO CONCEPTUAL	20
4.1.1 Modelos Matemáticos	20
4.1.2 Complejidad	20
4.1.3 Televisión Digital Terrestre (TDT)	20
4.1.4 Tráfico	21
4.2 MARCO TEÓRICO	21
4.2.1 Televisión Digital Terrestre (TDT)	21
4.2.2 Formatos de TV Digital	24
4.2.3 Interactividad	28
4.2.4 Emisión de la señal TDT	29
4.2.5 Antenas	30

4.2.6	Elementos que conforman la señal.	32
4.2.7	Recepción de la señal.	34
4.2.8	MPEG-2 para DVB-T [MPEG-2 "Flujo de Transporte"]	35
4.2.9	Características básicas de MPEG-2 TS:	37
4.2.10	Compresión	37
4.2.11	Unidades de presentación de Video en MPEG-2	38
4.2.12	Unidades de presentación de Audio	39
4.2.13	Unidades de acceso codificación MPEG-2	40
4.2.14	Modelos Matemáticos	42
4.3	ANTECEDENTES	47
4.3.1	Televisión Digital terrestre	47
4.3.2	Sistemas Complejos	50
4.4	ESTADO DEL ARTE	51
4.4.1	Televisión Digital Terrestre en la Unión Europea	51
4.4.2	La Televisión Digital Terrestre, TDT en Latinoamérica	51
4.4.3	El proyecto de la Televisión Digital Terrestre, TDT en Colombia	52
5.	LIMITACIONES Y ALCANCES	53
5.1	LIMITACIONES	53
5.2	ALCANCES	53
6.	DISEÑO METODOLÓGICO	54

6.1	METODOLOGÍA	54
6.2	FASES Y/O PROCEDIMIENTOS	54
6.3	Instrumentos	54
7.	DESARROLLO	56
7.1	Teoría del Caos (coe)	57
7.1.1	Cálculo de la teoría del caos	58
7.1.2	Limitaciones	58
7.2	Criticidad auto organizada (SOC)	58
7.2.1	Calculo SOC	59
7.2.2	Limitaciones	59
7.3	TOLERANCIA ALTAMENTE OPTIMIZADA (HOT)	60
7.3.1	Modelos de percolación	60
7.3.2	Generalizado de Codificación	61
7.4	El simulador ns-2	62
7.4.1	Estructura de NS-2	63
7.4.2	Redes móviles	64
7.4.3	Nodos Inalámbricos	64
7.4.4	Transmisión de paquetes	65
7.4.5	Recepción de paquetes	66
7.4.6	Metodología de la simulación	66

7.4.7	Generador de tráfico	67
7.4.8	Configuración de nodos	68
7.4.9	Archivos de traza	69
7.4.10	Herramienta Network Animator (nam)	71
7.5	INTERPRETACIÓN DE LA SIMULACIÓN	73
7.5.1	Tiempo de salida de los paquetes	73
7.5.2	Distribución Exponencial	74
7.5.3	Media	75
7.5.4	Coeficiente de correlación	75
7.6	COMPARACIÓN CON DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL	78
7.7	MODELO DE TRÁFICO ON-OFF	79
7.8	MODELO DE TRÁFICO MMPP	80
7.9	CARACTERIZACIÓN DETERMINISTA DEL TRÁFICO	81
7.10	CARACTERIZACIÓN DEL TRÁFICO	81
7.11	MODELO COMPLEJO	82
7.12	GENERACIÓN DEL MODELO COMPLEJO	83
8.	PRUEBAS Y RESULTADOS	84
8.1	PRUEBA 1	84
8.2	PRUEBA 2	85
8.3	PRUEBA 3	87

8.4	PRUEBA 4	88
8.5	ANÁLISIS DEL MODELO OBTENIDO	89
9.	CONCLUSIONES	91
10.	RECOMENDACIONES	93
	GLOSARIO	94
	BIBLIOGRAFÍA	97

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Diferencias de los estándares ATSC y DVB-T:	26
Tabla 2. Características de SOC y HOT	62
Tabla 3. Explicación de los campos de las trazas de NS-2:	70
Tabla 4. Resultado de la Correlación	77

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Ilustración representativa del progreso al mundo digital	23
Figura 2 Receptor de TDT para televisores Analógicos.	24
Figura 3 Distribución Mundial por estándares de TDT.	24
Figura 4 Diagrama General de DVB-T	27
Figura 5 Modelo de referencia para la interactividad en TDT	29
Figura 6 Concepto de COFDM	30
Figura 7 Opciones de Transmisión	31
Figura 8 Antenas y Patrones de Radiación (horizontal)	31
Figura 9 Multiplexación del flujo de transporte	32
Figura 10 Demultiplexación de la señal en el receptor	33
Figura 11 Recepción de la Señal	34
Figura 12 Flujo de transporte MPEG-2	36
Figura 13 Disposición de las tramas de audio AES/EBU	39
Figura 14 Flujo de señal comprimida	40
Figura 15 Antenas para recepción de TV digital por satélite	49
Figura 16 Esquema de un nodo inalámbrico en ns-2.	64
Figura 17 Resumen de la Simulación	67
Figura 18 Herramienta nam.	72
Figura 19 Herramienta nam.	72
Figura 20 Gráfica Eventos VS Tiempo	73
Figura 21 Gráfica Eventos vs Tiempo, Tamaño x10 – 4	74
Figura 22 Distribución de tiempo de salida de los paquetes	74
Figura 23 Comparación de Gráficas	79
Figura 24 Modelo ON-OFF del tráfico	79
Figura 25 Modelo de tráfico MMPP	80
Figura 26 Comportamiento de los paquetes enviados	84
Figura 27 Resultado Prueba 1	85
Figura 28 Resultado Prueba 2	86

Figura 29 Resultado Prueba 3

88

Figura 30 Resultado Prueba 4

89

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Independencia Lineal	42
Ecuación 2. Filtro ARMA	44
Ecuación 3. Relación Entrada-Salida Filtro todo-polos	45
Ecuación 4. Relación Entrada-Salida Filtro todo-ceros	45
Ecuación 5. Dependencia de Corto Plazo	46
Ecuación 6. Ecuación COE	58
Ecuación 7. Ecuación SOC	59
Ecuación 8. Propiedad de Potencia	59
Ecuación 9. Distribución Exponencial	75
Ecuación 10. Ecuación Media	75
Ecuación 11. Distribución Exponencial Reemplazada	75
Ecuación 12. Coeficiente de Correlación	76
Ecuación 13. Incrementos Estacionarios	77
Ecuación 14. Deducción Autocorrelación	77
Ecuación 15. Tercera Condición Autocorrelación	77
Ecuación 16. Consideración de la Correlación	78
Ecuación 17. Función de Distribución del Tráfico	81
Ecuación 18. Función de Tráfico Restringido	81
Ecuación 19. Ecuación General Modelo HOT	82
Ecuación 20. Ecuación para hallar r_i .	82
Ecuación 21. Modelo Complejo para TDT	83

RESUMEN

El siguiente trabajo describe las principales características de la transmisión de Televisión Digital Terrestre, adaptando un modelo complejo que se acomode a dicha transmisión, y prediciendo que el comportamiento de la transmisión sea el más efectivo; se estudiaron tres modelos complejos, los cuales se compararon en cuanto a ventajas y desventajas de cada uno, escogiendo al modelo HOT (Tolerancia Altamente Optimizada) para realizar el estudio del comportamiento del tráfico de Televisión Digital Terrestre.

Luego de escoger el modelo complejo, se desarrolla una simulación en el programa Network Simulator 2 (NS-2), que consiste en describir cómo será el comportamiento de la antena transmisora de Televisión Digital Terrestre (TDT) hacia los usuarios finales; estos datos son almacenados en archivos que son llamados trazas, en los cuales se puede verificar si el nodo 0 o principal está transmitiendo paquetes de información y cual nodo recibe la transmisión del mismo, donde el tiempo entre transmisiones es la variable que determina el comportamiento de la comunicación. De allí se verifica el comportamiento de la transmisión, obteniendo una distribución Exponencial, a la cual se llegó luego de comparar y correlacionar con otra función Exponencial. También se obtienen datos relevantes como lo es la media, la autocorrelación, cantidad y porcentaje de pérdida de paquetes.

Por último al modelo complejo se le agregan los parámetros obtenidos de la simulación, dando como resultado un modelo complejo con parámetros de transmisión de la Televisión Digital Terrestre.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la transición de la televisión análoga a la digital, permite proveer un mayor número de canales, mejor calidad de imagen o imagen en alta definición (HDTV o High Definition TV) y a su vez, mejor calidad de sonido empleando diferentes sistemas como AC3 y el Dolby Digital, al igual que la interactividad. Con esto se trae mejoras a una tecnología como lo es la Televisión, pero todas estas mejoras también implican un aumento significativo en el tráfico que soporta la antena transmisora.

Existen diferentes tecnologías para transmitir la TDT, las más usadas hasta el momento son la ATSC (Norteamérica), ISDB-T (Japón) y DVB-T en Europa y Australia. En el resto del mundo, algunos países se han acogido a una de estas tecnologías, hay quienes aún no toman la decisión y otros han establecido sus propios estándares como China o han modificado uno de los mencionados como Brasil, que agregó algunos cambios a la norma Japonesa.

La Televisión digital cuenta con diversos modelos respecto al medio y el modo de transmisión, entre los que se cuenta: televisión digital por satélite, cable, terrestre y radiodifundida por suscripción. Para los mismos cada norma presenta sus consideraciones, por esto se pretende predecir cómo será el comportamiento de dicha red, por medio de un modelo complejo.

1. PROBLEMA

Los avances tecnológicos son de vital importancia para el desarrollo y evolución de los países. A través del tiempo estos avances van mejorando de forma creciente la calidad de vida de la humanidad (Guerrero, 2008), haciendo que sus actividades como la comunicación social, la interacción personal y el intercambio de información entre otras, sean más eficientes al incrementar la velocidad con la que se hacen estas determinadas labores. Pero como cualquier avance no está exento de sufrir errores como es la congestión de su infraestructura.

Uno de estos avances tecnológicos es el Sistema de Televisión Digital Terrestre, que hasta este momento está realizando su migración en Colombia y hacer como en muchos otros países el llamado “apagón analógico” (CNTV, 2008). Dado que el sistema de televisión digital terrestre brindará mejoras en todos los aspectos de la televisión actual como lo es en su imagen, el sonido y la interactividad, cabe decir también que este sistema va a trabajar en el sistema actual de transmisión analógica de televisión. Por tal motivo no hay investigaciones en Colombia que demuestren el buen funcionamiento de la transmisión de televisión digital terrestre soportado sobre el sistema de transmisión de televisión analógico.

En las últimas décadas el avance en la compresión y el estudio de los sistemas complejos no solo ha generado cambios importantes a nivel científico sino también a nivel filosófico. Comprender que la complejidad emerge espontáneamente de la dinámica de ciertos sistemas no es fácil y, más difícil aun, es la incorporación de estas expresiones fenomenológicas a la forma de pensar cuando se observa la complejidad que los rodea (Villalobos, 2009).

Otra circunstancia es la falta de información que tiene la gente acerca del funcionamiento de la Televisión Digital Terrestre en Colombia, tanto en su parte de modulación como en su implementación física. Reuniendo todos los motivos anteriores se puede generar la siguiente pregunta, ¿Cómo se comporta el tráfico de la red de televisión digital terrestre en la infraestructura de Colombia basándose en un modelo complejo?

2. JUSTIFICACIÓN

El principal motivo de la presente investigación es verificar el buen desempeño de la infraestructura de la televisión digital terrestre, para poder obtener y generar un nuevo modelo que pueda corregir errores en la transmisión, sin tener que hacer modificaciones en el hardware sino en el software de la modulación y multiplexación de la misma (DVB, 2011).

Al reformar el software no se tendría que implementar nuevas estructuras físicas como son antenas, repetidoras, u objetos que generen ondas de radiofrecuencia que se sabe son perjudiciales tanto para la salud de los seres vivos, como lo es para el medio ambiente.

Otro motivo es presentar a las personas una investigación que muestre como es el funcionamiento de la televisión digital terrestre en Colombia, sus diferencias en la forma en que se implementó en otros países, sus ventajas y desventajas, facilitando su comprensión y mostrando este avance tecnológico no solo como un avance más, sino como un paso que el país debe dar para que sus habitantes progresen y evolucionen como el resto del mundo.

Para obtener el nuevo modelo de tráfico, se utiliza como base un modelo complejo, debido que en la última década un gran número de sistemas complejos reales han sido estudiados bajo la perspectiva de que todas las redes tienden a poseer comportamiento complejo (Villalobos, 2009), donde este modelo ayuda a realizar de una forma más exacta el pronóstico del tráfico. El nuevo modelo debe incluir todas las variables posibles, y debe poder predecir cada resultado todo esto basado en la transmisión digital. Este nuevo modelo posee la ventaja de que puede ser reestructurado si es necesario, por tal motivo queda abierta la investigación para un estudio posterior.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Obtener un modelo de tráfico que caracterice una red de Televisión Digital Terrestre, aplicando para su desarrollo un modelo complejo.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Recopilar información y escoger el modelo complejo que mejor se acomode a la Transmisión de Televisión Digital Terrestre.

Simular una red de televisión digital que permita describir el comportamiento de la transmisión de datos, bajo la plataforma de NS-2.

Desarrollar el modelo de tráfico con base a los datos obtenidos de la interpretación de las trazas y la información acerca de modelos complejos.

Validar el modelo de tráfico comparando el comportamiento de la simulación de Televisión Digital Terrestre después de aplicar el modelo propuesto.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO CONCEPTUAL

4.1.1 Modelos Matemáticos

Los modelos matemáticos describen de una manera cercana determinados fenómenos del mundo exterior, expresándolos en lenguaje matemático. Éstos se consideran una herramienta muy poderosa de conocimiento, ya que su análisis de la realidad permite entender la complejidad de los objetos de estudio. La aplicación de la modelación matemática consiste en el reemplazo del objeto a modelar por su equivalente matemático (modelo matemático), que mediante algoritmos implementados en herramientas de programación, permite recrear los procesos del fenómeno a modelar. Dicho proceso en forma relativamente rápida y sin costos elevados posibilita estudiar sus propiedades de estado y pronosticar la evolución del mismo (Girón, 2008).

El esquema general de un modelo matemático determina un flujo de entrada, una estructura del modelo y una salida. Las entradas activan los flujos y la estructura contiene los operadores, los parámetros y las variables de estado que controlan el sistema, y a su vez determinan las salidas. En este sentido la solución de un modelo matemático requiere la definición de unas condiciones iniciales (entradas) y de frontera, las cuales determinen la operatividad de la estructura del modelo dentro de un esquema general, que permita obtener salidas lo más parecidas a la realidad (Girón, 2008).

Resumiendo, los modelos matemáticos son una descripción de todo o parte de un sistema, escrito en un lenguaje mejor definido o de mayor comprensión que más adelante podrá ser estudiado o analizado, con ventajas como su rápida implementación y bajos costos.

4.1.2 Complejidad

Es un sistema que está compuesto por varios sub-sistemas interconectados entre ellos, donde se conoce el funcionamiento de cada uno pero no se conoce como se relacionan entre sí para poder llegar a un objetivo en particular.

4.1.3 Televisión Digital Terrestre (TDT)

La TDT o Televisión Digital Terrestre consiste en enviar señales digitales de televisión usando como medio de transmisión ondas hercianas. El medio de transmisión, las ondas, no difiere del usado hasta ahora por la televisión

analógica, sin embargo enviar la señal de forma digital, unos y ceros, permite un mejor aprovechamiento del canal usado y así poder enviar más información, de mayor calidad y sin que se vea alterada (Comisión Nacional de Televisión, 2008).

El estándar utilizado en Colombia para la transmisión de TDT, al igual que en más de 110 países a lo largo del mundo, entre los que se encuentran todos los de la Unión Europea, es el DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial). Para poder recibir el TDT se debe:

- Saber si existe cobertura en nuestra zona, para ello se puede consultar la página: <http://www.tdt.rtvco.gov.co>
- Adaptar la antena del tejado de su comunidad añadiendo módulos amplificadores de señal que son distintos a los que se venían usando hasta la actualidad. Es posible también que si su instalación es muy vieja requiera cambiar los cables de bajada desde la antena hasta su domicilio.
- Adquirir un receptor de TDT donde este aparato hará de intermediario entre el receptor y su televisor. En la actualidad todos los televisores de última tecnología que se venden en Colombia deben contar con un receptor TDT.

4.1.4 Tráfico

El tráfico se modela mediante un proceso estocástico que representa la demanda que los usuarios de una red de comunicaciones imponen sobre los recursos de la red. Para poder estudiar el tráfico, se toma la medida de la demanda que los usuarios de una red de comunicaciones imponen sobre los recursos de la red, se utilizan modelos matemáticos del comportamiento de los usuarios. En particular, se representan los patrones de llegada de las demandas que los usuarios producen, donde estas demandas se pueden medir en términos de paquetes, celdas, llamadas, flujos, conexiones, bits, o cualquier otra unidad de información adecuada. Estos patrones de llegada se representan mediante alguna secuencia de tiempo que los identifique, tal como los instantes de llegada (Alzate, 2001).

4.2 MARCO TEÓRICO

4.2.1 Televisión Digital Terrestre (TDT)

La llegada de la televisión digital presume un cambio tan radical como el que supuso el paso del blanco y negro al color. Se trata de conseguir imágenes mejores, pero no se queda ahí, sino que también se van a abrir las puertas a la futura introducción de servicios, como la recepción móvil de televisión, la

interactividad, la televisión a la carta o los servicios multimedia de Internet. El principal problema de la televisión analógica es que no saca partido al hecho de que en la mayoría de los casos, las señales de vídeo varían muy poco al pasar de un elemento de imagen (píxel) a los contiguos, o por lo menos existe una dependencia entre ellos. En pocas palabras, se desperdicia espectro electromagnético, Además al crecer el número de estaciones transmisoras, la interferencia pasa a convertirse en un grave problema (Beteta, Fernández, Ladrón, & Macías, 2006).

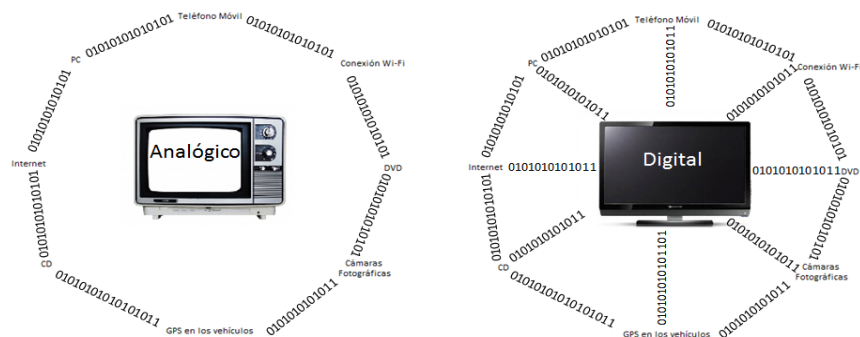
Los canales radioeléctricos de la televisión digital ocupan la misma capacidad de banda (6MHz) que los canales utilizados por la televisión analógica pero, debido a la utilización de técnicas de compresión de las señales de imagen y sonido (MPEG), tienen capacidad para un número variable de programas de televisión en función de la velocidad de transmisión, pudiendo oscilar entre un único programa de televisión de alta definición (gran calidad de imagen y sonido) a cinco programas con calidad técnica similar a la actual (norma de emisión G con sistema de color PAL), o incluso más programas con calidad similar al vídeo. Sin embargo, inicialmente, se ha previsto que cada canal múltiple (canal múltiple se refiere a la capacidad de un canal radioeléctrico para albergar varios programas de televisión) de cobertura nacional o autonómica incluya, como mínimo, cuatro programas. Por el momento, no se contempla la emisión de programas de televisión de alta definición (Prieto, 2006).

El empleo de la Televisión Digital Terrestre deja de ser solo un medio para la difusión de televisión, proporcionando una serie de beneficios u opciones al usuario final:

- Al utilizar como medio de difusión la red terrestre permite una recepción en el hogar sencilla y poco costosa, ya que emplea el mismo sistema de recepción de la televisión analógica, e incluso con la antena anterior, sin perder calidad.
- Permite la recepción portátil y en movimiento.
- Puede emplear redes de frecuencia única lo que conlleva el uso de un menor número de frecuencias.
- Requiere menor potencia de transmisión.
- Incrementa el número de programas con respecto a la televisión analógica actual, permitiendo múltiples programas y servicios multimedia en cada canal radioeléctrico.

- Mejora de la calidad de la imagen y del sonido (evita los efectos de nieve y de doble imagen de la televisión analógica) en la zona de cobertura, debido a la robustez de la señal digital frente al ruido, las interferencias y la propagación multitrayecto.
- La elevada resolución espacial de un sistema de televisión digital permite un realismo mayor, que se puede apreciar en una pantalla más grande.
- Permite el aumento de la relación de aspecto. El formato convencional es de 4:3, mientras que con la televisión digital se permite el formato panorámico de 16:9.
- Se puede ofrecer un sonido multicanal, con calidad de disco compacto. Además la multiplicidad de canales de audio permite conseguir el efecto de sonido perimétrico empleado en las salas de cine. Asimismo, estos canales podrían emplearse para transmitir diferentes idiomas con el mismo programa de vídeo.
- Abre las puertas del hogar a la Sociedad de la Información, debido a que permite la convergencia TV-PC. El televisor pasará a convertirse en una terminal multimedia que podrá admitir datos procedentes de los servicios de telecomunicaciones, suministrando servicios de valor añadido como correo electrónico, cotizaciones de bolsa, videoteléfono, guías electrónicas de programas (EPG), vídeo bajo demanda, pagar por ver, teletexto avanzado, banco en casa, tienda en casa, como se puede ver en la Figura 1.
- Facilita los servicios de ámbito nacional, regional y local.
- Permite el desarrollo equilibrado entre servicios públicos y servicios de privados.

Figura 1 Ilustración representativa del progreso al mundo digital



(Al-Majdalawi, 2006).

Los televisores actuales no permiten la recepción de la nueva señal digital para obtener una imagen nítida, por lo que caben dos soluciones:

- La primera solución es la adquisición de un televisor digital, pero hasta que el sistema no esté completamente introducido, los televisores digitales de pantalla grande apta para televisión digital serán muy costosos.
- La solución más económica es añadir al receptor de televisión corriente, un aparato decodificador, que convierte la señal digital en una señal analógica, (Receptor de TDT para Televisores analógicos Figura 2). Aunque el espectador no percibirá la calidad propia de la televisión digital, la calidad de la imagen superará la que tendría el mismo programa transmitido por un canal analógico.

Figura 2 Receptor de TDT para televisores Analógicos.

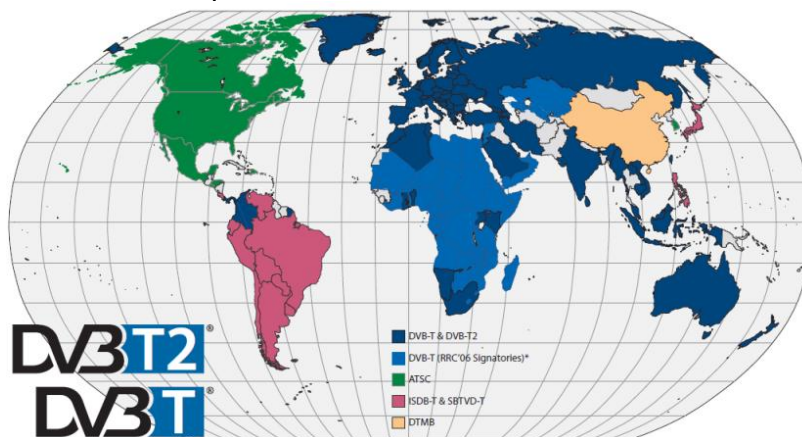


(DVB, 2011)

4.2.2 Formatos de TV Digital

A continuación se presenta una breve descripción de los tres estándares mencionados anteriormente, los cuales han sido considerados por la Comisión Nacional de Televisión Colombiana para definir el estándar a implementar. A continuación se muestra la representación a nivel mundial en la Figura 3.

Figura 3 Distribución Mundial por estándares de TDT.



(DVB, 2011)

4.2.2.1 Americano ATSC

El estándar ATSC (Advanced Televisión Systems Comité) ha sido diseñado en Estados Unidos para la transmisión de una señal de televisión digital de alta definición (HDTV High Definition Television) o múltiples señales de televisión estándar (SDTV Estándar Televisión), con alta calidad de video y audio, y para un espectro de canal de 6 MHz de ancho de banda. El comité ATSC fue fundado como organización privada en 1982 por radiodifusores fabricantes de equipos profesionales y de equipos de consumo, empresas de las industrias de computación, TV por cable, satélite y fabricantes de semiconductores (CNTV, 2009).

Este sistema ha sido adoptado hasta el momento por seis países: Estados Unidos, Corea del Sur, México, Canadá, Guatemala y Honduras.

4.2.2.2 Europeo DVB-T

Originalmente diseñado para canales de 8 MHz (aplicable también a 7 y 6 MHz), con un comportamiento general visible en la Figura 4. Fue desarrollado con el objeto de optimizar su funcionamiento en cualquiera de los tres entornos de operación presentes en Europa, a saber:

- Transmisión en un canal actualmente libre o en un canal adyacente.
- Transmisión en pequeñas y grandes redes de frecuencia única.
- Transmisión en grandes redes de frecuencia única.

Este sistema ha sido adoptado hasta el momento por cincuenta y ocho países: Namibia, Sudáfrica, Arabia Saudita (Arabia Saudí), Hong Kong, Singapur, Taiwán, Vietnam, Australia, Albania, Alemania, Andorra, Austria, Azerbaiyán, Bélgica, Bielorrusia, Chipre, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Gibraltar, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Islas Anglonormandas (Islas del Canal), Islas Feroe, Italia, Letonia, Liechtenstein, Lituania, Luxemburgo, Macedonia, Malta, Moldavia (La República de Moldova), Mónaco, Montenegro, Noruega, Países Bajos, Polonia, Reino Unido (Gran Bretaña [Inglaterra, Escocia, Gales] e Irlanda del Norte), República Checa, Rumania, Rusia, San Marino, Serbia, Suecia, Suiza, Turquía, Vaticano, Groenlandia y Holanda.

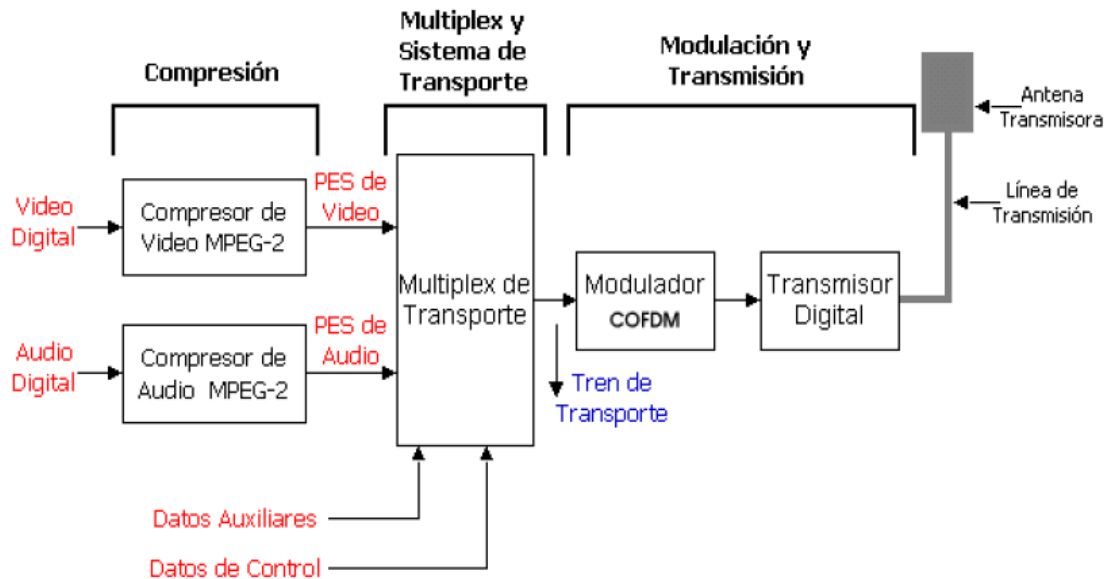
A continuación se muestra una tabla comparativa entre los estándares ATSC y DVB-T:

Tabla 1. Diferencias de los estándares ATSC y DVB-T:

	ATSC	DVB-T
Ancho de Banda	6 MHz. Igual al estándar de Televisión Analógica NTSC.	8 MHz. Igual al estándar de Televisión PAL.
Estándar de Compresión	MPEG-2(video) DOLBY AC-3 (audio)	MPEG-2 (video) Musicam (audio)
Máxima Resolución	Vertical: 1152 Líneas Horizontal: 1920 Líneas	Vertical: 1152 Líneas Horizontal: 1920 Líneas
Tipo de Modulación	8-VSB: Terrenal	COFDM: Modo 2k (1705 subportadoras) Modo 8k (6817 subportadoras)
Recepción Móvil	No diseñada para recepción móvil	Modo 2k es recomendado para la recepción móvil.
Eficiencia del Espectro	Es más eficiente debido al uso de las Redes Multifrecuencia.	Es menos eficiente debido a la implementación del intervalo de guarda.
Capacidad de transmitir HDTV	Diseñado para transmitir HDTV	No fue diseñado para transmitir HDTV pero se puede adaptar.
Sistema de Corrección de errores	Sistema de corrección más fuerte con RS (207, 187, t=10) y 52 bloques en el intercambiador.	Sistema de corrección menos fuerte que el ATSC, RS (204, 188, t=10) y 12 bloques en el intercambiador.
Interferencia del sistema analógico con la TDT	Menos potencia de transmisión, por lo que provoca menos interferencia	Utiliza más potencia por lo que ocasiona más interferencia.

(Knörich, s.f)

Figura 4 Diagrama General de DVB-T



(Guerrero, 2008)

4.2.2.3 Japonés ISDB

Este sistema divide la banda de frecuencia de un canal en trece segmentos. El radiodifusor puede seleccionar la combinación de segmentos a utilizar y esto permite la flexibilidad de servicios. Este sistema ha sido adoptado en dos países: Japón y Brasil. Cada uno de los países que han adoptado un estándar de televisión digital, ha elaborado estudios y pruebas de comportamiento, actualizado la reglamentación y diseñado un periodo de transición, a partir de la definición de la fecha de inicio de la transmisión digital y la fecha del apagado analógico (CNTV, 2009).

Por ejemplo, el Reino Unido comenzó pruebas y elaboración de la normatividad en el año 1996, inició operaciones de televisión digital en el año 2002, tiene proyectado un periodo de transición (donde convivirán el sistema analógico y digital) por el término de once años, para realizar el apagado analógico en el año 2012.

Éste no es sino el principio que terminará dentro de una o dos décadas con la eliminación de la televisión analógica una vez que todos los canales existentes sean también digitales y se haya renovado todos los televisores analógicos.

Existen distintos grupos y foros dedicados al desarrollo y puesta en funcionamiento de la televisión digital terrestre. Entre los más importantes hay que destacar (Beteta, Fernández, Ladrón, & Macías 2006):

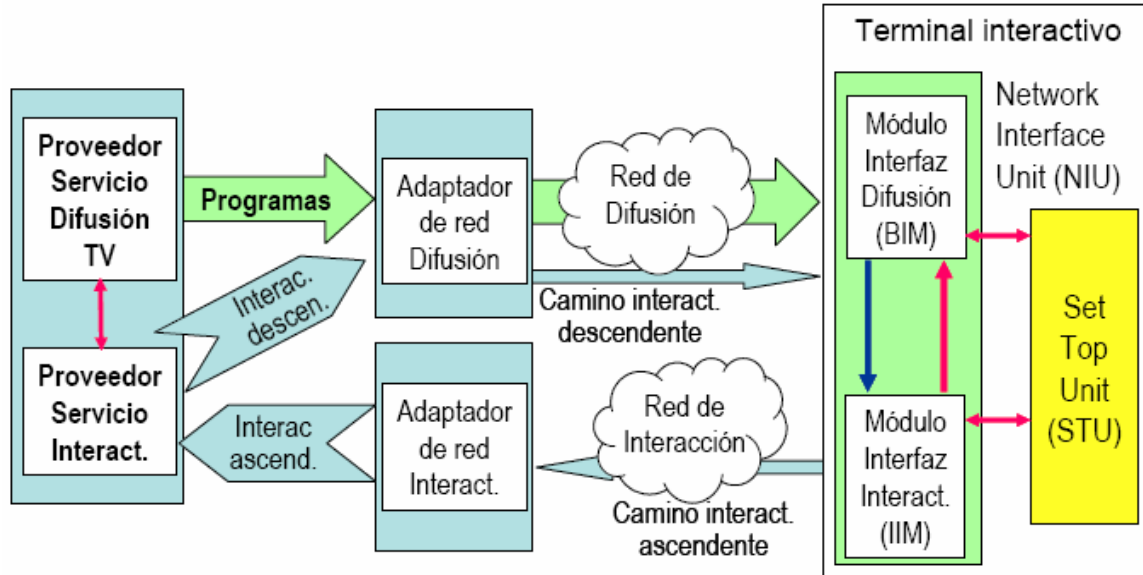
- Proyecto Europeo DVB (Digital Video Broadcasting), que establece las normas para difusión digital que se aplican a todas las formas de difusión (satélite, cable terrestre y otras).
- Foro DIGITAG (Digital Terrestrial Action Group), que se encarga de unificar criterios de requisitos de servicio, de funcionalidades del receptor, de aspectos regulatorios con todas las matizaciones propias de cada país y de fomentar la rápida introducción de televisión digital terrestre.
- Proyecto VALIDATE (Verification And Launch of Integrated Digital Advanced Television in Europe), que es el grupo de trabajo que valida todas las experiencias de televisión digital terrestre, en cuanto a la compatibilidad de los distintos receptores.
- Proyecto MOTIVATE, que analiza la posibilidad de recepción móvil de la televisión digital terrestre.
- Proyecto VIDITER (Video Digital Terrestre), que constituye el primer proyecto español en televisión digital terrestre, y cuyo objetivo es desarrollar una red de televisión digital terrestre y evaluar el comportamiento de este nuevo sistema, con experiencias reales de emisión.
- dTTb (digital Terrestrial Television broadcasting).

Las normas para la televisión digital han sido desarrolladas en Europa por el Proyecto DVB, integrado por más de 200 organizaciones. Debido a su menor complejidad, las normas de satélite y cable han antecedido uno o dos años a la norma de TV terrestre, y así se ha reflejado en su respectiva implantación.

4.2.3 Interactividad

Una de las principales novedades de la TDT es que permite una comunicación directa entre el emisor y el receptor, brindando un abanico de posibilidades que actualmente solo se encuentran en estudio. Entre las que ya se plantean está la participación en directo en concursos, encuestas, y también la opción de la compra directa de productos a través de la publicidad interactiva y de conexiones con Internet. Como se acaba de comentar, para poder acceder a la interactividad es necesario tener un decodificador compatible con el estándar europeo DVB-T (Beteta et all, 2006).

Figura 5 Modelo de referencia para la interactividad en TDT



(Prieto, 2006)

En la Figura 5 se observa el modelo de referencia para la interactividad, en el cual se deben incluir los elementos nuevos requeridos en la interactividad por canal de retorno, como el módulo de interfaz interactiva, el adaptador de red interactiva y el proveedor de servicios interactivos, indicando la decisión del DVB de cual canal interactivo va hacia el usuario embebido como flujo de datos en los MPEG-2 (Al-Majdalawi, 2006).

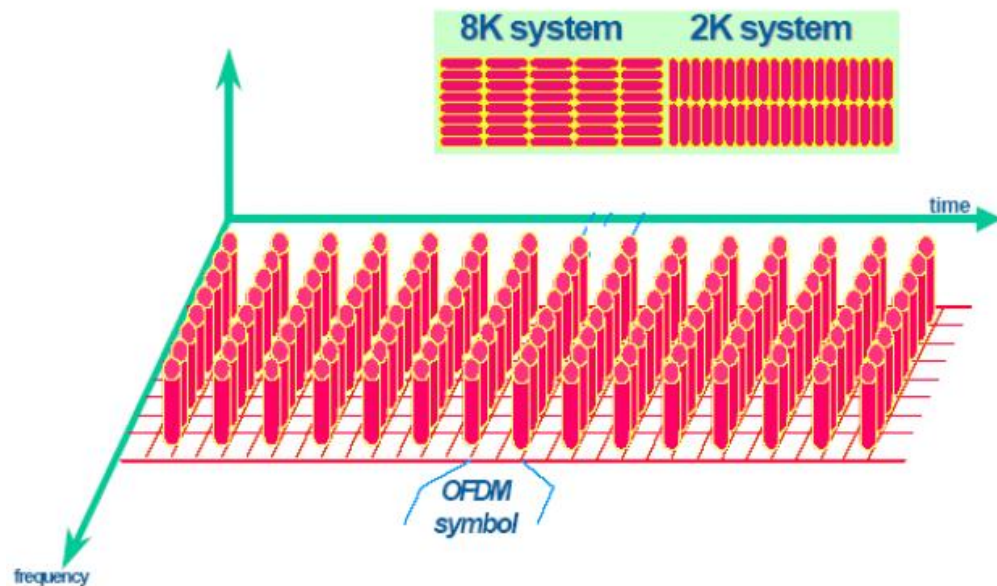
- La interactividad se proporciona principalmente por un transporte alternativo, en su mayoría por red telefónica, aunque existen especificaciones para Telecomunicaciones Inalámbricas Mejoradas Digitalmente, GSM y GPRS que facilitan su empleo en receptores portátiles.
- Existe una especificación en estado de elaboración de un canal de retorno en la misma banda de UHF: el canal de retorno por ondas terrestres.
- Existen grupos de trabajo buscando sinergias entre la televisión digital terrestre (y por satélite) y el UMTS.

4.2.4 Emisión de la señal TDT

La señal digital se comprime y codifica usando MPEG-2 tanto para video, audio y datos. Por tanto, para recibir la señal es necesario un sistema que sea capaz de decodificar esa señal para poder acceder al contenido, bien un receptor o tarjeta de televisión para PC capaz de decodificar la señal.

Para su transmisión, la señal es sometida a un proceso de modulación para poder transmitir los posibles estados (0 y 1), de los que se compone la señal digital este proceso se puede observar en la Figura 6. Hay diferentes tipos de modulación utilizados dentro de la televisión digital, QAM, QPSK, COFDM. Para la TDT en Colombia el sistema de transmisión utilizado es COFDM cuyo principio básico consiste en dividir la información a transmitir entre un número de portadoras independientes que se suman de forma ortogonal, y cada una de ellas está modulada por la norma 8K, la cual posee 6817 portadoras.

Figura 6 Concepto de COFDM



(Serna, 2005)

Se divide el flujo de datos binarios en miles de ‘sub-flujos’ de datos a muy baja velocidad y por tanto elevada duración de bit. Se emite durante un tiempo útil seguido de una parada o tiempo de guarda. Durante el tiempo útil todos los transmisores están sincronizados y emiten en paralelo una parte de bits del flujo binario. De esta manera, en entornos urbanos, las interferencias no degradan sino que mejoran la potencia y relación señal–ruido de la señal recibida. Se pueden diferenciar las distintas opciones que hay para transmitir la señal desde la estación base hasta el usuario final, visualizar Figura 7. Las posibles reflexiones o rebotes de la señal en obstáculos del entorno (por ejemplo edificios) hacen que las señales se superpongan sumando potencia y mejorando la relación señal-ruido (Bethencourt, 2001).

4.2.5 Antenas

Las antenas de TV digital difieren en tamaño, configuración y operación.

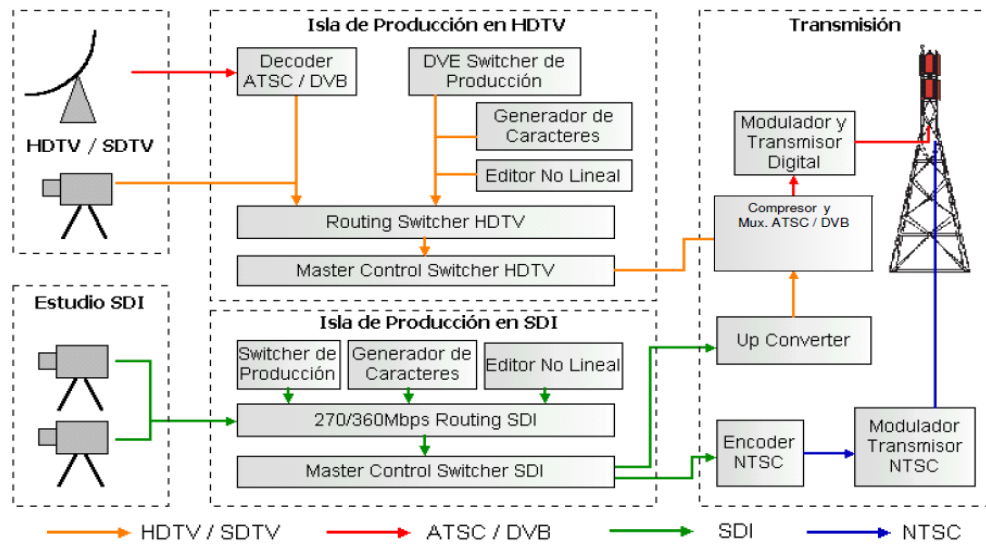
Baja potencia (~2 kW), low band VHF (~54-88MHz): antenas Yagiu log-periódicas.

> 2 kW: antena Batwing con unas cuantas bahías.

High band VHF (~174-216 MHz): antenas Batwing y arreglos de dipolos.

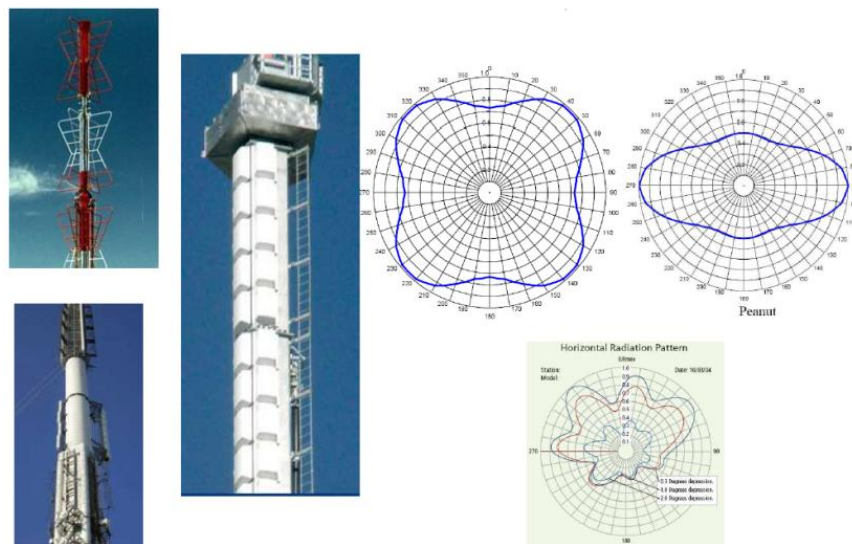
UHF (512-608 MHz, 614-806 MHz): antena Slot Broadband Arrays.

Figura 7 Opciones de Transmisión



(Guerrero, 2008)

Figura 8 Antenas y Patrones de Radiación (horizontal)



(Guerrero, 2008)

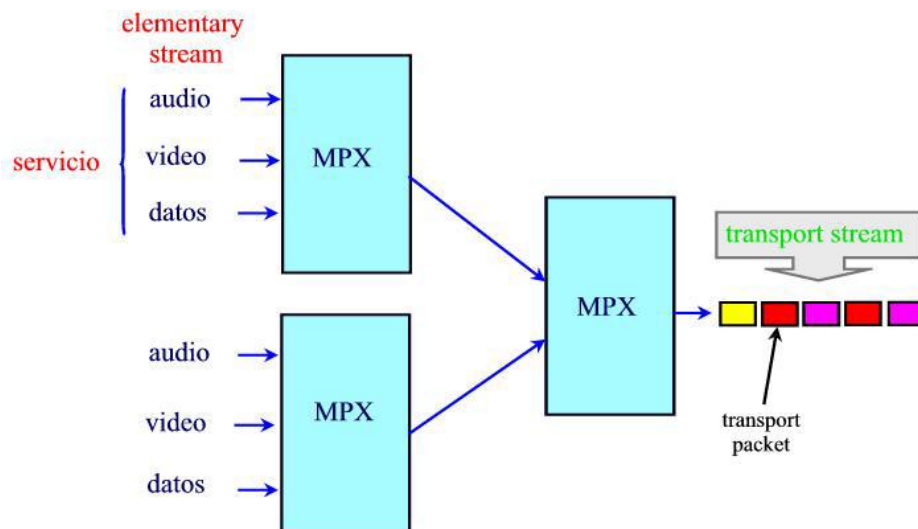
4.2.6 Elementos que conforman la señal.

Una señal de televisión digital se transmite como un flujo de datos codificados, conocido como flujo de transporte, el cual está formado por un conjunto de 'sub-flujos', llamados flujos elementales que pueden contener audio, video o datos, y que se encuentran encapsulados, en forma de paquetes, denominados paquetes de transporte (ForoTDT1, 2005). Los paquetes están identificados de manera única en el flujo de transporte mediante un PID o "identificador de paquete", que es un campo de 13 bits, añadido a la cabecera de cada paquete. En la práctica el número de paquetes que se transmiten está limitado a la velocidad de transmisión.

Dentro de un flujo de transporte se pueden transmitir varios servicios, cuyos componentes son multiplexados para ser transmitidos de manera conjunta con sus respectivos flujos elementales, formando un único flujo de paquetes de datos. Los proveedores de televisión son los encargados de generar estos datos para ser transmitidos.

Al insertar los paquetes dentro del flujo de transporte, es preferible hacerlo en el orden correcto con el objetivo de entregar cada elemento con anticipación y a una velocidad, lo suficientemente constante, para que el receptor pueda obtener la señal sin sobrecargar el buffer del decodificador MPEG (Morris, 2005). Una vez la señal es multiplexada y enviada a los receptores como se aprecia en la Figura 9, estos reciben los datos sin una indicación del tipo de información que se está recibiendo o cómo ha de reconstruir esa información, en algo que se pueda mostrar al usuario.

Figura 9 Multiplexación del flujo de transporte



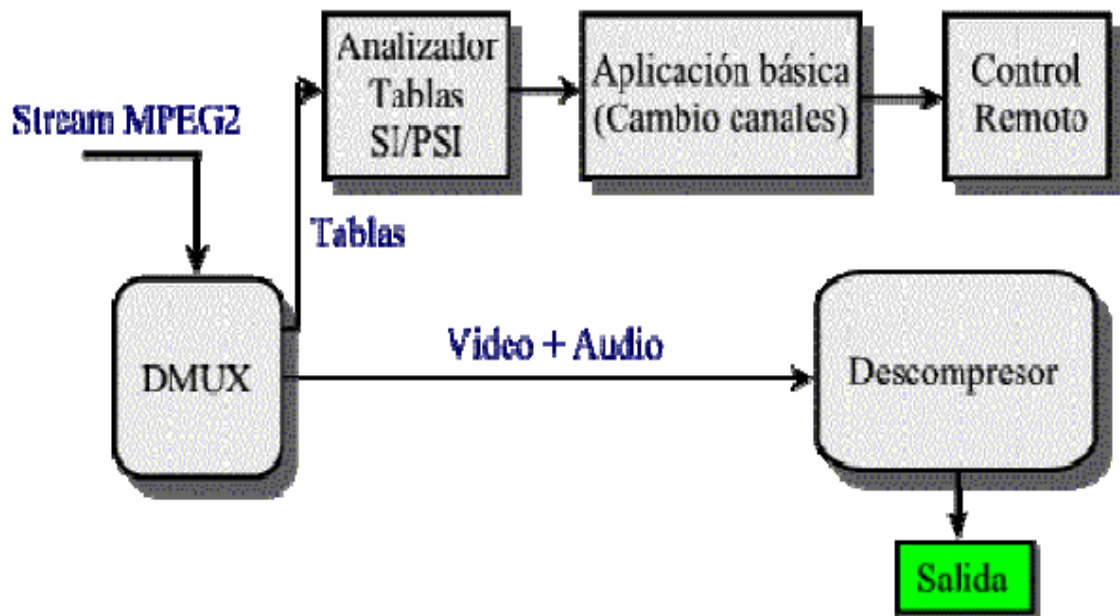
(Knörich, s.f)

Para solventar este problema DVB especifica un tipo de información, conocida como tablas de información de servicio o Service Information (SI), que debería ser añadida al flujo de transporte. Esencialmente, se trata de una base de datos que describe la estructura del flujo junto con información adicional sobre cada uno de los servicios que se transmiten y su contenido (Morris, 2005). Con esta información se puede saber cómo encontrar los flujos elementales que pertenecen a cada servicio dentro del flujo de transporte, lo que facilita el tratamiento de la información. Una vez que se dispone de toda la información sobre los servicios disponibles, se estará en disposición de seleccionar el servicio identificado por medio del DVB Locator.

Las tablas SI son un conjunto especial de flujos elementales que contiene una serie de tablas que describen la estructura de los datos transmitidos, los servicios insertados en él, e información útil que los receptores de televisión digital pueden mostrar al usuario, tales como el nombre del servicio, su duración, etc. Todo flujo de transporte contiene esta información, pero hay una serie de tablas que son de uso obligatorio, debido a la importancia que tienen en el envío de la información, y otras que añaden información adicional, pero cuyo uso es opcional (Puig Sellés, 2005).

Las tablas SI de la Figura 10, también describen información sobre todos los flujos de transporte transmitidos a través de la red por la que se transmite el flujo, con lo que se puede obtener información de todos los servicios accesibles desde esa red. Esto es muy importante para el proceso de sintonización.

Figura 10 Demultiplexación de la señal en el receptor

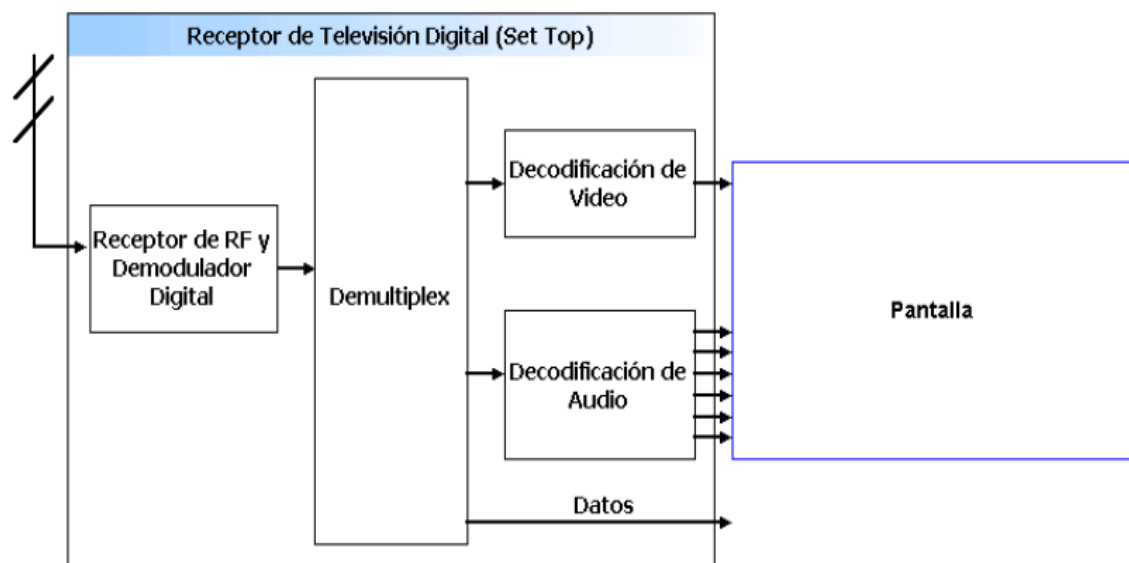


(MHP, 2005)

4.2.7 Recepción de la señal.

La señal digital se transmite por ondas electromagnéticas, al igual que en la televisión analógica, de forma que seguirán sirviendo las mismas antenas y mismas redes de distribución de señal que se usan para la transmisión analógica. En algunos casos puede ser necesaria una adaptación de las instalaciones de antena colectiva mediante la instalación de amplificadores multicanal. Además será necesaria la instalación de receptores de televisión digital en los hogares para transformar la señal digital en analógica, y así poder ser vista en los televisores actuales, como se puede observar en la Figura 11.

Figura 11 Recepción de la Señal



(Guerrero, 2008)

Los receptores son los dispositivos que van a permitir la recepción de la señal y sintonización del canal para su visualización en un televisor, pero también permiten la ejecución de aplicaciones interactivas con las que interactúa el usuario. Se Pueden distinguir varios tipos de receptores (MEDTV1, 2005):

- Zappers: receptor digital externo para la sintonización de canales de televisión, suelen tener algunas aplicaciones integradas básicas pero no permiten la ejecución de servicios interactivos por no disponer del soporte adecuado.
- STB (Set Top Box): receptor digital externo que se conecta al televisor y que posee de un middleware (MHP) integrado que proporciona un API sobre el que se desarrollan las aplicaciones interactivas. Dispone de un modem para actuar como canal de retorno de las aplicaciones.

- IDTV (Televisor Digital Integrado): incorpora el receptor digital dentro del televisor.
- PVR (Personal Video Recorder): receptor digital que posee un disco duro de alta capacidad que permite la grabación de contenidos audiovisuales para su visionado en diferido. Puede poseer una interfaz USB para descargar el contenido en un PC.

La conexión de los receptores externos con el televisor se realiza a través de una salida de televisión convencional a través de un puerto SCART (Euroconector).

En el ámbito de este proyecto, el STB es el dispositivo, que se nos ofrece como una posibilidad de obtención de la información de servicios bastante adecuada. Por medio de una aplicación interactiva, capaz de acceder a la información de los servicios visionados, podemos obtener la información de consumos, y gracias al canal de retorno, comunicarlos a un sistema de recogida de información.

La imagen que se debe tener de un STB es la de un dispositivo electrónico de componentes hardware y software. En esencia es un computador digital que tiene como función principal la de transformar señales digitales en el formato adecuado para ser mostrado por pantalla. Las principales funciones del STB son:

- Decodificar la señal digital de entrada.
- Mostrar imágenes de alta calidad en el televisor.
- Proporcionar la salida de sonido.
- Dar soporte a servicios interactivos de televisión.

4.2.8 MPEG-2 para DVB-T [MPEG-2 "Flujo de Transporte"]

En el conjunto de estándares de TV digital denominado DVB (Digital Video Broadcasting) se especifican los fundamentos de los sistemas para diferentes medios de transmisión: satélite, cable, difusión terrestre, etc. Cada estándar define los esquemas de codificación de canal y de modulación para el medio de transmisión de que se trate, pero en todos los casos la codificación de fuente es una adaptación del estándar MPEG-2.

Más concretamente, la señal de entrada y salida especificada para todos los sistemas es la denominada "MPEG-2 Transport Stream" (TS) o "Flujo de transporte MPEG-2". La generación de esta cadena de datos se puede dividir en

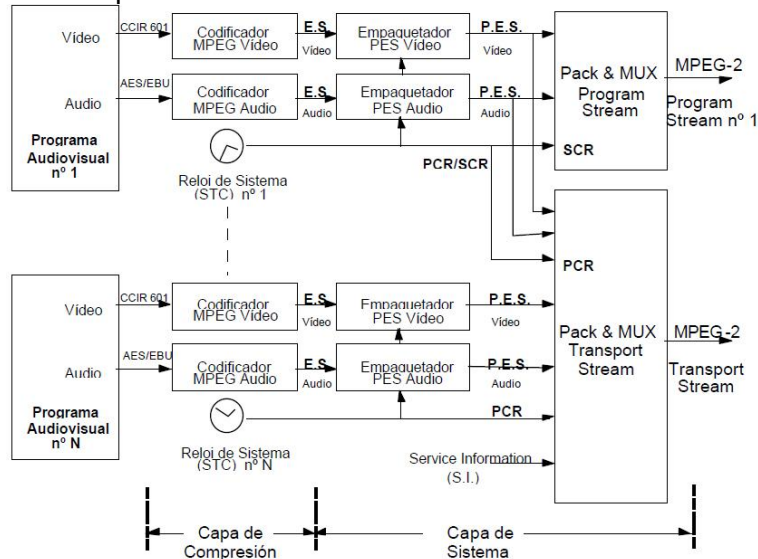
dos capas, la de sistema y la de compresión, las cuales se pueden distinguir en la Figura 12.

En la “Capa de Compresión” se realizan las operaciones propiamente dichas de codificación MPEG, recurriendo a los procedimientos generales de compresión de datos, y aprovechando además, para las imágenes, su redundancia espacial (áreas uniformes) y temporal (imágenes sucesivas) , la correlación entre puntos cercanos y la menor sensibilidad del ojo a los detalles finos de las imágenes fijas.

En cuanto al audio, se utilizan modelos psicoacústicos del oído humano, que tienen en cuenta la curva de sensibilidad en frecuencia (máxima entre 1 y 5 kHz), los efectos de enmascaramiento de frecuencias (señales simultáneas a diferentes frecuencias) y enmascaramiento temporal (un sonido de elevada amplitud enmascara sonidos más débiles anteriores o posteriores), para reducir la cantidad de datos que hay que transmitir, sin deteriorar de forma perceptible la calidad de la señal de audio.

En la “Capa de Sistema” se realizan las operaciones que conducen a la obtención de los flujos de señal MPEG-2, consistente en la organización en “paquetes” de los datos comprimidos y el posterior multiplexado de todas las señales asociadas al programa (vídeo, audio, datos). Además de la posibilidad de multiplexado de varios programas audiovisuales, se añaden en el multiplexor diversas informaciones relativas al servicio: Tabla de Asociación de Programas (PAT), Información para Acceso Condicional (CAT), Mapa de cada Programa (PMT), Tabla de datos de la red (NIT).

Figura 12 Flujo de transporte MPEG-2



(Torres, 2010)

4.2.9 Características básicas de MPEG-2 TS:

Conviene resaltar dos características notables de los multiplexores MPEG-2:

- No existen protecciones contra errores dentro del multiplexor. Las citadas protecciones y la subsiguiente modulación de los flujos MPEG son objeto de bloques de procesamiento posteriores, que son función del medio de transmisión elegido.
- No hay especificación física o eléctrica para los multiplexores MPEG. El diseñador puede elegir los niveles de señal y tipo de conector que mejor se adapte a su aplicación.

4.2.10 Compresión

Moving Pictures Experts Group Layer 2 (MPEG-2) es uno de los formatos de compresión más utilizados gracias a sus códecs (codificadores-descodificadores) de bajas pérdidas. La compresión se basa en la comparación tanto espacial (si un punto de la imagen es idéntico al de al lado, basta con enviar cuántos puntos hay iguales y dónde están) como temporal (si un imagen es muy similar a la siguiente, basta con enviar la diferencia entre el actual y el anterior). Así, para el segundo sistema de compresión el contenido de imagen se predice, antes de la codificación, a partir de imágenes reconstruidas pasadas y se codifican solamente las diferencias con estas imágenes reconstruidas y algún extra necesario para llevar a cabo la predicción. Respecto al primer paso de compresión, las muestras tomadas de imagen y sonido son divididas en celdas de 16x16 y transformadas en espacio-frecuencia y cuantificadas.

MPEG-2 realiza la codificación genérica de imágenes en movimiento y el audio asociado enviado directamente sin compresión desde el centro de producción en “unidades de presentación” que son sustituidas por “unidades de acceso”, que en el caso de la señal de vídeo se dividen en tres: cuadros intra (I), cuadros posteriores predecibles (P) y cuadros predecibles bidireccionales (B), arreglados en un orden específico llamado “La estructura GOP” (GOP = Group Of Pictures o grupo de imágenes). GOP es la mínima cadena MPEG completamente decodificable por sí sola. Por tanto debe tener una imagen I y sus referenciadas P o B. Los cuadros I serán los que contengan la información completa de la imagen (aunque comprimida espacialmente) mientras que el resto se crearán en el proceso de codificación.

El resultado de la codificación MPEG de una secuencia de vídeo, es una sucesión de “Unidades de Acceso de Vídeo y/o Audio”, que serán “empaquetados” para su

futura multiplexación con las diferentes señales provenientes de cada uno de los centros audiovisuales.

La tasa de bit de salida de un codificador MPEG-2 puede ser constante (CBR) o variable (VBR), con un máximo determinado por el sistema en el que vaya a ser utilizado – por ejemplo, el máximo posible en un DVD de película es de 10.4 Mbit/s. Para lograr una tasa de bits constante el grado de cuantificación es alterado para lograr la tasa de bits requerida.

4.2.11 Unidades de presentación de Video en MPEG-2

En cuanto a la señal de vídeo digitalizada sin comprimir, se emplea el formato 4:2:2 con cuantificación de 8 bits recogido en CCIR Rec. 601-1, cuya “Unidad de Presentación” es una “Imagen o Cuadro” (830 kbytes para sistemas de 625 líneas).

De acuerdo con este estándar, se digitalizan las señales Y (luminancia), CR y CB (obtenidas a partir de las señales diferencia de color), utilizando las siguientes frecuencias de muestreo:

Señal Y: 13,5MHz

Señales CR y CB: 6,75 MHz

En estas condiciones, el flujo bruto resultante, para la citada cuantificación de 8 bits resulta ser:

$$13,5 \times 8 + 2 \times (6,75 \times 8) = 216 \text{ Mbps}$$

A cada línea completa, cuya duración es de 64 μ s en un sistema de 625 líneas, le corresponderá el siguiente número de muestras:

$$\text{Señal Y: } 13,5 \times 10^6 \times 64 \times 10^{-6} = 864 \text{ muestras/línea completa}$$

$$\text{Señales CR y CB: } 6,75 \times 10^6 \times 64 \times 10^{-6} = 432 \text{ muestras/línea completa}$$

Sin embargo, el cálculo anterior incluye los sincronismos en la duración de la línea. Si se eliminase la digitalización de los intervalos de supresión, cuya duración es de 12 μ s quedarían 52 μ s útiles, con lo que resultaría:

$$\text{Señal Y: } 864 \times 52 / 64 = 702 \text{ muestras vídeo/línea}$$

En realidad se emplean, por línea activa digital:

Señal Y: 720 muestras/línea activa digital

Señales CR y CB: 360 muestras/línea activa digital

Con todo ello, considerando que del total de 625 líneas, solamente 576 son útiles, el flujo neto resultante para la señal digitalizada en formato 4:2:2 con cuantificación de 8 bits es:

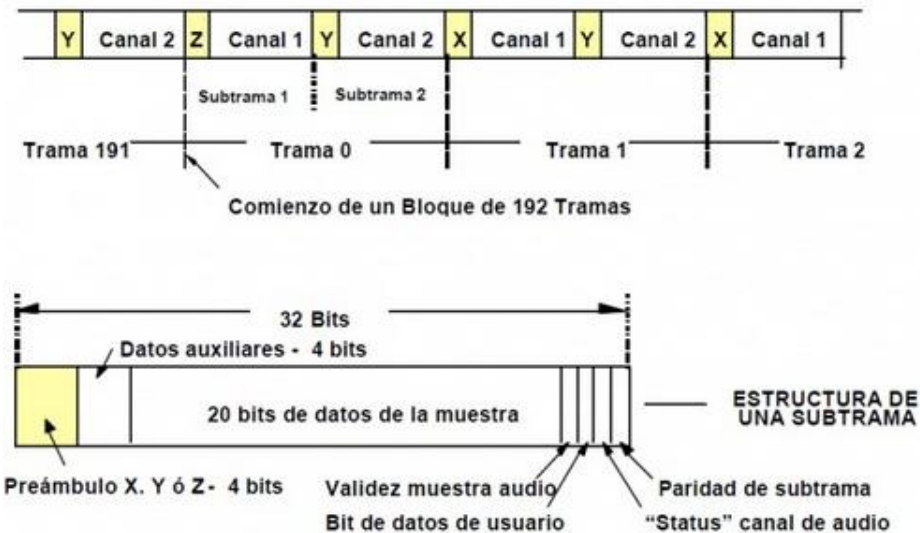
$$216 \text{ Mbps} \times (720 / 864) \times (576 / 625) = 165,888 = 166 \text{ Mbps}$$

En esta situación, teniendo en cuenta que se transmiten 25 imágenes por segundo y que hay 8 kbits por cada byte, resultará para cada "Imagen o Cuadro": $166 \text{ Mbps} / (25 \times 8k) = 830 \text{ kbytes} / \text{cuadro}$

4.2.12 Unidades de presentación de Audio

En cuanto al audio, la "Unidad de Presentación" es una "Trama de Audio AES/EBU" dispuesto en la Figura 13. En este caso, se requieren de 16 a 24 bits por muestra para proveer el rango dinámico y la relación señal/ruido deseados.

Figura 13 Disposición de las tramas de audio AES/EBU

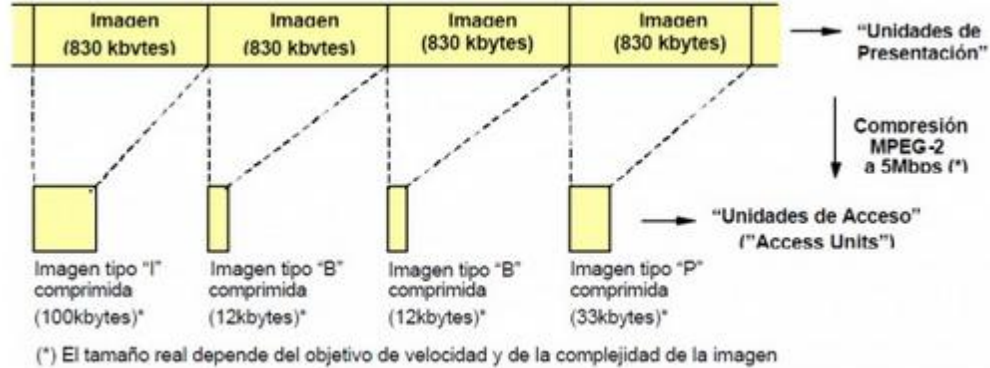


(Torres, 2010)

El formato de los datos de audio sin comprimir puede verse en la Figura 14 para una cuantificación de 20 bits. Consiste en secuencias de bloques de 192 tramas,

cada una de las cuales está compuesta por dos sub-tramas correspondientes a los dos canales de audio estéreo.

Figura 14 Flujo de señal comprimida



(Torres, 2010)

A su vez, cada sub-trama contiene los 20 bits de datos correspondientes a las muestras, precedidos por otros 4 bits de datos auxiliares, que pueden emplearse para extender la cuantificación a 24 bits. La sub-trama comienza con un preámbulo de 4 bits que indica a qué canal pertenece la muestra y termina con 4 bits que aportan información sobre el canal incluyendo un bit de paridad. En total, cada sub-trama tiene 32 bits.

El preámbulo de cada sub-trama puede ser de tipo X, Y ó Z. Se emplea el tipo Z para indicar el comienzo de cada bloque de 192 tramas y después alternativamente los tipos X e Y para identificar las sub-tramas de los dos canales de audio: X para el canal 1 e Y para el canal 2.

4.2.13 Unidades de acceso codificación MPEG-2

Para la compresión, la imagen de video es separada en dos partes: luminancia (Y) y crominancia (U y V) y tanto la compresión espacial como temporal se realizarán sobre cada parte. A su vez éstos son divididos en "macro-bloques" los cuales son la unidad básica dentro de una imagen. Cada macro-bloque es dividido en cuatro bloques de luminancia (divididos a su vez en bloques de 8x8 píxeles). El número de bloques de croma dentro de un macro-bloque depende del formato de color de la fuente. Por ejemplo en el formato común 4:2:0 hay un bloque de croma por macro-bloque para el canal U y otro para el canal V haciendo un total de seis señales por macro-bloque.

La codificación consiste en lo siguiente: los cuadros I (intra-codificado) son tratados de forma que los cuadros P y B primero son sujetos a un proceso de "compensación de movimiento". Cada macro-bloque en la imagen P o B es

entonces asociado con un área en la imagen previa o siguiente que esté bien correlacionada con alguno de éstos (anterior o posterior). Se crea así un "vector de movimiento" que mapea el macro-bloque con su área correlacionada, es codificado y entonces la diferencia entre las dos áreas es pasada a través del proceso de codificación. Cada bloque es procesado con una transformada coseno discreta (DCT) 8x8. El coeficiente DCT resultante es entonces cuantificado de acuerdo a un esquema predefinido, reordenado a una máxima probabilidad de una larga hilera de ceros, y codificado. Finalmente, se aplica un algoritmo de codificación Huffman de tabla fija.

En el caso de la señal de vídeo, las "Unidades de Acceso" comprimidas, como se ha comprobado en la Figura 14 se observa que son de 3 tipos, correspondiendo a otros tantos tipos de imágenes MPEG:

Imágenes tipo I (Intra): Se codifican sin ninguna referencia a otras imágenes, es decir: contienen todos los elementos necesarios para su reconstrucción. Tamaño: 100 kbytes.

Imágenes tipo P (Previstas): Se codifican con respecto a la imagen de tipo I o de otra P anterior, gracias a las técnicas de predicción con compensación de movimiento. Su tasa de compresión es claramente mayor que la de las imágenes I: Tamaño 33 kbytes.

Imágenes tipo B (Bidireccionales): Se codifican por interpolación entre las dos imágenes de tipo I o P precedente y siguiente que las enmarcan. Ofrecen la tasa de compresión más alta: Tamaño 12 kbytes.

Hay muchas estructuras posibles pero una común es la de 15 marcos de largo, y tiene la secuencia I_BB_P_BB_P_BB_P_BB_P_BB_. La relación de cuadros I, P y B en "la estructura GOP" es determinado por la naturaleza del flujo de video y el ancho de banda que constriñe el flujo. Además el tiempo de codificación puede ser un asunto importante. Esto es particularmente cierto en las transmisiones en directo. Un flujo que contenga varios cuadros B puede tardar tres veces más tiempo para codificar que un archivo que sólo contenga cuadros I (sin codificación temporal).

En el caso de la señal de audio, las "Unidades de Acceso" típicamente contienen unas pocas decenas de milisegundos de audio comprimido.

4.2.14 Modelos Matemáticos

El objetivo básico de un modelo de tráfico es ser capaz de imitar el comportamiento del tráfico real. Sin embargo, esta cualidad (la correspondencia con la realidad) no es el único concepto que debe considerarse a la hora de elegir una estrategia de modelado. Así, resultan de especial interés otros aspectos:

- La trazabilidad analítica del modelo: Esto es, la capacidad intrínseca del modelo de arrojar resultados analíticos, sin necesidad de simulación.
- La facilidad de implementación, ya sea vía software para proceder a simulaciones o vía hardware con el objetivo de disponer de un generador de tráfico sintético en tiempo real. Esta característica exige simplicidad no sólo a la propia estructura del modelo, sino también a la algoritmia y los costes computacional es que exige su implementación.
- La parsimonia del modelo. Con este concepto, que recurre al significado original de la palabra parsimonia, se describe la capacidad del modelo para ser descrito mediante un conjunto reducido de parámetros. De igual importancia, resulta la posible significación física de los parámetros. Se debe ser consciente de que al usuario final hay que ofrecerle una representación de la realidad comprensible, flexible, pero con una variabilidad acotada y controlable mediante unos parámetros que posean una conexión evidente con la realidad (por ejemplo: velocidad máxima, velocidad de pico, tamaño de ráfaga.).
- Capacidad de modelar otros tipos de tráfico, en especial tráfico agregado. En numerosas ocasiones se puede exigir de un modelo, en especial de los generalistas, la maniobrabilidad suficiente para que, mediante ciertos cambios de sus parámetros, sea capaz de imitar otros tipos de tráfico o incluso el propio tráfico agregado que resulta de multiplexar sobre un canal varias fuentes individuales.

Una manera razonable de clasificar los modelos de tráfico es mediante el análisis de la autocorrelación que presentan. La función de coeficientes de autocorrelación es:

Ecuación 1. Independencia Lineal

$$R_x(k) = \frac{1}{\sigma_x^2} E[(X[i+k] - \mu_x)(X[i] - \mu_x)]$$

(Pérez, 2007)

Donde $E[]$ es el operador esperanza matemática, mientras que σ_x^2 y μ , indican respectivamente, la varianza y la media de la señal $X[n]$, la cual, en el caso de modelado de tráfico, lleva aparejado la evolución en el tiempo de una variable física (por ejemplo: número de usuarios conectados, duración de prestación del servicio, número de bits transmitidos durante cierto intervalo, tiempo entre paquetes, tamaño del paquete).

De acuerdo con la forma en que el modelo impone a esta función, se puede distinguir entre:

4.2.14.1 Modelos no correlacionados o ruidos blancos

Se trata de señales en donde no existe relación de ningún tipo entre las muestras de la secuencia ($R_x(k)=0$ para todo $k \neq 0$), de tal modo que cada muestra es generada a partir de la misma función de distribución estadística, pero con total independencia de las anteriores. Estos modelos estadísticamente independientes se han probado válidos para modelar ciertos aspectos de la generación del tráfico, entre los que se pueden mencionar el tiempo entre llamadas, la duración de la llamada o el tamaño de los ficheros transmitidos. Dentro de este grupo, habría que incluir a modelos clásicos muy extendidos en todos los ámbitos, como el de Poisson (en donde el tiempo entre eventos se distribuye Exponencialmente), o los ruidos normales o gaussianos (Casilari et al.).

4.2.14.2 Modelos sin memoria

Los tiempos entre llegadas, T , son independientes y Exponencialmente distribuidos, de manera que el tiempo que se debe esperar hasta ver la próxima llegada es independiente del instante en que se empiece a observar, esto se conoce como la «falta de memoria» de la distribución Exponencial.

Esta propiedad también aparece en modelos de tiempo discreto en los que, en cada ranura de tiempo, la llegada de un paquete se da con probabilidad p , independientemente de otras ranuras. El número de llegadas en intervalos de n ranuras es una variable binomial (n, p), mientras que el número de ranuras N hay que esperar hasta ver la llegada del próximo paquete es una variable geométrica que también carece de memoria (Alzate, Marco y Peña, Néstor).

4.2.14.3 Modelos de renovación

Los procesos de renovación son una extensión de los modelos de tráfico sin memoria, en los que los intervalos de tiempo entre llegadas de paquetes son

independientes e idénticamente distribuidos, aunque no necesariamente Exponenciales o geométricos.

El tiempo que falta esperar hasta ver la llegada del próximo paquete depende de hace cuánto tiempo llegó el último paquete. Aunque esta memoria incrementa la complejidad analítica de los procesos generales de renovación con respecto a los procesos sin memoria, sigue siendo nula la correlación entre los tiempos entre llegadas de paquetes consecutivos, lo cual hace que estos modelos sigan siendo analíticamente tratables para estudiar el desempeño de los elementos de la red (Alzate & Peña, 2007).

4.2.14.4 Modelos de dependencia a corto plazo

El carácter intermitente (o por ráfagas) del flujo de datos impuso desde un principio la necesidad de introducir correlación en los modelos de tráfico, ya que la llegada de paquetes se encuentra fuertemente correlacionada. Las primeras soluciones de este tipo pasaron por sencillas cadenas markovianas de pocos estados. En un proceso markoviano, la correlación viene dada por el hecho de que el estado actual del sistema depende exclusivamente del estado anterior. En este grupo de procesos markovianos habría que incluir un modelo tan extendido como los procesos On-Off, aproximación simple y razonable de las fuentes de datos y voz. Una fuente On-Off consta de dos estados. Durante el estado On se emite tráfico a tasa constante mientras que durante el estado Off la fuente permanece ociosa.

Otros modelos muy conocidos los constituyen los procesos modulados por Markov, en especial el MMPP (Markov Modulated Poisson Process) de dos estados. De acuerdo con este modelo, apropiado para modelar el agregado de fuentes On-Off, la generación de tráfico evoluciona entre dos estados con generación poissoniana, pero de tasa media distinta. Por el contrario, la necesidad de definir una matriz con las probabilidades de conmutación entre estados hace que el número de parámetros crezca geométricamente con el número de estados considerado. En ese caso, y a costa de perder la mencionada tratabilidad, se puede recurrir a los filtros ARMA (Auto Regresive Moving Average), en los que el valor de la muestra actual $X[n]$ se obtiene a partir de N_a valores anteriores de $X[n]$ y N_b valores de un ruido blanco aleatorio $w[n]$ denominado proceso de innovación, expuesto en la Ecuación 2:

Ecuación 2. Filtro ARMA

$$X_{ARMA}[n] = a_0 + \sum_{t=1}^{N_a} a_t * X_{ARMA}[n - t] + \sum_{t=0}^{N_b} b_t * w[n - t]$$

(Pérez, 2007)

Donde N_a y N_b se corresponden con los órdenes de la parte AR y MA, respectivamente, y los coeficientes a_i y b_i son diseñados para imitar los primeros coeficientes de autocorrelación (Casilari & Reyes, 2006.). Los filtros ARMA (Procesos Autorregresivos de Medias Móviles) son la unión del Proceso AR (Autorregresivo), el cual es un filtro todo-polos y cuya ecuación en diferencias que relaciona la entrada y la salida es la Ecuación 3:

Ecuación 3. Relación Entrada-Salida Filtro todo-polos

$$x(n) + \sum_{i=1}^{N_a} a_i * x(n - i) = w(n)$$

(Pérez, 2007)

Proceso de MA (Medias Móviles), el cual es un filtro todo-ceros y cuya ecuación en diferencias para la relación entrada-salida es la Ecuación 4:

Ecuación 4. Relación Entrada-Salida Filtro todo-ceros

$$x(n) = \sum_{i=1}^{N_b} b_i * w(n - i)$$

(Pérez, 2007)

Los procesos ARMA son entonces un filtro lineal que tiene polos y ceros finitos en el plano Z (Proakis, Jhon G. y Manolakis, D.).

Otro modelo autorregresivo es el modelo TES (Transform Expand Sample). Este modelo, además de invertir la función de distribución acumulativa de los tiempos entre llegadas, consiste en generar probabilidades de éstas mediante números pseudoaleatorios correlacionados, opera con aritmética módulo 1 y no es lineal. Por lo tanto, con este modelo se pueden ajustar la autocorrelación de muestras reales de tráfico y la distribución marginal de los tiempos entre llegadas (Alzate & Peña, 2007).

En cualquier caso, los procesos markovianos y los filtros ARMA, así como alguna otra solución más compleja que se podría englobar en este grupo, como los procesos TES, tienen en común su incapacidad para aproximar la función de autocorrelación para valores altos del retraso k .

Efectivamente, estos procesos se diseñan para ajustar las dependencias a corto plazo o SRD (Short Range Dependence) dispuesto en la Ecuación 5 y presentan indefectiblemente una caída Exponencial de la función de autocorrelación (Casilari & Reyes, 2006.):

Ecuación 5. Dependencia de Corto Plazo

$$R_x(k) \propto \exp(-k); \quad \text{cuando } k \rightarrow \infty$$

(Pérez, 2007)

4.2.14.5 Modelos de dependencias a largo plazo

Las LRD, que se reflejan estadísticamente en coeficientes de autocorrelación con un decaimiento lento o hiperbólico, se asocian a la existencia de una variabilidad del tráfico en una amplia gama de escalas temporales que los modelos tradicionalmente empleados no son capaces de recoger y que pueden tener consecuencias graves para muchos esquemas de control, donde se supone una escala "natural" y acotada, en donde se manifiesta el carácter intermitente del tráfico.

Por su parte, esta variabilidad de la señal se liga a cierto grado de autosemejanza o fractalidad que ha permitido aplicar en este campo las conclusiones y la analítica desarrollada por Mandelbrot y otros autores que han estudiado procesos fractales en otras ramas de la ciencia.

Las LRD han venido a revolucionar, al menos parcialmente, el ámbito del modelado de tráfico telemático, ya que también se han detectado en otros tipos de tráfico: servicios Web, tráfico IP, tráfico de video, tráfico de enlaces metropolitanos y de red de área extensa. El argumento habitualmente esgrimido para explicar las LRD en series temporales es la existencia de una estructura multinivel de generación. Así, para justificar la LRD del tráfico Web se apela a la interacción del comportamiento del usuario (preferencias por ciertos ficheros, tiempo de análisis de páginas Web,...) con las políticas de caché de los buscadores, el tamaño subExponencial de los objetos en las páginas Web y el agregado de tráfico que resulta en la LAN. En el caso de las secuencias de video, las LRD se suelen fundamentar por la existencia de una escala de tiempo superior cuya duración se ha probado sub-Exponencial. Efectivamente se puede probar que un proceso cuyos niveles de actividad (tasa media de generación) oscilan de acuerdo con una temporización de colas pesadas presentará características LRD. Hasta la fecha existen dos técnicas genéricas en las que se podrían agrupar los modelos planteados para aproximar la naturaleza LRD de una señal de tráfico: (Alzate, 2008)

4.2.14.6 Modelos multinivel

En estos modelos se imita directamente la variabilidad existente a una serie de niveles o escalas de tiempo. Cada nivel suele modelarse mediante un proceso "clásico" (habitualmente cadenas de Markov) que modula la generación a niveles inferiores. Su variabilidad en ese caso se limita a las escalas contempladas

(modelos "quasi-fractales") presentando el inconveniente de que ofrecen estructuras complicadas, de escasa trazabilidad, cuya definición requiere un número amplio de parámetros, lo que perjudica la parsimonia del modelo (Casilari, 2006).

4.2.14.7 Modelos auto-semejantes

Estos modelos ya responden a estructuras estrictamente fractales, es decir, de variabilidad a todas las escalas de tiempo. Se corresponden con modelos generalistas bien conocidos, como los ruidos gaussianos fraccionarios o FGN (Fractional Gaussian Noise), o los procesos ARMA integrados fraccionarios, o FARIMA. Mientras que los primeros generan señales fractales puras (con la misma forma de distribución estadística con independencia de la escala temporal desde la que son contemplados), los segundos son capaces de añadir el ajuste de las dependencias a corto plazo, o SRD, incorporando una típica estructura autorregresiva de media móvil (ARMA). La principal ventaja de estos modelos, frente a la aproximación desarrollada por los del grupo anterior, es que son capaces de representar la LRD mediante un único valor, el parámetro H o de Hurst, que denota el grado de autosemejanza de la muestra a modelar (Casilari, 2006.).

De esta manera, estos modelos presentan un alto grado de parsimonia. Por el contrario, su principal desventaja radica precisamente en la dificultad de una estimación ajustada de H , el cual es un valor acotado entre 0.5 y 1. Esta dificultad se explica por la propia naturaleza de los estimadores propuestos, los cuales se basan en la medición de comportamientos asintóticos o en la minimización de funciones que suponen previamente una forma al espectro y que introducen siempre cierto sesgo en la medida, ya de por sí limitada a un estrecho intervalo. Esta problemática se agrava cuando estos diversos estimadores se aplican sobre series de tráfico real finitas y con posibles problemas de no estacionalidad. A esta dificultad hay que añadir la complejidad computacional de la propia estimación, así como la complejidad de generación que la ejecución rigurosa de estos métodos requeriría, aunque se debe apuntar que existen soluciones aproximadas (que, por ejemplo, acotan el número de coeficientes a considerar) que pueden solventar parcialmente este problema a efectos prácticos (Casilari, 2006).

4.3 ANTECEDENTES

4.3.1 Televisión Digital terrestre

La televisión analógica actual utiliza una tecnología que sólo permite la transmisión de un único programa de televisión por cada canal UHF de 8 Mhz de amplitud. Las ondas hercianas son un espacio finito, que además de ser usado por

la televisión analógica también es usado por otras infraestructuras como la radio o las emisoras civiles (Beteta et al, 2006). Además, los canales adyacentes al que tiene lugar una emisión han de estar libres, ya que en caso contrario, se producirían interferencias entre las señales de dichos canales que perjudicarían la calidad de la señal recibida. De esta manera existen complejos diseños de canales usados y libres en cada región, provincia o incluso área para minimizar las interferencias, aún a costa de limitar el número de emisiones simultáneas. Para solucionar todo esto y para añadir nuevas funcionalidades surge la TV digital (Prieto, 2006).

Al ser finitas las ondas hercianas y reservarse diferentes longitudes de onda para diferentes servicios se encuentra que la banda de emisión no podía crecer de forma descontrolada con lo cual se limitaba la creación de nuevos canales de televisión favoreciendo a aquellos que ya cuentan con una licencia de emisión (Beteta et al, 2006).

Teniendo en cuenta lo anterior, para crecer: o se asignan nuevas bandas de emisión o bien se emplea mejor el espacio existente. La segunda opción es más viable puesto que de este modo se procede a crear un sistema de emisión digital que comprime la información en unos y ceros con lo cual se puede emitir mucha más información en el ancho de banda que antes usaban unos pocos canales de televisión.

Las ventajas que aporta la Televisión Digital Terrestre, entre otras, son:

- La televisión digital supone un aumento de calidad de imagen que se acerca mucho al que se puede tener cuando se visualiza un DVD, cuyo formato es de 16:9.
- El audio mejora notablemente y se tiene la oportunidad de disfrutar de sonidos tridimensionales mediante la tecnología Dolby Surround. Además, la TDT permite escuchar un programa en otro idioma, y la aparición de subtítulos.
- LA TDT incrementa el número de canales y disminuye el coste de distribución. La transmisión de la señal digital requiere menor potencia que la analógica.
- Las señales enviadas no sufren los efectos de la transmisión multitrayecto que hacen que la imagen se vea doble o surja un efecto “nieve”, además, son más robustas frente al ruido y las interferencias. En caso de no haber señal simplemente no se presenta imagen.

- La codificación dispone de mecanismos para la detección y corrección de errores que mejoran la tasa de error en las señales recibidas en entornos especialmente desfavorables.
- Permite una optimización del espectro radioeléctrico, ya que gracias al diseño de la red de distribución de señal es posible usar todos los canales de la banda, sin necesidad de dejar canales de guarda para reducir las interferencias.
- Concede la recepción móvil de la señal de televisión haciendo que las antenas receptoras sean de un menor tamaño, posibilitando su uso en terminales más pequeños como un PDA o un teléfono móvil.
- Utiliza redes de frecuencia única, que logran emitir el mismo programa a la misma frecuencia desde distintos transmisores, facilitando la correcta recepción del mismo.
- Ofrece al usuario servicios propios de la Sociedad de la Información, como el acceso a Internet, lectura de correo electrónico, chat, juegos interactivos, entre otros, a través del televisor.
- Cambia completamente el concepto de comunicación unilateral, brindándole participación al televidente por medio de la interactividad.
- Reduce el tamaño de las antenas de recepción casi en un 50%, como se aprecia en la Figura 15.

Figura 15 Antenas para recepción de TV digital por satélite



(Prieto, 2006)

El estándar Europeo presenta las siguientes características:

- Ventajas en interactividad y multicanalidad.
- Mejor flexibilidad de la señal en áreas geográficas variadas.
- Menores costos estimados de implementación.
- DVB-T tiene la opción de recepción en dispositivos móviles y portátiles.
- Mejor calidad de audio y video.
- Ofrece la posibilidad de desarrollos basados en la Interactividad.

Para la televisión digital terrestre se han desarrollado en todo el mundo varios estándares, entre los cuales se destacan tres que han tenido la mayor aceptación. Son ellos el sistema ATSC (Advanced Television Systems Committee) diseñado por los Estados Unidos; el DVB-T (Digital Video Broadcasting-Terrestrial), creado por los europeos, y el ISDB-T (Terrestrial Integrated Services Digital Broadcasting) desarrollado en Japón. De igual manera los chinos están trabajando en su propio modelo (Comisión Nacional de Televisión, 2010-2013).

4.3.2 Sistemas Complejos

En 1948 la revista American Scientist publicó el artículo "Science and Complexity" en el marco de una preocupación general sobre el papel de la ciencia en la sociedad. El premonitorio artículo, escrito por W. Weaver, decía que el número de variables implicadas en un problema era determinante sobre su complejidad, y por ende, sobre su entendimiento. De esta forma el investigador separó los problemas físicos en tres grandes categorías:

- Problemas simples.
- Problemas complejos desorganizados.
- Problemas complejos organizados.

Para Weaver los problemas simples correspondían a aquellos compuestos por muy pocas variables (cuatro a lo sumo), y son los que ocuparon a los físicos desde el siglo VII hasta fines del siglo XIX. A partir de ese momento, la Física comenzó el estudio de los llamados problemas complejos desorganizados en los que el número de variables es muy grande pero cada una de las variables tiene un

comportamiento individualmente errático o quizás totalmente desconocido (imagínese una caja con moléculas de un gas). Sin embargo, a pesar de este comportamiento atropellado o desconocido de todas las variables individuales, el sistema como totalidad posee ciertas propiedades globales emergentes que en promedios son ordenadas y analizables (Villalobos, 2009).

No obstante había otro tipo de sistemas a los que la ciencia volcó su atención durante la primera mitad del siglo XX. Aunque aceptando sus limitaciones, llamaban la atención aquellos sistemas complejos pero organizados. Estudiarlos era prácticamente imposible en ese momento por que implicaba tratar simultáneamente con un número medible de factores que están interrelacionados en un todo orgánico. Los seres vivos, los ecosistemas, los sistemas sociales eran ejemplos de sistemas que presentaban esta característica y son los que hoy se denominan Sistemas Complejos (Villalobos, 2009).

4.4 ESTADO DEL ARTE

4.4.1 Televisión Digital Terrestre en la Unión Europea

El paso de la televisión analógica a la digital avanza "a buen ritmo" en la Unión Europea, donde ya Alemania, Finlandia, Luxemburgo, Suecia y Holanda han completado el proceso, que se prevé que culmine en 2012 en casi todos los Estados miembros. El "apagón analógico" está previsto antes del final de 2011 en España, Austria, Dinamarca, Estonia, Finlandia y Malta, mientras que se espera que Bulgaria, Chipre, la República Checa, Grecia, Francia, Hungría, Italia, Lituania, Letonia, Portugal, Rumanía, Eslovaquia, el Reino Unido y la totalidad del territorio de Bélgica lo concreten antes de acabar 2012. Polonia, por su parte, tiene como plazo 2015 e Irlanda no ha comunicado aún qué fecha límite ha decidido. Además, España es uno de los veintiún países comunitarios donde la transmisión de televisión digital terrestre ya se ha iniciado en parte de su territorio (Hernández, 2010).

4.4.2 La Televisión Digital Terrestre, TDT en Latinoamérica

En Argentina en 1998 se eligió el estándar ATSC pero no hay transmisiones regulares en ese estándar. En la actualidad se encuentran realizando pruebas para determinar la conveniencia de los diferentes estándares que operarán en el país.

En Brasil, ya se ha comenzado a reemplazar la TV analógica por la TDT, puesto que optaron por una versión modificada (SBTVD) del estándar japonés ISDB. Si

bien no hay un apagón analógico previsto, el cambio de modalidad (desde analógico a digital) se produce con mucha rapidez.

4.4.3 El proyecto de la Televisión Digital Terrestre, TDT en Colombia

En Colombia, el sistema de televisión digital elegido es el europeo (DVB-T). La decisión de la Comisión Nacional de Televisión fue anunciada el 28 de agosto de 2008, después de diferentes retrasos y negociaciones. Colombia determinó operar con el sistema de compresión MPEG-4. El apagón analógico está programado para el año 2019. La comisión tiene previsto iniciar el proceso de implementación de la televisión digital terrestre para el año 2009.

Mucho se ha hablado de la Televisión Digital Terrestre en nuestro país, pero la información disponible sobre el tema, hasta el momento no permite dimensionar la magnitud de las ventajas, aciertos y retos que podría generar este nuevo avance tecnológico. Por este motivo, se considera necesario desarrollar nuevas herramientas que permitan promover el acceso a la información sobre la TDT entre los diferentes actores sociales colombianos.

La televisión digital conlleva una mejora en la recepción de la señal de televisión, optimizando el uso del espectro radioeléctrico y aportando una mayor calidad de imagen y sonido, facilita, igualmente, el acceso a la televisión multicanal y promueve la irrupción de los servicios de la Sociedad de la Información que pueden ser recibidos a través de la propia pantalla del televisor. Este trabajo es pertinente y necesario porque en el 2019 entrará en funcionamiento en el país la TDT y desde ahora los realizadores, los docentes y los usuarios se deben informar sobre las características de este nuevo avance tecnológico.

5. LIMITACIONES Y ALCANCES

5.1 LIMITACIONES

La creación de este modelo se limita a un tráfico basado en la televisión digital terrestre de Europa, que actualmente está siendo implementado en Colombia, y no hay estudios que demuestren como sería dicho comportamiento del tráfico en el país.

Debido a la poca infraestructura actual el modelo se debe construir con base a pronósticos realizados por la Comisión Nacional de Televisión de Colombia, obtenidos de pruebas realizadas con anterioridad.

Debido al gran afluente de transmisiones originadas en la ciudad de Bogotá, allí se realizarán las primeras emisiones de TDT en Colombia, y este modelo se limita a esa primera fase.

5.2 ALCANCES

Proponer una posible optimización a la transmisión de Televisión Digital Terrestre en Colombia.

Obtener información sobre la buena calidad en cuanto a la transmisión y recepción del servicio de Televisión Digital.

Medir el desempeño de una futura implementación de una red de Televisión Digital Terrestre en Colombia.

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto de grado, fue necesario el uso de una investigación de tipo experimental, ya que para su desarrollo se utilizaron variables independientes, dependientes y parámetros constantes. Mediante esta investigación se hicieron pruebas de forma simulada, con las que se obtuvieron unos resultados que conllevaron a un análisis y obtención de una mejora a un modelo complejo HOT previamente implementado para optimizar redes WWW.

6.2 FASES Y/O PROCEDIMIENTOS

La metodología para cumplir el objetivo de una simulación en televisión digital terrestre, se divide en las siguientes fases.

- Fase 1: El primer requerimiento que se llevó a cabo para realizar la investigación, fue documentar sobre los distintos estándares que tiene la televisión digital en el mundo, haciendo énfasis en el estándar europeo, que fue el elegido por Colombia.
- Fase 2: Documentar sobre sistemas complejos debido que son sistemas causales y ayudan a realizar de una forma más exacta el pronóstico del tráfico esperado. Escogiendo entre todos los modelos complejos el modelo complejo HOT.
- Fase 3. Se desarrolló la simulación en NS-2 la cual permitió hallar las trazas que caracterizaron el comportamiento del tráfico en TDT.
- Fase 4: Luego de obtener las trazas mediante NS-2 fueron analizadas para obtener los datos característicos de la televisión terrestre Colombiana.
- Fase 5: Obtenidos los datos, se generó un modelo matemático que caracteriza la televisión digital terrestre, basado en sistemas complejos.
- Fase 6: Por último se obtuvieron y evaluaron datos del nuevo modelo.

6.3 INSTRUMENTOS

Un instrumento útil y de vital importancia para la realización de la presente investigación es el programa NS-2, que trabaja sobre una máquina que tenga

instalado el sistema operativo Linux, con cualquiera de sus distribuciones; este programa es de uso libre por lo que no genera problemas al momento de realizar las simulaciones.

7. DESARROLLO

Para la TDT se ha definido que la mejor forma de transmisión son los llamados modelos Complejos (Villalobos, 2009). En Colombia la implementación de la TDT lleva un proceso de migración lento, debido a que no se cuenta con la infraestructura necesaria para realizar satisfactoriamente este proceso y se carece de estudios con respecto al comportamiento del tráfico en forma compleja.

Para efectos de esta investigación, se ha determinado buscar tres de los modelos complejos más apropiados para la implementación de la TDT, con el fin de seleccionar el que más se acopla a las condiciones actuales del territorio. Una vez seleccionado este modelo se procede a realizar en primera instancia una simulación basada en las características teóricas investigadas, para poder estudiar y determinar el comportamiento del tráfico en la simulación, y así, lograr los resultados que luego serán introducidos en el modelo complejo para obtener una respuesta que se acerque a la realidad.

Para traspasar las barreras que imponen los modelos de la primera generación, de modo que sea posible proporcionar explicaciones físicas más cercanas a la realidad de la estructura general de la red, últimamente han aparecido nuevas consideraciones:

- Crear otras métricas aparte de la distribución del grado.
- Incorporar en los mecanismos de despliegue un crecimiento de la red tecnológica, limitaciones económicas y quizás, suposiciones de conducta para captar las actitudes de las principales partes interesadas.

En esta línea, se ha desarrollado una segunda generación de modelos con el objetivo no sólo de reproducir las propiedades locales, sino también de crear topologías de red in vitro que concuerden con la realidad y sean capaces de proporcionar un conocimiento sobre la estructura jerárquica a gran escala de las telecomunicaciones (Kavassalis, 2006).

Se ha admitido que la red proporciona sólo el fundamento sobre el cual debe desarrollarse el comportamiento dinámico de un sistema: “La dinámica, el tráfico y la topología subyacente están, por lo tanto, mutuamente correlacionados y es muy importante definir cantidades y medidas apropiadas, capaces de captar cómo participan todos estos ingredientes en la formación de redes complejas” (Amaral, 2004). Cuando algunos ingenieros dejaron de pensar en el tráfico como una serie de tiempo por caracterizar estadísticamente y quisieron mirar la fuente que genera dicha serie de tiempo, encontraron dos resultados: un origen de la fractalidad es la

multiplexión de fuentes que transmiten objetos cuyo tamaño obedece una distribución de cola pesada. Pero esa distribución se debe a la necesidad de utilizar óptimamente los recursos de la red (Strikant, 2000).

Otra fuente de fractalidad es el efecto multiplicativo de los protocolos de la red. Pero ese efecto surge de optimizar el uso de los recursos de la red; la fractalidad, definitivamente, no es una propiedad de las fuentes de tráfico que se deba caracterizar estadísticamente para alimentar los modelos de colas en lazo abierto, sino que es el producto directo de las interacciones entre los usuarios y la red a través de protocolos que, aunque diseñados independientemente para la transparencia, interactúan de maneras imprevistas produciendo fenómenos emergentes inesperados. En efecto, en casi todos los procesos de control de redes de comunicaciones se puede identificar algún mecanismo de realimentación mediante el cual los componentes de la red responden a la información suministrada tomando alguna acción de control correspondiente que puede afectar directamente a los usuarios (Alzate, 2007).

7.1 TEORÍA DEL CAOS (COE)

La Teoría del Caos es una técnica que se puede utilizar para los sistemas complejos y dinámicos el estudiar para revelar patrones del orden (no-caos) fuera de comportamientos aparentemente caóticos. La Teoría del Caos es el estudio cualitativo del comportamiento aperiódico e inestable en sistemas dinámicos no lineales y deterministas (Geick, 2008).

Se observa un comportamiento aperiódico cuando no hay una variable, reflejando una repetición regular de valores, describiendo el estado del sistema. El comportamiento aperiódico inestable es altamente complejo: este nunca se repite y continúa manifestando los efectos de cualquier pequeña perturbación (Geick, 2008).

Según la teoría matemática actual, un sistema caótico se define por mostrar "sensibilidad a las condiciones iniciales". Es decir, para predecir el estado futuro de un sistema con certeza, se necesita saber las condiciones iniciales con una exactitud infinita, puesto que los errores aumentan rápidamente con la más ligera inexactitud (Cambel, 1993).

Durante los años 60 Edward Lorenz, un meteorólogo en el MIT, trabajado en un proyecto para simular patrones del tiempo en una computadora. Él tropezó accidentalmente con el efecto mariposa, después de observar que desviaciones en milésimas cambiaban grandemente el resultado de las simulaciones. El efecto mariposa refleja cómo los cambios en pequeña escala, pueden influenciar cosas en una escala más grande. Es el ejemplo clásico del caos, donde los cambios

pequeños pueden causar grandes cambios. Una mariposa, aleteando sus alas en Hong-Kong, puede cambiar patrones del tornado en Tejas (Cambel, 1993).

7.1.1 Cálculo de la teoría del caos

Para aplicar la Teoría del Caos, con medición de una sola variable con un tiempo inicial t_0 , y un período de tiempo t , proporciona un espacio dimensional n , o fases del espacio, expresado en la Ecuación 6 que representa el espacio multivariado completo del estado del sistema; más de 4 dimensiones son requeridas para representar la fase espacial de un sistema caótico. Así, sobre un período de tiempo largo, un sistema observado desarrollará patrones dentro de una serie de tiempo no lineal que se pueden utilizar para predecir los estados futuros (Waldrop, 1992).

Ecuación 6. Ecuación COE

$$X(n) = x(t_0 + NT)$$

(Poincaré, 1993)

7.1.2 Limitaciones

Las limitaciones de aplicar la Teoría del Caos son debidas principalmente a la elección de los parámetros de entrada. Los métodos elegidos para computar estos parámetros dependen de la dinámica inferior en los datos y en la clase de análisis previsto, que es, en la mayoría de los casos altamente complejo y no siempre exacto.

La teoría del caos no es tan simplista como para encontrar una aplicación inmediata y directa en el entorno donde se desarrolla por lo que es un sistema complejo.

7.2 CRITICIDAD AUTO ORGANIZADA (SOC)

Se denomina Criticidad o Criticidad Auto-organizada a la propiedad de ciertos sistemas complejos abiertos, no lineales y en desequilibrio de auto organizarse para alcanzar un punto crítico desde el cual pueden experimentar cambios del tipo avalancha. Los cambios obtenidos son de diversa intensidad y obedecen a una Ley de Potencia, es decir que su magnitud es inversamente proporcional a su frecuencia.

El fenómeno de la Criticidad Auto-organizada fue descrito inicialmente por Per Bak, Chao Tang y Kurt Wiesenfield ("BTW") en un artículo aparecido en Physical Review Letters en 1987. En ese artículo se consideró ese fenómeno como uno de

los mecanismos por los que surge la complejidad en la naturaleza (Talavera, 2009).

Es una teoría construida en torno a los efectos de interacción. En esencia, la teoría postula que cuando las actividades inician movimientos en el tiempo y el espacio, las reacciones en cadena que resultan de tales acciones, siguen las distribuciones en el tiempo y el espacio que se producen en todas las escalas.

En otras palabras, estas reacciones pueden variar desde movimientos simples y aislados hasta movimientos que impliquen todas las actividades en el sistema (Wiesenfeld, 1987).

Los experimentos con sistemas teóricos sugieren que la duración y el tamaño de las actividades envueltas en tales reacciones siguen leyes de potencia. El descubrimiento clave para estos sistemas es que los sistemas evolucionan a una forma que encarna el estado crítico en que estas reacciones se producen continuamente de manera tal que el estado crítico del sistema se conserva (Arcangelis, 2002).

7.2.1 Cálculo SOC

Para aplicar matemáticamente la criticidad auto-organizada se tiene como ecuación principal

Ecuación 7. Ecuación SOC

$$y(x_1, x_2, \dots) = h^{-3}y(h^3x_1, h^3x_2, \dots)$$

(Valverde, 2002)

Si los exponentes a y b, son iguales, se dice que la función es autosimilar. Si los exponentes a y b, son diferentes, se dice que la función es auto afín. Por lo tanto toda ley de potencia se verifica con esta propiedad (Sanchez, 2006).

Ecuación 8. Propiedad de Potencia

$$y(x) = Axa : y(x) = h - ay(hx)$$

(Sanchez R., 2006)

7.2.2 Limitaciones

Las limitaciones de aplicar la criticidad auto organizada es que no hay longitud característica de la cadena en su duración, no hay un número o tamaño característico de las actividades en cuestión y no hay una distancia característica sobre la que tiene lugar la reacción.

7.3 TOLERANCIA ALTAMENTE OPTIMIZADA (HOT)

Es un mecanismo de leyes de potencia que combina la perspectiva de la física estadística con métodos de ingeniería para el desarrollo de sistemas robustos, muy relacionados entre sí. Los sistemas HOT pueden surgir a través de un diseño deliberado o por selección natural, y están asociadas con configuraciones de alto rendimiento en el medio de la incertidumbre del medio ambiente. Esto lleva a configuraciones modulares que son "robustas" en cuanto a las perturbaciones comunes, pero sobre todo "frágil" a los eventos raros, cambios imprevistos en el ambiente, y a las fallas en el diseño (Carlson, 1999).

Recientemente, HOT se ha estudiado en el contexto de los ecosistemas forestales, el tráfico de Internet, y sistemas de energía. En cada caso, HOT proporciona ajustes precisos de la distribución estadística de los acontecimientos. Más importante aún HOT está dando lugar a nuevos modelos de dominio específico para estos sistemas que debería conducir a avances en la comprensión de la especial fragilidad o sensibilidades que acompañan a los aspectos de alto rendimiento de estos sistemas (Wojcik, 2004).

7.3.1 Modelos de percolación

Modelos de Percolación es aplicado en incendios forestales y son una plantilla para el estudio de la complejidad y el punto de partida para HOT. Percolación es el modelo más simple que exhibe una transición de fase crítica. En un sitio de una red cuadrada de dos dimensiones están ocupados (los árboles) o vacantes (cortafuegos). El modelo de los incendios forestales incluye un acoplamiento a las perturbaciones externas, modelado por las chispas que afectan sitios individuales, quemando un grupo alrededor donde cae la chispa (Robert, 2000).

En la versión HOT, el objetivo es optimizar el rendimiento, entendiéndose por tal la densidad que queda después de una sola chispa. Se da una variedad de planes de optimización, incluyendo la colocación óptima de franjas verticales y horizontales de las vacantes en medio de una red completa de otro modo, el crecimiento de un bosque óptimo mediante la colocación de árboles en la mejor ubicación a la vez, optimizar la densidad de locales en las regiones de una cuadrícula de diseño superpuesta, la evolución darwiniana por la mutación y la selección natural.

Todo ello conduce a resultados similares. Separados por barreras lineales, formadas por los espacios donde nada se pueda tomar como peligroso. Estas barreras se concentran en las regiones donde las chispas son comunes, y escasa en las regiones donde las chispas son raras. Donde las barreras actúan como obstáculos, permitiendo la optimización y el desarrollo del entorno (Robert, 2000).

En algunos casos, las barreras son las limitaciones físicas (como la piel, las paredes celulares, y divisores de carril de la autopista). Sin embargo, las barreras también puede ocurrir en un espacio sin determinar, construido a través de lazos complejos, comentarios de reglamentación en las redes (tales como los sistemas inmunológico, y el protocolo TCP / IP). Los modelos de red ilustran la aparición de obstáculos para generar robustez y otras características asociadas con HOT (Robert, 2000).

7.3.2 Generalizado de Codificación

La codificación de HOT se obtuvo mediante la generalización de Shannon en la codificación de Teoría de la Información. Este es el modelo de derecho de préstamo público, definido por las probabilidades P , que describe la probabilidad relativa de un conjunto de eventos, las pérdidas de L , que describe el costo asociado, y R los recursos, que limitan la pérdida. El problema de derecho de préstamo público implica la optimización de la asignación de recursos limitados para minimizar las pérdidas previstas en todo el espectro de eventos posibles. En el caso de los incendios forestales, los recursos podrían ser cortafuegos u otros medios de represión. En el caso de la World Wide Web en cuestiones de tráfico, se plantea el análogo de chispas de fuego son los éxitos de navegación de los usuarios de un sitio, y se plantea la optimización en la división de documentos en un número limitado de archivos de una manera que reduzca al mínimo la congestión del servidor. El éxito de la teoría del derecho de préstamo público se encuentra en la sorprendente precisión con que se describen las distribuciones estadísticas para el tamaño y la frecuencia de los incendios forestales, World Wide Web de descargas, y los cortes de energía eléctrica (Robert, 2000).

Sin embargo, en comparación con SOC los sistemas HOT existen para que las densidades sean superiores a las densidades críticas, y las leyes no se limitan a los valores especiales de la densidad.

Los rasgos característicos de los sistemas HOT incluyen:

- Alta eficiencia, rendimiento y robustez diseñada para incertidumbres.
- Hipersensibilidad a fallas de diseño y las perturbaciones imprevistas.
- No genera configuraciones especializadas, estructurado, y de alimentación.

Donde estos puntos están en contraste con las características tradicionales de la criticidad, y se obtienen simplemente añadiendo el elemento de diseño a los modelos percolación y arena, que cambia por completo sus características.

Tabla 2. Características de SOC y HOT

	Propiedad	SOC	HOT
1	Configuración Interna	Genérico, homogénea, auto-similar	Estructurado, heterogéneo, auto-asimilar
2	Robustez	Genérico	Robusto pero frágil
3	Densidad y Rendimiento	Bajo	Alto
4	Tamaño Máximo de Eventos	Infinitesimal	Largo
5	Mecanismo de leyes de Potencia	Fluctuaciones internas críticas	Rendimiento Robusto
6	Exponente α	Pequeño	Grande
7	Aumenta la Resolución del Modelo	No cambia	Nuevas estructuras, sensibilidades nuevas
8	Respuesta Forzosa	Homogéneo	Variable

(Carlson, 1999)

7.4 EL SIMULADOR NS-2

Se llevó a cabo la búsqueda de una herramienta que permita recrear de la manera más apropiada los escenarios de simulación para redes inalámbricas. El simulador de eventos discretos Network Simulator 2 (NS-2) fue elegido por las características que posee. El objetivo del simulador NS-2 es soportar la investigación en redes y en la educación es apropiado para diseñar nuevos protocolos, comparar diferentes protocolos y evaluación de tráfico. Existen versiones disponibles para diferentes sistemas operativos como Linux, Windows y Mac OS x.

El simulador NS-2 fue originalmente desarrollado bajo la supervisión del proyecto VINT (Virtual Inter Network Testbed.- Pruebas de Interred Virtual). Este proyecto estuvo respaldado por la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency.-

Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados de Defensa) y actualmente ha quedado en manos de un grupo de investigadores y desarrolladores de la Universidad de Berkeley, LBL (Lawrence Berkeley Laboratory), USC/ISI (University of Southern California/Information Sciences Institute) y Xerox PARC (Palo Alto Research Center). La versión que se encuentra en desarrollo es la 2 (de la cual existen múltiples subversiones). El NS-2 es un simulador gratuito que se suministra con el código fuente completo. El principal cambio desde la versión 1 ha sido una mejor subdivisión de las clases de objetos que componen el núcleo del simulador y la adopción del lenguaje OTcl como lenguaje de scripting.

7.4.1 Estructura de NS-2

El simulador NS-2 utiliza métodos en C++ y OTcl (versión orientada a objetos de Tcl). Tcl (Tool Command Language), lenguajes de programación de comandos muy frecuentemente usados para el desarrollo de aplicaciones en entornos UNIX (aunque también existe una versión disponible para Windows). Permite programar de forma rápida y sencilla aplicaciones no muy complejas. Sin embargo, la velocidad de ejecución de éstas no es muy elevada ya que se encuentra ante un lenguaje interpretado y no ante un lenguaje compilado.

El simulador interpreta un script de simulación escrito en OTcl. El usuario tiene que configurar los diferentes componentes (por ejemplo el programador de eventos y los componentes de red) requeridos para completar la simulación. Algunas partes del simulador están escritas en C++ por razones de eficiencia, a partir de las trazas o archivos que se obtienen como resultados de la simulación. Finalmente, herramientas tales como Network Animator (nam) permiten realizar un análisis visual del envío y recepción de paquetes de datos y control a medida que avanza la simulación.

El NS-2 utiliza dos lenguajes de programación ya que el simulador tiene dos maneras diferentes de operar. Por una parte, las simulaciones detalladas de los protocolos requieren un lenguaje de programación con capacidad de manipular bytes, cabeceras de paquetes e implementar algoritmos que puedan correr sobre una gran cantidad de datos de una forma eficiente. Para esas tareas es muy importante la velocidad de ejecución, restándole importancia al tiempo empleado para la programación (compilación, depuración). Por otro lado, gran parte de la investigación en redes requiere variar parámetros y configuraciones, o explorar diferentes escenarios con una mayor velocidad. En esos casos, el tiempo de iteración (cambiar el modelo y volver a correr la simulación) es más importante y el tiempo de ejecución no lo es tanto. Debido a lo anterior, el NS-2 emplea dos lenguajes, C++ y OTcl. C++ es más rápido para la ejecución pero lento para modificar, haciéndolo más apropiado para implementaciones detalladas de

protocolos. OTcl corre mucho más lento pero puede ser modificado rápidamente, haciéndolo apropiado para configurar las simulaciones (Fall, 2003).

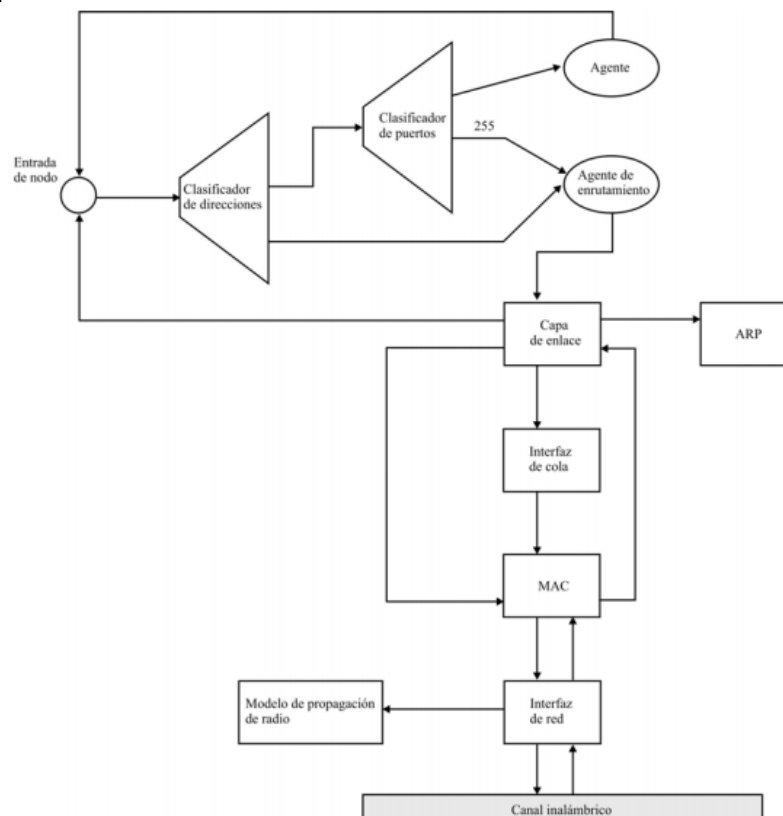
7.4.2 Redes móviles

Las redes móviles en NS-2 están basadas en extensiones de movilidad desarrolladas por el CMU Monarch group (Group, 2002). Estas extensiones introducen el concepto de nodos móviles conectados a canales inalámbricos y permiten la simulación de redes inalámbricas y móviles.

7.4.3 Nodos Inalámbricos

La figura 16 muestra el esquema de un nodo inalámbrico en NS-2 con un agente adicional agregado (para generación y procesamiento de paquetes) (Fall, 2003). La diferencia más importante entre los nodos alámbricos y los móviles es que éstos últimos se conectan a canales inalámbricos para su comunicación, mientras que los primeros se conectan mediante enlaces físicos. Los nodos móviles constan de los siguientes componentes:

Figura 16 Esquema de un nodo inalámbrico en ns-2.



(Group, 2002)

- Un clasificador de direcciones utilizado para dirigir paquetes hacia el clasificador de puertos o al agente de enrutamiento.
- Un clasificador de puertos utilizado para dirigir los paquetes al agente agregado en el nodo móvil.
- Un agente de enrutamiento empleado para administrar las tablas y transmisiones de paquetes.
- Una capa de enlace responsable de convertir las direcciones de red a direcciones físicas (con la ayuda de un módulo ARP) y preparar los paquetes para colocarlos en el canal inalámbrico.
- Un módulo ARP que convierte las direcciones de red a direcciones físicas (MAC).
- Una interfaz de cola utilizada para almacenar los paquetes que deben ser enviados.
- Una capa MAC para administrar el acceso al canal inalámbrico.
- Una interfaz de red que envía y recibe paquetes sobre el canal inalámbrico.
- Un modelo de propagación de radio que determina la intensidad de la señal de los paquetes recibidos y resuelve si el paquete puede ser recibido por la interfaz de red o no.
- Un canal inalámbrico sobre el cual los paquetes son distribuidos.

7.4.4 Transmisión de paquetes

El proceso de transmisión de paquetes por un nodo inalámbrico se define a continuación.

Los paquetes son primero generados por un agente o fuente de tráfico en el nodo inalámbrico. Cada paquete que se genera es colocado en la entrada del nodo y de ahí pasa al clasificador de direcciones. Este clasificador determina si los paquetes son destinados para el nodo actual o si deben ser transmitidos. Los paquetes que son transmitidos son manejados por el agente de enrutamiento, el cual procesa cada paquete y lo envía a la capa de enlace. La capa de enlace

convierte las direcciones de destino a direcciones MAC con la ayuda del módulo ARP. Los paquetes son entonces enviados a la interface de cola, encargada de almacenar los paquetes que deben ser transmitidos.

La longitud de la interface de cola puede ser especificada dependiendo del tipo de cola utilizada. La capa MAC recupera los paquetes de la interface de cola cuando el canal inalámbrico está disponible.

Posteriormente, los paquetes se pasan a la interface de red, para ubicarlos en el canal inalámbrico, allí se entregan los paquetes a la interfaz de red conectada al canal en ese momento.

Sin embargo, esto no significa que los paquetes sean correctamente recibidos por el nodo receptor; ya que se pueden generar pérdidas al entregar el paquete debido a que la cola del receptor este llena o que el enlace se encuentre saturado.

7.4.5 Recepción de paquetes

Cuando un paquete es recibido por una interface de red, ésta consulta el modelo de propagación de radio para determinar si el paquete puede ser recibido correctamente o no. Si el paquete es correctamente recibido se pasa a la capa MAC.

La capa MAC lo envía a la capa de enlace y a su vez ésta lo coloca en la entrada del nodo.

El clasificador de direcciones revisa la dirección de destino y si es la misma que el nodo actual el paquete se coloca en el clasificador de puertos, de lo contrario se pasa al agente de enrutamiento.

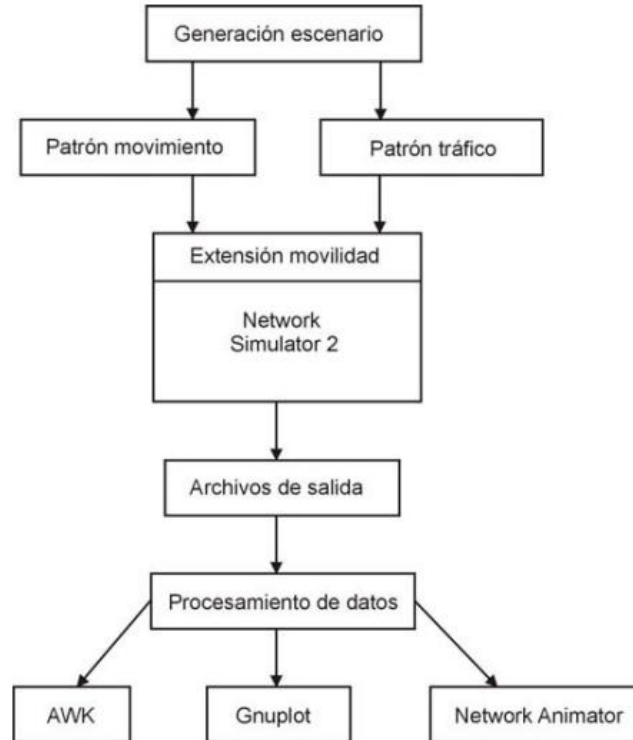
El clasificador de puertos pasa el paquete al agente agregado del nodo inalámbrico, basado en el número de puerto contenido en el paquete. Esto completa la entrega del paquete.

7.4.6 Metodología de la simulación

El archivo generador de tráfico es incluido en el script que define la simulación. El simulador es un generador de conexiones de tráfico. En el script también se tiene que especificar las características de los nodos. Como resultado de la simulación se generan dos archivos, uno conocido como traza, en el cual se registran todos los eventos ocurridos durante la simulación y el otro permite una visualización

gráfica con el Network Animator (nam). En la figura 17 se resume el proceso de la simulación en un diagrama de bloques.

Figura 17 Resumen de la Simulación



(Fall, 2003)

7.4.7 Generador de tráfico

El componente más importante de la simulación es la implementación del agente generador de tráfico, ya que de este depende la creación de los paquetes que serán enviados a través del medio para llegar a su destino.

En la presente simulación se va a generar el tráfico con un modelo que está en el interior de uno de los directorios del NS-2: `~ns/indep-utils/cmu-scen-gen` y consiste en un script de Tcl que genera un tráfico de tipo Exponencial (exp) al cual se le proporcionan los siguientes parámetros:

```
setftp1 [new Application/Traffic/Exponential]
```

```
$ftp1 set packetSize_ 832
```

```
$ftp1 set rate_ 3.8Mb
```

```
$ftp1 set burst_time_ 20ms
```

```
$ftp1 set idle_time_ 10ms
```

Dónde:

ftp1: Es el nombre del agente generador de tráfico.

packetSize_ tamaño constante del paquete generado

rate_ tasa de envío

burst_time_ promedio de encendido

idle_time_ promedio de apagado

Se implementaron dos agentes generadores de tráfico ya que es necesario transmitir video y audio, conociendo que cada uno tiene distinto tamaño de paquete que se describieron previamente en el capítulo 4.3.11 y capítulo 4.3.12.

7.4.8 Configuración de nodos

Los nodos son fundamentales para las simulaciones. Éstos procesan y transmiten los paquetes, lo que los convierte en uno de los componentes más importantes de NS-2. Antes de crear los nodos, deben configurarse con el comando node-config, esto se hace mediante una API en el script de OTcl donde se define el protocolo de enrutamiento y la capa de enlace. En el siguiente segmento se muestra el formato típico para la configuración de los nodos con los valores utilizados para generar la simulación. Después del símbolo # se encuentran comentarios que describen brevemente el significado de cada línea.

```
$ns_ node-config -adhocRoutingAODV # Tipo de protocolo
```

```
-llType LL # Tipo de capa de enlace
```

```
-ifqType "Queue/DropTail/PriQueue" # Tipo de cola
```

```
-ifqLen 50 # Máximo número de paquetes en la cola
```

```
-antType "Antenna/OmniAntenna" # Tipo de antena
```

-propType "Propagation/TwoRayGround" #Tipo de propagación

-phyType "Phy/WirelessPhy" # Tipo de canal físico

-topoInstance \$topo # Topología de la Simulación

-agentTraceON # Trazo a nivel de agente

-routerTraceON # Trazo a nivel de enrutamiento

-macTraceON # Trazo a nivel de MAC

-movementTrace OFF # Trazo de movimiento

Después de configurar los nodos, éstos se crean con el comando node, donde las opciones de configuración han sido especificadas previamente. Si se necesitan nodos con diferentes características, el procedimiento de configuración puede repetirse y más nodos pueden ser creados.

En este caso se crearon 9 nodos, de los cuales 8 nodos van a ser los receptores (televisores) y un nodo el transmisor (antena transmisora), solo se escogen 8 nodos para ser receptores ya que esta cantidad puede dar características iniciales a la generación del modelo, cabe también aclarar que el modelo complejo escogido no necesita datos infinitos para su generación, pues este se adapta corrigiendo errores de las características iniciales.

7.4.9 Archivos de traza

Los archivos de traza proporcionan información de los eventos que ocurrieron durante la simulación, por lo que es muy importante interpretarlos correctamente. Hay dos formatos de salida para las simulaciones de redes inalámbricas. En el primero la información es resumida y se conoce como formato antiguo y el otro es conocido como el formato nuevo, en el que la información no es tan fácil de leer como en el formato antiguo, debido a que la información es más amplia y consiste de un par etiqueta-valor donde etiqueta se refiere al significado del valor obtenido. En las simulaciones de la investigación se utiliza el formato nuevo, el cual se habilita mediante el comando \$ns use-newtrace en el script de OTcl. A continuación se presenta a manera de ejemplo un segmento del nuevo formato que se genera en el archivo de traza y en la tabla 3 se da una descripción de los campos o columnas que puede tener ese formato (Fall, 2003).

“s -t 2.556838879 -Hs 1 -Hd -2 -Ni 1 -Nx 803.18 -Ny 55.65 -Nz 0.00 -Ne -1.000000
 -NIAGT -Nw --- -Ma 0 -Md 0 -Ms 0 -Mt 0 -Is 1.0 -Id 2.0 -It exp -Il 512 -If 0 -li 0 -lv 32
 -Pncbr -Pi 0 -Pf 0 -Po 16777215”

Tabla 3. Explicación de los campos de las trazas de NS-2:

	Etiqueta	Contenido
	r s f d	Recibe Envía Retransmisión Pérdida.
	-t	Tiempo
Etiquetas con información de los nodos	-Ni -Nx -Ny -Nz -Ne -NI -Nw	Identificación de nodo Coordenada X del nodo Coordenada Y del nodo Coordenada Z del nodo Nivel de energía del nodo Nivel de traza Razón de pérdida del paquete: END = Fin de simulación COL = Colisión ERR = Error RET = Cuenta de entrada excedida NRTE = No hay ruta disponible LOOP = Hay un lazo de ruta TTL = Tiempo de vida es cero ARP = Pérdida por ARP OUT = Pérdida por estación base
Información a nivel MAC	-Ma -Md -Ms -Mt	Duración Dirección Ethernet del destino Dirección Ethernet del origen Tipo
Información a nivel IP	-Is -Id -It -Il -If -li -lv	Dirección del origen, número de puerto Dirección del destino, número de puerto Tipo de paquete Tamaño del paquete Identificación de flujo Valor de TTL
Información a nivel de Aplicación	-Pi -Pf -Po	Número de secuencia Número de veces de retransmisión

(Chalmeta, 2009)

Para analizar el comportamiento de los paquetes en la simulación se tienen en cuenta dos aspectos principales que son:

- Diferencia de tiempo con el cual transmite el nodo 0 ó transmisor cuando se envían los paquetes a los otros nodos receptores.
- Cantidad de paquetes perdidos en la simulación por saturación del nodo principal o el canal de transmisión.

La traza es analizada en el programa MATLAB con una Script llamado "leertrazas.mat", que puede ser encontrado en los anexos de la investigación (CD). En donde se muestran todas las variables necesarias para plantear el modelo, como es el porcentaje de pérdida de paquetes, eventos realizados solamente por el nodo 0, tiempo de evento, diferencia de tiempo entre un evento y otro.

7.4.10 Herramienta Network Animator (nam)

La herramienta nam es una herramienta de animación desarrollada en Tcl/TK que utilizando como entrada las trazas generadas automáticamente por NS-2, permite realizar una animación de la simulación. Para invocar nam se utiliza el siguiente comando: `nam nombre_de_archivo.nam`

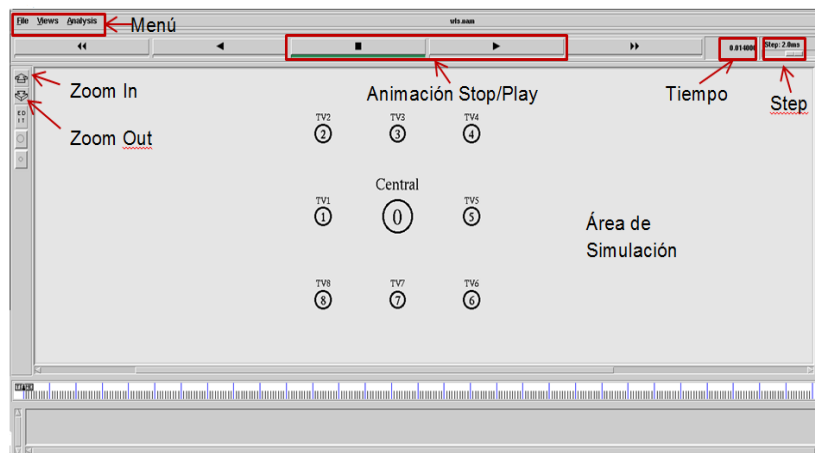
Cuando se abre un fichero de traza con nam, se crea una ventana con la topología indicada en la simulación. La Figura 18 muestra el aspecto general de la herramienta nam.

Se ha señalado con flechas los comandos y zonas más importantes de la herramienta. Las principales áreas y funciones de la herramienta nam son las siguientes:

- Área de animación: En esta zona de la ventana se visualiza el escenario y la animación del mismo.
- Zoom In y Zoom Out: Estos dos botones permiten acercar o alejar el escenario y poder abarcar un mayor rango de visión de la simulación.
- Animación Stop/Play: Como su nombre indica sirven para iniciar y detener la animación.

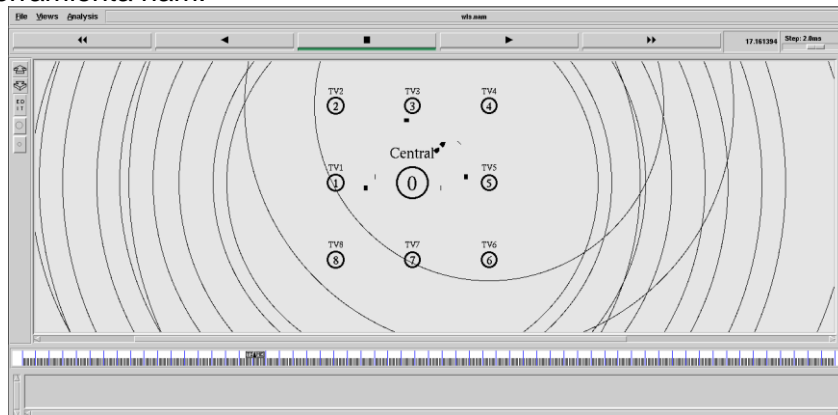
- Tiempo: Indica el tiempo que lleva la simulación. Su valor llegará hasta el tiempo que se estableció en la programación.
- Step: Este valor indica lo rápido que evolucionará la simulación (en milisegundos). Su valor se puede modificar con el slider que hay debajo del marcador.
- Menú: Agrupa varias opciones como por ejemplo grabar la animación, imprimir el área de animación, filtrar el tipo de paquetes a visualizar (datos, MAC, enrutamiento).

Figura 18 Herramienta nam.



Se debe señalar que ésta herramienta es una ayuda para entender lo que ocurre en la simulación como se muestra en la Figura 19, pero no es indispensable para que la simulación se lleve a cabo.

Figura 19 Herramienta nam.



7.5 INTERPRETACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Se genera la simulación para establecer parámetros iniciales del comportamiento de la red de Televisión Digital Terrestre, donde un nodo emisor o nodo 0, transmite paquetes que poseen características similares a las de TDT hacia 8 nodos receptores que son los televisores. Estos comportamientos son guardados en trazas sintéticas, donde se almacenan todos los eventos realizados, tanto del nodo transmisor como de los nodos receptores, dando prioridad a los eventos generados por el nodo 0, debido que allí es donde se genera todo el tráfico pero sin restarle importancia a los eventos realizados por los otros nodos.

Los datos con mayor relevancia es el tiempo que hay entre arribos de los paquetes a los nodos y el número de paquetes perdidos en el transcurso de la transmisión.

7.5.1 Tiempo de salida de los paquetes

En la gráfica 20 se representa el tiempo que le lleva al paquete ser emitido por el nodo 0 hacia el nodo n, el cual realizó la petición de envío de paquetes, teniendo la opción de solicitar video con audio, solamente de video, o solamente audio.

Se puede ver que se trata de mantener una constante en el tiempo 0.01s, pero como se aprecia en la Figura 21, la cual es una ampliación de un sector de la Figura 20, después de la mayoría de los eventos se devuelve al tiempo 0, siendo este el mismo tiempo de transmisión para algunos eventos. Esto se puede interpretar diciendo que en el tiempo 0 el nodo transmisor envía datos a más de un nodo receptor, generando mayor tráfico en el nodo transmisor.

Figura 20 Gráfica Eventos VS Tiempo

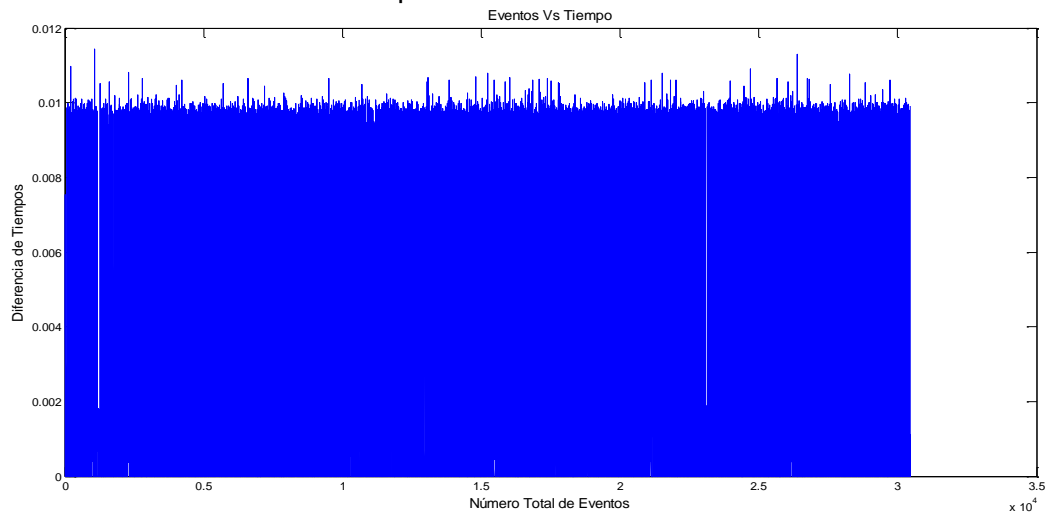
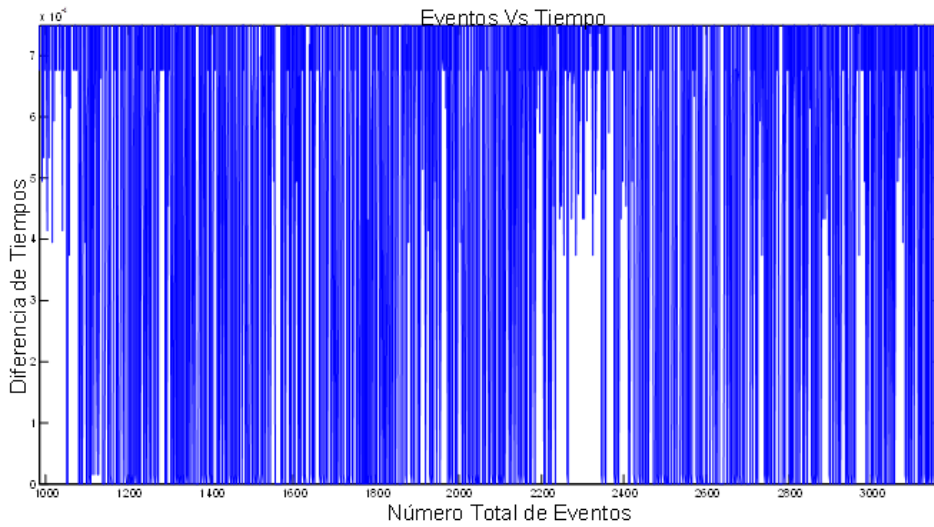
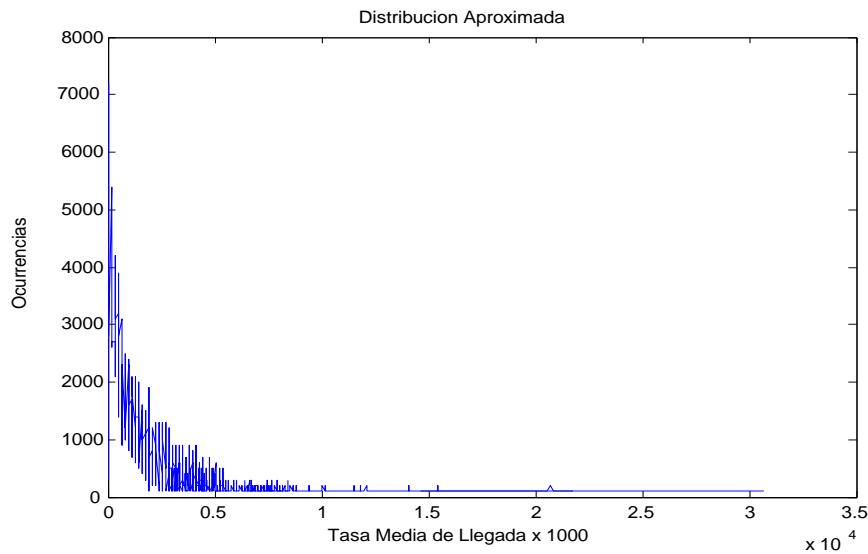


Figura 21 Gráfica Eventos vs Tiempo, Tamaño $\times 10^{-4}$



Luego de obtener la cantidad de repeticiones de los tiempos en los que se generaron los eventos se procede a organizar y obtener como es la distribución de los mismos. Teniendo en cuenta que se ordenan de mayor a menor; el tiempo inicial es el menor, debido a que en ese tiempo 0, se presenta el mayor número de repeticiones en los eventos realizados en la simulación.

Figura 22 Distribución de tiempo de salida de los paquetes



7.5.2 Distribución Exponencial

A lo largo de toda la historia de la ingeniería de teletráfico, la distribución Exponencial ha sido, sin lugar a dudas la más usada. La suposición, usada en los procesos de llegadas markovianos, donde las nuevas llegadas son independientes

de la historia pasada, lleva a un tiempo entre llegadas de forma Exponencial, siendo μ la media de la distribución.

Ecuación 9. Distribución Exponencial

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\mu} - e^{-\frac{x}{\mu}} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

(Alzate, 2001)

7.5.3 Media

Promedio del número total de muestras de la señal analizada. En el estudio de teletráfico, suele usarse para caracterizar el tiempo que hay de transmisión que hay entre paquetes que son enviados por un mismo transmisor hacia uno o distintos destinos.

Ecuación 10. Ecuación Media

$$\mu_{\Delta t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta t_i$$

(Alzate, 2008)

Se obtiene la media del intervalo de tiempo que hay entre el envío de un paquete y otro, la media es tan solo un número por eso no se gráfica, el cual equivale a 0,0019671.

En la Ecuación 11 se presenta la distribución exponencial descrita en la Ecuación 9 y reemplazando el valor de la media dada en la Ecuación 10.

Ecuación 11. Distribución Exponencial Reemplazada

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta t_i} - e^{-\frac{x}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta t_i}} & \end{cases}$$

7.5.4 Coeficiente de correlación

Se define el coeficiente de correlación de Pearson como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas.

En este caso se está estudiando dos variables aleatorias con distribución Exponencial x e y ; el coeficiente de correlación se simboliza con la letra $\rho_{x,y}$, siendo la expresión que nos permite calcularlo:

Ecuación 12. Coeficiente de Correlación

$$\rho_{x,y} = \frac{\sigma_{x,y}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E[(X - \mu_x)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_x \sigma_y}$$

(Molina, 2009)

Dónde:

- σ_{XY} es la covarianza de (X,Y)
- σ_X es la desviación típica de la variable X
- σ_Y es la desviación típica de la variable Y

El valor del índice de correlación varía en el intervalo $[-1,1]$:

Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.

Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva.

Si $r = 0$, no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.

Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.

Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante.

Realizando la correlación con el programa Matlab se obtiene la siguiente tabla, donde se obtiene un resultado al aplicar la correlación entre dos funciones, siendo este el porcentaje de similitud que hay entre las dos distribuciones.

Tabla 4. Resultado de la Correlación

<i>Correlación</i>	
<i>1.0000</i>	<i>0.8437%</i>
<i>0.8437%</i>	<i>1.0000</i>

La cual nos indica que la correlación es positiva, donde valor obtenido por medio del programa Matlab se aproxima a 1.

Se puede ver que este proceso tiene incrementos estacionarios y que:

Ecuación 13. Incrementos Estacionarios

$$Var[B_{H(t)} - B_H(s)] = E[(B_H(t) - B_H(s))^2] = |t - s|^{2H}$$

(Romero, 2004)

La autocorrelación de BH(t) es expresada como $R_B(t,s) = E[BH(t)BH(s)]$, y puede ser deducida de la siguiente manera:

Ecuación 14. Dedución Autocorrelación

$$\begin{aligned} E[(B_H(t) - B_H(s))^2] &= E[B_H^2(t) + B_H^2(s) - 2B_H(t)B_H(s)] \\ E[B_H(t)B_H(s)] &= 1/2(E[B_H^2(t)] + E[B_H^2(s)] - E[(B_H(t) - B_H(s))^2]) \\ E[B_H(t)B_H(s)] &= 1/2(Var[B_H(s)] - Var[B_H(t) - B_H(s)]) \\ E[B_H(t)B_H(s)] &= 1/2(t^{2H} + s^{2H} - |t - s|^{2H}) \end{aligned}$$

(Romero, 2004)

Nuevamente, con $H=0.5$ se reduce la autocorrelación a la de un proceso de movimiento browniano.

Para ver que el proceso FMB es autosimilar, se debe satisfacer las tres condiciones anteriores. Considerando el proceso $BH(at) = X(at)^H$, es fácil ver que $E[BH(at)] = a^H E[BH(1)] = 0$, lo que satisface la primera condición (Stallings, 1998).

$Var[BH(at)] = Var[X(at)^H] = (at)^{2H} Var[X] = (at)^{2H}$, lo que satisface la segunda condición. La tercera condición se cumple de la siguiente forma:

Ecuación 15. Tercera Condición Autocorrelación

$$\begin{aligned} R_{B_H}(at, as) &= 1/2((at)^{2H} - |at - as|^{2H}) \\ R_{B_H}(at, as) &= \frac{a^{2H}}{2}(t^{2H} + s^{2H} - |t - s|^{2H}) \\ R_{B_H}(at, as) &= a^{2H} R_{B_H}(t, s) \end{aligned}$$

(Romero, 2004)

Considerando la correlación entre los incrementos desde $-t$ hasta 0 y los incrementos desde 0 hasta t :

Ecuación 16. Consideración de la Correlación

$$E[(B_H(0) - B_H(-t))(B_H(t) - B_H(0))] = E[-B_H(-t)B_H(-t)B_H(t)]$$

$$E[(B_H(0) - B_H(-t))(B_H(t) - B_H(0))] = -\frac{1}{2}[(-t)^{2H} + t^{2H} - |-t - t|^{2H}]$$

$$E[(B_H(0) - B_H(-t))(B_H(t) - B_H(0))] = \frac{1}{2}(2t)^{2H} - t^{2H}$$

(Romero, 2004)

Para $\mu=H=0.5$, la correlación de los incrementos pasados y futuros desaparece, como se requiere para un movimiento browniano que tiene incrementos independientes. Pero, para $H>0.5$, se tiene una característica apreciable de persistencia (Stallings, 1998).

7.6 COMPARACIÓN CON DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL

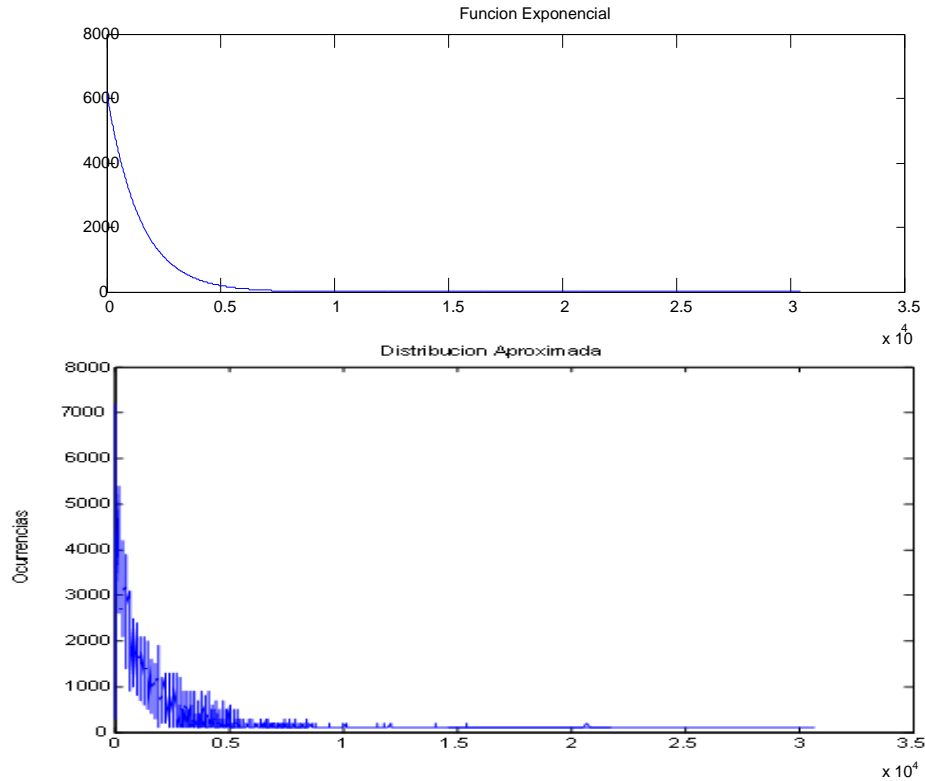
Ahora se procede a comparar la distribución obtenida en los datos de las trazas con una distribución de tipo Exponencial generada aleatoriamente en el programa de Matlab.

Para la comparación de las gráficas se determinan unos parámetros, que se describen a continuación.

- Forma de la gráfica
- Comportamiento de la curva característica de caída después de su punto máximo.
- Dirección de la concentración de los datos, Izquierda o derecha, según el comportamiento de la gráfica.
- Caracterización de la concentración de los datos en el comportamiento de toda la gráfica.

En la Figura 23 se observa una similitud con las dos gráficas, tanto en su forma, como en la característica pendiente de la función Exponencial, verificando que la mayor cantidad de ocurrencias ocurrieron en la parte izquierda de la gráfica. Su similitud también es reiterada en la Figura 22, donde se expone el resultado de la correlación entre la distribución observada en la simulación y en la distribución generada aleatoriamente por el programa Matlab.

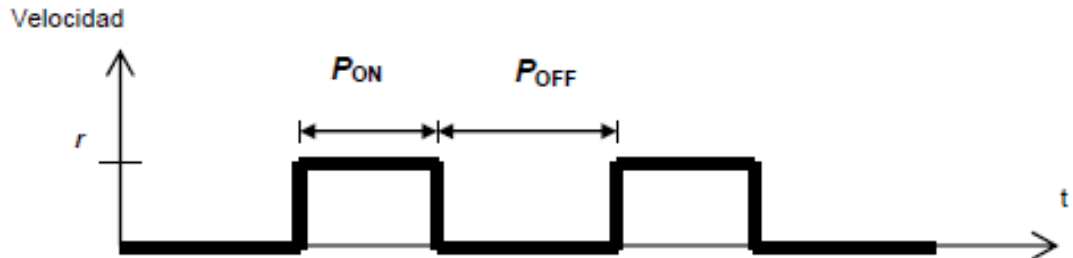
Figura 23 Comparación de Gráficas



7.7 MODELO DE TRÁFICO ON-OFF

Las fuentes de datos que arriban a una red pueden ser modeladas como tráfico ON-OFF. Este modelo considera un período de transferencia de datos (período ON) y un “thinking time”, período de espera (OFF). En la Figura 24 se esquematiza este concepto.

Figura 24 Modelo ON-OFF del tráfico



(Casares, 2004)

El tráfico alterna entre dos periodos: ON – OFF, periodos los cuales tiene las siguientes características:

- ON: se genera tráfico a una velocidad r .
- La longitud de ON y OFF son independientes y pueden tener distribuciones distintas.

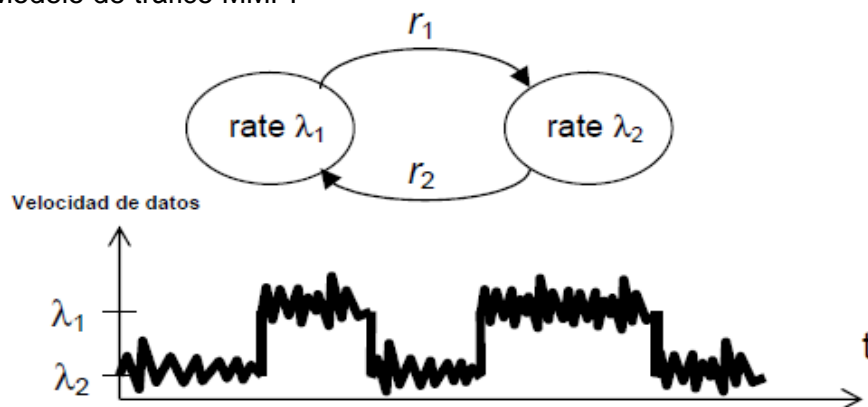
Es claro que estos tiempos ON-OFF van a depender fuertemente del tipo de servicio que este generando ese tráfico, ya que el ON-OFF de un usuario WEB no será el mismo que el de un usuario MMS (Multimedia Message Service).

7.8 MODELO DE TRÁFICO MMPP

Una de las aproximaciones más exitosas a los modelos de tráfico de datos ha sido la de los modelos Markovianos, pues han demostrado que el aumento de complejidad estadística, se puede modelar bajo modelos que sean capaces de guardar cierta memoria del tráfico, principalmente porque un Modelo de Markov puede capturar características relevantes que no son posibles de determinar bajo modelos de procesos invariantes.

Estudios posteriores han expresado la necesidad de generar modelos jerárquicos para buscar aproximaciones válidas a la dependencia de rango largo (LRD) en el tráfico en Internet, dado que ésta viene dada por distribuciones con un exceso de parámetros a determinar (lo cual complica el modelo matemático particular), lo cual ha arrojado un nuevo método de modelado consistente en tomar procesos de Poisson y modularlos bajo esquemas de Markov, consiguiendo resultados admirables con respecto al comportamiento real de las redes y comparados con el enfoque clásico. La gran ventaja de los modelos MMPP (Markov Modulated Poisson Process) consiste en su ajuste a la realidad del tráfico y en el hecho de necesitar pocos parámetros para su aplicación (Cajamarca, 2004).

Figura 25 Modelo de tráfico MMPP



(Färber, 2002)

7.9 CARACTERIZACIÓN DETERMINISTA DEL TRÁFICO

Para el análisis de tráfico el flujo se describe por medio de una función acumulativa definida por la cantidad de datos generados por la fuente de video en el intervalo de tiempo $[0, t]$, en este caso como se está interesado en analizar el tráfico MPEG a nivel de escena en el cual se usa el tiempo discreto y el parámetro de este tiempo es t el cual es un número entero de la secuencia del video. $R(k)$ Indica el número de bits generado por una fuente de video el tiempo k , i. e., $R(k)$ es el tamaño de k^{th} en bits.

Entonces la función $A(t) = \sum_{\tau=0}^t R(\tau)$, $\forall t \geq 0$ la cual se refiere a la función acumulada de tráfico de la fuente. La caracterización del tráfico de una fuente se obtiene mediante la definición de la función de restricción de tráfico $A^*(t)$ el cual define un límite superior a la cantidad de tráfico, en cualquier intervalo de tiempo de longitud t :

Ecuación 17. Función de Distribución del Tráfico

$$A^*(t) \geq A(s + t) - A(s), \quad \forall s \geq 0.$$

(Casilari & Reyes Lecuona, 2006)

Nótese que la función de restricción del tráfico no depende de s y por lo tanto ofrece una invariancia en el tiempo con destino a la función A . La función de tráfico restringido siempre es cada vez mayor (i. e., $A^*(t) \leq A^*(t + \tau)$ para $\tau > 0$).

La función $A^*(t)$ define una restricción significativa sólo si es subaditiva, lo que significa que $A^*(t + s) \leq A^*(t) + A^*(s)$ para todo $s, t \geq 0$, si $A^*(t)$ no es subaditiva, puede ser sustituido por su cierre subaditiva.

7.10 CARACTERIZACIÓN DEL TRÁFICO

Para la caracterización se considera un multiplexor ideal con fuentes de N entradas de video. Así este multiplexor no retrasara el tráfico de entrada y generara un flujo multiplexado de todos los flujos de entrada. Si los flujos de entrada N son cada uno caracterizado por la función de restricción de tráfico $A_i^*(t)$, $i = 1, 2, \dots, N$, entonces del flujo multiplexado tiene la función de tráfico restringido A_{mux}^* , tal que:

Ecuación 18. Función de Tráfico Restringido

$$A_{mux}^*(t) = \sum_{i=1}^N A_i^*(t)$$

(Sanchez, 2006)

7.11 MODELO COMPLEJO

Ecuación 19. Ecuación General Modelo HOT

$$\min \sum_i p_i l_i$$

$$l_i = f_\beta(r_i)$$

$$f_\beta(r_i) = \begin{cases} -c \log(r_i) & \beta = 0 \\ \frac{c(r_i^{-\beta} - 1)}{\beta} & \beta > 0 \end{cases}$$

(Doyle, 2000)

Todos los recursos son normalizados con $0 \leq r_i \leq 1$ y $f_\beta(1)=0$ con esto la pérdida de recursos o paquetes es $f'_\beta(r_i) = -c r_i^{-\beta-1}$, siempre y cuando $\beta \geq 0$. Esta función solamente determina $f_\beta(r_i)$ en conjunto con la constante c , descrito en la Ecuación 20.

Ecuación 20. Ecuación para hallar r_i .

$$r_i = R p_i^{\frac{1}{1+\beta}} \left(\sum_j p_j^{\frac{1}{1+\beta}} \right)^{-1}$$

$$l_i = \begin{cases} -\log(R p_i) + \log\left(\sum_j p_j\right) & \beta = 0 \\ \frac{c}{\beta} \left[\left(R p_i^{\frac{1}{1+\beta}} \right)^{-\beta} \left(\sum_j p_j^{\frac{1}{1+\beta}} \right)^\beta \right] - 1 & \beta > 0 \end{cases}$$

$$J_\beta = \begin{cases} -\sum_i p_i \log(R p_i) + \left(\sum_i p_i\right) \log\left(\sum_i p_i\right) & \beta = 0 \\ \beta^{-1} \left[\left(\sum_i p_i^{\frac{1}{1+\beta}}\right)^{1+\beta} - \sum_i p_i \right] & \beta > 0 \end{cases}$$

(Doyle, 2000)

Los valores de β se caracterizan solo con 3 valores enteros como son $\beta = 0, 1, 2$. Con esto se obtienen 3 casos o modos, y estos a su vez van asociados con una dimensión d , para poder optimizar algún caso.

El primer caso es cuando el valor de β es igual a 0, este es un caso especial ya que está asociado a un incremento Exponencial de recursos, que se crea cuando

se añade un dato o bit a la que se está transmitiendo, cambiando el tamaño del paquete, este resulta de la relación logarítmica, $l_i \propto -\log(r_i)$, con $\beta = 0$.

Cuando $\beta = 1$, es el tamaño característico de la escala con la que se accede a enviar los archivos del transmisor a los receptores.

Por último cuando $\beta = 2$, este es cuando se evalúa el tipo de entropía con la que se está generando el espectro electromagnético para irradiar a los distintos receptores.

Cuando se generan pérdidas generalmente se asume $r_i < 1$, cuando los eventos con $r_i = 1$ ($l_i = 0$) no contribuye al costo y se elimina, reduciendo R por 1.

7.12 GENERACIÓN DEL MODELO COMPLEJO

La Ecuación 21 se obtiene a partir de unir la Ecuación 20 con la Ecuación 11 se obtiene la siguiente ecuación que representa la distribución característica de la Televisión Digital Terrestre basada en un modelo complejo:

Ecuación 21. Modelo Complejo para TDT

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_i p_i l_i \\
 & l_i = f_\beta(r_i) \\
 & f_\beta(r_i) \\
 & -f(x) = \left\{ \frac{1}{0,0019671} - e^{-\frac{x}{0,0019671}} \right\} \log \left(\frac{1}{0,0019671} - e^{-\frac{x}{0,0019671}} \right) \quad \beta = 0 \\
 & = \frac{f(x) = \left\{ \frac{1}{0,0019671} - e^{-\frac{x}{0,0019671}} \right\} \left(\left(\frac{1}{0,0019671} - e^{-\frac{x}{0,0019671}} \right)^{-\beta} - 1 \right)}{\beta} \quad \beta > 0
 \end{aligned}$$

8. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para verificar el correcto funcionamiento del modelo obtenido se realizaron las siguientes pruebas:

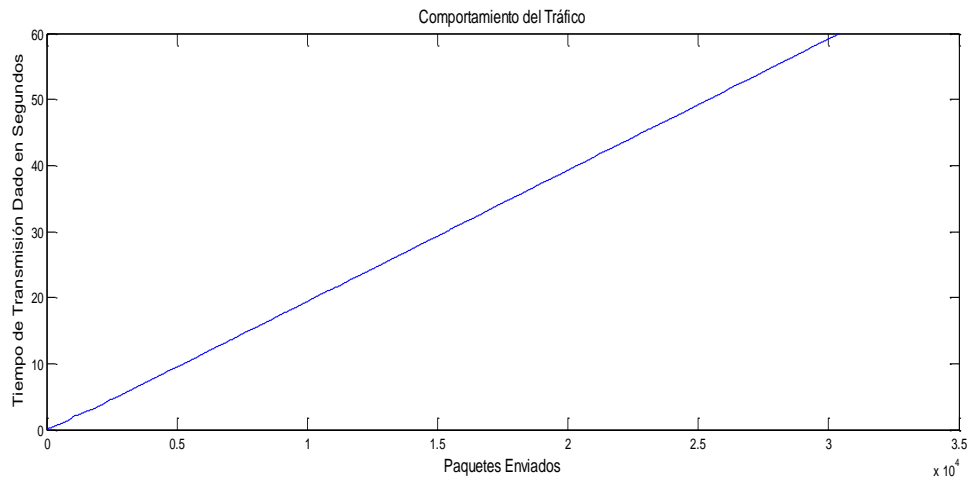
8.1 PRUEBA 1

En la simulación se incrementa la velocidad de transmisión en un 20% y se genera una nueva traza que describe el comportamiento de la red, en cuanto a paquetes enviados y paquetes perdidos por parte del nodo 0 o nodo transmisor hacia los otros nodos receptores.

Se obtuvieron los siguientes datos de la simulación:

Hay un total de 122.663 eventos registrados en la traza, 30.448 eventos realizados por el nodo 0, los cuales se representan en la Figura 26.

Figura 26 Comportamiento de los paquetes enviados



De los eventos realizados por el nodo 0, se encontró una pérdida del 0.0137%, esto representa 418 paquetes enviados y perdidos en el transcurso de la transmisión.

Luego se realiza la simulación incrementando la velocidad de transmisión en un 20%, aplicando para ello el modelo complejo, que optimiza la velocidad de transferencia obteniendo los siguientes datos:

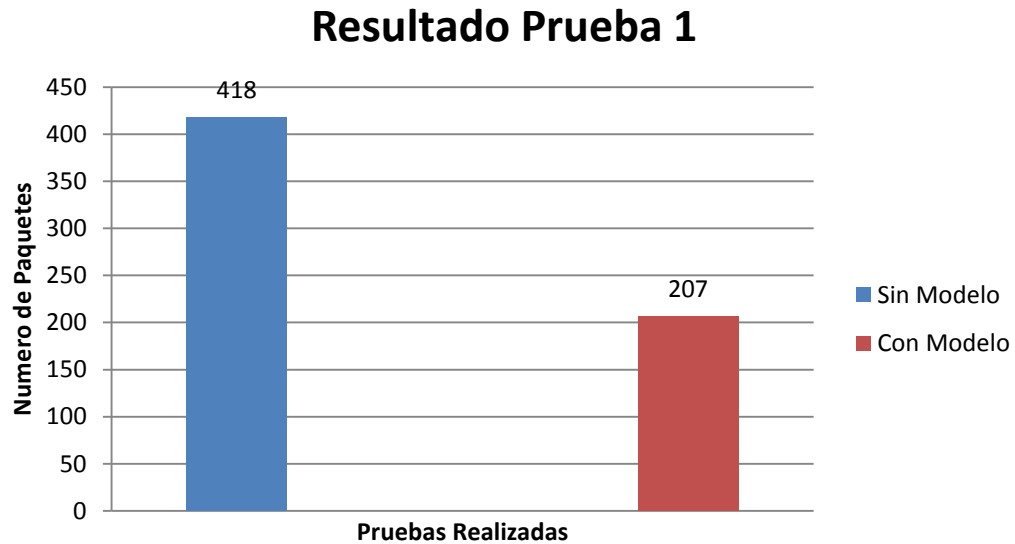
Eventos totales de la traza: 124.675 eventos.

Eventos generados por el nodo 0: 32.312 eventos.

Porcentaje paquetes perdidos: 0,0068%

Total paquetes perdidos: 207 paquetes.

Figura 27 Resultado Prueba 1



En la Figura 27 se observa una reducción en la pérdida de paquetes, a una velocidad de transmisión incrementada en un 20%, ya que su diferencia de paquetes perdidos es 211 paquetes.

De acuerdo con la prueba 1, se obtuvo una eficiencia del 99.35937113% de efectividad en la transmisión de los paquetes del modelo complejo obtenido en el Capítulo 6.12, en comparación, con una eficiencia del 98.62716763% sin la implementación del modelo.

8.2 PRUEBA 2

En la simulación se incrementa el tamaño del paquete en un 20% y se genera una nueva traza que describe el comportamiento de la red, en cuanto a paquetes enviados y paquetes perdidos por parte del nodo 0 o nodo transmisor hacia los otros nodos receptores.

Eventos totales de la traza: 121.518 eventos.

Eventos generados por el nodo 0: 30.494 eventos.

Porcentaje paquetes perdidos: 0,0137%

Total paquetes perdidos: 432 paquetes.

Luego se realiza la simulación incrementando el tamaño de los paquetes en un 20% del tamaño real, aplicando para ello el modelo complejo desarrollado y optimizando el tamaño de paquetes, donde se obtuvieron los siguientes datos:

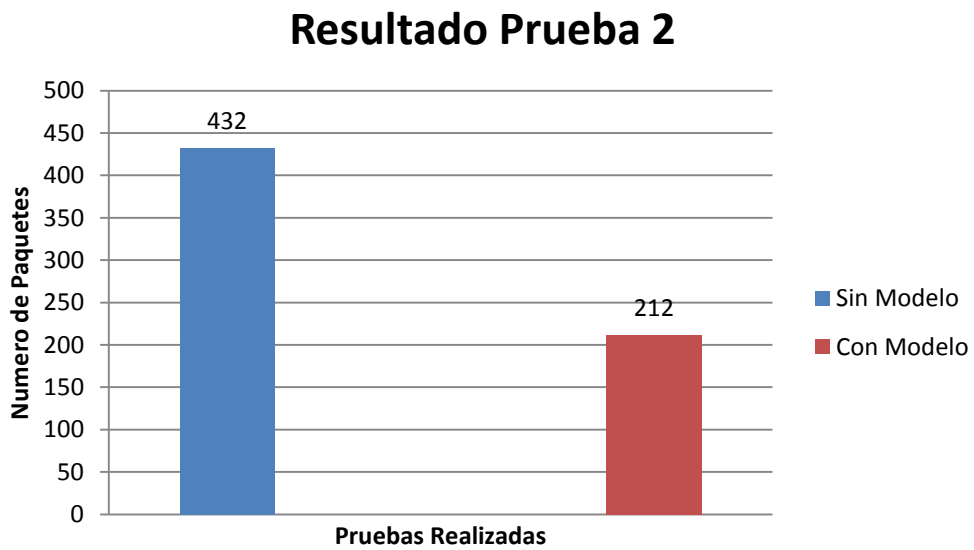
Eventos totales de la traza: 121.663 eventos.

Eventos generados por el nodo 0: 30.307 eventos.

Porcentaje paquetes perdidos: 0,0070%

Total paquetes perdidos: 212 paquetes.

Figura 28 Resultado Prueba 2



Se observa que se obtiene una optimización en cuanto a la pérdida de paquetes, siendo la diferencia de paquetes perdidos de 220 paquetes perdidos.

De acuerdo con la prueba 2, se obtuvo una eficiencia del 99.30049164% de efectividad en la transmisión de los paquetes del modelo complejo obtenido en el Capítulo 6.12, en comparación, con una eficiencia del 98.58332787% sin la implementación del modelo.

8.3 PRUEBA 3

En la simulación se incrementa el tamaño del paquete en un 50% del tamaño real y se genera una nueva traza la cual describe el comportamiento de la red, en cuanto a paquetes enviados y paquetes perdidos por parte del nodo 0 o nodo transmisor hacia los otros nodos receptores.

Eventos totales de la traza: 120.203 eventos.

Eventos generados por el nodo 0: 30.494 eventos.

Porcentaje paquetes perdidos: 0,0150%

Total paquetes perdidos: 458 paquetes.

Luego se realiza la simulación incrementando el tamaño de los paquetes en un 50% del tamaño real, aplicando para ello el modelo complejo obtenido y optimizando el tamaño de paquetes, donde se obtuvieron los siguientes datos:

Eventos totales de la traza: 121.773 eventos.

Eventos generados por el nodo 0: 30.524 eventos.

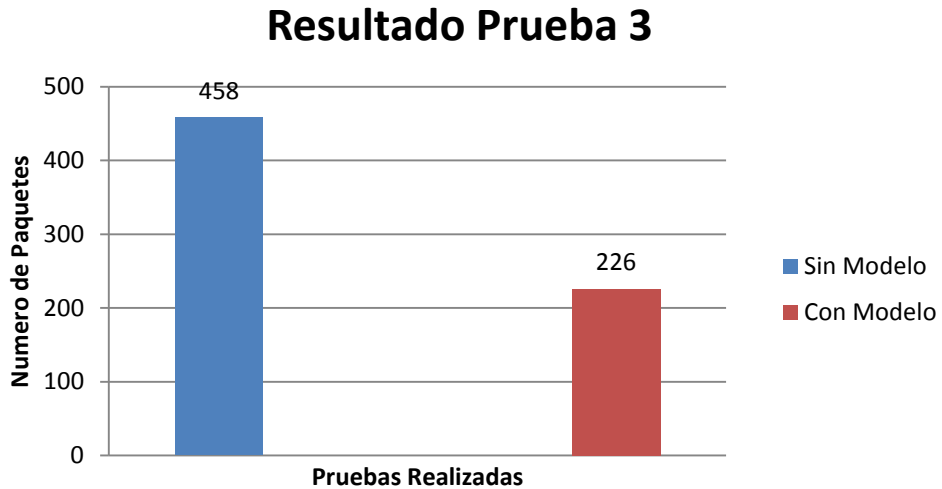
Porcentaje paquetes perdidos: 0,0075%

Total paquetes perdidos: 226 paquetes.

Se observa que se obtiene una mejora en cuanto a la no pérdida de paquetes con un incremento en el tamaño de los paquetes en un 50% del tamaño original, la diferencia de paquetes perdidos es 202 paquetes.

De acuerdo con la prueba 3, se obtuvo una eficiencia del 99.259599% de efectividad en la transmisión de los paquetes del modelo complejo obtenido en el Capítulo 6.12, en comparación, con una eficiencia del 98.49806519% sin la implementación del modelo.

Figura 29 Resultado Prueba 3



8.4 PRUEBA 4

En la simulación se incrementa el tamaño del paquete en un 100% del tamaño real y se genera una nueva traza que describe el comportamiento de la red, en cuanto a paquetes enviados y paquetes perdidos por parte del nodo 0 o nodo transmisor hacia los otros nodos receptores.

Eventos totales de la traza: 121.250 eventos.

Eventos generados por el nodo 0: 30.398 eventos.

Porcentaje paquetes perdidos: 0,0168%

Total paquetes perdidos: 285 paquetes.

Luego se realiza la simulación incrementando el tamaño de los paquetes en un 100% del tamaño original, aplicando para ello el modelo complejo desarrollado, optimizando el tamaño de paquetes y se obtuvieron los siguientes datos:

Eventos totales de la traza: 121.290 eventos.

Eventos generados por el nodo 0: 30.361 eventos.

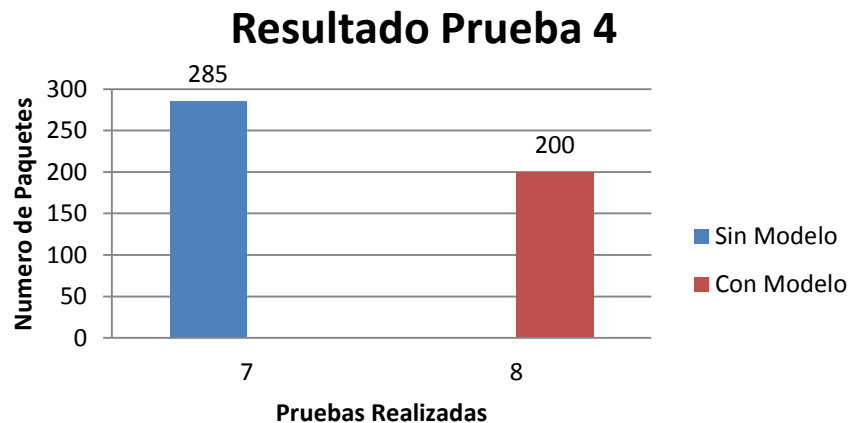
Porcentaje paquetes perdidos: 0,0066%

Total paquetes perdidos: 200 paquetes.

En la Figura 30 se observa que se obtiene una mejora en cuanto a la no pérdida de paquetes con un incremento en el tamaño de los paquetes en un 100%, la diferencia de paquetes perdidos es 85 paquetes.

De acuerdo con las pruebas realizadas se obtuvo una eficiencia del 99.34126017% de efectividad en la transmisión de los paquetes del modelo complejo obtenido en el Capítulo 6.12, en comparación con una eficiencia del 98.94126017% sin la implementación del modelo.

Figura 30 Resultado Prueba 4



8.5 ANÁLISIS DEL MODELO OBTENIDO

Ya que los datos para obtener el modelo de tráfico, fueron datos asumidos, como lo fue el canal de broadcast de 6Mhz, el tamaño de los paquetes que fuera fijo en el canal de broadcast de 832 kbytes, Las velocidades de transmisión para el canal de broadcast fue de 150Kbps, se llegó al resultado de una caracterización para el modelo de tráfico con una función exponencial. Estos resultados fueron obtenidos en base a los datos asumidos, pero difieren de los datos reales que están estipulados tanto por la ETSI "Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones" y la UIT que hace referencia a la Unión Internacional de Telecomunicaciones y es un organismo especializado de la Organización de las Naciones Unidas encargado de regular las telecomunicaciones a nivel internacional entre las distintas administraciones y empresas operadoras.

El estándar DVB-RCT cuenta con las siguientes características:

- 500Kb por canal en el ancho de banda de 6Mhz.
- Transmisión de las tramas TF1 y TF2, en donde TF1 envía un primer símbolo nulo, 6 símbolos de alineación y 176 de datos. Y en donde TF2 envía 8 grupos de 6 símbolos cada uno.
- Espaciado de las portadoras, caracterizando sus velocidades desde 1000ms de duración hasta 250ms de duración.
- Se propone utilizar un entrelazado utilizando un canal de radiofrecuencia y organizarlo de forma tal que los usuarios accedan a este usando TDMA y OFDM, casi a como lo hace DVB-T, dividiendo el canal de radiofrecuencia en ranuras de tiempo y frecuencia.
- Utilizar una tasa de bits distinta en función de la modulación y una tasa de protección de la codificación (1/2) y (3/4). Estas tasas de bits en la estación transmisora pueden variar entre 1 y 30 Mbps por el canal DVB-RCT.

Se propone, que se realice un estudio más detallado, enfocado para el canal de broadcast, especificando de esta manera cada una de sus características como lo son el ancho de banda que se utiliza para transmitir; un ejemplo claro es que se realice una simulación donde se contemplen los 4 canales que están en un ancho de banda de 6Mhz y se trabaje con anchos de banda de 500Kbps o 1Mbps por separado. Después de especificar los canales, se propone caracterizar la turbo codificación y caracterizar la segmentación de la banda, observando de esta manera como se realiza la transmisión de las tramas, siguiendo las recomendaciones de la UIT en el tema.

9. CONCLUSIONES

Debido a que la implementación de la Televisión Digital Terrestre está realizando su migración en Colombia muy lentamente, incluyendo también la falta de estudios respecto al comportamiento del tráfico en forma compleja, se determina realizar en primera instancia una simulación basada en las características teóricas investigadas, luego se estudia y se determina el comportamiento del tráfico en la simulación, para poder introducir estos datos obtenidos en el modelo complejo HOT, donde se optimiza la red con una relación de efectividad en la transmisión de los paquetes del 99.31518049%, comparado con una efectividad de transmisión de los paquetes sin el modelo complejo HOT de 98.59550609%.

Al realizar la presente investigación se estudiaron tres modelos complejos los cuales son “La teoría del Caos (COE)”, “Críticidad Auto-organiza (SOC)” y “Tolerancia Altamente Optimizada (HOT)”, que optimizan las características establecidas dentro de cada uno. Los modelos estudiados poseen ventajas propias, con la diferencia de que los dos primeros poseen desventajas para la implementación de la simulación y el desarrollo del modelo, en cambio por su cuenta el modelo HOT posee las ventajas necesarias para optimizar la red de Televisión Digital Terrestre, como son alta eficiencia, rendimiento, robustez diseñada para incertidumbres, hipersensibilidad a fallas de diseño y las perturbaciones imprevistas, no genera configuraciones especializadas, estructuradas, y de alimentación.

Para optimizar la red de Televisión Digital Terrestre se escogió el modelo complejo HOT, por tal motivo la optimización puede poseer tres estados 0,1, 2. Siendo el estado 0 un estado especial, que optimiza el tamaño del paquete, el estado 1 optimiza la velocidad de transmisión y el estado 2 optimiza la entropía con la que se genera el espectro electromagnético al momento de ser irradiado. Conociendo esto se puede calcular que valores deben ser cambiados o reformados en el momento de empezar la transmisión, esto se ve representado en las pruebas realizadas, donde se modifican los tamaños de los paquetes o los tiempos de ON-OFF para realizar la comunicación.

La presente investigación desarrolla un modelo que optimiza la emisión de Televisión Digital Terrestre, donde se podría cambiar el tamaño de los paquetes o la velocidad de transmisión. Partiendo de esto se ve que la optimización es desarrollada en la parte del software, como lo es, la forma en que se comprimen los paquetes y la multiplexación de la información, como resultado se observa que la implementación del modelo complejo no requiere más hardware del establecido previamente para la implementación de TDT, por tal motivo este modelo complejo se puede tener presente al momento de realizar el desarrollo del software, cuando empiece la migración total de TDT en Colombia.

La exactitud de los datos obtenidos y los comportamientos teóricos deben estar a prueba, ya que si se tomaran valores o trazas reales de las cuales se pueda determinar tipos de factores como son errores en la emisión o interferencias en la transmisión de los paquetes, donde estos errores podrían hacer que se modifique el comportamiento de la distribución Exponencial descrita en las características de TDT, por lo tanto allí es donde entraría a funcionar el modelo complejo, corrigiendo estos errores y modificando la forma de transmisión o tamaño del paquete.

Las características de Televisión Digital Terrestre halladas en la presente investigación, se generaron con un número total de ocho nodos receptores y un nodo transmisor, aunque no implica que el modelo complejo este limitado a este número de nodos, esto es posible porque el modelo no se genera con configuraciones especializadas, ni estructuras y se puede adaptar características no establecidas previamente en la caracterización.

10. RECOMENDACIONES

El análisis de trazas reales, podrá verificar el comportamiento expuesto en esta investigación, de esta manera se podrán obtener otros puntos de vista con respecto al modelo propuesto, y el comportamiento real de la transmisión de TDT.

En el momento que se puedan obtener las trazas reales del comportamiento de la televisión digital, se propone realizar una investigación de un modelo complejo distinto al propuesto en este trabajo, con el fin de contrastar su eficiencia y de esta manera se puedan realizar análisis más precisos que permitirán realizar nuevos dimensionamientos y rediseños con el fin de garantizar la calidad del servicio prestado.

De los tres estados del modelo complejo HOT desarrollado, se estudiaron los dos primeros estados en la presente investigación y el tercer estado no pudo ser estudiado debido que el simulador escogido tiene la limitante de no poder cambiar la entropía con la que se genera el espectro electromagnético al momento de ser irradiado, se podría realizar una futura investigación donde se verifica dicha prueba y validar el modelo complejo.

La presente investigación se realizó con base al estándar DVB-T, pero se recomienda realizar la misma investigación variando las características de la simulación con el estándar DVB-T2. Para evaluar el rendimiento del modelo obtenido.

GLOSARIO

- 8VSB: Es un tipo de modulación que cumple con los regímenes de la modulación analógica implementada para el estándar Americano.
- ATSC (Advanced Television Estándar Comitte): Estándar adoptado por los estados unidos para la televisión digital.
- BTSA: Transmisor que se utilizó para realizar pruebas con el estándar DVB-T en Colombia.
- CNTV (Comisión Nacional de Televisión): Es un organismo de derecho público encargado de dirigir y desarrollar cierto tipo de políticas en materia de la televisión en el país.
- DiBERG: Consorcio de empresas y concesionarias Japonesas (Knörich, s.f).
- Dipolo: Un dipolo de un tipo de antena que tiene una alimentación, que se emplea para la transmisión o para la recepción de ondas de radiofrecuencia.
- DMB-T/H (Digital Multimedia Broadcast Terrestrial/Handheld): Estándar adoptado por china, para la transmisión de la televisión digital móvil.
- DVB (Digital Video Broadcasting): Organismo encargado de proponer y crear procedimientos de estandarización para la televisión digital.
- DVB-T (Digital Video Broadcasting Terrestrial): Estándar adoptado por Europa para la transmisión de televisión digital.
- ETSI: El Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones es una organización de estandarización de la industria de las telecomunicaciones.
- FSK: Es un tipo de modulación en frecuencia en la cual la señal moduladora es un flujo de pulsos que varía entre valores determinados, la modulada es una señal senoidal que varía entre valores de frecuencia distintos (Sabana & Velasco, 2009)
- Harris: Transmisor que se utilizó para realizar pruebas con el estándar ATSC en Colombia.

- HDTV (Televisión de Alta Definición): La televisión de alta definición, es uno de los formatos que permite ver la televisión digital con una mejor calidad de imagen.
- IDTV: Decodificador integrado al televisor, para la recepción de señales digitales
- Interactividad: Hace referencia a la interacción, o modo de dialogo que se tiene entre el usuario y la máquina.
- ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial): Estándar adoptado por Japón para la transmisión de la televisión digital.
- MHP (Multimedia Home Platform): Define una plataforma común para las aplicaciones interactivas de la televisión digital, independiente tanto del proveedor de servicios interactivos como del receptor de televisión utilizado (Alzate, 2004).
- MPEG-4: Es un estándar internacional (ISO/IEC 14496) desarrollado por MPEG (Moving Picture Experts Group). La especificación de MPEG-4 fue finalizada en Octubre de 1998 y se convirtió en un estándar Internacional a principio del 1999 (Sanchez, 2006).
- OFDM: Es una multiplexación que consiste en enviar la información modulando en QAM o PSK un conjunto de portadoras de diferentes frecuencias por el mismo canal donde transmite múltiples señales simultáneamente sobre un solo medio de transmisión (Pérez, 2004).
- Portabilidad: Hace referencia a una recepción portátil, que implica que la señal pueda ser recibida directamente en un terminal, como un celular, palm o pc.
- PSK: La modulación por desplazamiento de fase o PSK (Phase Shift Keying) es una forma de modulación angular que consiste en hacer variar la fase de la portadora entre un número de valores discretos (Sabana & Velasco, 2009).
- QAM: La Modulación de Amplitud en Cuadratura o QAM es una modulación digital en la que el mensaje está contenido tanto en la amplitud como en la fase de la señal transmitida (Hernández, s.f).

- QPSK (Quadrature Phase Shif tKeying): es un esquema de modulación lineal digital donde la información transportada por la señal transmitida está contenida en la fase(Sabana & Velasco, 2009).
- Radiodifusión: es un servicio de radiocomunicación cuyas emisiones se destinan a ser recibidas directamente por el público.
- SDTV (Televisión de Definición Estándar): Nombre que reciben las transmisiones de televisión actuales en formato analógico, para poderlas diferenciar de la HDTV.
- STB (Set Top Box): Decodificador utilizado para la recepción de televisión digital.
- TDT (Televisión Digital Terrestre): Terrestre hace referencia a la aplicación de nuevas tecnologías del medio digital al tipo de transmisión de contenidos a través de una antena convencional.
- UHF (Ultra High Frequency): Es una banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 300 MHz a 3 GHz.
- VHF (Very High Frequency): Es la banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 30 MHz a 300 MHz.

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Majdalawi, A. Á. (2006). Televisión Digital Terrestre (TDT).
- Alzate Monroy, M. A. (2001). Introducción al tráfico autosimilar redes de comunicaciones. *Revista Ingeniería*.
- Alzate, M. A. (2004). Modelos de Tráfico en Análisis y Control de Redes de Comunicaciones. *INGENIERIA, Universidad Distrital*, 1.
- Alzate, M. A. (2007). Complejidad en Redes Modernas de Comunicaciones.
- Alzate, M. A., & Peña, N. (2008). *Modelos de tráfico en análisis y control de redes de comunicaciones*.
- Amaral, L. (2004). *Virtual Round Table on ten leading questions for network research*.
- Arcangelis, L. (2002). *Self-organized Criticality on Small World Networks*.
- Beteta, J. F., Fernández, D., Ladrón, J. L., & Macías, Ó. (2006). *La Televisión Digital Terrenal*. Obtenido de <http://www.asenmac.com/tvdigital/index.html>
- Bethencourt Machado, T. (2001). Televisión Digital. *Colección BETA*.
- Cajamarca, S. L. (2004). *Análisis y Modelado de tráfico de datos con aplicación a redes de acceso ADSL*.
- Cambel, A. B. (1993). *Applied of Chaos Theory: A Paradigm for Complexity*.
- Carlson, J. (1999). *Highly Optimized Tolerance: A Mechanism for Power Laws in Designed*.
- Casares, J. D. (2004). *Modelo de tráfico para video MPEG VBR escalable y no escalable*.
- Casilari, A., & Reyes Lecuona, A. (2006). *Modelado de tráfico telemático*.
- Chalmeta, J. U. (2009). *Estudio y análisis de prestaciones de redes móviles Ad Hoc mediante simulaciones NS-2 para validar modelos analíticos*.

- Comisión Nacional de Televisión. (2008). Fundamentos y Electrónica de las Comunicaciones.
- Comisión Nacional de Televisión. (2009). Formatos de Televisión Digital. Bogotá.
- Comisión Nacional de Televisión. (2010-2013). Lineamientos del Plan de Desarrollo de la Televisión.
- Doyle, J. (2000). Power laws, Highly Optimized Tolerance and generalized source coding.
- DVB. (2011). *Digital Video Broadcasting*. Obtenido de <http://www.dvb.org/>
- Fall, K. (2003). *The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation)*.
- Färber, J. (2002). *Network game traffic modeling*,.
- ForoTDT1. (2005). Guía de Implementación de la TDT en España.
- Geick, J. (2008). *Chaos Making a New Science*.
- Girón, J. B. (2008). Modelación Del Efecto de Escenarios De Cobertura SObre la Migración de Nutrientes en la Subcuenca del Rio Magdalena. Bogotá.
- Group, C. M. (2002). *Wireless and Mobility to NS-2*.
- Guerrero, F. (2008). *Introducción a la Televisión Digital Terres en Colombia*.
- Hernández, I. (s.f). *Modulación QAM*.
- Hernández, M. I. (2010). Estado del Arte, generacion y uso del conocimiento sobre Televisión Digital Terrestre (TDT) en Colombia.
- Kavassalis, P. (2006). *Informe de Vigilancia Tecnológica*.
- Knörich, M. Z. (s.f). *TV Digital aberta no Brasil - Políticas Estruturais para um modelo nacional*. São Paulo: Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos. Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.

- MEDTV1. (2005). Alternativas Tecnológicas para la Implementación del Modelo de Referencia.
- MHP, G. d. (2005). *Foro Tecnico de la Televisión Digital*. España: Ministerio de Industria, turismo y comercio.
- Molina, G. (2009). Estadística Descriptiva .
- Morris Chaigneau, S. (2005). Interactive TV Standards: A Guide to MHP, OCAP, and JavaTV. *Elsevier*.
- Pérez, C. (2004). *Modulación COFDM*.
- Pérez, J. A. (2007). *Tráfico Autosemejante*.
- Poincaré, L. (1993). Teoría del Caos.
- Prieto, D. (2006). Television Digital Terrestre.
- Puig Sellés, A. (2005). Guía de Implementación de la TDT en España.
- Robert, C. (2000). *Highly optimized tolerance in epidemic models incorporating local optimization and regrowth*.
- Romero, J. (2004). Tráfico Autosemejante.
- Sabana, M. H., & Velasco, E. G. (2009). *Prototipo PLC basico para un sistema Indoor*. Bogotá: Fundacion Universitaria San Martin.
- Sanchez, J. F. (2006). *Modelo de Tráfico para Video MPEG-4*. Bogotá: Fundacion Universitaria San Martin.
- Sanchez, R. (2006). *Introduccion a la Criticidad Auto-Organizada*.
- Serna, M. (2005). Implantación de Televisión Digital en Colombia: Estudio Técnico y Económico.
- Strikant, R. (2000). Control of Communication Networks.
- Talavera, I. T. (2009). *Criticallidad Autoorganizada*.

Torres, R. (2010). MPEG-2 para DVB-T. Cataluña.

Valverde, S. (2002). Self-organized critical traffic in parallel computer networks.

Villalobos, J. P. (2009). Modelo de Redes Complejas Mediante Enlace Compatible.

Waldrop, M. (1992). *Complexity The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*.

Wiesenfeld, K. (1987). *Self Organized Criticality an Explanation of 1/f noise*.

Wojcik, L. A. (2004). *A Highly-Optimized Tolerance (HOT)-Inspired Model of the Large Scale Systems Engineering Process*.