

**MODELO PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DE UNA RED LAN SOBRE PLC
EN LA TRANSMISIÓN DE VIDEO BAJO EL ESTÁNDAR HOMEPLUG AV**

**SERGIO MAURICIO BARÓN VERA
GERSON PAREDES DÁVILA**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
GRUPO DE TECNOLOGÍAS DE LA INVESTIGACIÓN
LINEA DE INVESTIGACIÓN EN TELEMÁTICA
MAESTRÍA EN TELEMÁTICA
BUCARAMANGA
2015**

**MODELO PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DE UNA RED LAN SOBRE PLC
EN LA TRANSMISIÓN DE VIDEO BAJO EL ESTÁNDAR HOMEPLUG AV**

**SERGIO MAURICIO BARÓN VERA
GERSON PAREDES DÁVILA**

**Proyecto de Grado presentado como requisito para optar al título de
Magíster en Telemática**

**Director
M.Sc ABIGAIL TELLO RIOS**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
GRUPO DE TECNOLOGÍAS DE LA INVESTIGACIÓN
LINEA DE INVESTIGACIÓN EN TELEMÁTICA
MAESTRÍA EN TELEMÁTICA
BUCARAMANGA
2015**

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, noviembre de 2015

DEDICATORIA

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado la vida, la salud y la sabiduría para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres, por su apoyo constante, por sus consejos, por sus ejemplos de perseverancia y constancia, por sus valores, por la motivación permanente que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su amor incondicional.

A Elizabeth, musa de mi inspiración, balanza de mi vida, fuente de constante apoyo y motivación, gracias por acompañarme y ser mi apoyo en todo momento.

A mis hijos Nicolas y Valentina motores de mi vida.

Sergio Mauricio Barón Vera

A Dios por ser siempre mi guía, mi alegría, tranquilidad en esta etapa de vida que culminare en mi entorno académico, espero ser digno de tan honorable esfuerzo.

Deseo especialmente, este logro relevante en mí vida a mis dos hijs amadas Paula Julina y Tatiana Alejandra, quienes permitieron que fuera posible este objetivo; igualmente dedicarles a todas las personas que siempre creyeron en mi capacidad, a esas personas que siempre estuvieron mí lado incondicionalmente, a lo largo de este proceso educativo y formativo.

Gerson Paredes Dávila

AGRADECIMIENTOS

Al personal docente de la maestría en Telemática de la Universidad Autónoma de Bucaramanga, de quienes obtuve muy valiosos aportes y sugerencias.

A la directora del proyecto M.Sc Abigail Tello Rios por su valiosa asesoría, paciencia y dedicación en el acompañamiento de la culminación de este proceso.

Al PhD(c) Juan Carlos Vesga Ferreira, por valioso aporte y colaboración en el proyecto de investigación.

Al M.Sc Gerardo Granados Acuña por sus aportes.

Finalmente, mi profundo agradecimiento a mi tía Marlen y a todas aquellas personas, que han hecho posible la culminación de mi trabajo de investigación.

Sergio Mauricio Barón Vera

A los docentes de la maestría en Telemática de la Universidad Autónoma de Bucaramanga, de quienes obtuve muy valiosos aportes y sugerencias.

A la directora del proyecto M.Sc Abigail Tello Rios por su valiosa asesoría, paciencia y dedicación en el acompañamiento de la culminación de este proceso.

Al PhD(c) Juan Carlos Vesga Ferreira, por valioso aporte y colaboración en el proyecto de investigación y a todas aquellas personas que me apoyaron.

Gerson Paredes Dávila

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. GLOSARIO	21
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
3. HIPÓTESIS	24
4. OBJETIVOS	25
4.1 OBJETIVO GENERAL	25
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
5. MARCO REFERENCIAL	26
5.1 ANTECEDENTES	26
5.2 ESTADO DEL ARTE	30
5.3 MARCO TEÓRICO	35
5.3.1 Características de la red eléctrica como canal de transmisión	37
5.3.2 Características del canal	38
5.3.3 Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM)	49
5.3.4 Funcionamiento de PLC	55
5.3.5 PLC y el modelo OSI	61
5.3.6 <i>HomePlug AV</i>	63
5.3.7 Red Eléctrica	69
5.3.7.1 Conformación de una red eléctrica	69
5.3.7.2 Líneas de distribución de baja tensión	69
5.3.7.3 Equipos de medida	69
5.3.8 Participación Eléctrica en Colombia	69
5.3.9 Fundamentos técnicos de video digital sobre redes IP	70
5.3.9.1 Sistemas de Transmisión de Video Digital	70
5.3.9.2 El Estándar MPEG (<i>Moving Pictures Experts Group</i>) de la ISO (<i>International Standards Organization</i>)	75
5.3.10 Almacenamiento y Transmisión	77

5.4 TRANSMISIÓN DE VIDEO EN UNA RED IP	81
5.4.1 IPTV sobre las redes IP	90
5.4.2 Requerimientos de QoS para IPTV en redes IP-PLT	92
5.4.3 Factores que afectan la entrega de servicios IPTV	97
5.4.4 Sistemas de Medición de QoE para IPTV	102
5.4.5 Perspectivas para IPTV	107
6. METODOLOGÍA	111
6.1 MATERIALES Y MÉTODOS	111
6.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO	112
6.3 PLANEACIÓN	115
6.3.1 Variables y Factores de la investigación	115
6.3.2 Dispositivos y especificaciones	118
6.3.3 Softwares utilizados	120
6.3.4 Consideraciones adicionales	126
6.3.5 Tamaño de la muestra	127
6.4 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	129
6.5 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO	134
7. RESULTADOS	138
7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS	138
7.2 MODELO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE VARIANZA PARA THROUGHPUT	139
7.3 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA EXPERIMENTACIÓN	145
7.3.1 Supuesto de Varianza Constante	146
7.3.2 Supuesto de Normalidad	147
7.3.3 Supuesto de Independencia	147
7.4 MODELO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL RETARDO	149
7.5 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA EXPERIMENTACIÓN	155

7.5.1 Supuesto de Varianza Constante	156
7.5.2 Supuesto de Normalidad	157
7.5.3 Supuesto de Independencia	157
7.6 MODELO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL <i>JITTER</i>	159
7.7 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA EXPERIMENTACIÓN	165
7.7.1 Supuesto de Varianza Constante	166
7.7.2 Supuesto de Normalidad	167
7.7.3 Supuesto de Independencia	167
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	169
8.1 CONCLUSIONES	169
8.2 RECOMENDACIONES	173
BIBLIOGRAFÍA	175
ANEXOS	182

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Variaciones en la línea de potencia	49
Cuadro 2. Tipos de modulación, FEC y throughput en capa física para el estándar HomePlug 1.0	55
Cuadro 3. PLC y modelo OSI	62
Cuadro 4. Especificaciones del hardware	68
Cuadro 5. Parámetros de ITU-R BT.601-5	73
Cuadro 6. Formatos de codificación/compresión de videos más usados	74
Cuadro 7. Formatos de Contenedores de Video Digital	78
Cuadro 8. Conjunto de PHBs definidos por la IETF	96
Cuadro 9. Tipos de Distorsión de Imagen	98
Cuadro 10. Típicas fuentes de Pérdidas de Paquetes	101
Cuadro 11. Tipos de Modelos de sistemas de medida de Calidad	103
Cuadro 12. Puntuación MOS usada para niveles de calidad IPTV	104
Cuadro 13. Puntuación MOS usada para niveles de calidad IPTV	107
Cuadro 14. Especificaciones técnicas del modem TP-LINK modelo TL-PA211	119
Cuadro 15. Tamaño de muestra para diseño factorial con dos (2) factores	129
Cuadro 16. Parámetros para el desarrollo de las pruebas	132
Cuadro 17. Muestras tomadas por Codec Video y cantidad de host	133

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación (1) Impedancia característica de las líneas de potencia Z_L	38
Ecuación (2) Constante de propagación γ	38
Ecuación (3) Función de transferencia $H(f)$	39
Ecuación (4) Impedancia característica Z_L	39
Ecuación (5) Constante de propagación $\gamma(f)$	39
Ecuación (6) Terminos de $Re\{\gamma(f)\}$	39
Ecuación (7) Terminos de $Im\{\gamma(f)\}$	39
Ecuación (8) Valor real de $R'(f)$	40
Ecuación (9) Expresión $\alpha(f)$	40
Ecuación (10) Expresión $\alpha(f)$	40
Ecuación (11) Expresión $\beta(f)$	40
Ecuación (12) Ecuación final para $\alpha(f)$	40
Ecuación (13) Amplitud de la función de transferencia del canal $A(f,l)$	41
Ecuación (14) Respuesta al impulso h en un tiempo discreto (t), $h(t)$	42
Ecuación (15) Respuesta al impulso h en el dominio de la frecuencia, $H(f)$	42
Ecuación (16) Ecuación final del modelo de canal PLC, $H(f)$	42
Ecuación (17) Capacidad del canal PLC, expresión de Shannon, C	43
Ecuación (18) Ajustes en la expresión de Shannon, C	43
Ecuación (19) Comportamiento ruido de fondo generalizado $NCBN(f)$	47
Ecuación (20) Comportamiento ruido de fondo $NCBN(f)$ desarrollos industriales	47
Ecuación (21) Comportamiento ruido de fondo $NCBN(f)$ desarrollos industriales	47
Ecuación (22) Tipo de ruido impulsivo $nimp(t)$	48
Ecuación (23) Ancho de banda de cada sub canal Δf	50
Ecuación (24) Símbolo OFDM en el dominio del tiempo	51
Ecuación (25) Símbolo OFDM completo en el dominio del tiempo	51
Ecuación (26) Símbolo OFDM completo en el dominio del tiempo aplicando FFT	52
Ecuación (27) OFDM en el dominio del tiempo aplicando FFT, N ortogonales	52

Ecuación (28) OFDM en el dominio del tiempo, señales retrasadas	52
Ecuación (29) Ancho de banda B_t de la señal	53
Ecuación (30) Throughput para una estación, en una red Homeplug AV, Thr	116
Ecuación (31) Desviación estándar del retardo (σ)	117
Ecuación (32) Y_{ijl} para códec (i), réplica (l), variable throughput	139
Ecuación (33) Hipótesis nula (H_o) e hipótesis alternativa (H_A), factor A	140
Ecuación (34) Hipótesis nula (H_o) e hipótesis alternativa (H_A), factor B	140
Ecuación (35) Hipótesis nula (H_o) e hipótesis alternativa (H_A), interacciones AB	140
Ecuación (36) Cálculo del Factor de Corrección (FC), variable throughput	141
Ecuación (37) Valor FC según los datos del cuadro 18, variable throughput	141
Ecuación (38) Cálculo de las sumas de cuadrados (SC), variable throughput	142
Ecuación (39) Cálculo de las sumas de cuadrados (SC) efecto A	142
Ecuación (40) Cálculo de las sumas de cuadrados (SC) efecto A	142
Ecuación (41) Cálculo de las sumas de cuadrados (SC) efecto AB	143
Ecuación (42) Valores SC_{AB} según los datos del cuadro 23, variable throughput	143
Ecuación (43) Suma de cuadrados para el error (SC_E), variable throughput	144
Ecuación (44) Y_{ijl} para códec (i), réplica (l), Variable de retardo	149
Ecuación (45) Hipótesis nula (H_o) e hipótesis alternativa (H_A), factor A	150
Ecuación (46) Hipótesis nula (H_o) e hipótesis alternativa (H_A), factor B	150
Ecuación (47) Hipótesis nula (H_o) e hipótesis alternativa (H_A), interacciones AB	150
Ecuación (48) Cálculo del Factor de Corrección (FC), variable de retardo	151
Ecuación (49) Valores FC según los datos del cuadro 19, variable de retardo	151
Ecuación (50) Suma de cuadrados (SC_{TOT}), variable de retardo	151
Ecuación (51) Cálculo de las sumas de cuadrados (SC) efecto A	152
Ecuación (52) Cálculo de las sumas de cuadrados (SC) efecto B	152
Ecuación (53) Cálculo de las sumas de cuadrados (SC) efecto AB	153
Ecuación (54) Valores SC_{AB} según los datos del cuadro 19, variable de retardo	153
Ecuación (55) Suma de cuadrados para el error (SC_E), variable de retardo	153
Ecuación (56) Y_{ijl} para códec (i), réplica (l), Variable de <i>Jitter</i>	159
Ecuación (57) Hipótesis nula (H_o) e hipótesis alternativa (H_A), factor A	160

Ecuación (58) Hipótesis nula (H_o) e hipótesis alternativa (H_A), factor B	160
Ecuación (59) Hipótesis nula (H_o) e hipótesis alternativa (H_A), interacciones AB	160
Ecuación (60) Cálculo del Factor de Corrección (FC), variable de <i>Jitter</i>	161
Ecuación (61) Valores FC según los datos de la tabla 10, variable de <i>Jitter</i>	161
Ecuación (62) Suma de cuadrados (SC_{TOT}), variable de <i>Jitter</i>	161
Ecuación (63) Cálculo de las sumas de cuadrados (SC) efecto A	161
Ecuación (64) Cálculo de las sumas de cuadrados (SC) efecto B	162
Ecuación (65) Cálculo de las sumas de cuadrados (SC) efecto AB	163
Ecuación (66) Valores SC_{AB} según los datos de la tabla 10, variable de <i>Jitter</i>	163
Ecuación (67) Suma de cuadrados para el error (SC_E), variable de <i>Jitter</i>	163

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Rango de frecuencias de ADSL vs PLC	36
Figura 2. Representación de un modelo multipath en un canal PLC	41
Figura 3. Modelo de densidad espectral para ruido de fondo generalizado	46
Figura 4. Ejemplo de ruido impulsivo en el dominio del tiempo en una red PLC	47
Figura 5. Modelo del impulso utilizado para establecer el ruido impulsivo	48
Figura 6. Sub canales para OFDM	50
Figura 7. Siete formas de onda OFDM en el dominio de la frecuencia	53
Figura 8. Arquitectura de PLC	56
Figura 9. Arquitectura PLC Indoor	57
Figura 10. Arquitectura de la segunda parte de la red PLC	58
Figura 11. Elemento de red dentro del hogar	59
Figura 12. Frecuencia usada por PLC en la línea eléctrica	60
Figura 13. Tipos de Filtros instalados en los equipos PLC	61
Figura 14. Diagrama de una red HomePlug	65
Figura 15. Adaptador de línea eléctrica TL-PA211	66
Figura 16. TL-PA211	67
Figura 17. Muestra de los distintos componentes	71
Figura 19. Cabecera de IP	82
Figura 20. Cabecera UDP	83
Figura 21. Cabecera TCP	83
Figura 22. Cabecera SCTP	84
Figura 23. Cabecera de RTP	86
Figura 24. Conformación Paquete RTCP	87
Figura 25. Funcionamiento RTSP	88
Figura 26. Cabecera TS	89
Figura 27. Ejemplo de Armado Cabecera TS	90
Figura 28. Diferentes Modelos de Jitter a través de una red IPTV	92

Figura 29. Modelos Potenciales de Tráfico IPTV y encolamiento	93
Figura 30. Explicativa que ilustra el beneficio de usar DiffServ	95
Figura 30. Jitter Promedio	117
Figura 31. PCs utilizados	118
Figura 32. Modem Homeplug AV marca TP-LINK modelo TL-PA211	119
Figura 33. Cable UTP	120
Figura 34. Interface de VLC	122
Figura 35. Medios y Formatos de Entrada de VLC	123
Figura 36. Formatos de reproducción de video de VLC	124
Figura 37. Interfaz Gráfica de Wireshark	126
Figura 38. Versión modo Texto (TSHARK)	126
Figura 39 . Configuración de Red Homeplug AV usada en el experimento	130
Figura 40. Servidor generando video con VLC	131
Figura 41. Servidor capturando tráfico con <i>Wireshark</i>	131
Figura 43. Valores residuales vs. Valores estimados para Throughput	146
Figura 44. Valores residuales de Throughput en gráfica de probabilidad	147
Figura 45. Valores residuales de <i>Throughput</i> vs. Ord. de ejecución de la prueba	148
Figura 46. Valores residuales vs. Valores estimados para Retardo	156
Figura 47. Valores residuales de Retardo en gráfica de probabilidad	157
Figura 48. Valores residuales de Retardo vs. Ord. de ejecución de la prueba	158
Figura 49. Valores residuales vs. Valores estimados para Jitter	166
Figura 50. Valores residuales de Jitter en gráfica de probabilidad	167
Figura 51. Valores residuales de <i>Jitter</i> vs. Ord. de ejecución de la prueba	168
Figura 52. Red con Dispositivos PLC de Diferentes Marcas	183
Figura 53. Red con Dispositivos PLC de Diferentes Marcas	183
Figura 54. Red para Verificar Influencia de Ruido	184

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Estado del Arte	30
Tabla 2. Matriz de diseño para Throughput (en Kbit/s)	134
Tabla 3. Matriz de diseño para la Desviación Estandar de retardo en segundos	135
Tabla 4. Matriz de diseño para la El Jitter Promedio	136
Tabla 5. Matriz de diseño para la Pérdida de Paquetes en unidades	137
Tabla 6. Factores y Tratamientos de prueba	139
Tabla 7. Throughput - Interacción de Factores A-B	143
Tabla 8. ANOVA completo para Throughput	144
Tabla 9. Retardo - Interacción de Factores A-B	153
Tabla 10. ANOVA completo para Retardo	154
Tabla 11. Jitter - Interacción de Factores A-B	162
Tabla 12. ANOVA completo para Jitter	164

RESUMEN

Debido a la demanda en el ancho de banda de servicios en las telecomunicaciones, se presentan nuevas oportunidades a otras tecnologías, entre ellas la posibilidad de transmisión de datos y video a través de la red eléctrica en los hogares. Este proyecto presenta los resultados de pruebas de campo frente a consideraciones tales como el retraso en la llegada de paquetes y el ancho de banda, con el fin de evaluar el desempeño de una red de datos utilizando la red eléctrica domiciliaria existente para la transmisión de servicios de video y los protocolos utilizados por estas aplicaciones.

PALABRAS CLAVES

- Comunicaciones por líneas eléctricas.
- Red de Área Local.
- Red de Área Local Virtual.
- Multiplexación por división de Frecuencia Ortogonal.
- HomePlug AV.

ABSTRACT

Due to the demand in the bandwidth of services in the telecommunications, new opportunities are opened for other technologies. The possibility of transmission of information and video across the electrical net for level of the homes, among others. The project presents the complete results of field trials in contrast of considerations such as the delay of packages and the bandwidth, in order to evaluate the performance of a network for the transmission of services of video and the protocols used by these applications.

KEYWORDS

- PLC Power line Communications.
- LAN Local Área Network.
- VLAN Virtual Local Área Network.
- OFDM Orthogonal Frecuency División Multiplexing.
- HomePlug AV.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la sociedad ha demandado con mayor ahínco sistemas y tecnologías de comunicación que permitan la transmisión de señales de video en alta definición sin que esto afecte la integridad de la señal, sosteniendo la calidad y permitiendo que llegue a satisfacción al usuario, quien al final es el que disfruta de estas señales.

En el área de las telecomunicaciones siempre ha representado un factor importante y de preocupación el ancho de banda, ya que es relevante y significativo en la comunicación por la transferencia de datos, voz y video, en los diferentes medios como lo son inalámbricos y cableados, esto a su vez ha permitido la evolución de nuestra sociedad, gracias al sin número de desarrollos que han permitido la mejora en las plataformas de comunicación.

Las redes inalámbricas, como: 802.11*, *Bluetooth*** y *HomeRF**** permiten interconectar puntos de acceso inalámbricos. El gran beneficio de utilizar redes inalámbricas es la capacidad de movilidad sin perder la conectividad de red y una desventaja son las velocidades que se pueden alcanzar.

Las redes cableadas como la tecnología *Ethernet*****, se basan en un sistema de cableado estructurado, sin embargo no es muy habitual encontrar en las casas toda una infraestructura física que se requiere para esta tecnología.

* 802.11 es un estándar más conocido como IEEE 802.11 que define el uso de los niveles inferiores de la arquitectura OSI (capa física y capa de enlace de datos), especifica sus normas de funcionamiento en una WLAN.

** Bluetooth estándar de comunicación mediante ondas de radio, de corto alcance que posibilita la diferente interconexión de dispositivos electrónicos para realizar la transmisión de voz y datos.

*** HomeRF es un protocolo de red inalámbrica diseñado en 1997 por HomeRF Working Group para la vivienda.

**** Ethernet (también conocido como estándar IEEE 802.3) es un estándar de transmisión de datos para redes de área local que se basan en el principio de que todos los equipos en una red Ethernet están conectados a la misma línea de comunicación compuesta por cables cilíndricos.

Las redes sin nuevos cables como la presentada en el presente proyecto que se basa en las redes de baja tensión (eléctricas), son las redes más dominantes. Las redes de comunicación en líneas de baja tensión (*Power Line Communication*), fueron introducidas en los Estados Unidos, Europa y Asia desde el año 2002.

Uno de los medios de comunicación que no se había explorado a plenitud son las redes eléctricas, cuya función principal es la transmisión de electricidad. Las redes eléctricas debido a que se encuentran en todas nuestras casas, ciudades, campos (zonas rurales) permiten ser tenidas en cuenta para los avances en las tecnologías de comunicaciones; es así como aparece la tecnología PLC *power line communication* con la que se logra la transmisión de datos, voz y video.

Esta tecnología permite implementar plataformas de comunicaciones de datos en escenarios que no requieran un cableado nuevo, donde se utilice la red eléctrica ya existente con llevando a una rápida instalación evitando también la contaminación electromagnética y generando otra opción en la transmisión ya que como se sabe el espectro de la comunicación inalámbrica en la actualidad se encuentra en su mayor congestión (redes y tecnologías Inalámbricas WiFi, etc.), de igual forma al utilizar las redes de electricidad como medio de transmisión permite una baja importante en los costos de infraestructura y cobertura gracias a la red existente como lo es el cableado eléctrico. Para lograr una conexión solo se debe conectar un dispositivo (adaptador o modem PLC) de usuario final en cualquier tomacorriente situado en el tendido eléctrico.

La mayoría de planes de gobierno de nivel departamental y nacional* en nuestro país contemplan políticas que permitan un gran auge de la conectividad en todo el territorio nacional, es así que el plan nacional de TIC busca fortalecer los procesos de conectividad en todas las organizaciones del estado y mejorar las oportunidades de que los ciudadanos tengan acceso a tecnologías de punta.

* Ministerio de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones de Colombia, 2008.

Esto presenta una gran ventana de oportunidad en la implementación de diseños en las redes de medios conocidos como sin nuevos cables, permitiendo el uso de nuevas tecnologías como alternativa a las ya existentes en la comunicación de información.

El Plan Vive Digital, en su numeral 8.1.5 establece estándares de conectividad para escenarios residenciales y empresariales.* Y actualmente se presenta situaciones poco sorteables en las edificaciones residenciales y empresariales a nivel de nuevas redes e infraestructura en estas edificaciones, es aquí donde tomo gran relevancia PLC pasando a ser como una gran alternativa para cumplir con el objetivo mencionado.

A nivel departamental, se quiere llegar por medio de la banda ancha en hogares y empresas y según lo establece el Plan de Desarrollo Santander en serio** “El crecimiento de la banda ancha se requiere para llegar no solo a zona residenciales si no rurales empresariales y educativas siendo de gran importancia la trasmisión de las tres señales datos, voz y video de nuevo es aquí donde juega un papel importante la tecnología PLC ya que con ella podremos llegar a sitios donde por otros medios no se puede, caso puntual son las zonas rurales.

Con la tecnología PLC y como se muestra en el proyecto se puede aplicar para participar activamente en los planes de gobierno mencionados anteriormente, así mismo es una alternativa muy interesante y garantiza un excelente ancho de banda el cual permite a su vez confianza y seguridad los usuarios que requieran trasmisión de información. La gran favorabilidad de esta tecnología es que los medios que ella utiliza son aquellos que encontramos en todas las zonas de nuestro país (residencial, empresarial y rural), se esta hablando del tendido eléctrico municipal, departamental y nacional permitiendo llagar casi a cualquier sitio de la geografía nacional.

* Ministerio de las Tecnologías de la información y comunicaciones de Colombia, 2011

** Gobernación de Santander, 2012

1. GLOSARIO

ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line.</i>
AMR	<i>Automatic Meter Reading.</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange.</i>
ASK	<i>Amplitude Shifting Keying.</i>
BER	<i>Bit Error Rate.</i>
BPL	<i>Broadband Powerline.</i>
DCE	<i>Data Communication Equipment.</i>
DPSK	<i>Differential Phase Shifting Keying.</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum.</i>
DTE	<i>Data Terminal Equipment.</i>
EBCDIC	<i>Extended Binary Coded Decimal Interchange Code.</i>
LAN	Local Área Network.
OPLAT	Onda Portadora de Alta Tensión.
OFDM	Ortogonal Frecuencia División Multiplexación.
OQPSK	<i>Offset Quadrature Phase Shifting Keying.</i>
PLC	<i>Powerline Communications.</i>
PSK	<i>Phase Shifting Keying.</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shifting Keying.</i>
RTU	<i>Remote Terminal Unit.</i>
TCP/IP	Protocolo de control de transmisión /Internet Protocolo.
UC	Unidades de Concentración.
USART	<i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter.</i>
USB	Universal Serial Bus.
UR	Unidades Repetidoras.
UU	Unidades de Usuario.
VLAN	Virtual Local Área Network.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La transmisión de video en la actualidad presenta limitaciones en lo referente al ancho de banda, por lo cual los servidores que tienen este servicio deben contar con gran velocidad para que la información llegue a sus clientes, de esta forma el número de clientes capaces de soportar se encuentra determinado por el ancho de banda disponible.

El ancho de banda un factor relevante cuando se habla de transmisiones en eventos multitudinarios (conciertos, etc.) o de sistemas en tiempo real, donde la información debe llegar con gran calidad y en el menor tiempo posible.

Es de gran importancia en el momento de iniciar a diseñar una red; plantear como pregunta ¿qué servicios se tienen que ofrecer?, ¿qué tecnologías se debe utilizar?, Para dar respuesta a las preguntas es necesario evaluar las necesidades de todos los usuarios del sistema.

En el caso de audio, la digitalización de la información planteaba un gran problema por la cantidad de espacio y ancho de banda que se requiere, tanto para almacenar como para transmitir la información sonora en forma de bits, la digitalización de secuencias de video presenta un problema mayor: Un video VHS incluye 25 fotos por segundo con una resolución de 768x512 (unos 393.216 puntos por fotograma). Si cada punto de la imagen puede ser elegido entre 16 millones de colores distintos, se precisarían 3 bytes (24 bits) por punto, lo que resultaría 1.179.648 bytes por fotograma. Lo que significa que un segundo de vídeo (25 fotografías) ocuparían 29.491.200 bytes, esto es, unos 28 MB por segundo y esto solo para la imagen sin contar el audio. Una película de 90 minutos ocuparía, unos 148 GB (Díaz, Moreno & Torres, 2001).

El problema es en la transmisión de vídeo vía internet o a través de otros tipos de redes, donde la compresión de datos tiene que alcanzar el máximo grado posible con el fin de disminuir el ancho de banda necesario para la transmisión de este tipo de información, sin que por ello se pierda la calidad de la imagen. (El ancho de banda es la cantidad de bits que puede viajar por el medio físico - cable coaxial, par trenzado, fibra óptica, etc.- Cuando mayor sea el ancho de banda más rápido obtendremos la información. Las velocidades típicas hoy en día son de 10 Mbps a 100 Mbps).

Todo esto, junto con el aumento en la capacidad de procesamiento, ha llevado a plantear el desarrollo de un "Estudio para evaluar el rendimiento en una red LAN sobre PLC bajo el uso del estándar *homePlug* AV para transmisión de video."

3. HIPÓTESIS

Mediante la implementación de la tecnología PLC se mejora la velocidad en la transmisión de video a nivel de hogares, es posible con esta tecnología reemplazar las tecnologías existentes para tener una mayor velocidad y cobertura en las zonas de difícil acceso a internet y será factible que con esta tecnología se logre reducir la brecha tecnológica y de conocimiento en los sectores rurales.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un modelo para evaluar el rendimiento de una red LAN sobre PLC en la transmisión de video bajo en estándar homeplug AV.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar la información relacionada con la transmisión de video bajo entornos de red y su articulación con el sistema *homeplug AV* a partir del año 2000.
- Realizar el muestreo y toma de datos para la transmisión de video en una red PLC mediante el uso de adaptadores de red bajo el estándar *homeplug AV*.
- Analizar bajo técnicas de diseño experimental los resultados obtenidos en la transmisión de video sobre la red PLC.
- Elaborar un modelo que permita predecir el comportamiento de una red LAN sobre PLC para transmisión de video.
- Evaluar el comportamiento de la red LAN en la transmisión de video al confrontar los resultados obtenidos experimentalmente frente al modelo propuesto.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1 ANTECEDENTES

Las comunicaciones son de gran relevancia en las relaciones humanas, internet es una forma masiva y rápida de comunicación en un principio la comunicación se ofreció por banda angosta, y nuevas necesidades hicieron posible la banda ancha.

La cantidad de usuarios que hoy día utilizan el internet ha ido aumentando de manera excesiva; por lo cual ahora se necesita que este contenga tecnología de alta velocidad y eficiencia; esta forma recibe el nombre de *Broadband* (Internet de banda- ancha). El inconveniente que presenta es su limitación debido a la falta de infraestructura.

Hay tecnologías como DSL (digital subscriber line por sus siglas en inglés) línea de abonado digital, la cual es vía líneas telefónicas y es ofrecida por proveedores de telefonía local. El tener acceso virtual y directo dentro de las casas u oficinas, ha hecho que el crecimiento del Internet de banda angosta sea impresionante; lo que la hace atractiva es lo que comúnmente se llama última milla (“*Last Mile*” es la última conexión que existe antes de llegar al usuario).

Dada la gran demanda en las comunicaciones se abren otras alternativas para transportar datos, video y voz como las líneas eléctricas, esta tecnología recibe el nombre de (power line communications) PLC.

En 1919, *General Electric* realizó pruebas en donde se demostraba la factibilidad de comunicarse por medio de una portadora de línea de potencia, y en 1921 el primero de estos sistemas fue puesto en servicio, esta aplicación fue realizada para la comunicación de voz, y luego se reconocieron que los canales de PLC pueden proveer circuitos para otros usos.

A finales de los años veinte PLC era usado como piloto en un relevador de protección y desde entonces continua usándose para relevadores. La Segunda Guerra Mundial produjo un gran ímpetu para resguardar la transmisión de potencia y PLC ayudó en la transmisión de telemetría y control de carga.

Más adelante, se comienza a operar con el primer sistema de frecuencia con portadora (CFS) en las líneas de alta tensión, en un rango de frecuencias que va de 15 hasta 500 kHz. En redes de alta tensión se llegó hasta 500 Km de distancia, utilizando 10 W de energía.

Unos años más tarde, a principios de los años 30, el CFS operaba con redes de media y baja tensión, mediante la señalización de Ondas en la Portadora (RCS), y comenzaron las transmisiones de datos en un rango de frecuencia de 125 Hz y 3 kHz, pero todo ello, con un problema, se tenía un limitado ancho de banda, es decir, de unos pocos bits por segundo.

Esta tecnología se mejora en los años 80, surgió con el objetivo de transporta datos utilizando las redes eléctricas usando frecuencias de 50 a 60 Hz. Usando las líneas de baja tensión se puede para tener acceso a los módems que se encargan de llegar al usuario final en su residencia.

En los años noventa se da un gran paso al lograr la comunicación bidireccional con esta tecnología. En 1997 la Universidad de Manchester realiza experimentos demostrando la viabilidad de transmitir señales de datos, video y voz con esta tecnología. Así mismo en ese mismo año, las compañías, Northern Telecom de Inglaterra y United Utilities de Canadá, presentan la viabilidad comercial de conseguir que Internet fuera accesible desde la red eléctrica. Llevando a que las compañías eléctricas a generar iniciativas para implementación de PLC en su infraestructura.

La tecnología PLC, mejora cuando al liberar el mercado de las telecomunicaciones y de energía se hacen unos grandes avances en los campos de la modulación, codificación y detección, permitiendo así la comunicación de banda ancha sobre las líneas de energía eléctricas.

Por otra parte, el uso de la red de baja tensión (BT) para dar acceso a Internet nació como una alternativa para problemas que presentaba ADSL, el cable modem o acceso inalámbrico. A principios del 2005, la FCC (*Federal Commission of Communications*), órgano regulador de los EEUU, anuncia oficialmente su apoyo a la tecnología PLC.

Más adelante, la FCC adopta unas normas para facilitar el desarrollo en el acceso PLC, es decir, el uso de la tecnología PLC para proporcionar servicios de banda ancha a hogares y negocios.

En 2006, la Unión Europea, publica en su boletín una recomendación de la Comunidad sobre las comunicaciones electrónicas de banda ancha en redes eléctricas, que anima a todos los miembros de la industria del PLC a unir los esfuerzos para favorecer a esta tecnología y así poder convertirse en una alternativa real a las tecnologías de banda ancha actuales.

A finales del 2006, *HomePlug PowerLine Alliance* sugiere AV como estándar PLC. Este ofrecía una tasa de datos sobre los 200 Mbps con un rendimiento real de aproximadamente 100 Mbps.

En octubre de 2010, se anuncia la especificación AV2, que integra el estándar IEEE 1901 para acelerar la transmisión de datos. Este nuevo estándar *HomePlug AV2*, incrementa el rendimiento en la capa de aplicaciones hasta cinco veces más que hasta ahora tenía *HomePlug AV*, permitiendo así múltiples descargas de video de alta definición de manera simultánea.

Actualmente, también se realizan mejoras en el rango del nuevo estándar AV2, con nodos adicionales en la red que se utilizan como repetidores para permitir que la señal se extienda a todas las partes del hogar, empresa, edificio...

La posibilidad de construir una arquitectura de red dentro del hogar, hace que las comunicaciones *Power Line*, un tema de actualidad con especial importancia, facilite la implementación de una red en el hogar sin la necesidad de realizar un cableado específico.

La tecnología HPAV es un sistema que aprovecha el cableado, ya existente, de la red eléctrica para la transmisión de los datos, video o voz, conocido como Triple-Play, basado en el protocolo IP. En la actualidad países como Alemania, España, Austria Suiza y Estados Unidos de Norteamérica ofrecen servicios utilizando esta tecnología.

Una visión general del próximo estándar *HomePlug AV*. En el año 2005 H. Kaywan, Afkhamie, Srinivas Katar, Larry Yonge and Richard Newman publicaron un artículo donde se muestra una introducción a algunos de los elementos básicos de la capa MAC y PHY del estándar *HomePlug AV*. Se describen algunas de las opciones a nivel del sistema y las características del canal que es la línea de alimentación. Finalmente, se discute el rendimiento del sistema propuesto medido con prototipos del sistema típico de hogares norteamericanos. También especifican que la tecnología *HomePlug AV*, se orienta hacia la distribución de voz, vídeo y datos en toda la casa utilizando como medio: las líneas de energía.

Benchmarking y calidad de servicio en líneas de potencia domiciliarias bajo condiciones de ruido. En el año 2007 Bente Jensen y Soren Kjaersgaard, publicaron un artículo orientado hacia el comportamiento de una red de datos bajo condiciones de ruido controlados, para lo cual implementaron una red LAN bajo el

uso de la tecnología PLC bajo condiciones altamente controladas. El artículo se enfoca en su mayor parte en el comportamiento de los diferentes adaptadores de red Ethernet-PLC utilizados y su respuesta ante diversas situaciones de ruido. Sin embargo, no presentan estudios de predicción para la transmisión de video o el throughput.

5.2 ESTADO DEL ARTE

Tabla 1. Estado del Arte

Título	Autores	País	Año	Impacto
<i>The low voltage distribution network as last mile access network – signal propagation and noise scenario in the HF-range</i>	Zimmermann, M. & Dostert, K	USA	2000	Nos permitió ser referente en la tecnología PLC en su out door
Una Panorámica de las Telecomunicaciones	Pearson Educación	España	2001	Fue importante en el contexto de las telecomunicaciones requerido para el proyecto
<i>Comparison of CDMA and OFDM systems for broadband downstream communications on low voltage power grid</i>	Fantacci, R.; Morosi, S. & Seravalle, R.	Suecia	2001	Permitió comprender el comportamiento de OFDM y la aplicabilidad en la tecnología PLC
<i>A power line communication network infrastructure</i>	Lin, Y.; Latchman, H.; Lee M. & Katar,	USA	2002	Nos permitió abordar el tema de transmisión a nivel

Título	Autores	País	Año	Impacto
<i>for the smart home</i>				residencial con PLC
<i>Power line Communication Network Infrastructure For Smart Homes</i>	Lin, Y.; Newman, R. & Latchman, H.	USA	2002	Nos permitió abordar el tema de transmisión a nivel residencial con PLC
<i>A multipath model for the power line channel. IEEE Transactions on Communications</i>	Zimmermann, M. & Dostert, K.	USA	2002	Nos permitió ser referente en la transmisión de múltiples canales, presentando el mismo comportamiento de PLC
<i>Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band power line communications.</i>	Zimmermann, M. & Dostert, K.	USA	2002	Nos permitió tener una referencia relevante en el ruido que se presenta en la banda ancha
<i>Power Line Telecommunications (PLT) Channel Characterization and Measurement Methods</i>	European Telecommunication Standards Institute	Europa	2003	Impacto en como tomar muestras en los canales de transmisión
<i>Theoretical and Field Performance Comparison between 802.11 Wireless and</i>	Lee, M.; Newman, R.; Latchman, H.; Katar, S. & YONGE L.	USA	2003	Nos permitió ver las diferencias de una tecnología inalámbrica vs PLC

Título	Autores	País	Año	Impacto
<i>Power line Home Plug 1.0 Protocols</i>				en un medio físico
<i>Home Plug 1.0 Power line Communication LANs –Protocol Description and Comparative Performance Results.</i>	Lee, M.; Newman, R.; Latchman, H.; Katar, S. & Yonge, L.	USA	2003	Nos permitió establecer comparaciones de la tecnología PLC en una red de área local (LAN)
<i>Throughput Modelling and Fairness Issues in CSMA/CA Based Ad-Hoc Networks</i>	Wang, X. & Kar, K.	USA	2004	Nos permitió ser referente en el modelo estadístico que realizamos
Transmisión de datos por la red eléctrica	Álvarez, J.; García, V.; González, D.; González-Moriyón, G.; Rodríguez, D.; Rubio, M. & Valencia	España	2004	Nos permitió comprender el funcionamiento de la tecnología PLC
<i>Broadband Power line Communications Networks</i>	Hrasnica, H.; Haidine, A. & Lehnert, R.	USA	2004	Permitió comprender la comunicación de PLC en la banda ancha
<i>Throughput Analysis of Home Plug 1.0</i>	Jung, M.; Chung, M & Lee, M	USA	2005	Nos permitió un preámbulo en el estándar 1.0 el cual antecedió al 2.0
<i>Modeling and Analysis of Noise Effects on Broadband</i>	Meng, H. & Guan, Y.	USA	2005	Nos permitió tener una referencia relevante en el

Titulo	Autores	País	Año	Impacto
<i>Power-Line Communications</i>				ruido que se presenta en la banda ancha
<i>Channel Capacity Statistical Analysis for Indoor Power Line Transmissions</i>	Ouzzif, M. & Le Masson, J.	USA	2006	Nos permitió realizar estadísticas en el canal de transmisión en PLC
Estadística y Muestreo	Martínez, C	México	2006	Nos permitió ser referente en el desarrollo del modelo basado en lo estadístico
<i>Benchmarking and QoS of In-House Power line Equipment for AV- Streaming Applications.</i>	Jensen, B.; Slavensky, H. & Kjærsgaard, S.	USA	2006	Permitió comprender la calidad de servicio en la transmisión de equipos PLC
<i>Understanding Broadband over Power Line</i>	Held, G.	USA	2006	Permitió comprender el comportamiento de la banda ancha en la línea eléctrica
Arquitectura de red indoor PLC	Casa Domo	España	2007	Permitió comprender uso de la tecnología PLC en su estructura indoor
<i>Efficient High Speed Communications over electrical power lines</i>	Lee, J. & Tripathi, K.	USA	2007	Permitió conocer acerca de la transmisión de alta

Titulo	Autores	País	Año	Impacto
<i>for a large number of users</i>				velocidad a múltiple usuarios, importante en las pruebas realizadas con los host
<i>Benchmarking and QoS of In-House Power line Equipment under Noisy Conditions</i>	Jensen, B.; Slavensky, H. & Kjærsgaard, S	USA	2007	Calidad de servicio baja condiciones de ruido, esto nos permitió referenciar esta condición
<i>Fixed or adaptive rate maximum throughput analysis</i>	Grote, W.	Chile	2007	Nos permitió tener bases en el rendimiento y análisis de la red PLC
Comisión Regulación de Energía y Gas	CREG	Colombia	2008	Permitió tener presente las regulaciones nacionales.
Frecuencia usada por PLC en la línea eléctrica	Conectronica	España	2008	Tener presente el espectro en el cual trabaja la tecnología PLC
<i>Throughput Analysis over Power Line Communication Channel in an Electric Noisy Scenario</i>	Guillen, E.; López, J. & Barahona, C.	Colombia	2008	Nos permitió realizar el análisis de un canal de potencia con gran ruido
Análisis y diseño de experimentos	Gutierrez, H.	México	2008	Permitió conocer y aplicar el modelo experimental

Título	Autores	País	Año	Impacto
Rango de frecuencias de ADSL vs PLC	Matiz, N.	España	2011	Nos permitió ver las diferencias de una tecnología inalámbrica vs PLC en un medio físico.
Análisis simple del estándar HomePlug 1.0 aplicado a la transmisión de información utilizando la red eléctrica como medio físico de transmisión	Vesga F., J. C.	Colombia	2011	Nos permitió conocer el estándar home plug 1.0 base del estándar home plug 2.0 el cual está inmerso en proyecto PLC
Elemento de red dentro del Hogar	Gamboa, D.; Quiguiri, C.; Narváez, J. & Martínez, R.	Ecuador	2012	Sirvió como referente en la transmisión in door de la tecnología PLC
<i>Power Line Communications in practice</i>	Jose Antonio Vesga Barrera	Francia (Paris)	2013	Permitió comprender como se utiliza el medio de trasmisión de la tecnología PLC

Fuente: Autores del Proyecto.

5.3 MARCO TEÓRICO

Al igual que ADSL surgió para optimizar el transporte de los datos y ofrecer servicio de banda ancha, utilizando y aprovechando el cableado de red telefónica; PLC tuvo la finalidad de aprovechar la estructura del cableado de la red eléctrica para la transmisión de los datos. En la red telefónica, la voz ocupa un ancho de

banda de 4 kHz y utilizando el mismo medio, el ADSL utiliza un rango de frecuencias de 25 kHz hasta 1.1 MHz.

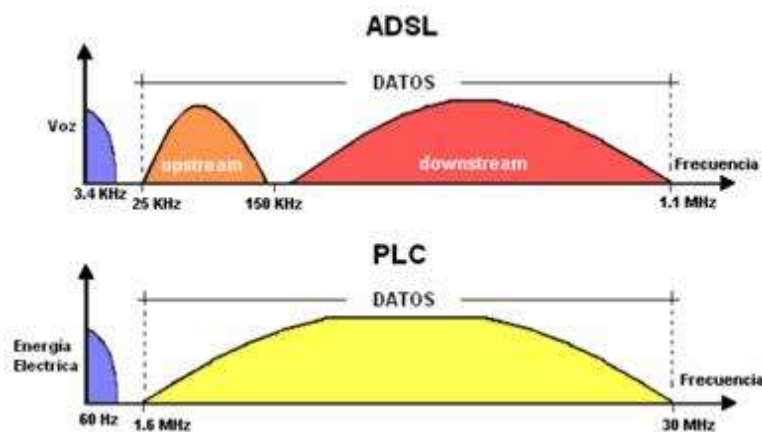
Análogamente, en la red eléctrica la energía eléctrica se transmite a 60 Hz, y el PLC, utilizando el mismo medio para la transmisión de datos, utiliza un rango de frecuencia de 1.6 MHz hasta los 30 MHz.

De esta manera, las comunicaciones PLC es una tecnología relativamente nueva e innovadora que permite transmitir voz y datos (telefonía e Internet) a través de la red eléctrica ya existente y por lo tanto, se utilizará la toma eléctrica convencional.

Con esta tecnología es posible conectarse a Internet a velocidades similares e incluso superiores a lo que es hoy conocido como "Internet de Banda Ancha". Al utilizar los cables de la red eléctrica, como medio de transmisión, la instalación eléctrica del hogar, se comporta como una red de datos donde cada enchufe es un punto de conexión a Internet.

En la Figura 1 se muestra el rango de frecuencias que utilizan PLC y ADSL.

Figura 1. Rango de frecuencias de ADSL vs PLC



Fuente: Matiz, N. (2011). Rango de frecuencias de ADSL vs PLC. Recuperado el 5 de agosto de 2014, de <http://natymatiz.blogspot.com/2011/04/distribucion-del-espectro-de.html>

5.3.1 Características de la red eléctrica como canal de transmisión. La red eléctrica no fue diseñada para realizar procesos de comunicación, sino para el transporte de energía eléctrica; aunque la red eléctrica no ha sido diseñada para establecer procesos de comunicación a alta frecuencia, actualmente es considerada objeto de estudio, debido a que estaba siendo subutilizada. Empresas de desarrollo tecnológico han visto en ella un gran potencial para ofertar servicios de telecomunicaciones tales como: telemetría, voz, datos, video, entre otros, lo cual constituye una gran ventaja competitiva en comparación con otras soluciones alternativas existentes en el mercado.

La red eléctrica es considerada un medio hostil para la transmisión de información, en donde se pueden presentar numerosos problemas en el momento de establecer un proceso de comunicación tales como: alto componente de ruido, impedancia variable y posibles atenuaciones significativas; son algunos de los retos que se deben afrontar debido a las diversas conexiones presentes en la red eléctrica y cambios constantes en la topología de la red a causa de apertura o cierre de circuitos, generándose la aparición de transitorios, los cuales causan reflexiones de señal y con ello cambios característicos en su impedancia y atenuación de la señal (Zimmermann & Dostert, 2002).

Las redes PLC se caracterizan por la propagación *multipath* debido a numerosas reflexiones causadas principalmente en las uniones de los cables, puntos terminales y ramificaciones de la red PLC en donde se presentan diversos valores de impedancias y pérdidas por reflexión. El resultado de esto es la propagación de una señal *multipath*, con una frecuencia de desvanecimiento selectivo. (Hooijen, 1997; Zimmermann & Dostert, 2000; Zimmermann & Dostert, 2002).

La atenuación en las redes PLC depende de la longitud de las líneas y los cambios constantes de impedancia en las líneas de transmisión. Diversos estudios han demostrado que la atenuación en la red eléctrica es relativamente aceptable

en tramos cortos de cable (aproximadamente hasta 200-300 m), pero es muy malo en los cables de mayor longitud. Por lo tanto, es importante considerar que si se desea implementar una red PLC de gran tamaño, esta debe contar con dispositivos repetidores conectados a partir de cierta distancia y en puntos estratégicos dentro de la red PLC (Held, 2006).

5.3.2 Características del canal. La propagación de señales sobre la red eléctrica introduce una atenuación, la cual se incrementa con la longitud de la línea y la frecuencia de la señal. Esta atenuación es una función de la impedancia característica de las líneas de potencia Z_L y la constante de propagación γ . Según Matiz (2011) y ETSI (2003), estos dos parámetros pueden ser definidos por la resistencia primaria $R'(f)$ por unidad de longitud, la conductancia $G'(f)$ por unidad de longitud, la inductancia $L'(f)$ por unidad de longitud y la capacitancia $C'(f)$ por unidad de longitud; las cuales dependen de la frecuencia. Las expresiones para impedancia característica de las líneas de potencia Z_L y la constante de propagación γ son las siguientes:

$$Z_L = \sqrt{\frac{R'(f) + j2\pi fL'(f)}{G'(f) + j2\pi fC'(f)}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$\gamma(f) = \sqrt{[R'(f) + j2\pi fL'(f)] * [G'(f) + j2\pi fC'(f)]}$$

$$\gamma(f) = \alpha(f) + j\beta(f) \quad \text{Ecuación (2)}$$

La función de transferencia para una línea de transmisión de longitud l , considerando solo la propagación de la onda desde el origen hasta su destino, se puede representar de la siguiente forma:

$$H(f) = e^{-\gamma(f)l} = e^{-\alpha(f)l} \cdot e^{-j\beta(f)l} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Según Zimmermann & Dostert (2002), en diversas investigaciones realizadas en líneas de energía se ha concluido que $R'(f) \ll 2\pi fL'(f)$ y $G'(f) \ll 2\pi fC'(f)$ en el rango de frecuencias establecidas para PLC (1–30MHz). En vista de lo anterior, se podría considerar el valor de la impedancia característica y la constante de propagación de la siguiente forma:

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$\gamma(f) = \frac{R'(f)}{2Z_L} + \frac{G'(f)Z_L}{2} + j2\pi f\sqrt{L'C'} \quad \text{Ecuación (5)}$$

En donde:

$$\text{Re}\{\gamma(f)\} = \frac{R'(f)}{2Z_L} + \frac{G'(f)Z_L}{2} \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$\text{Im}\{\gamma(f)\} = j2\pi f\sqrt{L'C'} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Tomando la parte real de la constante de propagación y sustituyendo a $R'(f)$ por su valor real:

$$R'(f) = \sqrt{\frac{\pi\mu_o}{kr^2}} f \quad \text{Ecuación (8)}$$

En donde μ_o (constante de permeabilidad), k (conductividad) y r es el radio del cable.

Por otro lado, $G'(f) \sim f$ según resultados obtenidos en estudios sobre PLC (Casa Domo, s.f.). En vista de lo anterior, reemplazando cada uno de los términos en la expresión se obtiene que:

$$\alpha(f) = Re\{\gamma(f)\} = \frac{1}{2Z_L} \sqrt{\frac{\pi\mu_o}{kr^2}} f + \frac{Z_L}{2} f \quad \text{Ecuación (9)}$$

Si se resumen términos constantes, la expresión se puede representar de la siguiente forma:

$$\alpha(f) = Re\{\gamma(f)\} = k_1\sqrt{f} + k_2f \quad \text{Ecuación (10)}$$

$$\beta(f) = Im\{\gamma(f)\} = k_3f \quad \text{Ecuación (11)}$$

La cual finalmente podría ser representada por:

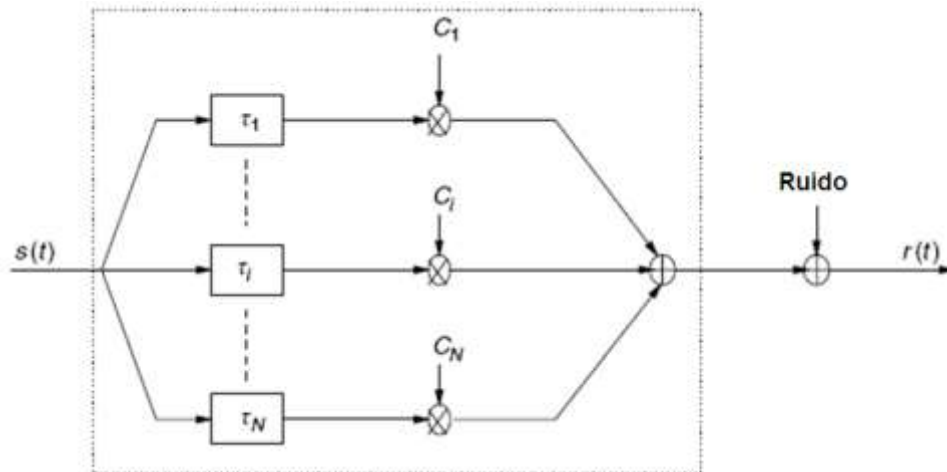
$$\alpha(f) = a_0 + a_1f^k \text{ con } a_0, a_1, k \text{ constantes} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Las mediciones de pérdidas de propagación a lo largo del espectro de PLC se pueden encontrar en Matiz (2011). Si las pérdidas se representan por unidad de longitud, y bajo una adecuada selección de los parámetros a_0 , a_1 y k sería posible calcular la atenuación de línea eléctrica, la cual corresponde a la amplitud de la función de transferencia del canal, definida por la siguiente ecuación:

$$A(f, l) = e^{-\alpha(f).l} = e^{(a_0 + a_1 f^k).l} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Modelamiento del canal PLC. En un canal PLC se presenta un fenómeno conocido como “eco” el cual se presenta por las múltiples reflexiones producidas por las diversas discontinuidades en la impedancia característica del canal. Por esta razón, una señal transmitida puede llegar por N caminos diferentes al receptor. Cada camino i presenta un retardo τ_i y un cierto factor de atenuación C_i . El canal PLC se puede describir por medio de una respuesta al impulso h en un tiempo discreto (t), tal como se muestra en la Figura 2 y se representa en la siguiente ecuación:

Figura 2. Representación de un modelo multipath en un canal PLC



Fuente: Zimmermann, M. & Dostert, K. (2002). *A multipath model for the powerline channel*. IEEE *Transactions on Communications*, 50(4), 553–557.

$$h(t) = \sum_{i=1}^N C_i \cdot \delta(t - \tau_i) \rightarrow H(f) = \sum_{i=1}^N C_i \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad \text{Ecuación (14)}$$

La cual en el dominio de la frecuencia sería:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot A(f, l_i) \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde g_i es un factor de ponderación que representa el producto de la reflexión y otros factores de transmisión a lo largo del camino. La variable τ_i , representa el retardo producido por la ruta i , se calcula dividiendo la longitud del camino l_i por la velocidad de fase v_p ; (Hooijen, 1997).

Al sustituir la atenuación media $A(f, l_i)$ por su valor original, se obtiene la ecuación final del modelo de canal PLC, la cual, abarca los parámetros de sus tres características (la atenuación, las fluctuaciones de impedancia y efectos multipath). Esta ecuación se compone principalmente de tres términos (ponderación, atenuación y retardo):

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{(a_0 + a_1 f^k) \cdot l_i} \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad \text{Ecuación (16)}$$

Ponderación: g_i

Atenuación: $e^{(a_0 + a_1 f^k) \cdot l_i}$

Retardo: $e^{-j2\pi f \tau_i}$

Capacidad del canal PLC

De acuerdo con la Ley de Shannon, la capacidad de un canal (cantidad máxima de información en bps que es posible transferir) bajo condiciones de ruido se puede calcular a través de la siguiente expresión: (Held, 2006)

$$C = B \cdot \log_2 \left[1 + \frac{S}{N} \right] \quad \text{Ecuación (17)}$$

C = Velocidad máxima de transmisión de datos en bps

B = Ancho de banda del canal

S/N = Relación señal a ruido del mismo.

Esta expresión no es aplicable directamente a un canal de PLC, ya que la relación señal a ruido (SNR) no es constante en todo el ancho de banda B , la cual puede variar sustancialmente. Sin embargo, es posible en la práctica obtener la densidad de potencia de la señal transmitida $S_{rr}(f)$ y la densidad de potencia del ruido $S_{nn}(f)$, las cuales son factores que dependen de la frecuencia. En vista de lo anterior se pueden obtener estos valores dentro de un rango específico de frecuencia y con ello realizar un ajuste en la expresión de Shannon: (Ouzzif, & Le Masson, 2006)

$$C = \int_{f_u}^{f_o} B \cdot \log_2 \left[1 + \frac{S_{rr}(f)}{S_{nn}(f)} \right] df \quad \text{con } B = f_o - f_u \quad \text{Ecuación (18)}$$

La capacidad del canal generalmente decrece con la distancia debido al comportamiento de filtro paso bajo de las líneas de potencia. Por otro lado, los

esquemas de modulación pueden diferir mucho debido a la necesidad de explotar al máximo la capacidad del canal y a las condiciones existentes en la red eléctrica en un momento dado, las cuales varían constantemente. (Hrasnica, Haidine, & Lehnert, 2004)

Ruido en redes PLC

Según diversos estudios realizados sobre PLC, se puede clasificar el ruido en cinco tipos según: su origen, tiempo de duración, lugar en el espectro e intensidad (Zimmermann & Dostert, 2000). El espectro del ruido en el rango de frecuencias de PLC por encima de los 145 KHz consiste de cuatro tipos de ruido. (Meng & Guan, 2005)

Ruido de fondo coloreado (tipo 1). Es la suma de fuentes de ruido como transformadores de distribución, sistemas de alumbrado público, entre otras. Este tipo de ruido presenta una densidad de potencia espectral baja y disminuye con la frecuencia. Este tipo de ruido se debe a la superposición de diversas fuentes de ruido de baja intensidad. Este tipo de ruido muestra una fuerte dependencia de la frecuencia y sus parámetros pueden variar en diversos momentos del día.

Ruido de banda angosta (Tipo 2). La mayoría de las veces tiene una forma sinusoidal, con amplitudes moduladas. Este tipo ocupa varias subbandas, que son relativamente pequeñas y continúan a lo largo del espectro de frecuencias. Este ruido es causado principalmente por la entrada de estaciones de radiodifusión en medio y las bandas de radiodifusión de onda corta.

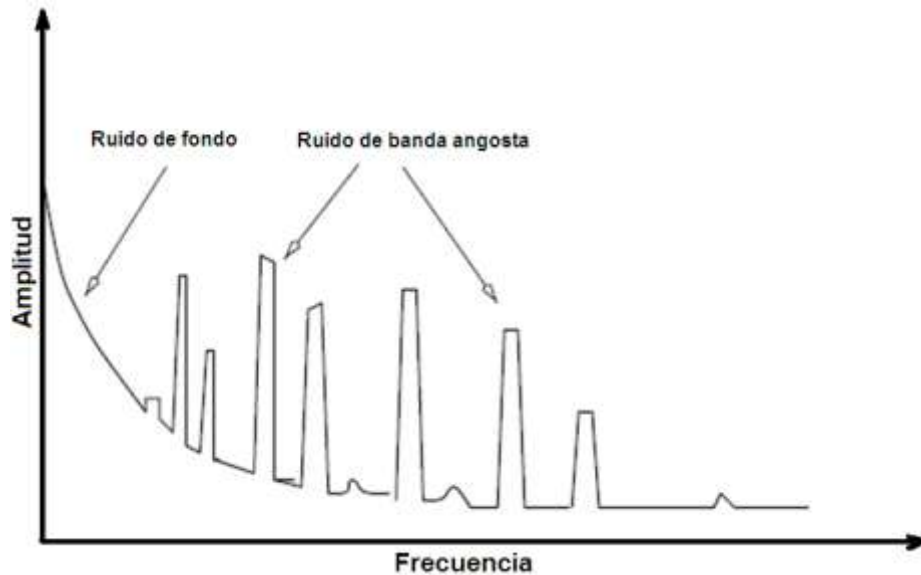
Ruido impulsivo periódico, asincrónico a la frecuencia fundamental de la red eléctrica (tipo 3). Presenta una forma de impulsos con una tasa de repetición entre 50 y 200 kHz. Este tipo de ruido se debe principalmente a fuentes de alimentación conmutadas.

Ruido impulsivo periódico sincrónico a la frecuencia fundamental de la red eléctrica (tipo 4). Son impulsos con una frecuencia de 50 o 100 Hz y son sincrónicos con la frecuencia fundamental de la red eléctrica. Este tipo de ruido es generalmente causado por un suministro de energía que operan en sincronismo con la frecuencia principal, tales como los convertidores de potencia conectada a la red eléctrica.

Ruido impulsivo asincrónico (tipo 5). Son impulsos son causados principalmente por el cambio transitorios en las redes, tienen una duración de algunos microsegundos hasta a unos pocos milisegundos con un tiempo entre llegadas arbitrario. Su densidad espectral de potencia puede alcanzar valores de más de 50 dB por encima del nivel del ruido de fondo, haciendo que la principal causa de aparición de error en la comunicación digital a través de redes PLC.

Los tipos de ruido 1,2 y 3 son los que presentan un comportamiento estacionario por largos periodos de tiempo (segundos, minutos e incluso horas). Por tal razón, estos tres niveles fueron resumidos en un solo tipo de ruido denominado "Ruido de fondo generalizado". Los tipos 4 y 5 por el contrario, se presentan en unos cuantos milisegundos o microsegundos y son clasificados en un tipo de ruido denominado "Ruido impulsivo".

Figura 3. Modelo de densidad espectral para ruido de fondo generalizado



Fuente: Promax (2005). Equipos PROPOWER para la evaluación de una red para transmisión PLC.

La expresión matemática que describe el comportamiento del ruido de fondo generalizado correspondiente a la siguiente ecuación:

$$N_{CBN}(f) = N_0 + N_1 \cdot e^{-\frac{f}{f_1}} [dB\mu V/Hz^{1/2}] \quad \text{Ecuación (19)}$$

En donde N_0 corresponde a una constante de densidad de ruido, y los parámetros N_1 y f_1 son parámetros de la función exponencial.

Posteriormente, a través de diversas investigaciones y mediciones en ambientes residenciales e industriales, fue posible encontrar los valores aproximados de cada uno de los parámetros propuestos en el modelo anterior. Las expresiones para cada uno de los casos son: (Guillen & Barahona, 2008)

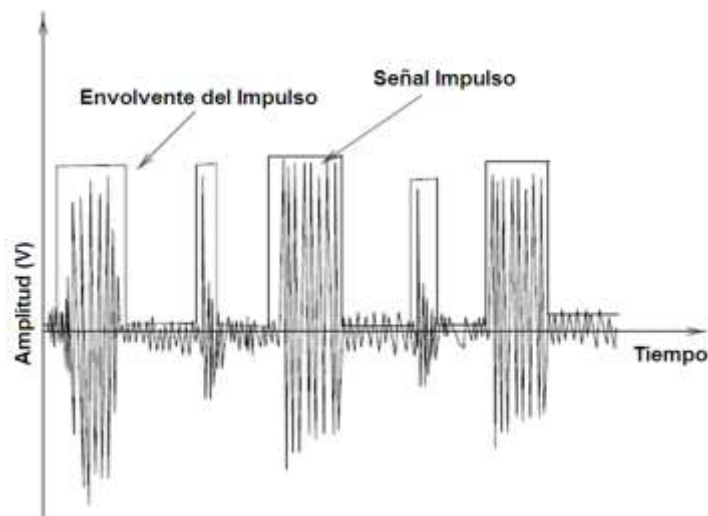
$$N_{CBN}(f) = -35 + 35.e^{-\frac{f[\text{MHz}]}{3,6}} \left[\text{dB}\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2} \right] \quad \text{Ecuación (20)}$$

Para desarrollos residenciales

$$N_{CBN}(f) = -33 + 40.e^{-\frac{f[\text{MHz}]}{3,6}} \left[\text{dB}\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2} \right] \quad \text{Ecuación (21)}$$

Para desarrollos industriales

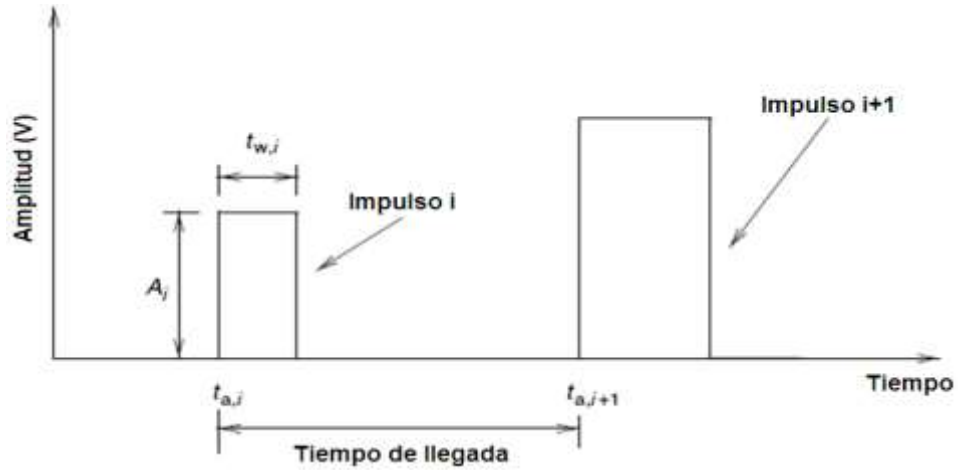
Figura 4. Ejemplo de ruido impulsivo en el dominio del tiempo en una red PLC



Fuente: Zimmermann, M. & Dostert, K. (2002). Analysis and modeling of impulsive noise in broadband powerline communications”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Volume 44, Issue 1, p. 249 – 258

Entre los aspectos que se deben tener en cuenta para establecer las características estadísticas de los parámetros de ruido, se encuentran la distribución de probabilidad del ancho del pulso y su distribución entre llegadas tiempo; lo cual representa el tiempo entre dos impulsos sucesivos, tal como se ilustra en la Figura 5.

Figura 5. Modelo del impulso utilizado para establecer el ruido impulsivo



Fuente: Zimmermann, M. & Dostert, K. (2000). *An analysis of the broadband noise scenario in powerline networks. International Symposium on Powerline Communications and its Applications (ISPLC2000)*, Limerick, Ireland.

La expresión matemática para representar el tipo de ruido impulsivo es la siguiente:

$$n_{imp}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} A_i \cdot p\left[\frac{t - t_{a,i}}{t_{w,i}}\right] \quad \text{Ecuación (22)}$$

Una aproximación de este modelo corresponde a un tren de pulsos con un ancho de pulso t_w , amplitud de pulso A , tiempo de llegada t_a tiempo y una función generalizada de pulso $p(t/t_w)$ por unidad de amplitud (Held, 2006). Los parámetros $t_{w,i}$, A_i y $t_{a,i}$ son variables aleatorias y sus valores estimados se encuentran en Hrasnica, Haidine & Lehnert (2004).

La amplitud, presenta un 90% de sus valores entre 100 y 200mV, menos del 1% alcanza un voltaje máximo de 2V. El tiempo presenta valores inferiores a 500µs y

el tiempo de separación entre pulsos es inferior a 200ms.

Cuadro 1. Variaciones en la línea de potencia

Aparato eléctrico	Amplitud (mV)		Duración (s)	
	Valor Promedio	Desviación estándar	Valor Promedio	Desviación Estándar
(pulso sencillo)				
Horno eléctrico	329.2	431.2	1015.8	505.2
Plancha eléctrica	369.3	585.8	760.2	347.9
(pulso periódico)				
Televisor	197.2	311.3	722.4	34.3
Dimer de luz	670.8	1199.3	140.0	7.5
(pulso continuo)				
Aspiradora	1457.5	2155.5	Siempre	...
Secadora	87.9	119.7	105.3	56.0

Fuente: Guillen, E.; López, J. & Barahona, C. (2008). *Throughput Analysis over Power Line Communication Channel in an Electric Noisy Scenario*. *World Academy of Science, Engineering and Technology Volume 33*. ISSN 2070-3740

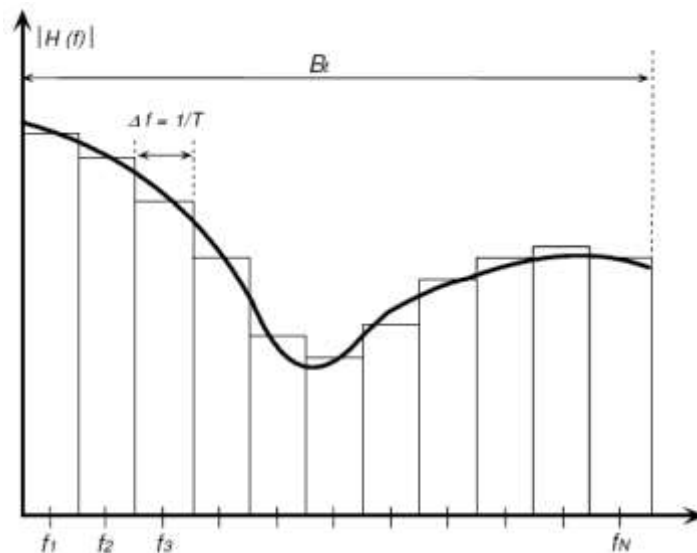
El estándar *HomePlug 1.0* posee un campo denominado FEC (*Forward Error Correction*), con el fin de corregir errores en la información recibida debido al ruido existente en la red; en donde se hace uso de un método de corrección de errores denominado "*Reed Solomon*", el cual permite reconstruir los bits comprometidos bajo la emisión de unos bits de protección de manera aleatoria, de tal forma que si una señal de datos se ve afectada se pueda reconstruir la señal de datos original a partir de los bits de protección.

5.3.3 Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM). La Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) es una técnica relacionada con las técnicas de espectro expandido por salto de frecuencia (FH, *frequency hopping*), también es llamada DMT (*discrete multitone modulation*). Una de las principales características de OFDM, es su inmunidad frente a diversas

clases de interferencia. En OFDM, el espectro disponible B_t es dividido en varios subcanales de banda más estrecha. El flujo de datos es transmitido utilizando multiplexación por división de frecuencia (FDM, *Frequency Division Multiplexing*), destinando N portadoras con frecuencias $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$, las cuales se encuentran centradas en la banda de cada canal tal como se muestra en la Figura 6 en donde cada sub canal tiene un ancho de banda igual expresado por: (Tang, So & Gunawan, 2005)

$$\Delta f = \frac{B_t}{N} = \frac{1}{T} \quad \text{Ecuación (23)}$$

Figura 6. Sub canales para OFDM



Fuente: TANG L. T., SO P. L., GUNAWAN E. (2005). *Performance analysis of OFDM systems for broadband power line communications under impulsive noise and multipath effects*.

OFDM usa una transformada rápida de Fourier para dividir el canal en muchos canales de banda estrecha, con la característica de que los canales son ortogonales.

Tal como se ha mencionado anteriormente, el método OFDM emplea N portadoras, por lo que se requieren, N muestras complejas en tiempo discreto para representar un símbolo OFDM. Las muestras $(0, 1, \dots, N-1)$ en el dominio del tiempo son el resultado de una sub portadora k modulada con un símbolo C_k OFDM y pueden expresarse de la siguiente forma:

$$S_{k-ofdm}[n] = \frac{C_k}{N} e^{j \frac{2\pi kn}{N}} \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde:

N = número de sub portadoras y muestras en el dominio del tiempo utilizadas.

n = índice de la muestra en el dominio del tiempo

k = índice de la sub portadora.

C_k = amplitud y fase de la información a transmitir.

Tanto C_k como k son valores constantes para una sub portadora dada durante el período de un símbolo OFDM. Según la ecuación anterior se puede establecer que las N muestras complejas para la sub portadora k giran exactamente k círculos en el plano complejo durante el período útil de un símbolo OFDM.

En vista de lo anterior, un símbolo completo en el dominio del tiempo se construye a partir de la superposición de las N sub portadoras; tal como se expresa en la siguiente ecuación: (BP Blogspot, s.f.)

$$S_{k-ofdm}[n] = \sum_{k=0}^{N-1} S_{k-ofdm}[k] \quad \text{Ecuación (25)}$$

Los coeficientes C_k son complejos, en donde representan la señal en el dominio de frecuencia. Con el fin de convertir esta señal al dominio del tiempo, es necesario aplicar en el modulador la transformada inversa de Fourier. En el caso práctico la transformada inversa rápida (IFFT). Caso contrario ocurre en el receptor en donde se aplica la transformada rápida directa de Fourier (FFT) al símbolo OFDM en el dominio del tiempo. El resultado de este proceso es la señal original transmitida, la cual se reconstruye comparando cada sub portadora con una señal de referencia de amplitud, frecuencia y fase conocidas:

$$S_{k-ref}[n] = e^{j\frac{2\pi kn}{N}}$$

Ecuación (26)

Debido a la ortogonalidad de las N sub portadoras, el resultado en el momento de hacer la comparación es cero en la FFT para cualquier sub portadora diferente a la de referencia.

$$\sum_{n=0}^{N-1} \frac{S_{l-ofdm}[n]}{S_{k-ref}[n]} = \begin{cases} C'_k & \text{sil} = k \\ 0 & \text{sil} \neq k \end{cases}$$

Ecuación (27)

En que C'_k representa la amplitud y fase de la señal de información recibida.

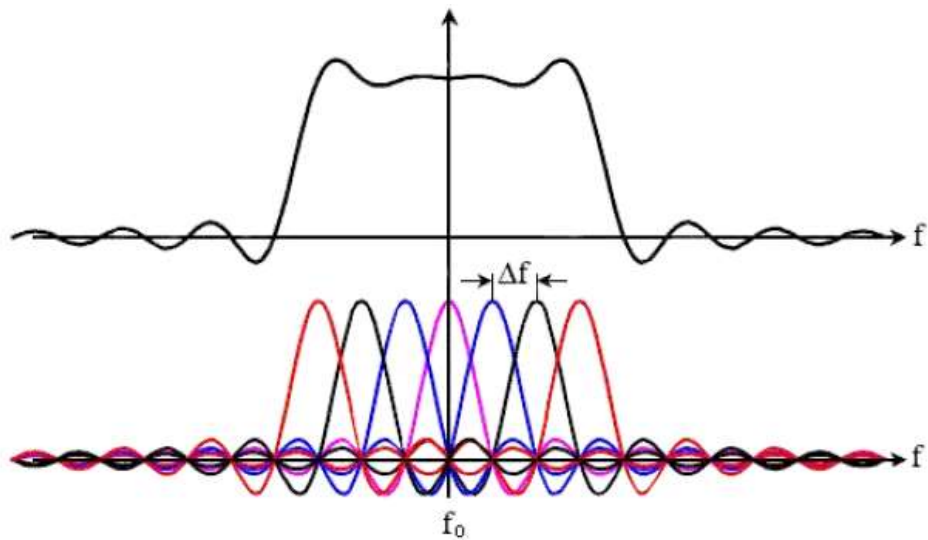
Si en el receptor se recibe una señal retrasada en el tiempo por Δ muestras complejas, este efecto se reflejará en un desvanecimiento o amplificación en diferentes porciones del dominio de frecuencia sin afectar la integridad de la información transmitida. Para este caso en particular, la expresión sería la siguiente:

$$S_{k-ofdm}[n] = \frac{C_k}{N} e^{j\frac{2\pi k(n-\Delta)}{N}}$$

Ecuación (28)

En la Figura 7 se ilustran las condiciones espectrales para N=7 formas de onda. El hecho de que exista ortogonalidad entre las diversas sub portadoras permite que las formas de onda se traslapen entre sí sin que exista interferencia entre ellas, provocándose con ello el uso del espectro de una manera más eficiente, en comparación con otras técnicas de modulación existentes.

Figura 7. Siete formas de onda OFDM en el dominio de la frecuencia



Fuente: BP Blogspot (2001). Tipos de filtros instalados en los equipos de PLC. Recuperado el 15 de septiembre de 2014, de <http://1.bp.blogspot.com/-NspKBgb8ReQ/T8Um-pcdI9I/AAAAAAAAACc/rNAoGV4Ddcs/s1600/filtros.png>

Si se considera r_s como la tasa de transmisión para N sub portadoras, se puede calcular el ancho de banda B_t de la señal OFDM a través de la expresión:

$$B_t = (N + 1) \cdot r_s \approx N \cdot r_s \quad \text{Ecuación (29)}$$

Ventajas de OFDM (Fantacci, Morosi & Seravalle, 2001)

- Alta eficiencia espectral, sustentada en la ortogonalidad de las portadoras la cual permite el traslape entre ellas sin generar interferencia en la señal.
- Alta inmunidad al ruido, en donde no todas las portadoras son afectadas por interferencias en un momento dado.
- Menor distorsión por propagación multitrayectoria (puesto que las sub portadoras se transmiten a menor velocidad, la duración del símbolo es mayor y no le afecta al receptor el esparcimiento de retardo tanto como a los sistemas de portadora única)
- Es escalable a velocidades de transmisión altas.
- Es flexible y puede ser adaptable en esquemas de modulación, ancho de banda y velocidad de transmisión.

Desventajas de OFDM (Tachikawa, Nari & Hamamura, 2002)

OFDM sufre de variaciones de tiempo en el canal debido a que las sub portadoras son espaciadas muy cerca la una de la otra. En caso tal de presentarse una sincronización de frecuencias imperfecta, puede causar una pérdida en la ortogonalidad de las sub portadoras provocando una degradación severa en el desempeño del proceso de comunicación, debido a que la señal es la suma de un gran número de sub portadoras.

Cuadro 2. Tipos de modulación, FEC y throughput en capa física para el estándar HomePlug 1.0

	Modulación	FEC	Throughput (Mbps) capa física
DQPSK 3/4	DQPSK	Código de convolución 3/4 y código Reed-Solomon	13,78
DQPSK 1/2	DQPSK	Código de convolución 1/2 y código Reed-Solomon	9,19
DBPSK 1/2	DBPSK	Código de convolución y código Reed-Solomon	4,59
ROBO	DBPSK	Código de convolución 1/2, código Reed-Solomon y cada bit es repetido 4 veces	1,02

Fuente: HomePlug 1.0 Specification, HomePlug Powerline Alliance, June 2001.

Cuando se establece una conexión entre un par de nodos, ellos primero determinan cuales sub portadoras serán utilizadas, y que tipo de modulación y corrección de errores será utilizado para el canal, esto genera como resultado un mapa de tonos que serán utilizados entre las estaciones para realizar el proceso de comunicación.

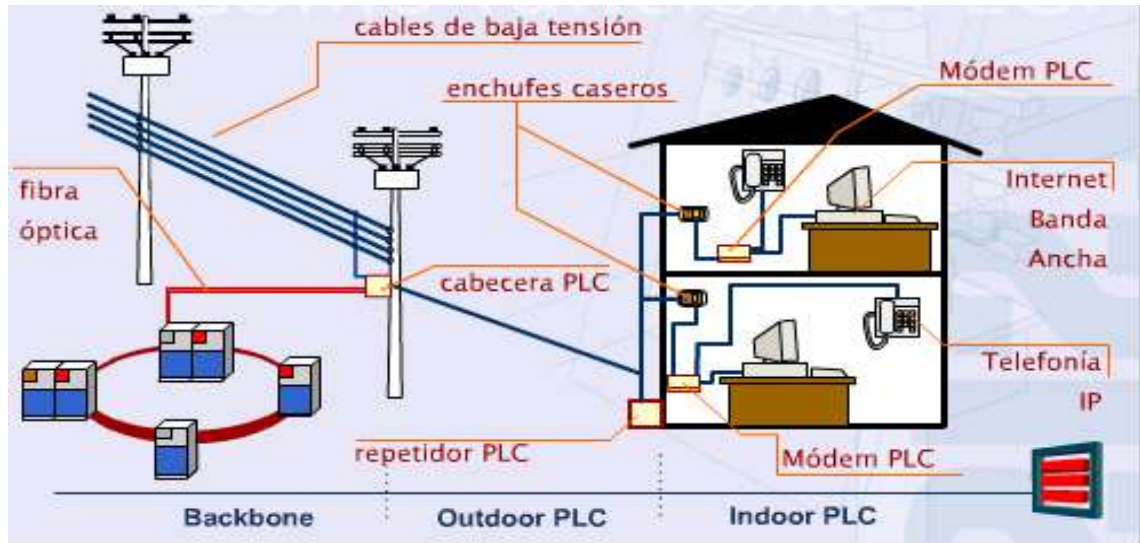
5.3.4 Funcionamiento de PLC. La tecnología PLC funciona desde un nodo conectado a la red telefónica (Internet) y conectado también a la red de corriente eléctrica en el que se encuentra la cabecera PLC, que realiza la conversión entre la señal de la red backbone a la señal eléctrica utilizado en el PLC.

La comunicación PLC por la red eléctrica, requiere de un modem cabecera al centro de la transformación eléctrica que ilumina el edificio para enviar la señal. Desde este punto hasta el hogar, el cable eléctrico transporta energía y datos, los cuales deben ser leídos por un Chip siete u electro-modem colocado en cada

aparato doméstico. En el domicilio el usuario instala un módem PLC donde se podrán conectar los computadores, teléfonos, impresoras, etc.

La siguiente figura muestra la arquitectura PLC.

Figura 8. Arquitectura de PLC



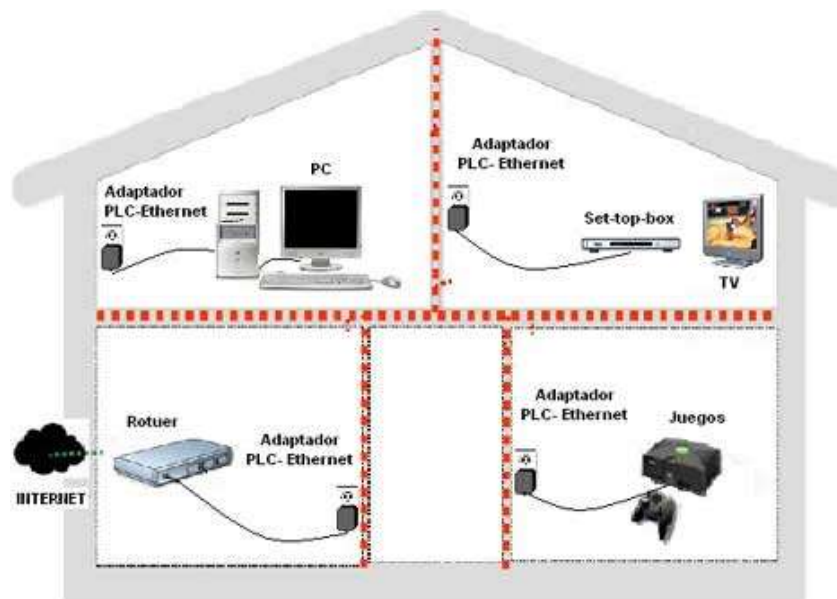
Fuente: PC Actual (2003). Arquitectura de una red PLC. Recuperado el 3 de agosto de 2014, de http://www.pcactual.com/articulo/laboratorio/especiales/7476/dispositivos_PLC_alternativa_wifi.html

Elementos del Sistema PLC

El sistema PLC está conformado básicamente por tres elementos que son: Outdoor o de Acceso, Indoor, y el último elemento de la red PLC lo constituye el modem terminal o modem cliente.

- Outdoor PLC: Cubre el tramo de lo que en telecomunicaciones se conoce “última milla”, es el tramo final desde una línea de comunicaciones, hasta dar servicio al usuario. En cuanto al sistema PLC, comprende desde el cableado de la red eléctrica de baja tensión del transformador de distribución hasta el medidor de la energía eléctrica.
- Indoor PLC: Este sería la segunda parte del sistema de esta tecnología PLC, cubre el tramo desde el medidor del usuario hasta todas las conexiones o enchufes ubicados en el interior de los hogares. Este sistema utiliza como medio de transmisión el cableado eléctrico interno como método para dar servicios de telecomunicaciones dentro del hogar.

Figura 9. Arquitectura PLC Indoor

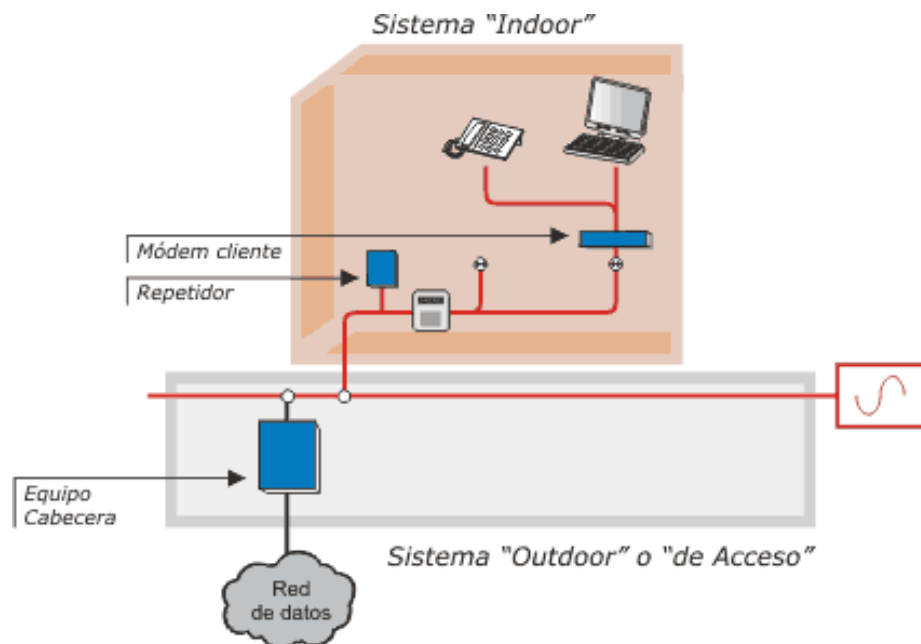


Fuente: Casa Domo (2007). Arquitectura de red indoor PLC. Recuperado el 13 de agosto de 2014, de <http://www.casadomo.com/noticiasdetalle.aspx?id=9313&c=6&idm=10&pat=10&nwl=s>

Para comunicar estas dos partes del sistema es necesario un repetidor, normalmente instalado y ubicado cerca del medidor de la energía eléctrica, formado por un modem y un equipo de cabecera del sistema *Outdoor*, donde el segundo componente se comunica con la parte del terminal del repetidor e inyecta la señal en el tramo *Indoor*.

En la siguiente figura se muestra la arquitectura PLC en su segunda parte, que es la que llega a los hogares:

Figura 10. Arquitectura de la segunda parte de la red PLC



Fuente: Promax (2005). Equipos PROPOWER para la evaluación de una red para transmisión PLC. Recuperado el 8 de septiembre de 2014, de <http://www.promax.es/esp/news/extdnew.php?text=49>

- El tercer elemento de la red PLC, está formado por modem, que recoge la señal directamente de la red eléctrica a través de los tomas. De esta manera, la energía eléctrica como los datos, comparten el mismo canal, la red eléctrica domiciliaria.

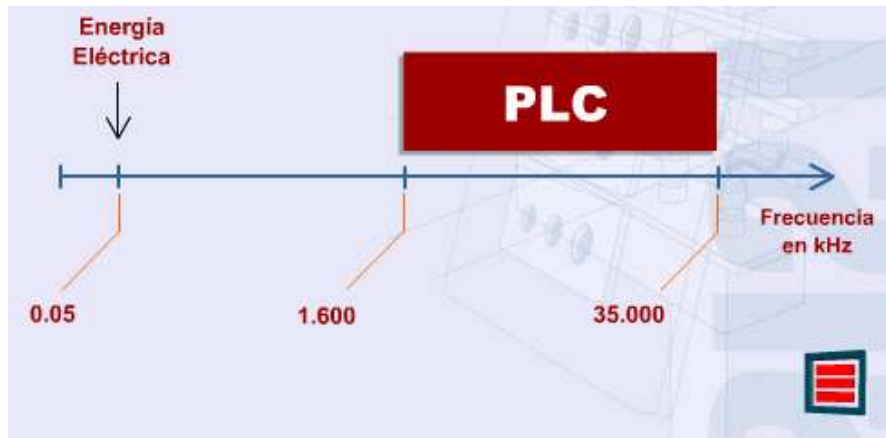
Figura 11. Elemento de red dentro del hogar



Fuente: Gamboa, D.; Quiguiri, C.; Narváez, J. & Martínez, R. (2012). Elemento de red dentro del Hogar. Recuperado el 8 de septiembre de 2014, de <http://impacto-PLC.blogspot.com/>

Este MODEM se puede conectar un computador, un teléfono IP u otro equipo de comunicaciones que posea una interfaz Ethernet o USB. Por su parte en la tecnología PLC el equipo cabecera (equipo emisor) emite señales de baja potencia (50mW) en un rango de frecuencias que van desde 1.6 Mhz hasta los 35 Mhz, es decir en una frecuencia varios miles de veces superior a los 60 Hz en donde opera la energía eléctrica. Al otro extremo del medio de transmisión (el cable eléctrico) existe un receptor (equipo terminal) que es capaz de identificar y separar la información que ha sido transmitida en el rango de frecuencia indicado (UDEDEC, 2003).

Figura 12. Frecuencia usada por PLC en la línea eléctrica



Fuente: Conectronica (2008). Frecuencia usada por PLC en la línea eléctrica. Recuperado el 10 de septiembre de 2014, de <http://www.conectronica.com/PLC/Tecnolog%C3%ADa-PLC-de-Banda-Ancha-%20para-las-Comunicaciones-del-Hogar.html>

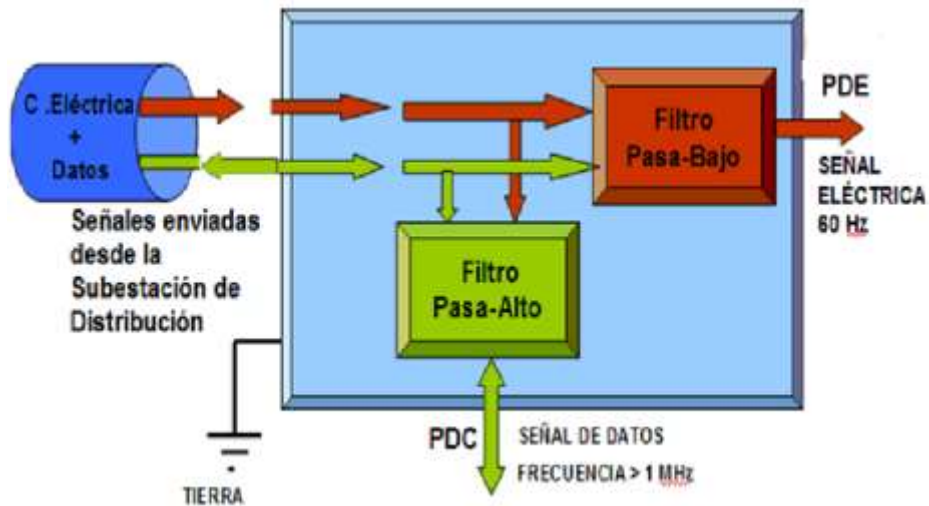
La unidad de acondicionamiento HFPCN (*High Frequency Conditioned Power Network*). La unidad de acondicionamiento CU se pone cerca del metro eléctrico en cada uno de los consumos caseros que lo necesiten. Las aplicaciones del CU contienen los filtros de pase para segregar las señales de electricidad y de los datos, facilitando el acoplamiento entre los clientes y una subestación eléctrica.

El CU contiene tres puertos que se juntan. El dispositivo recibe la entrada agregada en su puerto de red (NP), esta entrada agregada pasa por un filtro pasa altos. Este filtrado de las señales de alta frecuencia permite derivarlos al puerto de comunicación CDP, y mediante un filtro pasa bajos se envía la electricidad al consumo (Álvarez y otros, s.f.).

La señal de 60 Hz. fluye del filtro pasa bajos y también sirve para atenuar el ruido provocado por las aplicaciones eléctricas en casa del cliente, ya que el agregado de estos ruidos extraños provocaría distorsiones significativas en la red.

La señal de datos, sale del CU a las unidades de consumo y distribución de datos mediante el empleo de cables coaxiales estándar.

Figura 13. Tipos de Filtros instalados en los equipos PLC



Fuente: BP Blogspot (2008). Tipos de filtros instalados en los equipos de PLC. Recuperado el 15 de septiembre de 2014, de <http://1.bp.blogspot.com/-NspKBgb8ReQ/T8Um-pcdI9I/AAAAAAAAACc/rNAoGV4Ddcs/s1600/filtros.png>

5.3.5 PLC y el modelo OSI. Para la descripción de la operación de los sistemas de telecomunicaciones modernos, generalmente se utiliza el modelo de referencia OSI (*Open Systems Interconnection*) promovido por la ISO para definir la forma en que se comunican los sistemas abiertos de telecomunicaciones, es decir, los sistemas que se comunican con otros sistemas. El modelo de referencia consiste en 7 capas. Estas capas se visualizan generalmente como bloques apilados, por lo que también se le conoce como el *OSI Protocol Stack*.

Cuadro 3. PLC y modelo OSI

CAPA	DETALLES
7. APLICACIÓN	Soporta aplicaciones que utiliza directamente el usuario.
6. PRESENTACIÓN	Toma los datos de red, y los presenta a las aplicaciones para darles el formato adecuado para ser usados.
5. SESIÓN	Establece y maneja las conexiones lógicas o sesiones.
4. TRANSPORTE	Manejo de los mensajes de sesión entre los puntos de la red.
3. RED	Manejo de las conexiones lógicas, direccionamiento enrutamiento y manejo del trafico
2. ENLACE DE DATOS	Manejo y entrega de datos entre dos nodos de la red
1. FÍSICA	Conexiones y medio físico de la red

Fuente: BP Blogspot (2008). Tabla de PLC y el modelo OSI. Recuperado el 15 de septiembre de 2014, de http://4.bp.blogspot.com/-ZEu0X1q6IXQ/T8UKLIBN6SI/AAAAAAAAABc/Wz8L_CbuaXg/s1600/capa.png

PLC trabaja principalmente en la capas 1 y 2, es decir en la capa física y en la capa de enlace de datos.

Capa física

La Capa física del modelo de referencia OSI es la que se encarga de las conexiones físicas, es decir, el nivel básico que se compone generalmente por el cableado.

Se debe considerar una capa física robusta debido a que esta específica la modulación, la codificación y el formato de los paquetes. La capa física es la encargada de definir las especificaciones eléctricas, mecánicas y funcionales para activar y mantener un enlace físico entre varias elementos.

Capa enlace de datos

PLC se gobierna mayoritariamente por protocolos de capa 2. En esta capa, se realiza la organización de los datos en paquetes lógicos que serán convertidos a señales binarias para inyectarlas al medio físico y viceversa. Además, se establecen comunicaciones, identificando cada uno de los nodos de la red con una

dirección MAC. Al ser 100% compatible con el estándar OSI, PLC puede compartir conexiones con usuarios de *Ethernet* y otros estándares compatibles. (Gamboa, Quiquiri & Martínez, 2012)

5.3.6 HomePlug AV. Debido a que no existe un estándar definitivo para la tecnología PLC, se tienen instituciones a nivel mundial trabajando en ello. Los grupos más importantes que existen son: el PLC forum, la UPA (*Universal Powerline Association*), la PUA (*PLC utilities Alliance*), IEEE P1901, la *HomePlug Powerline Alliance*, UPLC (*United Power Line Council*), PLC-J en Japón, APTEL en Brasil, entre otras compañías y grupos. (Carcele, s.f.)

La *Universal Power Line Association* (UPA) es una organización internacional sin ánimo de lucro orientada al desarrollo de tecnología PLC, la cual debe estar certificada bajo los estándares internacionales y favorecer la interoperabilidad de los equipos entre diversos fabricantes, con el objetivo de fortalecer el mercado de la tecnología PLC a nivel mundial. Entre las compañías que forman parte de esta organización se encuentran: *AcBel Polytech Inc, Ambient Corporation, Toshiba, ST&T, Ascom, Corinex Communications, DS2, Toyocom*, entre otras.

Otra de las organizaciones es la PUA (*PLC utilities Alliance*), la cual busca conseguir un alto grado de cooperación entre las compañías eléctricas con el objetivo de promover e influenciar el desarrollo de la tecnología PLC en Europa.

La *HomePlug Powerline Alliance* es una asociación de industrias relacionadas con PLC. Sus miembros aportan la capacidad y financiación necesaria para el desarrollo de esta tecnología, el cual es considerado como uno de los estándares más importantes en la tecnología PLC.

Un aspecto importante es que aún queda mucho trabajo por realizar en el campo de la normalización sobre la tecnología PLC. Entre las normas más importantes

sobre las cuales se rige la tecnología PLC se pueden mencionar:

- EN50065-1 del CENELEC, que establece el uso del espectro para banda angosta.
- TS 101 867 del ETSI que aplica para el uso de banda ancha. Es este último el que regula sobre la utilización de la red eléctrica para la transmisión digital de datos a altas velocidades.
- TR 102 049 del ETSI que establece las calidades de servicio que deben implementar los equipos PLC instalados en el lado del abonado (CPEs).

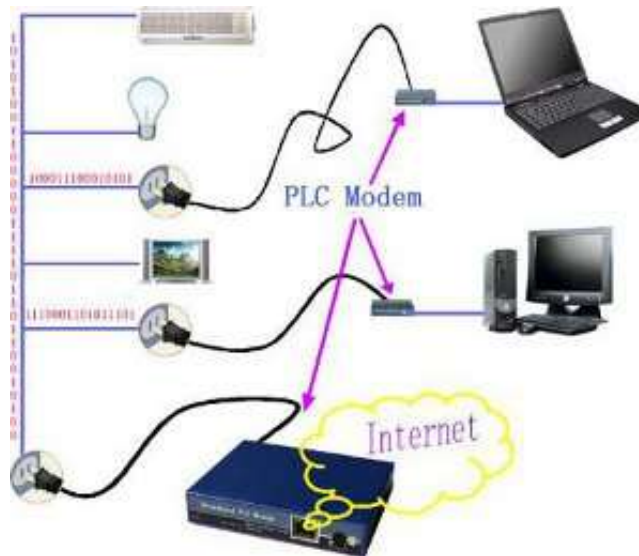
¿Qué es *HomePlug AV*?

Es el nombre del estándar de PLC que adapta el cableado eléctrico existente en un hogar de tal manera que lo hace válido para crear redes de datos. Este permite una tasa de transferencia de 200 Mbps en las redes eléctricas del hogar.

El estándar *HomePlug* no sólo está pensado para ofrecer banda ancha en el hogar, Internet, si no también VoIP, televisión de alta definición, multi-stream, o los juegos en línea, transportando la información por el cableado eléctrico. Así pues, la tecnología *HomePlug* se basa en la utilización de la red eléctrica doméstica como línea de transmisión de datos. Su instalación es muy sencilla, tanto como enchufar una pasarela en la red y pegarla en un *router*. Para añadir un dispositivo, sólo es necesario conectar un adaptador.

En la Figura 14 se puede ver un diagrama de una red HomePlug:

Figura 14. Diagrama de una red HomePlug



Fuente: HomePlug Powerline Alliance (2001). HomePlug 1.0 Specification.

¿Cómo funciona *HomePlug AV*?

Para garantizar que la solución de comunicaciones es viable en el canal del cableado eléctrico, se utilizarán interfaces de capa física y de acceso al medio suficientemente robustos. La capa física del *HomePlug* utilizando multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM). HPAV utiliza esta técnica en modo de ráfagas en lugar de hacerlo de forma continua como por ejemplo en los sistemas de radio difusión digital.

La capa MAC de HPAV es una variante del protocolo utilizado por el sistema WIFI y estándar IEEE 802.11b, el CSMA / CA (acceso múltiple por detección con portadora y evitando colisiones), al que se le han añadido algunas características que permiten la priorización según la clase, la igualdad y el control de retrasos.

La utilización del protocolo CSMA / CA implica que la capa física tiene que soportar la transmisión y recepción por ráfagas, es decir, cada cliente activa la transmisión solo en los momentos que ha de enviar datos, al terminar, apaga el transmisor y vuelve en modo de recepción.

La topología de la red es en forma de bus y se utiliza una modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para así permitir la existencia de otras portadoras, hasta 1155 en el mismo cable.

Adaptadores AV 200 Mini. Los adaptadores de línea eléctrica AV 200 Mini TL-PA21 son que se usaran para este proyecto a continuación presentamos características y funciones del adaptador (TP-Link, s.f.).

TL-PA211 de TP-LINK adaptador de línea eléctrica se aprovecha de los actuales cables eléctricos de su casa para la transferencia de datos al mismo tiempo que la transferencia del poder tradicional. Eso quiere decir, sin cableado adicional, los usuarios pueden simplemente conectar el TL-PA211 en tomas de corriente existente y de inmediato establecer una infraestructura de red. Con altas velocidades de transferencia de datos de hasta 200Mbps, los usuarios pueden disfrutar de streaming de vídeo de alta definición, juegos online, VoIP o cualquier otra tarea intensiva de banda ancha para trabajar o jugar.

Figura 15. Adaptador de línea eléctrica TL-PA211



Fuente: TP-LINK (s.f.). Mini Adaptador Multi-transmisión Powerline AV200. Recuperado de <http://www.tplink.com/pe/products/details/?model=TL-PA211>

De hasta 200 Mbps, a 300 metros.

Con la avanzada tecnología HomePlug AV, TL-PA211 proporciona a los usuarios altas velocidades de transferencia de datos de hasta 200Mbps en una longitud de línea de hasta 300 metros. Junto con su base de QoS y potente encriptación AES.

Figura 16. TL-PA211



Fuente: TP-LINK (s.f.). Mini Adaptador Multi-transmisión Powerline AV200. Recuperado de <http://www.tplink.com/pe/products/details/?model=TL-PA211>

Características

- *HomePlug AV* compatible con el estándar de alta velocidad de transferencia de datos de hasta 200Mbps, lo suficiente como para streaming de vídeo HD
- Diseño súper pequeña con un nuevo exterior, se integra por completo frente a cualquier toma de corriente.
- Sin cables, los usos actuales cables eléctricos.
- Alcance de hasta 300 metros sobre el circuito de corriente eléctrica para un mejor rendimiento a través de paredes o pisos a través de Plug and Play fácil, no requiere configuración.
- Patentado modo ahorro de energía reduce automáticamente el consumo de energía hasta en un 65%.*

* Los datos reales pueden variar debido a las condiciones de la red y factores ambientales.

- Establecer un encriptado AES de 128 bits para asegurar las comunicaciones De Energía, simplemente pulsando el botón de par en el adaptador.
- El QoS integrado asegura la calidad de las aplicaciones sensibles, tales como juegos de voz, vídeo y en línea.

Cuadro 4. Especificaciones del hardware

Estándares y Protocolos	HomePlug AV, IEEE802.3, IEEE802.3u
Interface	puerto Ethernet 10/100Mbps
Tipo de Conector	EU, US, UK, AU
Botón	Botón par
Peso	103 Grams
Indicador LED	PWR, PLC, ETH
Dimensiones (Largo x Ancho x Alto)	3.6 x 2.2 x 1.2 in.(93×56×30 mm)
Consumo de Energía	< 3 W
Rango	300 M en la casa
CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE	
Tecnología de Modulación	OFDM
Funciones de Servicio	QoS integrado Adaptación de canal inteligente
Encriptación	Encriptación de 128-bit AES
OTROS	
Certificación	CE, FCC, RoHS
Contenido del Paquete	Adaptador Ethernet de Energía, Cable Ethernet (RJ45), CD de recursos, Guía de instalación rápida
Requisitos del Sistema	Windows 2000/XP/2003/Vista, Windows 7, Mac, Linux
Ambiente	Temperatura de funcionamiento: 0°C ~ 40°C (32°F ~ 104°F) Temperatura de almacenamiento: -40°C ~ 70°C (-40°F ~ 158°F) Humedad: 10% ~ 90% sin condensación Humedad de almacenamiento: 5% ~ 90% sin condensación

Fuente: TP-Link (s.f.). AV200 Mini Kit de inicio de energía, TL-PA211KIT. Recuperado el 18 de junio de 2015, de <http://www.tp-link.com/co/products/details/?model=TL-PA211KIT>

5.3.7 Red Eléctrica

5.3.7.1 Conformación de una red eléctrica. El sistema eléctrico está compuesto por varios elementos a fin de una red eléctrica entre los cuales se pueden encontrar centros de generación, medios de transmisión, subestaciones y estación de transformación de la energía a baja tensión, líneas de distribución en baja tensión, equipos de medición y dispositivos de consumo. (Comisión Regulación de Energía y Gas, 2008)

Los centros de generación, son los elementos que permiten que se produzca la energía eléctrica. Se pueden encontrar varias fuentes de energía hidráulica eólica solar (renovables), carbón, gas, nuclear (no renovables).

5.3.7.2 Líneas de distribución de baja tensión. Son las líneas por donde se transmite la energía a nuestros usuarios finales. En Colombia se maneja una escala entre 120/110 voltios a frecuencia de 60 Hz, Vale la pena mencionar que en Europa en se maneja voltajes de 220 voltios a 50 Hz

5.3.7.3 Equipos de medida. Son los que se encargan de medir el consumo de energía en los sitios en los cuales se encuentran los usuarios finales.

5.3.8 Participación Eléctrica en Colombia. En Colombia todos los sistemas eléctricos esta regulados por la comisión de energía y gas (CREG). Según 097 del 2008 se establecen los siguientes niveles de tensión electica:

- Nivel de Tensión I: Tensiones inferiores a 1kv
- Nivel de Tensión II: Tensiones entre 1 a 30 kv
- Nivel de Tensión III: Tensiones entre 30 a 62kv
- Nivel de Tensión IV: Tensiones mayor 62kv

5.3.9 Fundamentos técnicos de video digital sobre redes IP. En los últimos años, la transmisión digital, presenta una serie de ventajas frente a la transmisión analógica. Al verse la información reducida a un flujo de bits, se consigue una mayor protección contra posibles fallos, ya que se pueden introducir mecanismos de detección de errores, se elimina el problema de las interferencias, disminuye el efecto del ruido en los canales de comunicación, se consiguen codificaciones más óptimas y encriptado, permite mezclar distintos tipos de información a través de un mismo canal y se puede manipular los datos con computadores para comprimirlos. El desarrollo del presente capítulo describirá aspectos técnicos importantes del Video Digital IPTV, se analiza también la distribución de servicios de video digital para entornos IPTV sobre redes IP, la misma que tiene ciertos conceptos y parámetros a ser tomados en consideración, porque con base en estos se define la calidad del video digital percibido por el usuario final.

5.3.9.1 Sistemas de Transmisión de Video Digital. Un sistema básico de transmisión de video digital presenta las siguientes etapas:

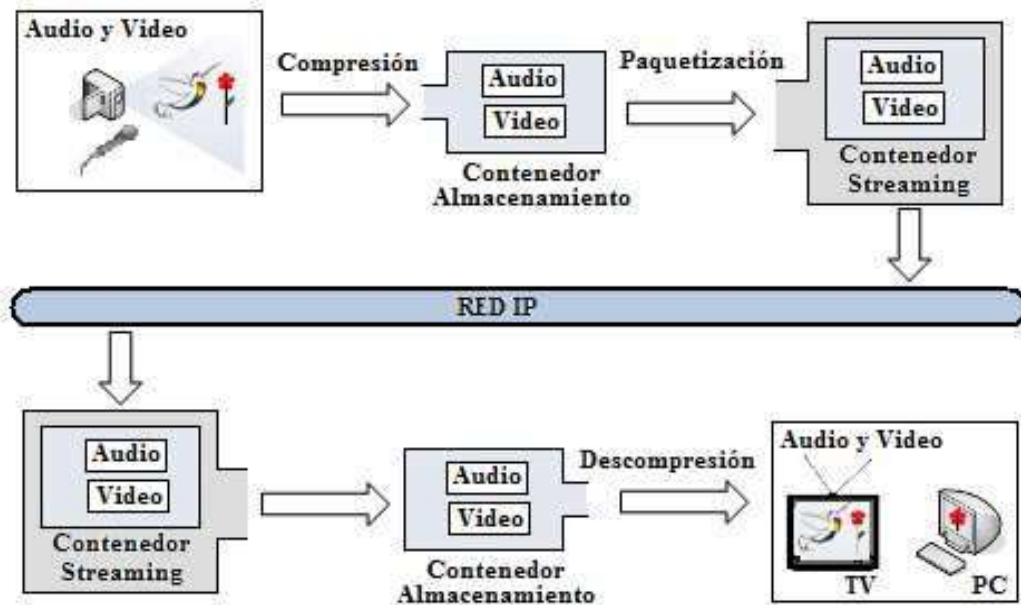
- Una etapa de captura, codificación y compresión del audio/video.
- Una etapa de almacenamiento con un servidor capaz de guardar y proveer los contenidos multimedia digitales.
- Una etapa de distribución con un canal que conecte al cliente con el servidor, como por ejemplo una red IP.
- Finalmente la etapa de reproducción multimedia por el cliente, el cual decodifica el audio/video.

En la etapa de captura y codificación existen tres diferentes procesos, el primero se refiere al paso de la transmisión de analógica a digital (captura), el segundo elimina la redundancia presente en la información de audio/video (codificación y compresión), mientras que el tercer realiza la paquetización de los datos anteriormente comprimidos. Para estos procesos existen una numerosa cantidad

de estándares y recomendaciones los cuales se mencionarán pero no serán profundizados.

Posteriormente el servidor debe almacenar el contenido y presentarlo en forma de streaming para que pueda ser consumido por los clientes. El *streaming* es una forma de transmitir información (generalmente multimedia) que permite al cliente ir consumiendo la información mientras que se está descargando. Existen también varios estándares para almacenar y transmitir el contenido. Por ejemplo el estándar MPEG-2 presenta un definición de como almacenar contenido utilizado por los DVDs, también presenta un mecanismo de *streaming* MPEG-TS utilizado en redes de cable digital y en transmisión satelital (Conectronica, s.f.).

Figura 17. Muestra de los distintos componentes



Fuente: Triviño, R. (2012). Estudio y Análisis de la Viabilidad Técnica para la Transmisión de Señales de Televisión Digital sobre Líneas de Potencia Eléctrica en las Instalaciones de CITIC.

El canal de distribución, que para esta aplicación es la red IP (usando una red PLT), permite el envío del *streaming* desde el servidor al cliente. En redes dedicadas de IPTV habitualmente la red cumple con propiedades de calidad de

servicio (QoS) con el objetivo de asegurar una buena experiencia al usuario. Pero la transmisión de video digital también es posible en redes no dedicadas como Internet, como ya se había mencionado, donde no se asegura calidad de servicio y la capa de aplicación se encarga de protegerse frente a fallas de la red.

Codificación y Compresión de Video Digital. Por Codificación de Video debe entenderse el proceso de compresión y descompresión de una señal de video digital (Guillen, López & Barahona, 2008). La Compresión de Video se refiere a la reducción de la cantidad de información necesaria para representar un contenido de video sin disminuir excesivamente la calidad de imagen. Debe entenderse entonces que toda codificación digital implica una compresión del video original. Los sistemas de video digital presentan una primera etapa de conversión analógica a digital, es decir la captura del video. Generalmente existen dos tipos de equipamiento capaz de realizar la captura: los que además de capturar comprimen el video (habitualmente usando el estándar MPEG-2) y los que no la comprimen.

El proceso de captura realiza dos muestreos:

- Muestreo espacial.- Se captura un snapshot, frame o imagen, y se muestrea generando una imagen digital, generalmente un rectángulo de píxeles. Aquí es importante el tamaño de la imagen y la definición de color de cada píxel
- Muestreo temporal.- Para representar el movimiento, se captura una sucesión de imágenes a intervalos regulares de tiempo. La cantidad de imágenes o frames por segundo determina la calidad del muestreo espacial. Para lograr continuidad en general se requieren más de 25 frames por segundo.

La forma natural de realizar las muestras de la señal de video es conocida como Muestreo Progresivo, y como se dijo anteriormente el video es muestreado como una serie temporal de frames completos. Una mejora comúnmente utilizada es el

Muestreo Interlaceado, en este caso la mitad de un frame es muestreado en cada intervalo de tiempo de la siguiente forma: en un intervalo se muestrean solo las líneas horizontales pares de un frame, en el siguiente las impares y así sucesivamente.

Un formato muy utilizado en el ambiente de televisión se encuentra especificado en la recomendación ITU-R BT.601-5, y presenta dos variantes: NTSC y PAL.

Cuadro 5. Parámetros de ITU-R BT.601-5

Parámetro	NTSC 30 Hz	PAL/SECAM 25 Hz
Fields per second	60	50
Lines per complete frame	525	625
Luminance samples per line	858	864
Chrominance samples per line	429	432
Bits per sample	8	8
Total bit rate	216 Mbps	216 Mbps
Active lines per frame	480	576
Active samples per line (Y)	720	720
Active samples per line (Cr,Cb)	360	360

Fuente: Ribelles García, A. (s.f.). Digitalización, almacenamiento y transmisión de audio y vídeo Recuperado de [https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Audiovisual/Plataformas_de_distribucion_de_contenidos/Plataformas_de_distribucion_de_contenidos_\(Modulo_2\).pdf](https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Audiovisual/Plataformas_de_distribucion_de_contenidos/Plataformas_de_distribucion_de_contenidos_(Modulo_2).pdf)

Se requieren 216 Mbits por segundo para almacenar un video codificado en este estándar o un canal de 216 Mbps para transmitirlo. Esto supera disponibilidad actual de las redes de IPTV e Internet y por tanto es imprescindible aplicar algún mecanismo de compresión de video.

Basado en lo anterior, la cantidad de información utilizada en una codificación cruda del video puede sobrepasar la capacidad de almacenamiento y transmisión del sistema de video digital, es por ese motivo que se han desarrollado y perfeccionado en los últimos años varias técnicas de compresión, especificada por un par de sistemas: el encoder y el decoder.

- El encoder convierte la señal de video en formato intermedio CIF previamente capturada, a un formato comprimido.
- El decoder conoce este formato comprimido, y se encarga de regenerar la señal de video intermedia para luego ser presentada en un televisor o monitor.

Generalmente al *encoder/decoder* se le denomina *CODEC* (Conectronic, s.f.; Gutiérrez, 2008), idealmente esta codificación debe ser: eficiente, utilizando la menor cantidad de información posible y eficaz, al representar de la forma más fiel posible el video original.

Dependiendo de las particularidades de cada sistema de video digital se han desarrollado distintos estándares de CODEC, habitualmente se especifica completamente el decoder dejando a la habilidad de la industria en construir mejores y más eficientes encoders. En los sistemas de IPTV el encoder es un hardware de propósito específico, de alta disponibilidad y calidad. Mientras que el decoder se encuentra implementado generalmente por software en el Set Top Box (STB).

Cuadro 6. Formatos de codificación/compresión de videos más usados

Formato	Uso
H.261	Se utilizó para videoconferencia y video telefonía y sirve como base para otros
MPEG1	Logra calidad similar a VHS (compatible con PC's y casi todos los DVD).
MPEG2	Es el usado en DVD's, permite imagen a pantalla completa con buena calidad
H.263	Tasa bajas y calidad aceptable. Usado para videoconferencia y videotelefonía
MPEG42 parte	Mejorada respecto a MPEG-2
MPEG410 parte	Es el más usado actualmente por una gran variedad de

	aplicaciones.
WMV9	video de poca calidad a en Internet, como de alta definición.(mejora del MPEG-4)

Fuente: Autores del Proyecto.

El formato MPEG-2 implementado por los sistemas de TV por satélite ha mostrado ser exitoso en su uso hasta hoy. Sin embargo, para reducir las tasas de datos, actualmente se está produciendo una transición al formato MPEG-4 *Advanced Video Coding* (AVC) o H.264, denominación de la recomendación publicada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Utilizando H.264/AVC las velocidades de transmisión de información típicas para la señal de televisión digital de alta calidad en definición estándar (*Standard Definition Television*, SDTV) oscilan entre 1.5 y 2.5 Mbps, y de 4 a 8 Mbps en formato de alta definición (*High Definition Television*, HDTV).

Otro estándar que se está utilizando actualmente para la entrega de IPTV es el Windows Media Video 9 (WMV9). Originalmente desarrollado como un codificador/decodificador (*codec*) propietario, WMV 9 fue introducido a la *Society of Motion Picture and Television Engineers* (SMPTE) donde fue aceptado como estándar y denominado como "VC-1". Su desempeño es muy similar al de H.264/AVC y ha sido considerado por grandes compañías de telecomunicaciones para la implantación de IPTV. Lo cierto es que, para lidiar con las restricciones de ancho de banda que ofrece la red de acceso, IPTV exige la utilización de H.264/AVC ó VC-1 desde el inicio del proyecto.

5.3.9.2 El Estándar MPEG (*Moving Pictures Experts Group*) de la ISO (*International Standards Organization*). Es el grupo más destacado y aceptado por la industria en lo que respecta a estandarización de video digital. Luego del éxito obtenido con el estándar MPEG-1 en 1993, el grupo decide realizar un estándar más completo y mejorado de un sistema de video digital. El mercado

potencial del estándar era la difusión de televisión digital, un mercado atractivo y de gran escala.

El Estándar MPEG 2 presenta mejoras en la compresión, codificación interlaceada (además de progresiva) y gran flexibilidad debido a la utilización de perfiles y niveles. Los perfiles y niveles son variaciones de calidad de compresión que permiten adaptar el estándar a las diferentes exigencias de los sistemas particulares, además de ofrecer a los fabricantes reglas más claras respecto a la conformidad de sus productos con el estándar. El estándar MPEG-2 se encuentra completamente definido en la ISO/IEC 13818. La parte más importante del estándar es la definición del formato de los flujos multimedia.

- **Flujos Elementales (*Elementary Streams* - ES).**- Es básicamente la salida del codificador, y este contiene toda la información necesaria para que un decodificador puede crear una aproximación lo más certera posible. Existen 2 tipos diferentes de ES.

Audio (*Audio Elementary Streams* o AES), es la salida del codificador de audio, diferente a la compresión de video, todos los fotogramas son codificados de la misma manera. Video (*Video Elementary Streams* o VES), que es una secuencia de video, habitualmente la salida del codificador, pueden existir varios tipos de fotogramas por lo tanto de tamaño.

- **Flujos Elementales Paquetizados (*Packetized Elementary Streams* - PES).**- Para manejar los diferentes ESs, estos son divididos en paquetes de diferente tamaño, según las características de la aplicación y del decodificador. Al proceso de partición en paquetes del ES se le llama Paquetización y un ES paquetizado es un PES. El PES presenta toda la información temporal para poder decodificar una señal de audio o de video.

Estándar MPEG 4 y H.264/AVC

Luego de MPEG-2, finalizado en 1995, el grupo MPEG continuó su trabajo de estandarización, la parte 2 del estándar MPEG-4 (ISO/IEC 14496-2) conocida como MPEG-4 Visual especifica la codificación y decodificación de video digital finalizada en 1999. El estándar H.264 fue comenzado por el grupo de trabajo *Video Coding Experts Group* (VCEG) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T). Las últimas etapas del trabajo se realizaron por la *Joint Video Team* (JVT) un grupo conformado por los grupos VCEG y el MPEG.

H.264 o MPEG-4 Part 10 Básicamente la codificación H.264 no difiere mucho de MPEG-2, se especifica el formato de codificación y como decodificarlo y se ha dejado nuevamente libre a la industria diseñar codificadores eficientes; utiliza también perfiles y niveles para definir variantes de resolución y calidad de video. El formato de salida del codificador que se entendería como la primera capa se llama VCL - *Video Coding Layer* que se ocupa de representar eficazmente el contenido de vídeo. El formato VCL es mapeado a unidades de la capa NAL (*Network Abstraction Layer*) que es la capa de adaptación a la red del formato de video (Guillen, López & Barahona, 2008; Held, 2006), previo a su almacenaje o transferencia por la red.

5.3.10 Almacenamiento y Transmisión. Una vez que es codificado un stream elemental ES, este se paquetiza formando un PES, generalmente es necesario combinar varios PES (al menos un audio y un video) para crear el contenido que posteriormente será reproducido. Dos posibilidades de tratamiento surgen entonces: almacenar el contenido para su posterior reproducción o transmitirlo (en nuestro caso por una red IP).

En el almacenamiento de video digital los flujos de video o streams son almacenados en contenedores, que son formatos de archivo de computadora que puede contener determinado tipo de información codificada con uno o varios

CODEC estándares. Por ejemplo el contenedor para el CODEC MPEG-1 Audio Layer 3, es comúnmente conocido por MP3 y la extensión de los archivos es “.mp3”.

Cuadro 7. Formatos de Contenedores de Video Digital

	Propietario	Soporta fotogramas B	Capítulos	Subtítulos	Formatos de Video soportados	Formatos de Audio Soportados
3GP	3GPP	Yes	?	Timed Text	MPEG-4, H.262, H.264	AMR-NB/WB, (HE)-AAC
ASF	Microsoft	Si	Si	Si	Casi Todos	Casi Todos
AVI	Microsoft	Si con hackeo	Si con hackeo	Si con hackeo	Casi Todos, H.264 tiene problemas	Casi Todos Vorbis tiene problemas
Div X	DivX	Si	Si	Si	DivX	MP3, PCM, AC-3
Matroska	Dominio Público	Si	Si	Cualquiera	Cualquiera	Cualquiera
MPEG-PS	MPEG	Si	Solo en VOB de archivos en DVDs	Solo en VOB de archivos en DVDs	MPEG-1, MPEG-2	MP3, PCM, AC3, LPCM, DTS
MPEG-TS	MPEG	Si	No	Posible vía ETSI	MPEG-1, MPEG-2, MPEG4	MP3, PCM, AC3, LPCM, DTS, AAC
MOV	Apple	Si	Si	Si	Cualquiera con códec QuickTime	Cualquiera con CoreAudio
MP4	MPEG	Si	Descriptor de Segmentos	Descriptor de Segmentos	MPEG-1, MPEG-2, MPEG4	MP3, MPEG-2/4, AC-3, (HE)-AAC
VOB	MPEG	Si	Si	VobSub	MPEG-2, Part 2	AC-3,, linear PCM, DTS, MPEG-2 Part 3

Fuente: Autores del Proyecto.

Los contenedores más complejos son capaces de soportar distintos CODECs de audio y video, manejar subtítulos, capítulos y meta-data (o tags). Uno de los roles más importantes del contenedor es propiciar información temporal para poder sincronizar la reproducción de más de un stream en simultáneo.

La mayoría de los contenedores presentan la posibilidad de tasa de bits variables tanto para audio y video. Actualmente cuando un contenedor no cuenta con alguna característica deseada los distintos softwares realizan extensiones para poder soportarlas, muchas veces estas extensiones son incompatibles entre sí complicando el escenario.

Las técnicas para la transmisión de video en las redes IP habitualmente son conocidas como mecanismos de streaming. El *Streaming* se podría definir como la transmisión en vivo de audio y video sobre una red, utilizando streaming, es posible ir visualizando un contenido multimedia a medida que éste es transferido. Existen múltiples técnicas de streaming según la realidad particular del sistema de video digital. En el caso del sistema de MPEG-2 (ISO/IEC 13818-1) define dos métodos de multiplexación de audio, video y contenido asociado para la transmisión:

- *Program Streams* (conocido como MPEG-2 PS o simplemente MPEG-PS)
- *Transport Streams* (conocido como MPEG-2 TS o simplemente MPEG-TS)

Un canal (como uno de televisión) se encuentra formado al menos por un PES de video y un PES de audio.* El proceso de juntar varios PES que serán reproducidos en forma conjunta se denomina multiplexación. Para lograr una reproducción conjunta sincronizada es necesario enviar información de reloj en la multiplexación. Mientras que MPEG-PS permite transportar un único canal, el

* En muchos países donde existe televisión digital los canales presentan más de un lenguaje de audio y subtítulo, esto se logra enviando otros PES en el canal.

MPEG-TS permite enviar varios simultáneamente (cada uno con una sincronización de reloj independiente). MPEG-TS incorpora además mecanismos de detección y corrección de fallas en la transmisión (los mecanismos usados son Control de Errores Convulcionales y Reed-Solomon).

Además la IETF** define su propio conjunto de protocolos para la transmisión de contenido multimedia por una red IP. Para sistemas de video digital de tiempo real, habitualmente se utiliza el protocolo RTP (Protocolo en Tiempo Real). Este protocolo es habitualmente montado sobre el protocolo UDP (Protocolo de datagramas de usuario), el cual a su vez se monta sobre paquetes IP (Protocolo de Internet).

El transporte RTP sobre TCP (Protocolo de Control de Transmisión) también se encuentra definido sin embargo es menos utilizado por presentar una mayor latencia UDP (lo que es una desventaja para aplicaciones de tiempo real). Lamentablemente RTP no cuenta con información de sincronización, ni con mecanismos para la recuperación de fallas nativos. Una serie de CODECs se encuentran estandarizados para poder ser enviados sobre RTP, varios dentro de la línea MPEG-2.

MPEG-4 o H.264, no definen un sistema obligatorio de transporte para la transmisión. Con la enmienda 3 del sistema MPEG-2 (ISO/IEC 13818-1) es posible transportar MPEG-4 y en particular H.264 con los transportes definidos ahí como son: Flujos de Programa (*Program Streams* conocido como MPEG-2 PS o simplemente MPEG-PS) y Flujos de Transporte (*Transport Streams* conocido como MPEG-2 TS o simplemente MPEG-TS).

** Internet Engineering Task Force (IETF) (Grupo de Trabajo en Ingeniería de Internet) es una organización internacional abierta de normalización, que tiene como objetivos el contribuir a la ingeniería de Internet, actuando en diversas áreas, como transporte, encaminamiento, seguridad. Fue creada en EE. UU. en 1986.

El MPEG-2 es muy utilizado en la actualidad tanto en almacenamiento como en transmisión de audio y video. Algunos de los sistemas que utilizan MPEG-2 son SVCD, DVD, DVB y ATSC. En cada caso se implementa solo la porción necesaria del estándar. H.264 comienza a ser utilizado en sistemas de video digital de alta resolución, es de esperar que con el paso del tiempo los distintos sistemas de transmisión de video migren a este formato reemplazando los tradicionales H.262/MPEG-2.

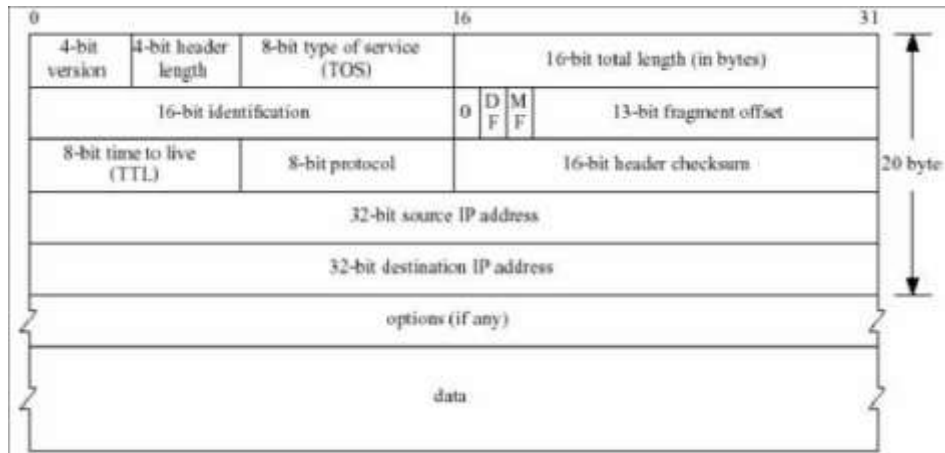
5.4 TRANSMISIÓN DE VIDEO EN UNA RED IP

Para una mejor explicación sobre la transmisión de video se hará referencia al modelo OSI, mencionando la capa de red y la capa de transporte en redes IP, con el fin de entender los mecanismos de streaming que se tratará.

Protocolo de Internet (IP *Internet Protocol*). Es un protocolo de la capa de red del modelo OSI no orientado a conexión usado tanto por el origen como por el destino para la comunicación a través de redes de conmutación de paquetes. IP provee un servicio de datagramas no fiable (también llamado del mejor esfuerzo) (Jensen, Slavensky & Kjærsgaard, 2006; Jensen, Slavensky & Kjærsgaard, 2007), por lo tanto no provee ningún mecanismo para determinar si un paquete alcanza o no su destino y únicamente proporciona seguridad (mediante *checksums* o sumas de comprobación) de sus cabeceras y no de los datos transmitidos, por lo tanto no proporciona ningún tipo de seguridad para que los datos realmente lleguen al destino (de esto se deben encargar los protocolos de capas superiores).

Los datos en una red basada en IP son enviados en bloques conocidos como paquetes o datagramas. En particular, en IP no se necesita ninguna configuración antes de que un equipo intente enviar paquetes a otro con el que no se había comunicado antes. El formato de la cabecera IP se muestra en la figura siguiente:

Figura 18. Cabecera de IP



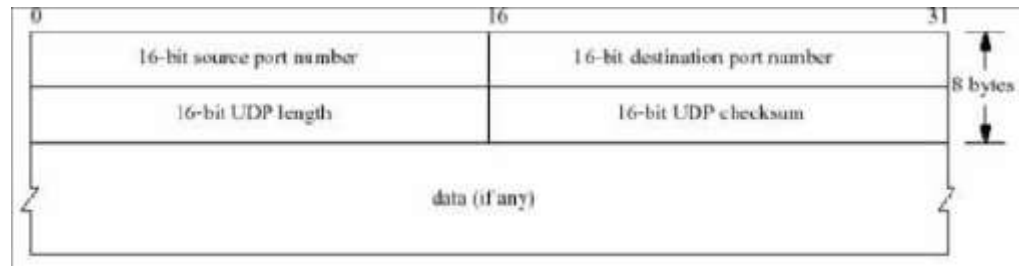
Fuente: Jensen, B.; Slavensky, H. & Kjærsgaard, S. (2007). Benchmarking and QoS of In-House Powerline Equipment under Noisy Conditions. IEEE Proceedings of ISPLC2006, Orlando, pp. 150-155.

Protocolos de Transportes (UDP, TCP, SCTP). Protocolo UDP (*User Datagram Protocol*).- Es un protocolo del nivel de transporte basado en el intercambio de datagramas, que provee un servicio “*best-effort*”. Permite el envío de datagramas a través de la red sin que se haya establecido previamente una conexión, ya que el propio datagrama incorpora suficiente información de direccionamiento en su cabecera. Tampoco se tiene confirmación ni control de flujo, por lo que los paquetes pueden adelantarse unos a otros; y tampoco se sabe si ha llegado correctamente, ya que no hay confirmación de entrega o recepción, es decir no provee garantía sobre pérdida de paquetes ni paquetes duplicados. Los manejos de errores en la transmisión se deben realizar por parte de las aplicaciones que usan el mismo. (Jensen, Slavensky & Kjærsgaard, 2006; Jensen, Slavensky & Kjærsgaard, 2007)

UDP es tradicionalmente usado para el streaming de video en vivo y sistemas de videoconferencia o interactivos, esto se debe a que es un protocolo de menor sobrecarga y de rápida inicialización (en comparación con TCP). En los sistemas

de transmisión en vivo tradicionalmente se considera inútil una retransmisión de la información pedida puesto que esta llegaría a destiempo.

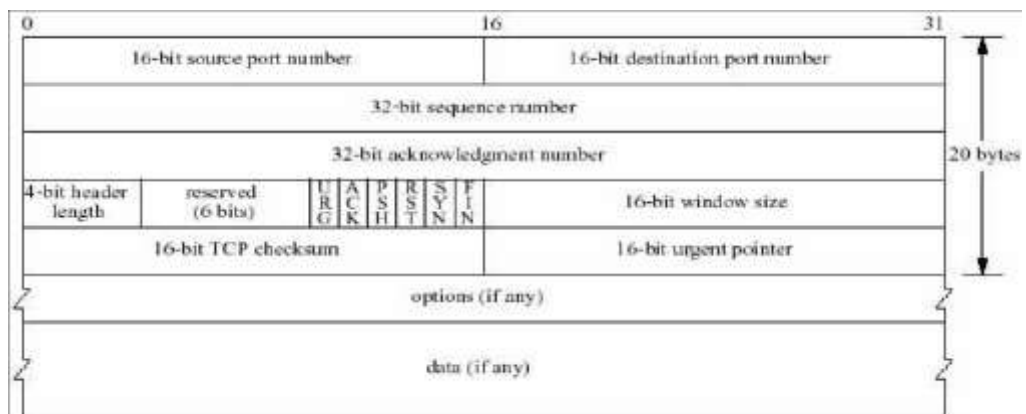
Figura 19. Cabecera UDP



Fuente: Jung, M.; Chung, M & Lee, M. (2005). Throughput Analysis of HomePlug 1.0. IEEE Communications Letters, vol. 9, no. 2, pp. 184–186.

Protocolo TCP (*Transmission Control Protocol*).- El protocolo garantiza que los datos serán entregados en su destino sin errores y en el mismo orden en que se transmitieron, esto es conseguido mediante un mecanismo en el cual, cuando no se recibe por parte del destinatario la confirmación del paquete durante cierto tiempo se reenvía. Los paquetes de este protocolo van dentro de los de los paquetes del protocolo de red (IP) y contienen la siguiente información.

Figura 20. Cabecera TCP

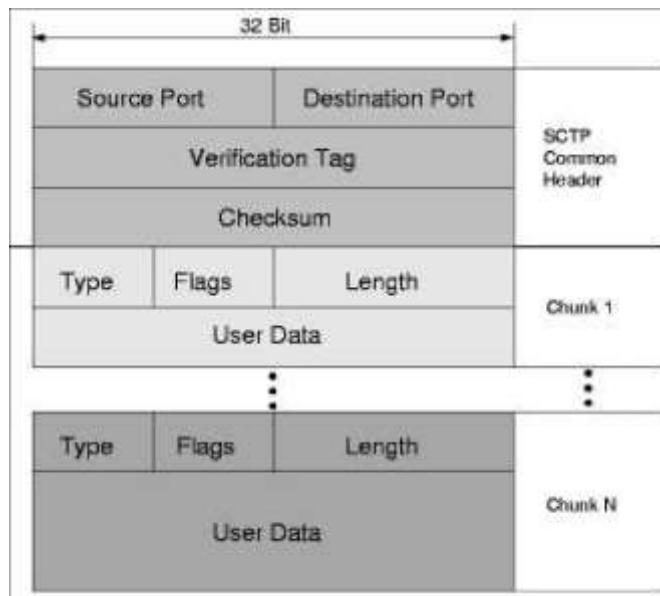


Fuente: Jensen, B.; Slavensky, H. & kjærsgaard, S. (2007). Benchmarking and QoS of In-House Powerline Equipment under Noisy Conditions. IEEE Proceedings of ISPLC2006, Orlando, pp. 150-155.

Debido a este comportamiento es posible detectar paquetes perdidos y pedir retransmisión de los mismos. En el caso de transmisión de stream, cuando se pierden paquetes la retransmisión aumenta el retardo y el consumo del ancho de banda lo que puede provocar que se vacíe el buffer de reproductor (por consiguiente la interrupción de la reproducción).

A pesar de estar completamente estandarizado a tenido una escasa difusión. Se lo menciona por su potencial utilidad en el streaming de video (potencialmente puede ser utilizado en contextos de grandes pérdidas como redes inalámbricas).

Figura 21. Cabecera SCTP



Fuente: Jung, M.; Chung, M & Lee, M. (2005). Throughput Analysis of HomePlug 1.0. IEEE Communications Letters, vol. 9, no. 2, pp. 184–186.

Este protocolo es basado en datagramas pero a diferencia de UDP tiene registro de números de secuencia con los que realiza controles de paquetes fuera de orden y pérdidas las cuales serán retransmitidas. A diferencia de TCP este

protocolo permite dentro de una misma conexión (origen SCTP – destino SCTP) diferentes direcciones IP.

O sea que cada uno de los extremos de conexión puede tener diferentes IP (manteniendo el puerto de conexión) y los paquetes serán enviados indistintamente por cualquier IP y a cualquier IP correspondiente en cada extremo SCTP. También soporta el tráfico sobre la misma conexión de diferentes tipos de paquetes manteniendo número de secuencia para cada uno de ellos.

En las redes IP existen distintas técnicas para la difusión de la información:

- Unidifusión (*Unicast*): El envío de un punto a otro en una red. El mecanismo habitualmente utilizado por todas las aplicaciones.
- Multidifusión (*Multicast*): El envío de la información a múltiples destinos simultáneamente.
- Amplia Difusión (*Broadcast*): El envío a todos los nodos en una red. Lógicamente aplicable en contextos reducidos, por ejemplo para el descubrimiento de recursos en una red LAN.

Dependiendo de la información se elige el mecanismo ideal para su difusión. En IPTV, la transmisión de canales en vivo habitualmente se realiza mediante *multicast*, puesto que se espera sean observados por una numerosa audiencia (su envío individual a cada espectador (*unicast*) redundaría en un dimensionamiento inadmisibles de la red). La técnica de *multicast* es de fácil descripción y de complicada implementación. El *multicast* debe usar la estrategia más eficiente para el envío de los mensajes sobre cada enlace de la red (con el fin de disminuir el consumo de ancho de banda), utilizando cada enlace a lo sumo una vez para cada paquete a ser difundido y creando copias cuando los enlaces en los destinos se dividen. Habitualmente esto se logra mediante la utilización de árboles de cubrimiento, surgiendo un protocolo para mantener dicho árbol. Desde el punto de

vista del emisor y los receptores el proceso es sencillo: el emisor envía la información una sola vez a una dirección IP especial (de forma idéntica a una difusión unicast); los receptores se suscriben al grupo de multicast asociado a esa IP especial y reciben una copia de todo lo enviado por el emisor. Por tanto antes del envío de la información en multidifusión, deben establecerse una serie de parámetros.

Protocolos de *Streamings* (RTP, RTCP, RTSP y MPEG TS). Como se mencionó anteriormente, existen variadas técnicas para transmitir multimedia en una red IP. En las redes de IPTV habitualmente se utiliza el conjunto de protocolos de tiempo real estandarizados por la IETF. Otros protocolos son nombrados en esta sección también.

Protocolos en Tiempo Real:

Protocolo RTP (*Real-time Transport Protocol*). Es un protocolo de transporte desarrollado para streaming. Este incluye datos extras no presentes en TCP, como *timestamp* y número de secuencia lo que contribuye a transporte en forma continua. También hay datos de control que permite al servidor realizar el streaming a una tasa correcta.

Figura 22. Cabecera de RTP

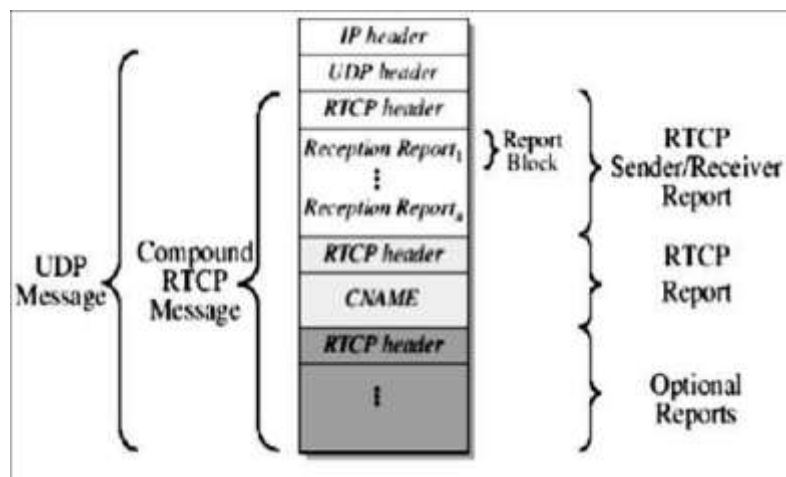


Fuente: Jung, M.; Chung, M & Lee, M. (2005). Throughput Analysis of HomePlug 1.0. IEEE Communications Letters, vol. 9, no. 2, pp. 184–186.

Protocolo RTCP (*Real Time Transport Control Protocol*).- Es un protocolo de comunicación que proporciona información de control que está asociado con un flujo de datos para una aplicación multimedia (flujo RTP). Trabaja junto con RTP en el transporte y empaquetado de datos multimedia, pero no transporta ningún dato por sí mismo. Se usa habitualmente para transmitir paquetes de control a los participantes de una sesión multimedia de streaming.

Una característica particular que tiene este protocolo es que para amortizar la sobrecarga de la cabecera se pueden reunir varios mensajes RTCP y ser enviados en un mensaje RTCP compuesto. Los paquetes deben estar compuestos al menos por un mensaje de receptor o emisor y el nombre canónico del participante (CNAME) y deben ser enviados periódicamente sin llegar a consumir el 5% del ancho de banda de la sesión.

Figura 23. Conformación Paquete RTCP



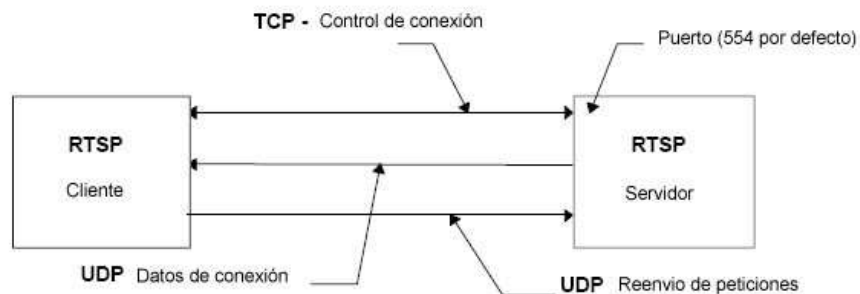
Fuente: Jung, M.; Chung, M & Lee, M. (2005). Throughput Analysis of HomePlug 1.0. IEEE Communications Letters, vol. 9, no. 2, pp. 184–186.

Protocolo RTSP (*Real-Time Streaming Protocol*). Es un protocolo no orientado a la conexión, en lugar de esto el servidor mantiene una sesión asociada a un identificador, en la mayoría de los casos RTSP usa TCP para datos de control del

reproductor y UDP para los datos de audio y vídeo aunque también puede usar TCP en caso de que sea necesario. En el transcurso de una sesión RTSP, un cliente puede abrir y cerrar varias conexiones de transporte hacia el servidor con tal de satisfacer las necesidades del protocolo. Además Realiza control sobre datos multimedia de tiempo real, brinda la posibilidad de interactividad con el reproductor, de forma similar a un video reproductor domestico el RTSP permite: reproducir, pausar, adelantar y más. También puede reaccionar a congestiones en la red y reducir el ancho de banda. Los comandos estandarizados en RTSP son: Describe, Setup, Play, Pause, Record, Teardown (Jung, Chung & Lee, 2005; Lee, Newman, Latchman, Katar & Yonge, 2003).

RTSP fue inspirado en HTTP 1.1 pero con la mejora de que se puede mantener el estado de la conexión (HTTP no mantiene estado) y que ambos (cliente y servidor) pueden realizar pedidos. RTSP soporta RTP como protocolo de transporte. Una de sus utilidades es brindar una forma inicial de escoger el canal de distribución óptimo hacia el cliente.

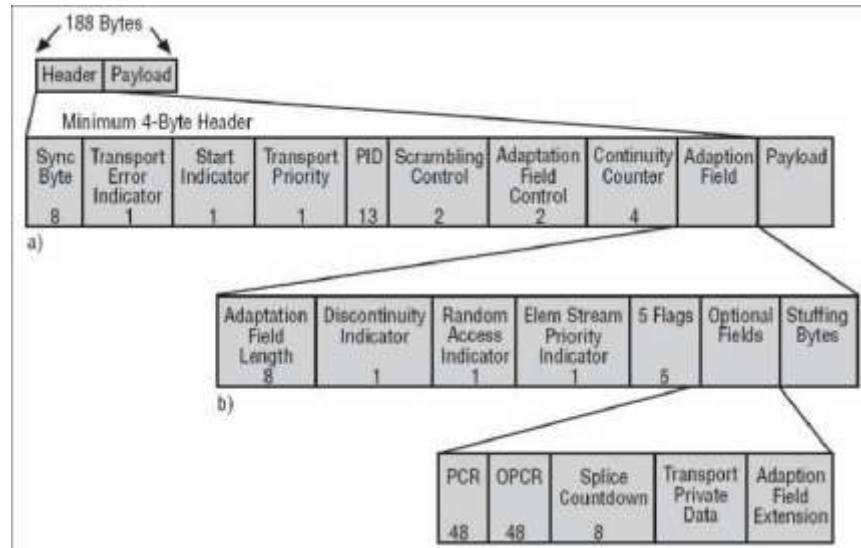
Figura 24. Funcionamiento RTSP



Fuente: Jung, M.; Chung, M & Lee, M. (2005). Throughput Analysis of HomePlug 1.0. IEEE Communications Letters, vol. 9, no. 2, pp. 184–186.

Protocolo MPEG-2 *Transport Stream*.- MPEG TS es un protocolo que brinda un mecanismo para multiplexar (combinar) los streams de audio y video, y así transmitirlos por la red. Es muy utilizado en los sistemas de video digital de televisión cable.

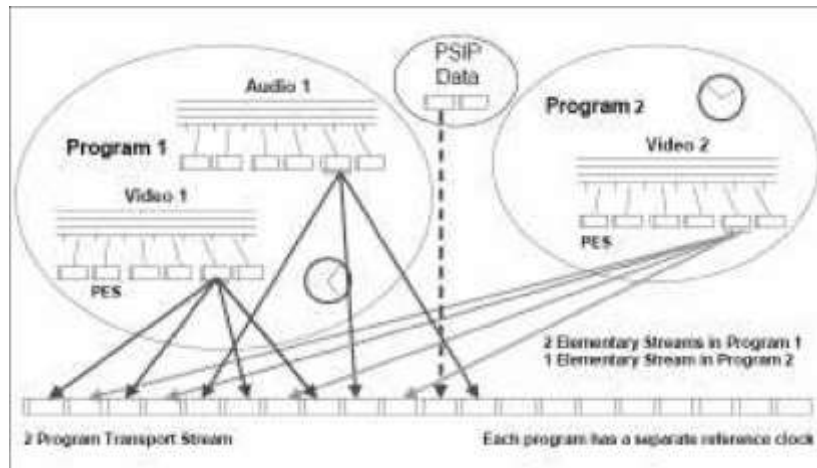
Figura 25. Cabecera TS



Fuente: Gutiérrez, H. (2008). Análisis y diseño de experimentos. 2ª Ed. México: McGraw-Hill, 571 p.

Entonces uno de los aspectos que el protocolo TS permite, es dentro de un mismo flujo enviar ESs de diferentes programas, es decir por ejemplo en IPTV, TS brinda la posibilidad de enviar diferentes canales dentro de un mismo flujo. Esto se llama transporte múltiple de flujos de Programa.

Figura 26. Ejemplo de Armado Cabecera TS



Fuente: Gutiérrez, H. (2008). Análisis y diseño de experimentos. 2ª Ed. México: McGraw-Hill, 571 p.

5.4.1 IPTV sobre las redes IP. Una vez definidos los aspectos importantes del video digital, se debe analizar la distribución de servicios de video digital para entornos IPTV sobre redes IP, la misma que tiene ciertos conceptos y parámetros preliminares a ser tomados en consideración, porque en base a estos se define la calidad del video digital percibido por el usuario final.

Conceptos importantes para la entrega de IPTV. Dentro del análisis de video digital y orientado hacia la aplicación de IPTV se debe tener en cuenta que durante los procesos de transporte y transmisión se debe tener presentes ciertos conceptos importantes que van de la mano.

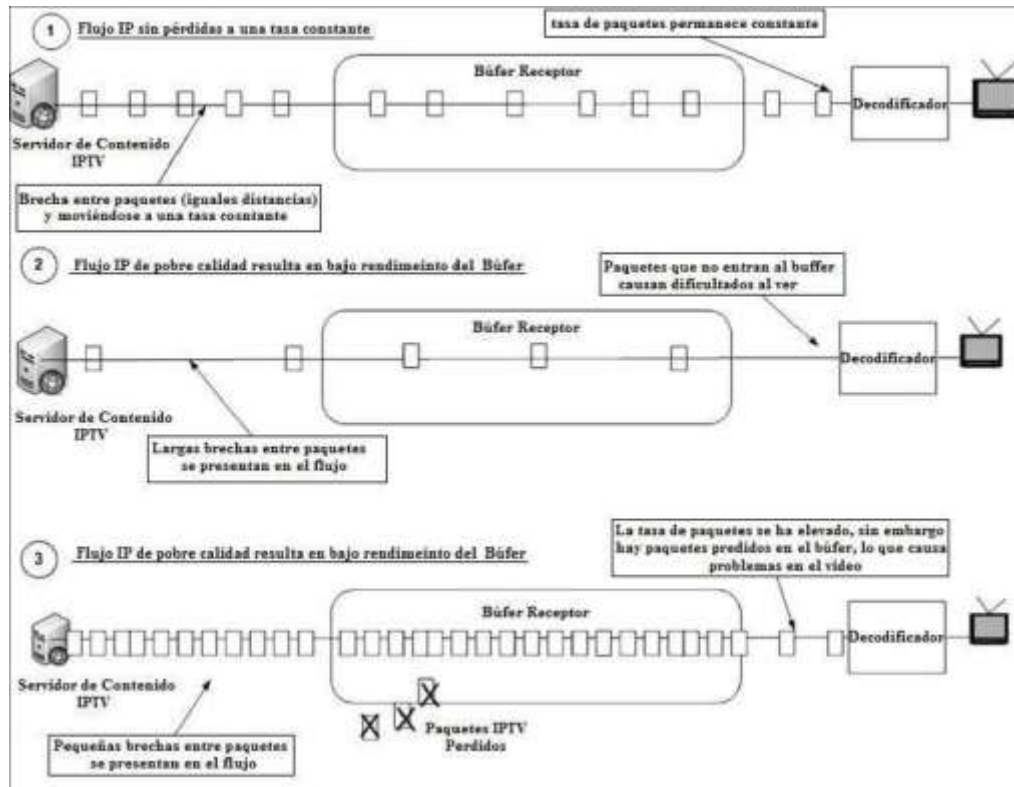
Calidad de Servicio (QoS). Es una medida del funcionamiento del sistema a nivel del transporte de los paquetes y desde el punto de vista de la red. También se conoce como calidad de servicio a un conjunto de tecnologías y mecanismos que permiten al administrador de la red, proveer servicios diferenciados a ciertos usuarios, otorgando prioridad a determinados flujos de tráfico, de manera que se pueda manejar los efectos de la congestión.

Calidad de experiencia (QoE). Es una medida del funcionamiento del sistema a nivel del servicio extremo a extremo y desde la perspectiva del usuario. Brinda un indicativo de cuán bien el sistema satisface las expectativas y necesidades del cliente respecto al servicio. En el caso de IPTV la QoE analiza desde la perspectiva del usuario la calidad del video y el audio percibido.

Latencia.- Es el tiempo que le lleva a un paquete ir de un extremo al otro de la red. El retardo tiene varias componentes, el retardo de codificación (depende del estándar utilizado), el retardo de señalización (depende de las interfaces de los equipos, siendo menor este retardo cuanto mayor sea la velocidad de la interface), el retardo de propagación (depende del medio físico que se utilice y la distancia recorrida), el retardo de encolamiento (tiempo que un paquete está en una cola esperando a ser transmitido) y retardos de conmutación (tiempo que demora un switch (conmutador) o un router (enrutador) en poner los paquetes en una cola y decidir por cual interface los va a transmitir).

Jitter.- Es la medida de tiempo entre el momento en que se espera que un paquete llegue y efectivamente llega, o dicho de otra forma es la variación o diferencia de retardo entre paquetes. Como consecuencia que cada paquete, se almacena en buffers en la red y durante diferente tiempo (debido por ejemplo, a la carga de la red en los diferentes nodos), algunos paquetes se atrasan más que otros. En general el jitter es compensado a nivel de los elementos de la red.

Figura 27. Diferentes Modelos de Jitter a través de una red IPTV



Fuente: PC Actual (2007). Arquitectura de una red PLC. Recuperado el 3 de agosto de 2014, de http://www.pcactual.com/articulo/laboratorio/especiales/7476/dispositivos_PLC_alternativa_wifi.html

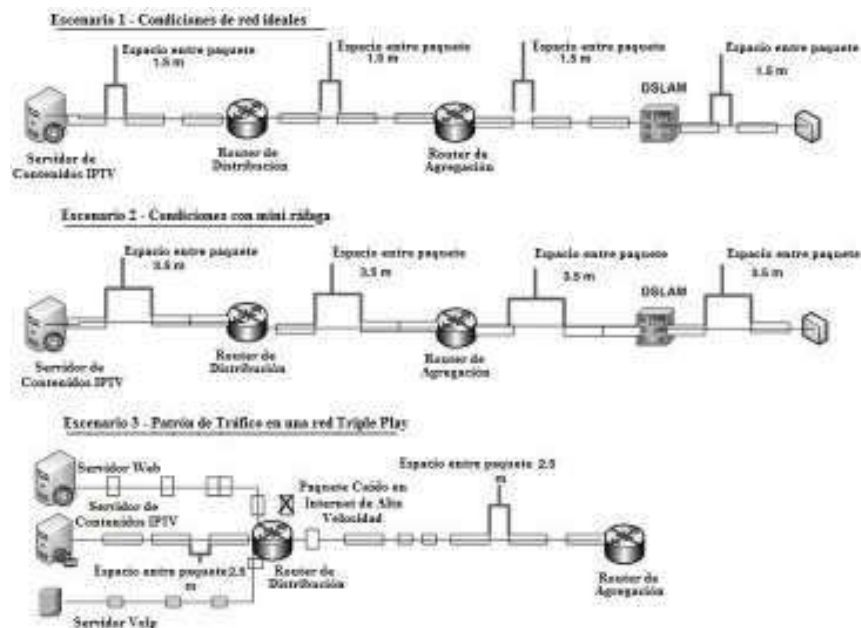
5.4.2 Requerimientos de QoS para IPTV en redes IP-PLT. Entregar una señal de video que sea comparable o mejor que la señal de video entregada por los proveedores existentes es uno de los prerequisites que se deben cumplir al ofrecer servicios IPTV. Para un proveedor de este tipo de servicios es necesario garantizar que su distribución para acceso al servicio de IPTV en toda la casa por medio del uso de PLT se logre, garantizando que la red soporte un sistema de QoS no solo hasta el módem, sino de ahí en adelante en la distribución in-home usando los equipos PLT hasta el STB; lo cual proporciona al cliente una experiencia de alta calidad.

Cuando un paquete IP ha sido transmitido a la red de distribución de IPTV, necesita pasar a través de un número de componentes de red como enrutadores,

switches, bridges PLT, etc. El paso de un paquete típicamente significa que el paquete entra a un dispositivo en una interfaz específica, se almacena en un buffer de memoria, es copiado fuera del buffer, procesado por el dispositivo y vuelto a enviar al siguiente dispositivo de red.

Siendo que el tráfico de una red IPTV es particularmente sensible a la pérdida de paquetes y jitter, el hecho del encolamiento debe ser examinado cuidadosamente. En el más simple nivel el encolamiento de paquetes involucra a un router, un switch o en para este estudio un quipo PLT, guardando paquetes de datos IP por muy corto periodo de tiempo; el número de colas soportado por un equipo varía de acuerdo al número de servicios que soporta en la red.

Figura 28. Modelos Potenciales de Tráfico IPTV y encolamiento



Fuente: PC Actual (2007). Arquitectura de una red PLC. Recuperado el 3 de agosto de 2014, de http://www.pcactual.com/articulo/laboratorio/especiales/7476/dispositivos_PLC_alternativa_wifi.html

- El primer escenario ilustra la situación cuando las condiciones de red son ideales y los paquetes están separados una diferencia de tiempo de 1.5ms. El

espacio entre paquetes permanece constante mientras atraviesa cada uno de los saltos en la red hasta llegar al STB del usuario.

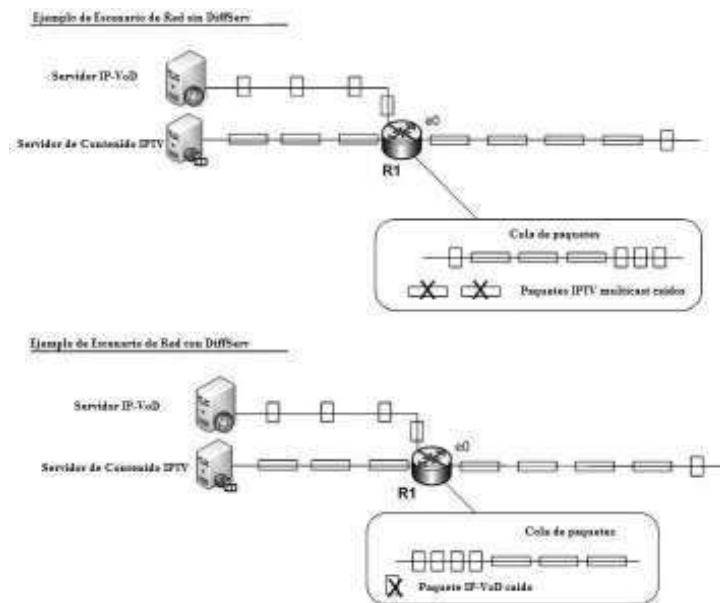
- En el segundo escenario, dos paquetes IPTV han sido introducidos en la red de distribución sin separación de tiempo y el tercer paquete está 3.5ms atrás del par de paquetes IPTV, Aunque está ocurriendo filas, la inserción de otro par de paquetes resultará en la formación de una mini fila.
- En el tercer escenario es más representativo y real del comportamiento de una red de servicios triple play; servidores de VoIP, IPTV e Internet están inyectando simultáneamente paquetes IP en la red. Una vez en la red los retrasos entre paquetes de los tres envíos son más o menos los mismos mientras llegan al router; este no es capaz de procesar tres ráfagas de envíos de datos al mismo tiempo, así que en consecuencia una fila de proceso se forma y los paquetes necesitan esperar un periodo finito de tiempo en memoria antes de ser reenviados por el puerto correcto.

Como se ve en el ejemplo del tercer escenario, la fila, se desborda lo que provoca que existan pérdidas de paquetes de contenido Internet, mientras el tráfico de VoIP e IPTV tienen un tratamiento preferencial en la fila.

Arquitectura de Diferenciación de Servicios. Las redes IP fueron diseñadas originalmente para un trabajo bajo la idea de mejor esfuerzo para el transporte de datos, y esta misma idea es aplicada en las redes PLT, lo que nos lleva a concluir que en una correcta secuencia de transporte de paquetes IP no se garantiza su entrega, para complicar la entrega de tráfico IPTV, el mecanismo usado para el control de tráfico en las redes IP durante la congestión consiste en descartar paquetes, además IP trata a todo el tráfico de red de la misma manera, es así que se le da igual prioridad a tráfico en tiempo real como a tráfico tolerante al retraso, lo que puede resultar en pérdidas o retrasos en la entrega de paquetes IPTV al STB.

Como resultado de ello un mecanismo de QoS es necesario, para dar prioridad a paquetes de IPTV sobre otros que se encuentren en la red, mientras se transmite en la red. Esto se da a través de la clasificación del tráfico IP en diferentes grupos, la provisión de QoS para redes de IPTV se lo hace a través de un estándar IETF* llamado Arquitectura de Diferenciación de Servicios (DSA).

Figura 29. Explicativa que ilustra el beneficio de usar DiffServ



Fuente: PC Actual (2007). Arquitectura de una red PLC. Recuperado el 3 de agosto de 2014, de http://www.pcactual.com/articulo/laboratorio/especiales/7476/dispositivos_PLC_alternativa_wifi.html

Para que un DSA funcionen es necesario que todos los dispositivos configurados con políticas de QoS similares estén combinados dentro de una unidad lógica llamada dominio, y por lo tanto los dispositivos conectados al link físico que puedan experimentar congestión deben poder implementar funcionalidades de DiffServ, es así que routers, switches, equipos PLT, STBs, etc., manejen la implementación de funcionalidades de DiffServ en una red IPTV.

* IETF: The Internet Engineering Task Force

DiffServ ayuda a los equipos por ejemplo en una red IP a clasificar los paquetes IPTV marcándolos con un campo de 6 bits, conocido como Código de Punto de Diferenciación de Servicios (*Differentiated Services Code Point – DSCP*). El DSCP reemplaza el campo de Tipo de Servicio (ToS) del encabezado estándar IP.

Usando los seis bits las opciones de “tratos para reenvío”, que se puede aplicar son varias, esas opciones son también llamadas comportamiento por salto (*per-hop behavior* o PHBs), cada PHB provee un particular nivel de servicio, de los 64 posibles la IETF ha definido un conjunto de 14 valores PHB, los más importantes son:

Cuadro 8. Conjunto de PHBs definidos por la IETF

Tipo de PHB	Número Asignado	Descripción
Mejor Esfuerzo <i>Best Effort</i> (BE)	1	El tráfico IP recibe ningún trato especial en el los dispositivos. Este PHB es típicamente aplicado al tráfico de acceso a Internet. La implementación de este PHB ocurre en el router y garantiza una mínima cantidad de capacidad para asegurar que el tráfico de acceso a Internet atraviese la red.
Reenvío Acelerado/ Expedited Forwarding (EF)	1	Las etiquetas de paquetes IP que se asignan este PHB experimenta mínimos retrasos cuando han sido procesados por un dispositivo como router. Provee al STB una conexión con el servidor con bajos niveles de latencia y jitter, que en el caso de servicios de Voz por ejemplo son críticos.
Reenvío Asegurado / <i>Assured Forwarding</i> (AF)	12	Latencia y jitter son un aspecto no tan importante para el tráfico IPTV sin embargo, IPTV tiene unos fuertes requerimientos sobre pérdidas de paquetes, esto tiene que ver con el hecho que los algoritmos de compresión tienen la habilidad de “empaquetar” una gran cantidad de

		<p>información de video, es así que la pérdida o modificación de un paquete tiene alta incidencia e impacto en la imagen de la calidad mostrada al usuario final. Un PHB AF es usado para garantizar cierta cantidad de ancho de banda para determinados flujos de video, garantizar el ancho de banda reduce la posibilidad de pérdidas de paquetes, lo que reduce la probabilidad de degradación en la calidad de la señal de video y es usado habitualmente por servicios de tipo IPTV y VoD. Otra característica del AF es que incluye una combinación de 4 niveles de aseguramiento del reenvío con tres niveles de probabilidad de pérdidas de paquetes.</p>
--	--	--

Fuente: Autores del Proyecto.

En resumen la arquitectura DiffServ es un mecanismo muy útil para los proveedores de servicio para mejorar el desempeño de sus redes IPTV, y típicamente opera en conjunto con otra tecnología como es MPLS.

MPLS-Diffserv QoS. MPLS es un sistema de ingeniería de tráfico que mejora la eficiencia del ruteo IP en las redes, que combinando muchos de los beneficios de MPLS con QoS se garantiza DiffServ (diferenciación de servicio), los operadores de las redes son capaces de desarrollar servicios que requieren garantías para un estricto desempeño, como IPTV. Los mecanismos usados por los sistemas MPLS-DiffServ QoS están definidos en la norma RFC 3270. Para resumir lo que se pretende es dar una idea de cómo reforzar QoS dentro de una red, lo que se traduce en definitiva a mejorar la QoE para los usuarios finales.

5.4.3 Factores que afectan la entrega de servicios IPTV. La calidad de video y audio de los servicios de IPTV deben ser tan buenos o mejores que los servicios proporcionados por la televisión RF tradicional. Hay varios puntos importantes que pueden impactar la calidad de IPTV como: baja calidad de la fuente del contenido,

codificación usada en el centro de IPTV, Paquetes corrompidos, paquetes que llegan fuera de orden, paquetes IP perdidos, latencia y video jitter, competencia con otros servicios triple play, incorrecta configuración y congestión del servidor.

Baja calidad de la fuente de contenido. La baja calidad de la fuente del contenido reduce la eficiencia del proceso de codificación y tiene un impacto negativo en la calidad del contenido entregado al usuario final.

Codificación. Los mecanismos para la codificación del material de video pueden tener un gran impacto en la calidad de la señal entregada al usuario de IPTV. Los proveedores de servicios de IPTV usualmente usan MPEG-2, H.264/AVC o VC-1 como sistemas de codificación para los videos antes de ser enviados por la red IP. Todos estos sistemas pueden comprimir la información a varias tasas de transmisión, ya que las señales de video comprimidas reducen la cantidad de ancho de banda necesaria para su transmisión a través de la red, sin embargo la calidad de la imagen percibida puede que no sea de alta calidad, los tipos de distorsión de imagen por codificación están especificados en la tabla siguiente:

Cuadro 9. Tipos de Distorsión de Imagen

Tipo	Características
<i>Tiling</i> (Embaldosado)	Se refiere a la renderización de una imagen de video que incluye secciones de la imagen que están en lugares equivocados cuando se comparan con la fuente original.
Distorsión de Bloques de Video	Un bloque es una porción de video MPEG que consiste de una matriz de pixeles. Durante la codificación un algoritmo es aplicado a esta matriz que en algunos casos puede distorsionar la calidad del bloque de video y cuando esto ocurre el bloque no puede presentar el contenido de la fuente. Debido a que un cierto número de bloques son requeridos para construir una imagen completa el efecto visual de la distorsión de un bloque de video es limitado si el número de bloques es

	pequeño, sin embargo es un problema si durante la codificación distorsiona bloques constantemente.
Ruido de Cuantización	Durante la digitalización del video algunos errores de ruido pueden ser introducidos como parte del proceso. Una larga cantidad de ruido de cuantización es evidenciada como el efecto de “Nieve” que puede ser visualizada cuando se reproduce el video en el STB.
Saltos de Imagen (<i>jerkiness</i>)	Un flujo de video IPTV consiste de una secuencia de imágenes que son mostradas en una TV o Monitor a una alta velocidad, para el usuario el rápido cambio de imágenes pasa desapercibido y se lo nota como movimiento, sin embargo si la tasa a la cual se presenta las imágenes baja a una tasa en particular el flujo es percibido como imágenes estáticas o que saltan, antes que como una secuencia continua. El salto de imagen es introducido por codificadores que no comprimen el contenido a una tasa de imágenes lo suficientemente alta, aunque en ciertos casos puede ser necesario cuando el ancho de banda es un problema y el contenido necesita ser codificado a una baja tasa de transmisión.
Retención de Objetos en la pantalla	Esta distorsión ocurre cuando un objeto en particular o una sección de la pantalla persisten cuando la secuencia de video ya ha cambiado y ha continuado.

Fuente: Autores del Proyecto.

Paquetes Corrompidos. La corrupción de un paquete es otro factor que contribuye con la distorsión de la señal de IPTV, esta corrupción generalmente ocurre durante el proceso de transmisión, y es donde entra el análisis en la red PLT que servirá para transmitir la señal; este efecto produce la modificación de la carga o del encabezado del dato contenido dentro del empaquetamiento. Ruidos por impulsos electromagnéticos son de las principales causas para la corrupción de paquetes en un ambiente IPTV y de vital importancia a analizar para el estudio ya que la red eléctrica es un medio donde constantemente se puede ver que afectan este tipo de impulso por la conexión o desconexión de equipos, el

encendido y apagado de iluminarias o el switcheo de ciertos dispositivos electrónicos.

Paquetes que llegan fuera de orden. Paquetes que arriban en el orden equivocado y paquetes IP mal encaminados en el router se deben a las deficiencias de la red. El uso de buffers de paquetes es una técnica que es usualmente usada para manejar y mitigar el efecto de los paquetes que arriban fuera de la secuencia.

Paquetes IP perdidos y descartados. Algo de pérdida de paquetes está bien para buscadores web y aplicaciones de e-mail que generalmente pasan desapercibidos para los usuarios. Sin embargo paquetes descartados en una red IPTV pueden degradar toda la experiencia de visualización debido a la alta naturaleza de la compresión del contenido de video. Donde tecnologías de compresión como VC-1 y H.264/AVC son extremadamente sensibles a las pérdidas de paquetes.

En casos muy severos la conexión entre el servidor de video y el STB terminará. Esto es particularmente verdadero para contenido IPTV, que es transportado por UDP, porque el paquete nunca es reenviado y el contenido se pierde. TCP no es de mayor beneficio porque el tiempo que toma en solicitar una copia del paquete podría resultar en un desbordamiento de búfer y un congelamiento de la imagen asociada con este.

Cuadro 10. Típicas fuentes de Pérdidas de Paquetes

Fuente para la pérdida de Paquete	Explicación
Interferencia Eléctrica	<p>La pérdida de paquetes puede ocurrir debido a la interferencia eléctrica que ha sido introducida en varios puntos de la infraestructura de la red IPTV. Por ejemplo STBs conectados a los toma corrientes de la red interna de las casas, debido a que estos tomacorrientes están sujetos a diversas alteraciones como</p> <p>Bajas de tensión y picos en los niveles de potencia, esto puede ocasionar problemas con errores de bit, que resultan en pérdidas de paquetes mientras en dispositivo está en operación.</p>
Relación Señal Ruido (SNR)	<p>La SNR es otro factor que influye y tiene un efecto sobre el número de paquetes de IPTV que son perdidos o descartados durante la transmisión de un flujo unicast o multicast IPTV. Así que entre mayor sea la relación señal a ruido de la red eléctrica menores serán las pérdidas de paquetes. La variación de SNR depende de muchas cosas como la corrosión del cable, la distancia, los empalmes, etc.</p>
Congestión en la red	<p>La congestión de la red es una de las obvias fuentes de pérdidas de paquetes. Es normal para la mayoría de infraestructura de red de IPTV experimentar algo de congestión durante ciertos periodos de tiempo. Mientras el periodo de congestión sea lo más corto posible y no se extienda, la pérdida de paquetes son típicamente pequeñas.</p>

Fuente: Autores del Proyecto.

Generalmente para mantener el servicio se utilizan técnicas de gestión de red para reducir los efectos de la pérdida de paquetes, entre ellas se puede mencionar:

1.- Uso de retransmisiones.- Dentro de las principales funciones del modelo de comunicación en la capa de transporte de IPTV, es asegurar que el contenido de video sea entregado a su destino. Una entrega asegurada del contenido a través de la red en algunos casos requiere el uso de algunos mecanismos de retroalimentación que detecten paquetes que no han arribado a su destino.

2.- Diseñar los Requerimientos de Ancho de Banda adecuadamente.- Una red que posea suficiente ancho de banda para transportar tráfico IPTV durante tiempos picos de demanda puede reducir la probabilidad de congestión que ocurra en la red. Es así que una red PLT debe poseer un ancho de banda adecuado para IPTV con el fin de reducir la pérdida de paquetes; ya que la congestión en la red por falta de ancho de banda produce pérdida de paquetes y redundancia en una reducción de la QoE percibida por el usuario.

Otros factores. A parte de la latencia y el jitter mencionados anteriormente, la competencia con otros servicios triple play demandados simultáneamente pueden ocasionar problemas, una manera adecuada de mitigar este factor es priorizando la entrega de tráfico de video.

5.4.4 Sistemas de Medición de QoE para IPTV. Uno de los objetivos de QoE es asegurar que las características principales de la señal original sean recreadas en el receptor del usuario final. Para lograr este objetivo se requiere un buen entendimiento de cómo detectar y prevenir problemas que puedan ocurrir en la entrega de servicios IPTV. Para ello los modelos de medidas y las métricas de QoE frecuentemente son usados para identificar factores que podrían impactar directamente en la experiencia visualizada por el usuario final. Existen tres

modelos primarios usados por los sistemas de medición de calidad de IPTV, y son: Referencia Completa, Cero Referencia y Referencia Parcial.

Cuadro 11. Tipos de Modelos de sistemas de medida de Calidad

Tipo	Descripción
Referencia Completa	El sistema FR hace una copia del flujo de video en el receptor y lo compara con una señal de referencia obtenida de la fuente del contenido de video. Esta medida determinará el nivel de distorsión y degradación que ocurrió durante la codificación y transmisión del video original a través de la red, mediante el uso de un algoritmo, brindando una medida exacta de la calidad de video recibida por el usuario final.
Cero Referencia	Los sistemas ZR no necesitan de una señal de video de referencia para calificar la calidad de video de un flujo IPTV, solo con la señal recibida por el usuario final. Son muy usados para analizar flujos IPTV en tiempo real porque analizan unos pocos factores, ya que focalizan en analizar los encabezados de los frames de video y monitorear una amplia variedad de métricas incluidas el número de errores PCR, frames tipo I, MDI contenidos en el flujo IPTV.
Referencia Parcial	Los sistemas PR tienen mucha similitud con los FR, pero están diseñados para tomar una muestra de la fuente y el destino, las compara y da una métrica, necesitan de menos complejidad computacional al compararlos.

Fuente: Autores del Proyecto.

Métricas de QoE y QoS para IPTV. Las métricas de QoS y QoE se dividen en dos categorías: métricas subjetivas y objetivas.

Métricas Subjetivas. Usan participantes o grupos de participantes para calificar y evaluar la calidad de la imagen. El tipo de gente usada para pruebas subjetivas varía dependiendo de los proveedores de servicio, algunos pueden usar

ingenieros experimentados, otros expertos en análisis de calidad de video, y otros usuarios segmentados por edad, sexo, estrato, etc. Los pasos típicos asociados con la identificación de métricas subjetivas para IPTV incluyen (PC Actual, s.f.):

- Identificar una serie de secuencias de video como prueba.
- Seleccionar un número de parámetros de configuración.
- Establecer un ambiente de pruebas de acuerdo con los parámetros a analizar.
- Reunir a un grupo de gente para que formen parte del test.
- Realizar el test y analizar los resultados.

Como Puntuación Media de Opinión (MOS) es usado, ya que un sistema de QoE necesita también del factor humano, el sistema MOS permite a un número de personas asignar un valor numeral entre 1 y 5 a la calidad percibida del video observado.

Cuadro 12. Puntuación MOS usada para niveles de calidad IPTV

Percepción del canal IPTV	Puntuación MOS
Excelente	5
Bueno	4
Medio	3
Malo	2
Pésimo	1

Fuente: Autores del Proyecto.

La clasificación MOS es subsecuentemente calculada por el promedio de los resultados, hay cuatro variantes del MOS.

- MOS V.- Califica la calidad visualizada en un flujo IPTV.
- MOA-A.- Es la versión en audio del MOS es usada para calificar la porción de audio del flujo IPTV entrante.

- MOS-AV.- Es usada para evaluar la calidad de Audio y Video en un flujo IPTV.
- MOS-C.- Está métrica es usada para calificar la experiencia asociada a interactuar con los flujos IPTV, como cambio de canal y uso del EPG. Varias iniciativas industriales como la TR-126 del foro DSL recomienda el uso de MOS como mecanismo para determinar la QoE de servicios de video.

Métricas Objetivas. Para este tipo de métricas son usados equipos de pruebas para medir la calidad de la señal de video en términos de comparar los flujos de imágenes y medir la calidad de la señal degradada. Comúnmente las métricas objetivas usadas para QoS y QoE en IPTV incluyen PSNR, MPQM, VQEG y MDI (PC Actual, s.f.)

Pico de la relación señal a ruido (PSNR).- Adicionalmente a identificar problemas de entrega de paquetes, es también necesario analizar y medir la calidad actual del contenido dentro de los paquetes después de decodificar y transmitir a través de una red. Una métrica llamada Pico de la Relación Señal a Ruido (PSNR) es algunas veces usada para examinar y calificar la calidad de este contenido como es percibido por el usuario final. Expresa la relación entre la potencia de una señal de video y la potencia generada por ruido electromagnético en término de decibeles.

Métrica de calidad de movimiento (MPQM).- La métrica de calidad de movimiento de imágenes es usada para analizar la calidad de los videos comprimidos MPEG, esto incluye tecnologías que replican la experiencia de un observador humano y califican el flujo IPTV en la escala de 1 a 5, donde 1 es excelente y 5 pésimo.

Índice en entrega medio (MDI).- El Índice de Entrega Medio es un estándar industrial definido en RFC 4445, es usado para medir los niveles de calidad en varios puntos de una red. MDI es un mecanismo de puntuación que indica niveles

de calidad de video y también identifica componentes de la red que están afectando la QoE del usuario final. Esto se logra midiendo niveles de jitter y pérdida de paquetes que ocurren en diferentes puntos de la red IPTV.

El Factor de Retraso (DF), mide la cantidad de tiempo de búfer requerido para alojar la cantidad jitter presente en la red. El valor del jitter es obtenido de la medida de la latencia respecto a la tasa del flujo, en otras palabras si la tasa de salida del servidor de streaming es 2.4Mbps y el flujo está llegando con STB a la misma tasa de 2.4Mbps, entonces el valor del jitter en este caso ideal es cero, cuando el jitter es cero el STB está procesando los paquetes a una tasa constante. Un valor de jitter de cero es raro o no se da debido a que cada componente en el camino del flujo contribuirá de alguna manera con algo de jitter. Y se lo puede calcular de la siguiente manera:

$X \text{ (Mb)} = |\text{bytes recibidos} - \text{bytes mostrados}|$

Luego $DF = [\max(X) - \min(X)] / \text{la tasa media en Mbps}$

Donde X es el nivel de un búfer virtual en el que DF es medido, usualmente DF viene dado en milisegundos.

Por ejemplo si un flujo tiene un DF de 40ms, el flujo necesitará de un búfer en el receptor de al menos 40ms para guardar. Además un valor alto de DF es un muy buen indicador de la congestión que ocurre en ciertas partes de la red.

La Tasa Media de Pérdidas (MLR), define el número de paquetes IP perdidos o caídos por segundo, es por esto que cualquier valor que se encuentre sobre cero puede tener un efecto en la QoE percibida por el cliente. Se la obtiene de la resta del número promedio de paquetes recibidos durante un intervalo de tiempo y el promedio de paquetes esperados durante ese intervalo y se escala a un segundo.

$MLR = (\text{paquetes esperados} - \text{paquetes recibidos}) / \text{un intervalo de tiempo en segundos.}$

Debido a que la MLR es un tasa, información importante es perdida, un estudio del foro DSL WT-126 ha demostrado que casi todas las más simples pérdidas de paquetes producen un error visible, a un usuario típico prefiere menos frecuentes pero significativos errores a más frecuentes pero menos significativos errores, aunque aún están en debate se recomienda como estándares de QoE para IPTV una pérdida máxima de 5 paquetes IP consecutivos por cada 30 min para SDTV y VoD, y de 4 horas para HDTV, si lo se traslada a términos MLR:

Cuadro 13. Puntuación MOS usada para niveles de calidad IPTV

Servicio	MLR Máximo aceptable
SDTV	0.004
VoD	0.004
HDTV	0.0005

Fuente: Autores del Proyecto.

Como se ha visto a lo largo de este capítulo para la transmisión de IPTV a través de las líneas de potencia eléctrica se debe analizar los parámetros de calidad de servicio en la red PLT implementada, verificar los aspectos de pérdida de paquetes que son muy importantes para el manejo de IPTV ya que la mínima pérdida influye sobre la calidad de la imagen percibida.

5.4.5 Perspectivas para IPTV

Resolución, Aplicaciones y Demanda de Ancho de Banda. La complejidad de los sistemas IPTV recae en la gran cantidad de información que llevan los flujos de video, de hecho IPTV es conocido como una de las aplicaciones asesinas en Internet debido a su gran demanda de ancho de banda.

El incremento constante de la demanda de mayor calidad de imágenes, implica mayor resolución y por ende mayor ancho de banda, a ello se le debe sumar la

tendencia a requerimientos extra de ancho de banda con el fin de proveer servicios de video 3D, que en la mayoría de versiones más populares consiste de unir dos imágenes en una sola, aumentando la necesidad de recursos.

Otro aspecto es la aparición de nuevas aplicaciones relacionadas con televisión IP, como por ejemplo televisión interactiva. La interactividad mejora a IPTV ofreciendo al usuario la posibilidad de interactuar con el proveedor de servicios con el propósito de compra por tarjeta, reserva de lugares o servicios, encuestas de opinión, etc., sin embargo demanda nuevos requerimientos de la red, que en este caso son más similares a los juegos interactivos que a la televisión clásica.

Para un manejo adecuado de los flujos de IPTV y aplicaciones, existen numerosos proyectos* dedicados al desarrollo y mejoramiento de nuevas soluciones constantemente, en áreas relacionadas con tecnologías de almacenamiento, codificación de audio y video, encriptación de datos, distribución de flujos de datos y transmisión sobre la red.

IPTV e IPv6. El IPv6 permite soportar un número mucho mayor de dispositivos en Internet, también introduce importantes opciones incluyendo nuevos y mejores mecanismos de seguridad, mejor calidad de servicio (QoS), más eficientes formas de ruteo, y el beneficio más importante para IPTV se tiene en transmisión de video, ya que IPv6 nativamente soporta transmisión multicast.

Sin embargo al pasar hacia redes IPv6 se tiene otras dificultades a ser analizadas, debido a que IP se relaciona con todos los sistemas y dispositivos (desde un punto de horizontal), es decir se tendría que adoptar IPv6 para los sistemas multimedia, bases de datos distribuidas y aun las plataformas de pruebas; además se debe tener en cuenta que el tráfico IPv6 se incrementaría en la red, por ejemplo Google activó IPv6 en las comunicaciones internas de Youtube incrementando el tráfico

* EU 7FP de la unión Europea, P2P – Next Project, Mobile3DT, CANTATA, entre otros.

IPv6 en el Internet cerca de un 3000%, otras empresas como Yahoo y Facebook ya han comenzado también con implementaciones.

El primer escenario.- Es el más probable debido a la inversión realizada en equipos para brindar servicios IPTV, y el tiempo de vida útil que estos poseen, sin embargo para lograr ello se tendrán varias etapas para lograr la transición:

- **Etapas 1 Red IPv4.-** Los servicios de video unicast y multicast están basados solo en la red IPv4 y se diseña el plan de migración a IPv6.
- **Etapas 2 Primera Actualización.-** Los equipos terminales IPTV son solo IPv4 o han sido actualizados a pila dual, la red de la misma manera es pila dual, sin embargo las fuentes multicast de video continúan siendo IPv4. Eso quiere decir que el núcleo de la red cambia a modo de pila dual para soportar más y más solo servicios de video unicast, pero aún no multicast; los nuevos equipos terminales IPTV serán pila dual, siendo instalados gradualmente solo para compatibilidad con la futura red IPv6. Esta etapa podría durar unos 10 años, y al final el tráfico de video IPv4 unicast sería alrededor del 10% del ancho banda utilizado.
- **Etapas 3 Segunda Actualización – Dejar de lado IPv4.-** En esta etapa los equipos terminales IPTV serán pila dual o entrarán los nuevos equipos IPv6 nativos; la red y las fuentes de video IPTV serán solo IPv6. Esta etapa comienza cuando las empresas de telecomunicaciones encuentran que el tráfico IPv4 unicast en su red es insignificante, y se decide “apagar” la pila IPv4 de los equipos, para este momento los terminales IPTV IPv4 ya no estarán en uso o han sido reemplazados por los duales.
- **Etapas 4 Una red IPv6 multicast pura.-** En la etapa final los equipos terminales IPTV pila dual habrán desaparecido, y la red será pura IPv6.

Segundo Escenario.- En el cual la red de acceso se despliega desde su comienzo como una red IPv6, donde la red, los servidores y los equipos terminales son nativos IPv6 desde el inicio del despliegue, lo cual no es muy común, pero no imposible. Actualmente, el primer sistema IPTV completamente implementado en IPv6 se encuentra en Japón, ya que este país optó por desarrollar su red solo IPv6 como política de estado. NTT Plala Hikari TV resulta en una aplicación exitosa de IPTV IPv6 con cientos de miles de clientes, y soportado por empresas como Toshiba que fue la primera compañía en comercializar STB que trabajen con IPv6.

6. METODOLOGÍA

6.1 MATERIALES Y MÉTODOS

MATERIALES

- Adaptadores Ethernet PowerLine AV modelo PLE200 de Linksys.
- Portátiles y equipos de mesa.
- Software Video LAN VLC se trata de una solución completa para transmisión de vídeo, desarrollada por programadores de todo el mundo, dentro de un proyecto GPL.
- *Wireshark* herramienta utilizada para la realización de toma de las medidas, se trata de un analizador de protocolos open source utilizado para realizar análisis y solucionar problemas en redes de comunicaciones.
- Iperf herramienta de análisis de uso común que puede crear TCP y UDP flujos de datos y medir el rendimiento de una red que está llevando, escrito en C + +. Fue desarrollado por el Equipo de Soporte de Aplicaciones distribuidas (DAST) en el Laboratorio Nacional de *Applied Research Network* (NLANR).

MÉTODOS

Los métodos utilizados en la realización del proyecto fueron los métodos empíricos, como los siguientes:

- Método experimental: complejo y eficaz, puede ser otro método científico independiente con su propia lógica, llamada lógica experimental.
- Método de observación científica: permite conocer la realidad mediante la percepción directa de los procesos, posee cualidades que le dan un carácter distintivo. Característico de las ciencias descriptivas.
- Método de medición: se desarrolla para obtener información numérica acerca de una propiedad o cualidad del objeto, proceso o fenómeno, es asignación de valores numéricos, magnitudes, entre otros, apoyándose de estadísticas.

Se describen las fases relacionadas con el método experimental, la planeación y la descripción del mismo. Por último se presentarán los resultados tabulados.

La metodología aplicada en la presente investigación es cuantitativa, porque es la que permite generar información a través de la recolección de datos sobre variables, y plantear conclusiones al comparar estadísticas.

Se describen las fases relacionadas con el diseño experimental, la planeación y descripción del experimento y Para concluir se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo del experimento.

6.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Una característica del diseño de experimentos es definir cuáles pruebas o tratamientos se van a realizar y cuantas repeticiones de cada uno se requieren, de manera que se logre la máxima información al mínimo costo posible, esto con el fin de obtener la **Matriz de diseño** que es el arreglo formado por los tratamientos que serán corridos, incluyendo las repeticiones.

Un diseño experimental es algo más que un conjunto de condiciones de prueba; es una secuencia de etapas o actividades que deben realizarse para cumplir con éxito los objetivos. Actualmente, existen diversos tipos de diseños experimentales en donde cada uno de ellos permite estudiar situaciones que ocurren en la vida práctica, ajustándose a las necesidades de investigador. Por tal razón, es muy importante saber cómo elegir el más adecuado para el problema que se quiere resolver (Gutiérrez, 2008).

El saber diseño de experimentos y otras técnicas estadísticas, en combinación con conocimientos del proceso, sitúan al responsable del mismo como un observador

perceptivo y proactivo que es capaz de proponer mejoras y de observar algo interesante (oportunidades de mejora) en el proceso y en los datos donde otra persona no ve nada (Gutiérrez, 2008).

Los cinco aspectos que más influyen en la selección de un diseño experimental, en el sentido de que cuando cambian por lo general llevan a cambiar de diseño, son (Gutiérrez, 2008):

1. El objetivo del experimento.
2. El número de factores a estudiar.
3. El número de niveles que se prueban en cada factor.
4. Los efectos que interesa investigar (relación factores-respuesta).
5. El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

Como la presente investigación se localiza dentro del contexto de las ciencias aplicadas, se utilizó el diseño experimental, empleando métodos estadísticos y el proceso inductivo-deductivo para obtener un modelo que permita evaluar el rendimiento de una red LAN sobre PLC para la transmisión de video bajo en estándar homeplug AV.

Cuando se desea realizar un experimento, se deben establecer claramente cada una de las siguientes etapas: (Gutiérrez, 2008):

- **Planeación:** Es una de las etapas críticas para el desarrollo del experimento, ya que si no se realiza correcta y adecuadamente, es factible generar posteriormente resultados errados y por esta razón no cumplir a satisfacción el objetivo principal de la investigación. Dentro de esta etapa se debe identificar claramente: el problema de investigación, determinar los factores que deben estudiarse acorde con la influencia que estos podrían tener sobre la variable objeto de estudio, elegir las variables de respuesta que serán medidas en cada punto del diseño

garantizando que se miden de manera confiable, seleccionar el diseño experimental adecuado a los factores que se tienen y al objetivo del experimento, planear y organizar el trabajo experimental y finalmente realizar el experimento.

- **Análisis:** En esta etapa hay que recordar que los resultados experimentales son observaciones muestrales, no poblacionales. Por lo tanto, hay que recurrir a métodos estadísticos inferenciales para ver si las diferencias o efectos muestrales (experimentales) son lo suficientemente grandes para que garanticen diferencias poblacionales (o a nivel proceso). La técnica estadística central en el análisis de los experimentos es el llamado análisis de varianza (**ANOVA / ANalysis Of VAriance**) y es ampliamente utilizada por su gran aproximación en la construcción de modelos a partir de muestreos (Montgomery, 2004).

- **Interpretación:** Tomando como base el análisis estadístico planteado en la etapa anterior, se debe analizar concienzudamente los resultados obtenidos. Para ello se debe realizar un comparativo entre las conjeturas (hipótesis iniciales) y los resultados del experimento, hasta determinar los nuevos aprendizajes resultantes del proceso, validar los supuestos y seleccionar el mejor tratamiento.

- **Conclusiones finales:** En esta etapa final se detallan los resultados obtenidos en el desarrollo del experimento, donde lo recomendable es establecer las pautas necesarias para acoger y generalizar el resultado del estudio realizado.

A continuación se describen cada una de las etapas que se realizaron para el desarrollo del proyecto, teniendo en cuenta las recomendaciones en el diseño de experimentos descritas anteriormente.

6.3 PLANEACIÓN

A continuación se presentan cada una de las etapas que se llevaron a cabo en el desarrollo del proyecto de investigación, acorde con las recomendaciones experimentales relacionado con la construcción del modelo de evaluación del rendimiento de la red Homeplug AV para la transmisión de video.

6.3.1 Variables y Factores de la investigación

Rendimiento: es uno de los puntos importantes a tener en cuenta en el análisis global en las redes LAN por el impacto que éste produce sobre el usuario final. El rendimiento puede ser definido de varias maneras razón por la cual permite incorporar otras formas de evaluación dependiendo del objetivo particular. El rendimiento se obtiene a partir de la evaluación de unos parámetros básicos como: Throughput, jitter, retardo y porcentaje de paquetes perdidos.

Throughput: Dar una definición exacta es complicado, pero en términos generales se define como la capacidad de un enlace de transportar información útil, representando la cantidad de información útil que puede transmitirse en una unidad de tiempo, Este parámetro puede verse alterado en la misma conexión de red dependiendo de varios factores donde los más representativos son: el protocolo usado para la transmisión y del tipo de tráfico (voz, video, datos, etc.). En la actualidad los algoritmos más usados y eficientes para maximizar el *throughput* en un sistema *Homeplug AV* y garantizar un BER (*Bit Error Rate* / Tasa de bits erróneos) mínimo es el uso de turbo-códigos y en *bit loading* (Guerrini & Veronesi, 2011).

Como el fundamento de la investigación es plantear un modelo, con el cual se podrá predecir el valor del *Throughput* para una estación, en una red con tecnología *Homeplug AV*, se tendrá como base la expresión matemática que por definición lo describe (Carcele X., 2006).

$$Thr = \frac{L_M - L_C}{[T_M + T_{ACC}]} \quad \text{Ecuación (30)}$$

Donde,

L_M Longitud total del mensaje.

L_C *Bits* de control del mensaje.

T_M Tiempo de transmisión del mensaje.

T_{ACC} : Tiempo de acceso al medio.

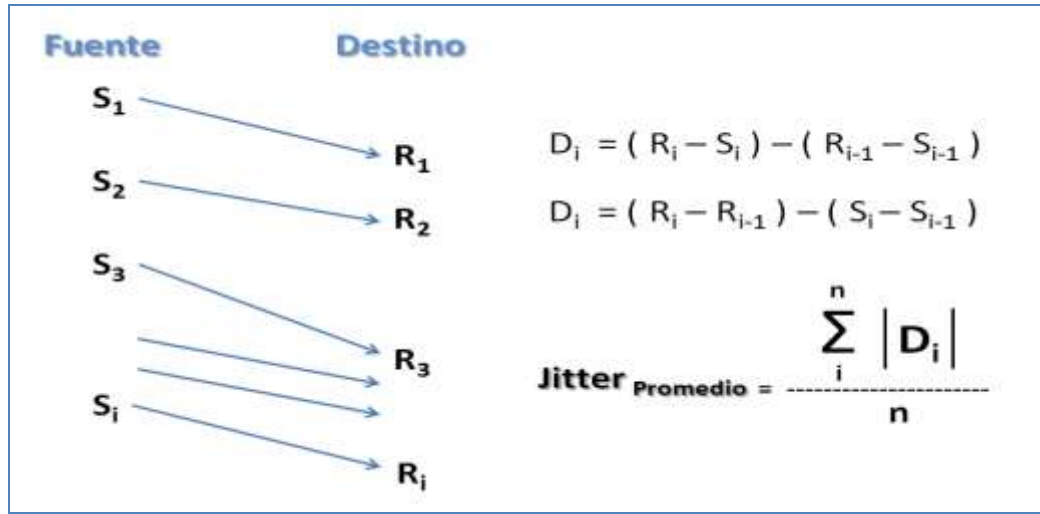
En general, los métodos empleados para hacer las mediciones se caracterizan por realizar muestreos de la conexión entre estaciones (*host*), enviando algún patrón de tráfico (video, paquetes, voz, etc.) con el fin de efectuar su evaluación. Es importante aclarar que estas mediciones o muestras se repiten varias veces, después se promedian para obtener a una aproximación más exacta.

Otra variable que se consideró en el experimento fue el jitter.

Jitter: Es la variación de los retardos en la llegada de los paquetes entre su origen y el destino, usualmente producida por congestión de tráfico en algún punto de la red o diferencia en el tiempo de tránsito de paquetes cuando estos viajan por diferentes rutas (Hrasnica, Haidine, Lehnert, 2004).

El valor para el Jitter es un valor promedio, que se obtenido de acuerdo con la fórmula planteada en la Figura 30.

Figura 30. Jitter Promedio



Fuente: Autores del Proyecto

Retardo: Se entiende que es el tiempo que tarda la señal en llegar al otro extremo del sistema de transmisión. Es calculado con el promedio de las diferencias entre los tiempos de envío y recepción de los paquetes. Para efectos de la toma de muestras se toma el valor de “Desviación estándar del retardo” (σ) es cuál es calculado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2} \quad \text{Ecuación (31)}$$

Donde,

- N** Número de paquetes considerados
- d_i** Retardo del paquete **i**
- \bar{d}** Retardo promedio de los paquetes

Pérdida de paquetes: La probabilidad de que se presente depende del tipo de red, ya que ello es lo que determina el número de rutas que se puedan establecer simultáneamente con la finalidad de reducir la cantidad de buffering o almacenamiento interno usado (Gebali, 2008).

6.3.2 Dispositivos y especificaciones. Para realizar el experimento de investigación, se utilizaron los siguientes componentes físicos (hardware): Pcs, Adaptadores *Ethernet-PLC* (módems PLC) y cables.

PCs: Los equipos utilizados son equipos de mesa marca HP (Hewlett-Packard) a 32 bits, disco duro de 250 gb SATA, memoria RAM de 2 GB, Procesador Pentium(R) *Dual-Core*, tarjeta de red Intel(R) 82566DM-2 *Gigabit Network Connection* y Sistema Operativo Windows 7.

Figura 31. PCs utilizados



Fuente: Autores del Proyecto

Módems PLC: Para la realización de las pruebas, se utilizaron Modems PLC certificados para operar con el estándar *Homeplug AV*. Los módems usados son marca TP-LINK Modelo PA-211. Un completo detalle de las especificaciones técnicas de los módems se presentan en el siguiente cuadro (TP-LINK Industries, n.d.).

Figura 32. Modem Homeplug AV marca TP-LINK modelo TL-PA211



Fuente: <http://www.directron.com/tlpa211kit.html>

Cuadro 14. Especificaciones técnicas del modem TP-LINK modelo TL-PA211

Característica	Detalle
Estándares y protocolos	HomePlug AV, IEEE802.3, IEEE802.3u
Interfaces	Puerto Ethernet a 10/100/1000 Mbps
Tipo de Enchufe	Unión Europea, Estados Unidos, Reino Unido, Australia
Botones	Botón de emparejamiento
Peso	103 Gramos
Indicador LED	PWR, PLC, ETH
Dimensiones (W X D X H)	3,6 x 2,2 x 1,2 pulgadas (93×56×30 mm)
Consumo de Potencia	< 3 W
Alcance	300 metros dentro de la casa/oficina
Tecnología de modulación	OFDM
Funciones Avanzadas	Función QoS (Calidad del Servicio), Selección inteligente de canal
Encriptación	Encriptación AES de 128 bits

Fuente: TP-LINK (2011). TL-PA211 AV200 Mini Powerline Adapter, User Guide. Recuperado de <http://www.tp-link.com/resources/software/201152711295110.pdf>

Cableado: El cableado eléctrico ubicado en el laboratorio de la Facultad de estudios técnicos y tecnológicos de la Universidad Autónoma de Bucaramanga que son las instalaciones donde se realizaron los experimentos, tiene instalado alambre AWG (*American Wire Gauge*) número 12 (Calibre de cable americano) con alimentación a 110 Voltios y operando en frecuencia de 60Hz que es la frecuencia utilizada en Colombia.

Con referencia a los cables UTP, se utilizaron patch cords certificados de acuerdo con la norma ANSI/TIA/EIA-568-A y operando en Categoría 5e.

Figura 33. Cable UTP



Fuente: Autores del Proyecto.

6.3.3 Softwares utilizados. En la actualidad existen diferentes herramientas software que permiten realizar mediciones sobre una red. La mayoría de herramientas operan mediante configuraciones cliente/servidor, enviando paquetes de un host a otro, generando situaciones de tráfico controladas y aleatorias, permitiendo variar el tipo de protocolo de transmisión, TCP o UDP, el

tamaño del paquete, y en algunas ocasiones la tasa de transferencia (Vesga, 2010).

Para la realización experimental de la investigación se utilizaron dos Software el primero como generador de trafico IP (especialmente video) llamado VLC y Wireshark para la captura de paquetes o trafico en este caso específico.

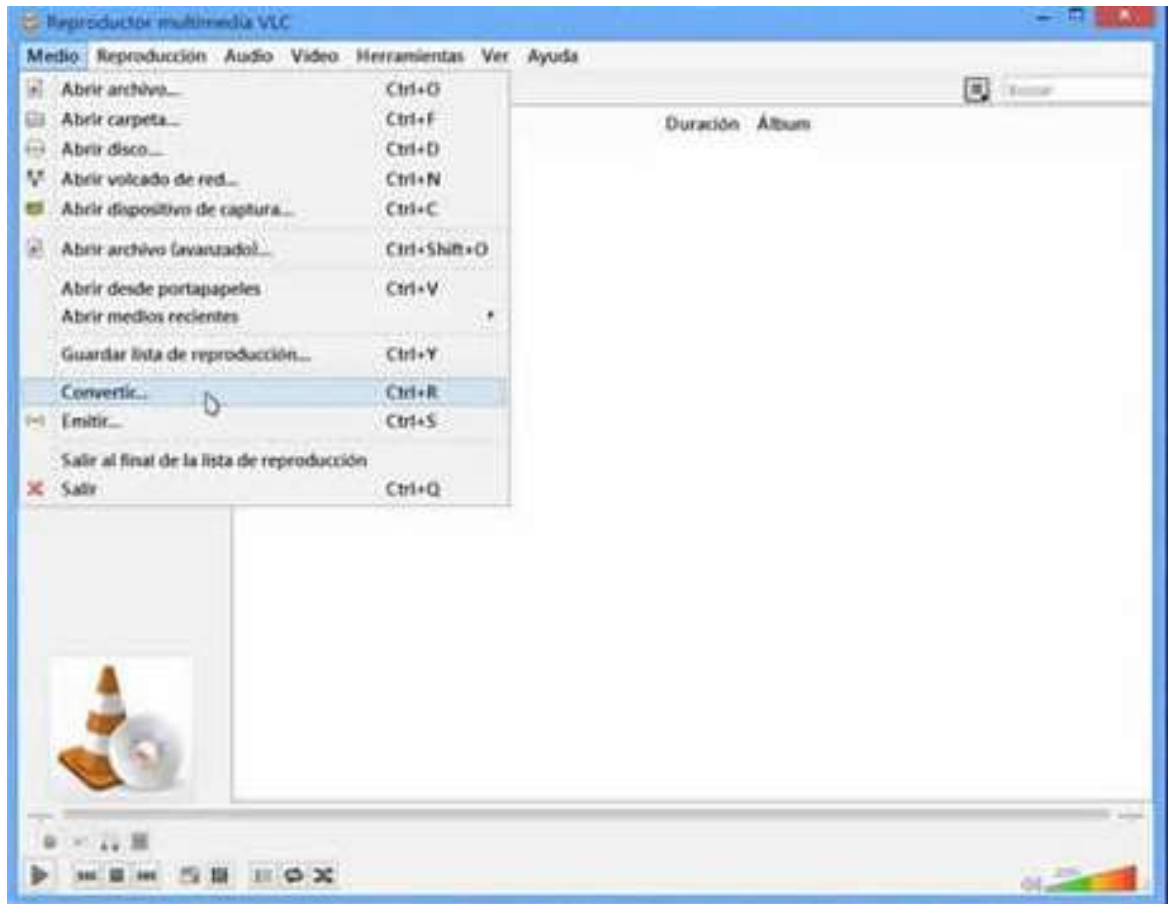
Generador de Tráfico: Por las bondades que tiene para la generación y reproducción de multimedia y por ser un software libre, de código abierto se utilizo el software **VLC**.

- **VLC** es un reproductor multimedia libre de código abierto multiplataforma y un «framework» que reproduce la mayoría de archivos multimedia, así como DVD, Audio CD, VCD y diversos protocolos de transmisión.

VLC (inicialmente cliente VideoLAN), puede ser usado como servidor para transmitir archivos y vídeo en vivo sobre la red en unicast o multicast; o usado como cliente para recibir, decodificar y visualizar flujos MPEG.

Puede ser utilizado como un servidor *streaming*: para, transmitir video o audio mediante Internet, así se puede ver lo que están transmitiendo desde cualquier lugar con solo acceder al equipo.

Figura 34. Interface de VLC



Fuente: Autores del Proyecto

Fue desarrollado por VideoLAN que es un proyecto integrado por un equipo de voluntarios, que creen en el poder del código abierto cuando se trata de multimedia.

Las principales características de los medios de entrada y formatos de entrada que permite transmitir VLC se muestran a continuación.

Figura 35. Medios y Formatos de Entrada de VLC

	Windows	Mac OS X	Linux	Mac OS	BSD
Input media					
UDP/RTP Unicast	✓	✓	✓	✓	✓
UDP/RTP Multicast	✓	✓	✓	✗	✓
HTTP / FTP	✓	✓	✓	✓	✓
MMS	✓	✓	✓	✓	✓
TCP/RTP Unicast	✓	✓	✓	✓	✓
DCCP/RTP Unicast	✗	✗	✓	✗	✗
File	✓	✓	✓	✓	✓
DVD Video ¹	✓	✓	✓	✓	✓
Video CD / VCD	✓	✓	✓	✗	✓
SVCD ²	⊕	⊕	⊕	✗	⊕
Audio CD (no DTS-CD)	✓	✓	✓	✗	✓
DVB (Satellite, Digital TV, Cable TV)	✓	⊕ EyeTV ³	✓	✓	✗
MPEG encoder ⁴	✓	✗	✓	✗	✗
Video acquisition	✓ Direct Show	✓ QTKit ⁵	✓ V4L, V4L2	✗	✗
Input formats					
MPEG (ES,PS,TS,PVA,MP3)	✓	✓	✓	✓	✓
AVI	✓	✓	✓	✓	✓
ASF / WMV / WMA	✓	✓	✓	✓	✓
MP4 / MOV / 3GP	✓	✓	✓	✓	✓
OGG / OGM / Annodex	✓	✓	✓	✓	✓
Matroska (MKV)	✓	✓	✓	✓	✓
Real	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
WAV (including DTS)	✓	✓	✓	✓	✓
Raw Audio: DTS, AAC, AC3/A52	✓	✓	✓	✓	✓
Raw DV	✓	✓	✓	✓	✓
FLAC	✓	✓	✓	✓	✓
FLV (Flash)	✓	✓	✓	⊕	✓
MXF	✓	✓	✓	⊕	✓
Nut	✓	✓	✓	⊕	✓
Standard MIDI / SMF	✓	✓	✓	✓	✓
Creative™ Voice	✓	✓	✓	✓	✓

DVD decryption is done through the libdvdcss library.
 VLC on GNU/Linux, Solaris, and Microsoft Windows has playback control support via libodc and libvinfo. On other platforms, SVCD support varies depending on the availability of these libraries. (Volunteers for adding support are always welcome.). Handling still frames (often used in menus) and switching between different video formats is problematic.
 On Mac OS X 10.4 or later, VLC is able to grab video and audio from EyeTV applications and therefore all EyeTV-compatible capture devices. The user needs to install a plugin to EyeTV.app in order to use this feature. Guidance is provided in the User Interface. Requires VLC 0.9.0 or later.
 VLC for GNU/Linux supports V4L2 compatible encoding cards as well as two kinds of MPEG-2 encoding cards: Hauppauge WinTV-PVR-250/350 and Visiontech Kfir.
 VLC can capture video from internal iSights on Mac OS X 10.5 or later (video only) since version 0.9.0. VLC 1.2 adds capturing from all devices supported by QTKit. It also enables audio capturing support on Mac OS X 10.6 and later.

✓ = Yes
 ⊕ = Partial
 ✗ = No
 ⊕ = Untested

Fuente VideoLAN Organization (s.f.). VLC playback Features. Recuperado de <https://www.videolan.org/vlc/features.html>

Las características que poseen son: ser simple, potente y rápido. Tiene multitud de códecs de audio y video, normalmente no necesita añadir ninguno más, además

soporta casi todos los formatos que hay hasta la fecha, utiliza varios protocolos streaming.

La siguiente figura muestra las características de los formatos de video que reproduce.

Figura 36. Formatos de reproducción de video de VLC

	Windows	Mac OS	Linux	BeOS	OS/2	Solaris
MPEG-1/2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DIVX (1/2/3)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MPEG-4 ASP, DivX 4/5/6, XviD, 3ivX D4	✓	✓	✓	✓	✓	✓
H.261	✓	✓	✓	?	✓	✓
H.263 / H.263i	✓	✓	✓	?	✓	✓
H.264 / MPEG-4 AVC	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cinepak	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Theora	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dirac / VC-2	✓	✓	✓	?	✓	✓
MJPEG (A/B)	✓	✓	✓	?	✓	✓
WMV 1/2	✓	✓	✓	?	✓	✓
WMV 3 / WMV-9 / VC-1	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sorenson 1/3 (Quicktime)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
DV (Digital Video)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
On2 VP3/VP5/VP6	✓	✓	✓	?	✓	✓
Indeo Video v3 (IV32)	✓	✓	✓	?	✓	✓
Indeo Video 4/5 (IV41, IV51)	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Real Video 1/2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Real Video 3/4	✓	✓	✓	?	✓	✓

Windows DMO codecs can be used by VLC on 32-bit x86 platforms and allow WMV-3/WMA-3 decoding. This feature is untested on Intel-based Macs.

✓ = Yes
 ⚪ = Partial
 ✗ = No
 ? = Untested

Fuente VideoLAN Organization (s.f.). VLC playback Features. Recuperado de <https://www.videolan.org/vlc/features.html>

Analizador de tráfico: Después de realizar un análisis de los software existentes para analizar el trafico en la red como lo son: *Windump*, *TCPDump*, *Dsniff* y *Wireshark* se decidió seleccionar Wireshark porque su parte grafica ayuda mucho para realizar el análisis.

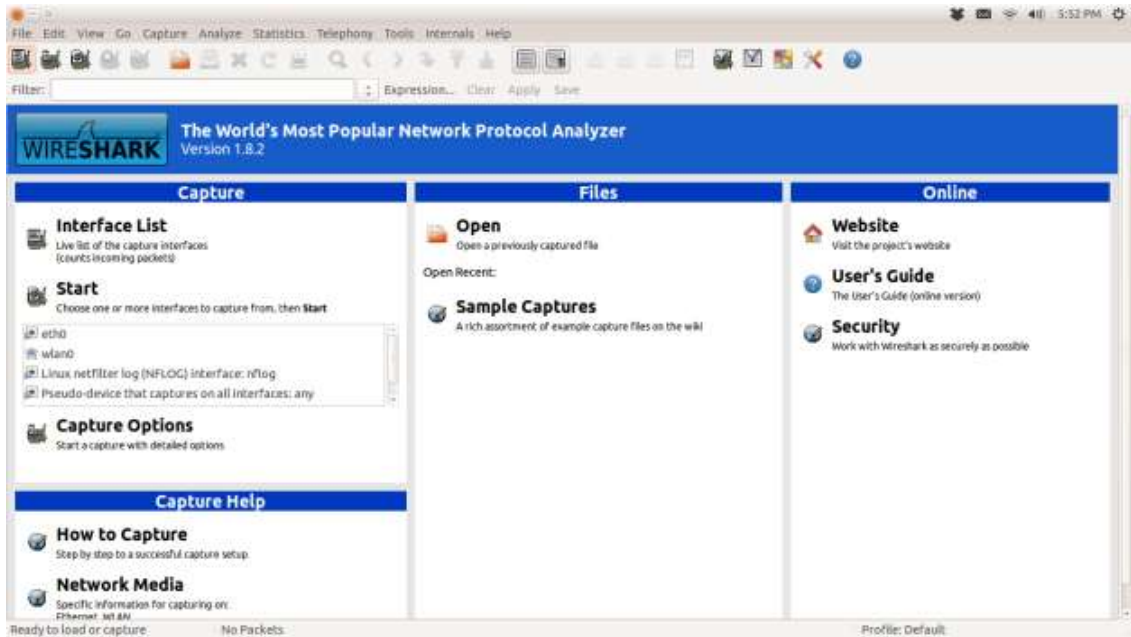
- **Wireshark:** Es considerado como el más importante analizador de redes en todo el mundo. Permite ver lo que está sucediendo en la red a nivel microscópico, este software prospera gracias a los aportes de la creación de redes de expertos en todo el mundo, es la continuación del proyecto que nació en 1998, antes conocido como Ethereal, es un software de análisis de protocolos que se basa en las librerías Pcap y que, se utiliza comúnmente como herramienta para realizar un análisis de redes y aplicaciones en red. *Wireshark* soporta una gran cantidad de protocolos (más de 450), como ICMP, HTTP, TCP, DNS, y un largo etcétera.

Funciona en varias plataformas, como Windows, OS X, Linux y UNIX. Es usado regularmente por desarrolladores, profesionales de la seguridad y en muchos casos para la educación. Es totalmente gratis y de código libre. Además, está publicado bajo licencia GNU GPL versión 2.

Una de las ventajas que tiene Wireshark es que en un momento dado, se puede dejar capturando datos en una red el tiempo que se quiera y, posteriormente almacenarlos, con el fin de poder realizar el análisis más adelante. Esto es algo totalmente necesario, porque son miles los paquetes que se capturan en una red y, si se trata de hacer el análisis en el mismo instante, la capacidad se vería desbordada.

Wireshark posee una interfaz gráfica la cual facilita mucho su uso, aunque también se dispone de una versión en modo texto llamada tshark.

Figura 37. Interfaz Gráfica de Wireshark



Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 38. Versión modo Texto (TSHARK)

```
TCP Conversations
Filter: <No Filter>
```

	←		→		Total		Rel. Start	Duration
	Frames	Bytes	Frames	Bytes	Frames	Bytes		
10.255.255.103:45700 <-> 69.59.197.21:80:80	45	61916	48	3804	85	65720	0.009924000	2.7379
10.255.255.103:45693 <-> 69.59.197.21:80:80	33	46872	26	2276	59	49148	1.243866000	0.6928
10.255.255.103:48995 <-> 173.194.44.19:80:80	24	30995	23	3032	47	34027	2.963363000	0.5399
10.255.255.103:56391 <-> 54.243.68.156:80:80	4	1722	6	732	10	2454	0.950431000	0.2009
10.255.255.103:34913 <-> 173.194.44.9:80:80	3	1326	6	2745	9	4071	0.798774000	2.0792
10.255.255.103:56394 <-> 54.243.68.156:80:80	3	1646	5	678	8	2324	2.130302000	0.8928
10.255.255.103:52743 <-> 95.172.94.55:80:80	3	457	4	782	7	1239	2.831454000	0.1487
10.255.255.103:52740 <-> 95.172.94.55:80:80	3	457	4	784	7	1241	2.064161000	0.1495
10.255.255.103:58027 <-> 69.59.197.30:80:80	2	651	5	1099	7	1750	0.888648000	0.4100
10.255.255.103:43033 <-> 69.59.197.29:80:80	2	269	5	840	7	1109	0.866351000	0.3909
10.255.255.103:52737 <-> 95.172.94.55:80:80	3	457	4	782	7	1239	0.808779000	0.1313
10.255.255.103:43029 <-> 69.59.197.29:80:80	2	134	2	140	4	274	0.000000000	0.3801
10.255.255.103:43039 <-> 69.59.197.29:80:80	1	74	2	140	3	214	2.923155000	0.2052
10.255.255.103:43036 <-> 69.59.197.29:80:80	1	74	2	140	3	214	2.126996000	0.1983

Fuente: Autores del Proyecto.

6.3.4 Consideraciones adicionales. El tipo de diseño experimental seleccionado en la investigación es el de tipo factorial mixto, cuyo objetivo consiste en estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas (*Throughput*, *Jitter*, porcentaje de paquetes perdidos, retardos, etc.). Es decir, lo que se quiere es estudiar la relación entre los factores y la respuesta, con el fin de conocer cómo es esta relación y generar un conocimiento que logre permitir tomar acciones y

decisiones que mejoren el desempeño del proceso (la transmisión de video sobre *Homeplug Av*). Para estudiar la manera en que influye cada factor sobre la variable de interés, es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos. Con el diseño factorial mixto se corren aleatoriamente en el proceso todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles seleccionados (Gutiérrez. 2.008).

Los métodos de diseño experimental recomiendan el uso de una técnica estadística para el análisis e interpretación de los datos. En el caso particular del diseño factorial mixto, la técnica sugerida es el análisis de varianza. En estadística, el análisis de la varianza (ANOVA, según terminología inglesa) es una colección de modelos estadísticos, en los cuales la varianza está particionada en ciertos componentes debidos a diferentes variables explicativas (Gutiérrez, 2008).

Al finalizar el experimento se busca identificar si uno o más factores afectaron a la variable respuesta, y con ello establecer una relación de causalidad, sentando las bases para el modelo de predicción que permita evaluar el rendimiento de una red LAN sobre PLC para la trasmisión de video bajo en estándar homeplug AV.

6.3.5 Tamaño de la muestra. Teniendo en cuenta que el caso experiemntal a desarrollar comprende el análisis del rendimiento en una red LAN PLC con tráfico de Video, a partir de dos (2) factores representativos como son Codec utilizado y número de estaciones en la red; se debe definir el tamaño de muestra requerida por cada prueba a realizar (Gutiérrez, 2008).

Como el estudio es de carácter experimental, las variables que intervienen en la determinación del tamaño de la muestra son las que se citan a continuación (Morales, 2012).

- **Nivel de confianza:** Para el estudio se asume que es posible aceptar un 5% de probabilidades de error al realizar la hipótesis nula (H_0) y por lo tanto el nivel de confianza asumido es $\alpha=0,05$. Con ello se trata de minimizar el denominado error de tipo I (se acepta poca probabilidad de equivocación cuando se afirma una diferencia o una relación).
- **Potencia de la prueba:** La variable hace referencia a la probabilidad de no cometer el error de tipo II (no rechazar la hipótesis nula cuando podría haberse rechazado). La probabilidad de cometer éste tipo de error se denomina β y la potencia es por lo tanto $1- \beta$. Para el desarrollo experimental se considera razonable establecer una potencia de 0,7, es decir tener un 70% de probabilidades de detectar una diferencia o relación.
- **Magnitud de la diferencia:** Esta variable establece el tamaño del efecto con respecto a la relación que se desea detectar y se asume para diferencias pequeñas, moderadas o grandes. Considerando que para el experimento se pretenden encontrar diferencias significativas la variable (magnitud de la diferencia) se asume para diferencias grandes.

Teniendo en cuenta que el factor Codec comprende 4 niveles (Codecs mpeg, flv, mp4 y avi) y el factor Número de estaciones comprende 3 niveles (1, 2, y 3 PCs) se aplicará un tamaño de muestra para una relación 4 x 3 de acuerdo con las variables descritas y según la siguiente tabla.

Cuadro 15. Tamaño de muestra para diseño factorial con dos (2) factores

Niveles Factor1 x Niveles Factor2	Potencia (1-β)	Magnitud de la diferencia		
		Pequeña	Moderada	Grande
2 x 2	0,70	152	25	11
	0,80	193	32	13
2 x 3	0,70	127	21	9
	0,80	158	26	11
2 x 4	0,70	109	18	8
	0,80	134	22	9
3 x 3	0,70	85	14	6
	0,80	106	18	7
3 x 4	0,70	73	12	5
	0,80	90	15	6
4 x 4	0,70	55	9	4
	0,80	67	12	5

Fuente: (Morales Vallejo, 2012 p.20)

De acuerdo con el cuadro 15, el valor resultante para el tamaño de muestra es de cinco (5).

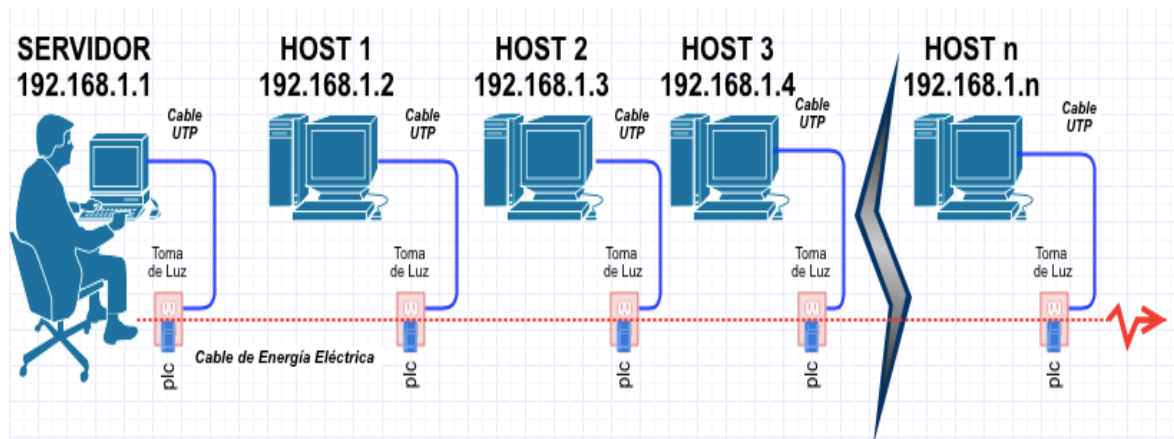
6.4 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

En este ítem se hace referencia al experimento junto con las diferentes opciones de prueba y/o tomas de datos. En el desarrollo del experimento se realizó la configuración de una red LAN operando sobre el cableado eléctrico, para que esto suceda se hace uso de adaptadores Homeplug AV marca TP-LINK, modelo TL-PA211.

Especificaciones técnicas del modem TP-LINK modelo TL-PA211) en cuyos extremos se conectan los equipos de usuario final (PCs o Hosts) con cables ethernet.

Los equipos utilizados (*Hosts*) se configuran con direcciones de red tipo IP clase C, para este caso las direcciones seleccionadas fueron 192.168.1.1, 192.168.1.2, 192.168.1.3 y 192.168.1.4.

Figura 39 . Configuración de Red Homeplug AV usada en el experimento

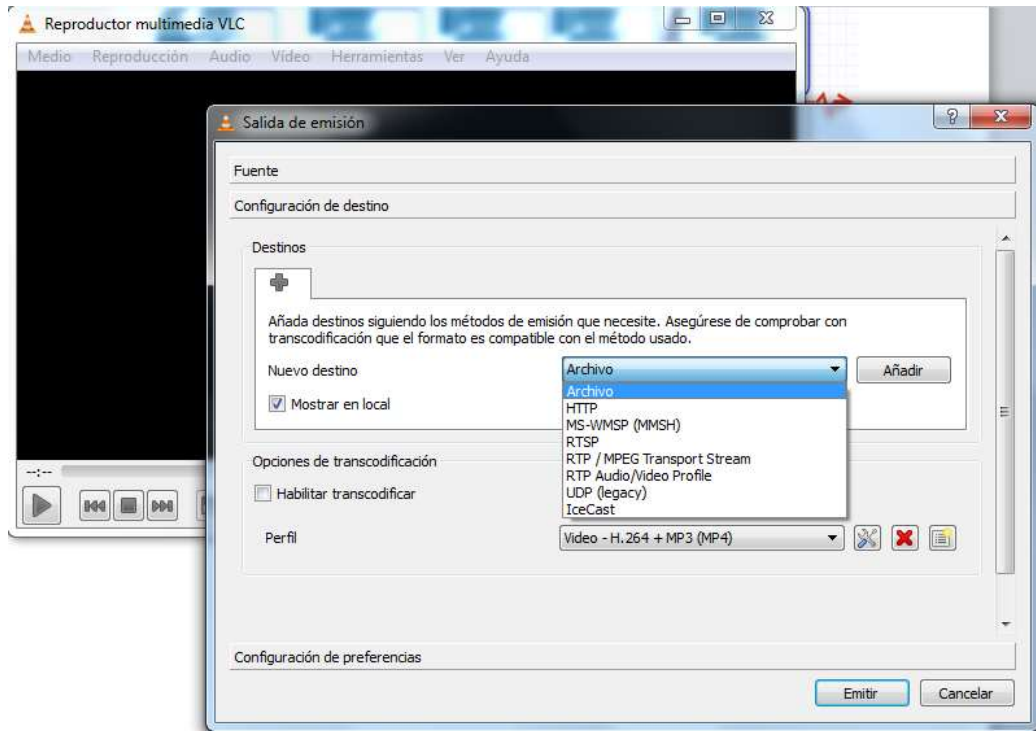


Fuente: Autores del Proyecto

De los equipos o *hots* utilizados para la red, uno se configura como servidor y los restantes como clientes o *hots*. El servidor tiene la función de generar tráfico tipo Video (paquetes TCP) en forma *streaming* por medio del software VLC y los Hots son los que realizan la recepción de los paquetes de video por medio del software VLC, el servidor a su vez realiza el análisis de los paquetes que circulan por la red Homeplug AV por medio del software *Wireshark*.

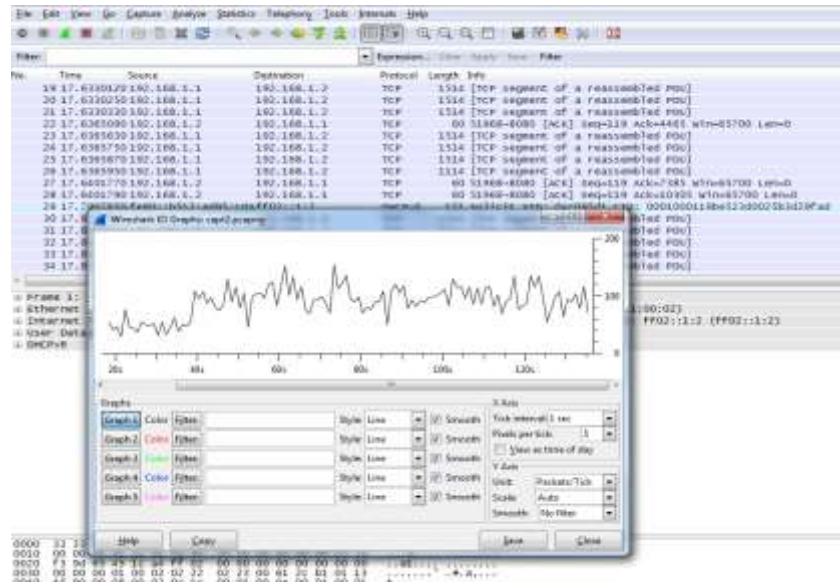
Como se dijo anteriormente en el equipo servidor se habilitan los softwares VLC para generar el tráfico de video en los diferentes formatos y *Wireshark* que permite realizar la captura de los paquetes para poder realizar el respectivo análisis.

Figura 40. Servidor generando video con VLC



Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 41. Servidor capturando tráfico con *Wireshark*



Fuente: Autores del Proyecto.

Los parámetros específicos para el desarrollo de las pruebas y la consecuente captura de datos se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 16. Parámetros para el desarrollo de las pruebas

Característica	Detalle
Adaptadores Utilizados	<i>Homeplug AV</i> marca TP-LINK modelo TL-PA211
Equipos (servidor y clientes)	Equipos de mesa con tarjeta de red Intel(R) 82566DM-2 <i>Gigabit Network Connection</i> .
Cables <i>Ethernet</i>	Tipo UTP (patch cords) certificados de acuerdo con la norma ANSI/TIA/EIA-568-A y operando en Categoría 5e
Tiempo de duración x muestra	240 segundos
Cantidad de paquetes x muestra	4601.97
Direccionamiento usado en los host	IP clase C
Tipo de paquetes generados	Paquetes Video para codecs MPEG, MP4, FLV y AVI.
Tamaño de paquete	Establecido por el Codec utilizado.
Cantidad de Host x muestra	1, 2 y 3 estaciones

Fuente: Autores del Proyecto.

Con el fin de tomar los codecs más utilizados en plataformas de Video para redes LAN, en las muestras tomadas se tuvieron en cuenta los codecs MPEG, MP4, FLV y AVI respectivamente. En la siguiente tabla resumen se evidencia la cantidad de muestras tomadas para cada códec y número de estaciones (host).

Cuadro 17. Muestras tomadas por Codec Video y cantidad de host

Hosts	MPEG	MP4	FLV	AVI
1	5 muestras	5 muestras	5 muestras	5 muestras
2	5 muestras	5 muestras	5 muestras	5 muestras
3	5 muestras	5 muestras	5 muestras	5 muestras

Fuente: Autores del proyecto

Como se analizaron los cuatro (4) parámetros del rendimiento (Throughput, Jitter, retardos y porcentaje de paquetes perdidos), por cada uno de ellos se realizaron muestras de la siguiente manera:

Teniendo en cuenta la cantidad de parámetros analizados se obtiene un total de **60 muestras**.

En este orden de ideas, para el desarrollo de la presente tesis de investigación fue seleccionado un diseño factorial mixto de **60** combinaciones de tratamientos o puntos experimentales. Como se evidencia, los niveles de los cuatro factores seleccionados son **cuantitativos**. Dadas las condiciones experimentales descritas, se define que las cinco (5) replicaciones por codec del experimento y las **240 mediciones** dan un margen de aceptación alto para medir los efectos principales y las interacciones que puedan darse.

Es necesario resaltar que, debido a que se utilizan codecs de Video (mpeg, mp4, flv y avi) y que ellos establecen por defecto un tamaño de paquete estándar y la opción de temporización entre paquetes, no se consideran las variables tamaño de paquete y tiempo entre paquetes.

6.5 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

Durante el desarrollo del experimento se obtuvo un buen volumen de datos, que optimizar su manejo se organizó en tablas teniendo en cuenta cada parámetro del rendimiento, las Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5:

Tabla 2. Matriz de diseño para Throughput (en Kbit/s)

No. de Host	CODEC DE VIDEO UTILIZADO								TOTAL
	MPEG		MP4		FLV		AVI		Y _{i...}
1 Host	71.428757	43	126.811594	43	0.178571	0	32.894736	18	1056,058477
	79.710144		87.412587		0.116607	'	38.602941		
	78.358208	9,	32.258064	2,	0.089285	4	34.647435	3,	
	132.867132	77	87.412587	10	0.087412	9	35.256410	68	
	77.413793	80	98.214285	91	0.018518	0	42.279411	09	
2 Host	174.825174	82	95.419847	68	13.297872	2	83.892617	58	2118,754070
	151.408450		88.652482		8.0935251	9	114.583333		
	173.611111	5,	171.232876	0,	3.030303	'	89.98057	2,	
	154.320987	39	154.320987	0,	2.636718	8	204.918032	66	
	171.232876	85	171.232876	68	2.777777	3	89.285714	02	
3 Host	98.214285	69	126.119402	10	6.551724	3	91.666666	11	2954,810787
	126.748251		135.869565		6.724137	8	228.658536		
	172.413793	4,	232.142857	23	6.002432	'	197.368421	98	
	170.454545	52	287.542312	,4	5.208333	1	160.361842	,7	
	126.689655	05	241.762177	36	13.636363	2	520.675491	30	
Y _j	1959,6971044	2136,404498	68,4495771	1965,072155	6129,6195284				

Fuente: Autores del Proyecto.

Tabla 3. Matriz de diseño para la Desviación Estandar de retardo en segundos

No. de Host	CODEC DE VIDEO UTILIZADO								TOTAL
	MPEG		MP4		FLV		AVI		Y _{i..}
1 Host	12.002011	24	10.102341	25	0,600021	15	0.100123	24	90,837775
	0.700001	.9	11.301231	.8	4.800231	.8	11.900123	.2	
	0.502016	05	1.421023	48	10.008934	73	0.100122	10	
	11.501231	39	0.011231	13	0.502341	83	12.100152	41	
	0.200134	3	3.012311	7	0.412341	4	0.100001	1	
2 Host	11.400231	52	13,102415	65	4,666666	38	6,000011	83	238,7838
	11.000127	.3	12.999312	.0	8.510072	.3	6.102111	.0	
	8.112009	23	12.996781	90	8.524117	67	32.800121	02	
	11.100001	48	12.999991	81	8.666159	24	6.100002	25	
	10.711118	6	12.992314	3	8.000231	5	32.000011	6	
3 Host	7.745032	36	12.723512	65	7.800239	38	6.078965	36	177,247411
	7.755176	.8	12.845551	.2	7.511124	.6	12.222155	.5	
	6.986291	75	13.400897	27	8.000022	33	6.154892	10	
	7.434418	30	12.802197	77	7.322121	63	5.800376	68	
	6.954389	6	13.455621	8	8.000132	8	6.254301	9	
Y _{j.}	114,104185		156,166728		92,874717		143,723356		Y... 506,868986

Fuente: Autores del Proyecto.

Tabla 4. Matriz de diseño para la El Jitter Promedio

No. de Host	CODEC DE VIDEO UTILIZADO								TOTAL
	MPEG		MP4		FLV		AVI		Y...
1 Host	5.597001	26 0, 45 92 77	4.500287	16 2, 85 76 66	51.296543	42 0, 89 07 88	16.363001	2	1046,986546
	145.755023		12.500741		0.015548		9.843781	0	
	0.197027		10.587051		5.325610		162.494212	2	
	77.055897		10.082579		67.763981		4.001267	7	
	32.031654		125.187008		296.489106		10.076554	8 8 1 5	
2 Host	74.469001	30 5, 29 92 32	8.498991	48 6 18 88 8	33.898111	16 0, 71 23 23	206.316111	1	1783,813886
	69.380222		9.101222		92.405001		212.667331	2	
	79.832002		10.609233		23.312448		310.431001	6	
	81.138005		9.800111		10.356212		229.337009	9	
	0.480002		10.609331		0.740551		310.431991	1 8 3 4 4 3	
3 Host	86.708299	35 5, 71 04 45	22.694333	51 9 00 59 4	108.934276	48 1, 88 71 43	219.075001	9	1801,998258
	86.708992		6.605808		24.211885		22.790221	1	
	69.234165		8.695402		117.925274		226.758338	2	
	43.822438		5.210008		112.890199		217.118991	5	
	69.238551		8.695043		117.925509		226.758209	0 7 6	
Y _j	921,468954	263,37714	1063,490254	2384,463018	4632,799366				

Fuente: Autores del Proyecto.

Tabla 5. Matriz de diseño para la Pérdida de Paquetes en unidades

No. de Host	CODEC DE VIDEO UTILIZADO								TOTAL
	MPEG		MP4		FLV		AVI		Y _{i..}
1 Host	0.000607	0.	0	0.	0	0.	0	0	0.001127
	0.000086	00	0.000217	00	0	0.	0		
	0	06	0	02	0	02	0		
	0	93	0	17	0	17	0		
	0		0		0.000217		0		
2 Host	0.000434	0.	0		0		0	0	0.000434
	0	00	0		0		0		
	0	04	0	0	0	0	0		
	0	3	0		0		0		
	0	4	0		0		0		
3 Host	0		0		0		0	0	0.000217
	0.000217	0.	0		0		0		
	0	00	0	0	0	0	0		
	0	02	0		0		0		
	0	17	0		0		0		
Y _{j.}	0,001344		0.000217		0.000217		0		Y _{... 0,001778}

Fuente: Autores del Proyecto.

Para concluir con la metodología, y basandonos en los resultados de la matriz del parámetro Pérdida de paquetes, en la mayoría de las mediciones realizadas se obtuvo un valor muy cercano a cero (0), por esta razón se tomara como valor 0. Estos valores en 0 se deben a la versatilidad y funcionalidad de la tecnología *Homeplug AV* para adaptarse a las condiciones de línea de potencia imperantes en el experimento y a la madurez de la tecnología para el desempeño en redes LAN PLC de tipo residencial y empresarial.

7. RESULTADOS

Tomando como base la información obtenida en el capítulo anterior, se utilizara una técnica estadística que permita describir y/o modelar el comportamiento de los datos. Para ello se plantea el análisis de varianza (ANOVA) es la técnica central en el análisis de datos experimentales. La idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento (Gutiérrez, 2008).

7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se evidencia en la información recopilada para el presente proyecto de investigación muchas veces se realiza el estudio de los efectos de dos o más factores sobre una variable de estudio y por tal motivo los diseños factoriales son los más eficientes para estos tipos de experimentos. En un diseño factorial, como el caso actual, para cada ensayo del experimento, se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores (Montgomery, 2004).

En el caso actual de la investigación, se determina que existen dos factores a analizar (**códec de video usado y número de estaciones**) para cada una de las variables de estudio (*throughput*, *jitter*, retardo) que hacen parte fundamental del rendimiento y desempeño de la red LAN *Homeplug AV*. Por lo tanto, el factor A (*Codec*) tiene 4 tratamientos, el factor B (Nro. de estaciones) tiene 3 tratamientos y cada réplica contiene todas las combinaciones de las pruebas.

Tabla 6. Factores y Tratamientos de prueba

Factor A: Codec Usado		Factor B: Número de Estaciones	
Tratamiento 1	MPEG (5 muestras x paquete)	Tratamiento 1	1 Host
Tratamiento 2	MP4 (5 muestras x paquete)	Tratamiento 2	2 Host
Tratamiento 3	FLV (5 muestras x paquete)	Tratamiento 3	3 Host
Tratamiento 4	AVI (5 muestras x paquete)		

Fuente: Autores del Proyecto.

El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producido por un cambio en el nivel del factor, y con frecuencia se le denomina “efecto principal” por qué se refiere a los factores de interés primario en el experimento (Gutiérrez H, 2008).

7.2 MODELO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE VARIANZA PARA THROUGHPUT

“Un diseño factorial de dos (2) factores posee una respuesta (Y) que puede describirse mediante el modelo de efectos dado por la siguiente fórmula” (Martinez & Martinez, 1997, p.191):

$$Y_{ijl} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \varepsilon_{ijl} \quad \text{Ecuación (32)}$$

$$i = 1,2,\dots,a; \quad j = 1,2,\dots,b; \quad l = 1,2,\dots,n$$

Donde,

a = Códec Utilizado.

b = Número de estaciones en la red Homeplug AV.

n = número de replicas por experimento.

Y_{ijl} = Throughput para un codec (i) con un número de estaciones en la red Homeplug AV (b), para la replicación (l).

μ =Media general del *Throughput* independiente de cualquiera de los factores considerados en el experimento.

A_i =Efecto del Codec usado (*i*).

B_j =Efecto del número de estaciones (*j*).

$(AB)_{ij}$ =Efecto de la interacción entre los factores Códex y número de estaciones.

ε_{ijkl} =Error aleatorio.

El estudio factorial para dos (2) factores (A,B) permite analizar los efectos A,B y AB; donde el nivel de detalle con el que pueden estudiarse depende del número de niveles usados para cada factor. Para el experimento realizado, se tienen tres (3) efectos de interés con los cuales se plantean tres (3) hipótesis nulas (H_0) y cada una emparejada con una hipótesis alternativa (H_A) (Gutiérrez, 2008).

Las hipótesis de interés para los dos (2) factores y sus interacciones son:

$$H_0:\text{Efecto } A = 0, \quad H_A:\text{Efecto } A \neq 0 \quad \text{Ecuación (33)}$$

$$H_0:\text{Efecto } B = 0, \quad H_A:\text{Efecto } B \neq 0 \quad \text{Ecuación (34)}$$

$$H_0:\text{Efecto } AB = 0, \quad H_A:\text{Efecto } AB \neq 0 \quad \text{Ecuación (35)}$$

Para casos en los que todos los factores del experimento son fijos, es posible formular y probar fácilmente hipótesis acerca de los efectos principales y sus interacciones.

Para el caso de modelos de efectos fijos, los test para probar las hipótesis sobre cada efecto principal y sus interacciones se debe construir dividiendo el cuadrado

medio (CM) correspondiente del efecto o la interacción, por el cuadrado medio del error (CM_E).

“Los grados de libertad para cada efecto principal son los niveles del factor menos uno y el número de grados de libertad para una interacción es el producto del número de grados de libertad asociados con los componentes individuales de esta” (Moreno, p. 151, 2002).

El procedimiento es el que se refleja a continuación:

Variable dependiente: **Throughput**

Factores: (A): Número de host en la red.
(B): Codec usado.

Número de muestras experimentales: 60

A continuación se presenta el análisis de varianza para el throughput a partir de los datos tomados de la Cuadro 18.

La expresión matemática para el cálculo del Factor de Corrección (FC) es la siguiente:

$$FC = \frac{Y^2_{\dots}}{abn} \quad \text{Ecuación (36)}$$

Teniendo en cuenta los datos del cuadro 18 el valor FC es:

$$FC = \frac{Y^2_{\dots}}{abn} = \frac{836,9413^2}{3 * 4 * 5} = 11674,5123 \quad \text{Ecuación (37)}$$

$$FC = 11674,5123$$

Para el cálculo de las sumas de cuadrados (SC) se usarán las siguientes fórmulas matemáticas, basándonos en el método ANOVA:

$$SC_{TOT} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^n Y_{ijl}^2 - FC = 28117,1837 - 11674,5123 = \mathbf{16442,6713} \quad \text{Ecuación (38)}$$

$$SC_{TOT} = \mathbf{16442,6713}$$

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i...}^2}{bn} - FC \quad \text{Ecuación (39)}$$

$$SC_A = \frac{(106,04719)^2 + (238,7238)^2 + (177,247411)^2}{20} - 11674,5123 = \mathbf{2457,88636}$$

$$SC_A = \mathbf{2457,88636}$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j}^2}{an} - FC \quad \text{Ecuación (40)}$$

$$SC_B = \frac{(195,9697)^2 + (213,6404)^2 + (67,9668)^2 + (359,3643)^2}{15} - 11674,5123 = \mathbf{2846,0604}$$

$$SC_B = \mathbf{2846,0604}$$

Para calcular las sumas de cuadrados (SC) de las interacciones de dos (2) factores, se calculan las SC de las celdas correspondientes y se les restan las SC de los dos (2) efectos principales. Para facilitar los cálculos se recomienda ajustar los cuadros de dos (2) factores para calcular las SC de las celdas correspondientes.

Las expresiones matemáticas para calcular las interacciones de dos factores son las siguientes:

A: Codec Utilizado

B: Número de estaciones en la red

Tabla 7. Throughput - Interacción de Factores A-B

No. de Host	CODEC DE VIDEO UTILIZADO			
	MPEG	MP4	FLV	AVI
1 Host	43,97781	43,21090	0,490392	18,36809
2 Host	82,53985	68,08590	29,83619	138,6231
3 Host	69,45205	102,3436	37,64022	202,3730

Fuente: Autores del Proyecto.

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^b \frac{Y_{i.k}^2}{n} - FC - SC_A - SC_B \quad \text{Ecuación (41)}$$

Tomando como base los datos del cuadro 23 se tiene:

$$SC_{AB} = \frac{93363,3525}{5} - 11674,5123 - 2457,88636 - 2846,06046 = \mathbf{1694,21136} \quad \text{Ecuación (42)}$$

$$SC_{AB} = 1694,21137$$

La suma de cuadrados para el error (SC_E) se determina mediante la siguiente expresión:

$$SC_E = SC_{TOT} - SC_A - SC_B - SC_{AB} \quad \text{Ecuación (43)}$$

$$SC_E = 16442,6713 - 2457,88636 - 2846,06046 - 1694,21137 = 9444,5133$$

$$SC_E = 9444,5133$$

En Tabla 8 se presenta el resultado del análisis de varianza correspondiente al *throughput*:

Tabla 8. ANOVA completo para Throughput

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SC)	Gr. Lib	Cuadrado Medio (CM)	Cociente-F (Fo)	p-Valor
A: Nro. de estaciones	2457,8863	2	1228,9431	6,2458	<0,0001
B: Códec	2846,0604	3	948,6868	4,8215	<0,0001
Interacción AxB	1694,2113	6	282,3685	1,4350	<0,0001
Error	9444,5133	48	196,7606		
TOTAL	16442,6713	59			

Fuente: Autores del Proyecto.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos en la Tabla 8, “el efecto cuyo *p – Valor* sea menor al valor especificado para α , se establece como estadísticamente

significativo, lo que equivale a decir que se encuentra activo” (Moreno, 2002, p.155). Por lo tanto, se tomarán como estadísticamente significativos los valores cuyo $p - Valor < 0,05$.

La tabla ANOVA permite descomponer la variabilidad del *Throughput* en las contribuciones debidas a varios factores. Ya que se eligió la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se hizo la medición de cada factor teniendo en cuenta la eliminación del resto de los factores. Los $p - Valor$ determinan la importancia estadística de cada uno de los factores. Considerando que en el análisis de varianza existen tres (3) efectos con $p - Valor$ inferiores a 0,05 (A, B y AB), se destaca que estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo del *Throughput* en un 95 % de confianza para los cuales la hipótesis H_0 se rechaza.

7.3 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA EXPERIMENTACIÓN

La validez de los resultados obtenidos a partir de un análisis de varianza queda sujeto a que los supuestos del modelo Anova se cumplan. Estos supuestos son: normalidad, varianza constante (igual varianza de los tratamientos) e independencia. Lo que quiere decir que la respuesta (Y) debe tener una distribución normal, con similar varianza en cada experimento y las mediciones deben ser independientes. Estos supuestos sobre (Y) se traducen en supuestos sobre el término error (ε) en los diferentes modelos. (Gutiérrez, 2008)

Por lo general se emplean los gráficos de residuos para verificar los supuestos del modelo, ya que si los supuestos se cumplen los residuos se podrán ver como una muestra aleatoria de distribución normal con media cero y varianza constante (0). Los supuestos del modelo ANOVA (análisis de varianza) deben ser verificados y validados antes de dar por ciertas las conclusiones de la etapa de interpretación

en donde se supone que los residuos se distribuyen de manera normal, independientes y con varianza constante.

Es fundamental la verificación ya que de comprobarse la violación de alguno de los supuestos, pueden producirse impactos errados sobre las conclusiones establecidas. A continuación se realiza el análisis para cada uno de los tres supuestos:

7.3.1 Supuesto de Varianza Constante. Una forma de verificar el supuesto de varianza constante (o que los tratamientos tienen la misma varianza) es graficando los valores estimados contra los residuos (\hat{Y}_{ij} vs ϵ_{ij}). Generalmente, \hat{Y}_{ij} va en el eje X (horizontal) y los residuos en el eje vertical. Si los puntos de la gráfica de residuos contra los estimados se distribuyen aleatoriamente en una banda horizontal, sin ningún patrón claro y contundente, entonces es señal de que cumple con el supuesto de que los tratamientos tienen igual varianza. Por el contrario, si se distribuyen con algún patrón claro y contundente, como por ejemplo una corneta o un embudo, entonces es señal de que no se está cumpliendo el supuesto de varianza constante. En particular, la parte estrecha del embudo indica que en esos niveles estimados para la variable respuesta, se espera una menor variabilidad, por lo que se debe analizar si estos valores ayudan a maximizar o a minimizar el resultado deseado. (Moreno, 2002).

Figura 42. Valores residuales vs. Valores estimados para Throughput

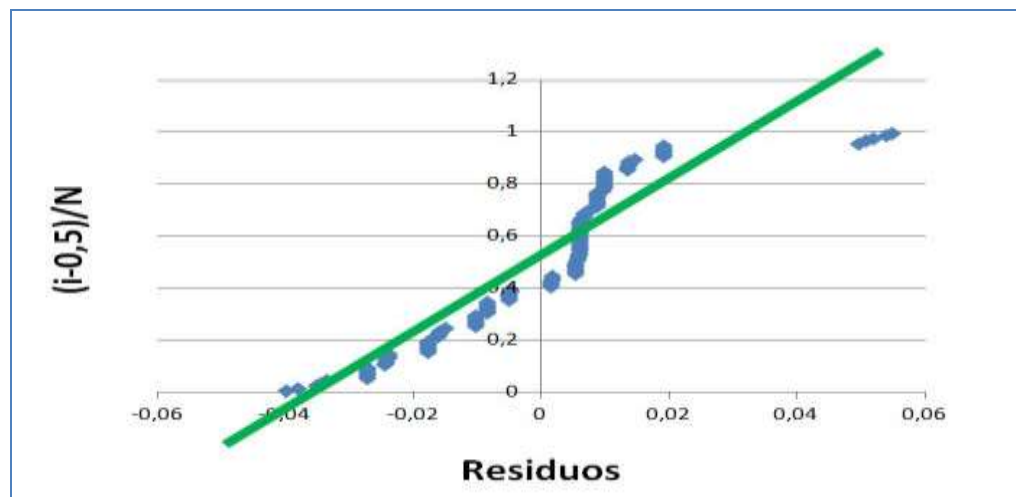


Fuente: Autores del Proyecto.

En la Figura 42, se aprecia que se cumple el supuesto de varianza constante ya que los datos se distribuyen aleatoriamente en la banda horizontal sin ningún patrón claro.

7.3.2 Supuesto de Normalidad. Un procedimiento usualmente utilizado para verificar el supuesto de normalidad de los residuos, se basa en ubicar los residuos en una gráfica de probabilidad normal. Esta gráfica de tipo X-Y tiene las escalas, de tal manera que si los residuos siguen una distribución normal, al graficarlos tienden a estar alineados en una línea recta; si esto no ocurre, se concluye que el supuesto de normalidad no es correcto.

Figura 43. Valores residuales de Throughput en gráfica de probabilidad



Fuente: Autores del Proyecto.

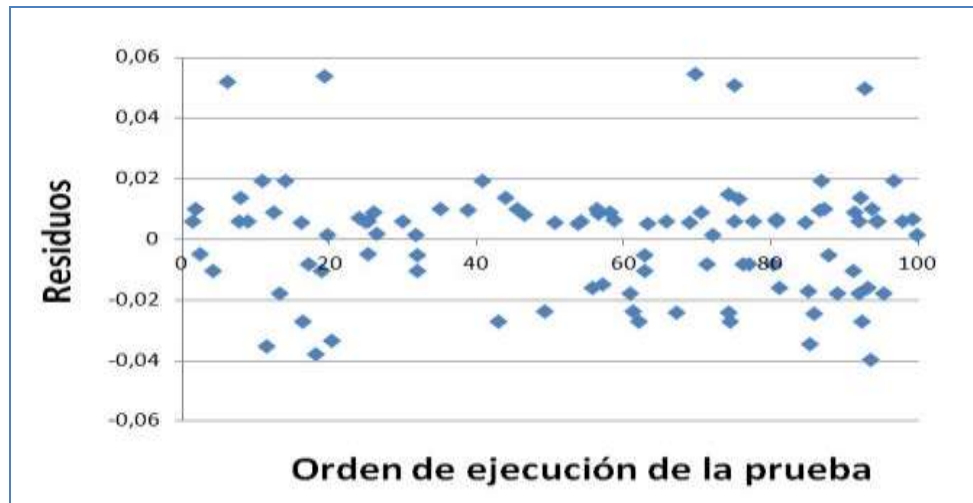
En la Figura 43, correspondiente a la gráfica de probabilidad normal, se aprecia el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos, ya que estos se encuentran ajustados sobre una recta.

7.3.3 Supuesto de Independencia. Para comprobar el supuesto de independencia se grafica el orden en que se tomó un dato contra el residuo correspondiente. De esta manera, al graficar en el eje horizontal (orden de

ejecución de la prueba) y en el eje vertical (residuos) se puede detectar una tendencia hacia un patrón no aleatorio claramente definido. Si esto ocurre, es evidencia de que existe una correlación entre los errores y el supuesto de independencia no se cumple.

Si el comportamiento de los puntos es aleatorio dentro de la franja horizontal se considera que el supuesto de independencia se cumple. La violación de éste supuesto ocurre por lo general debido a deficiencias en la planeación y ejecución del experimento, ya que puede ser que no se aplicó en forma correcta el principio de aleatorización de las pruebas; o, en la medida en que se realizaron las pruebas, se presentaron otros factores que alteraron la respuesta y que no fueron tenidos en cuenta durante el experimento.

Figura 44. Valores residuales de *Throughput* vs. Ord. de ejecución de la prueba



Fuente: Autores del Proyecto.

En la Figura 44, en donde se presenta la relación entre los valores residuales y el orden en el que fueron ejecutadas las pruebas experimentalmente, se aprecia el cumplimiento del supuesto de independencia ya que los valores residuales se encuentran distribuidos de manera aleatoria sobre la franja horizontal.

7.4 MODELO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL RETARDO

Tomando como base los procedimientos desarrollados en los numerales 3.2 y 3.3, en éste aparte se desarrollará el modelo estadístico de la misma manera que para el throughput, análisis de varianza y la validación de los resultados obtenidos experimentalmente para la variable de *Retardo*.

Como se mencionó anteriormente “Un diseño factorial de dos (2) factores posee una respuesta (Y) que puede describirse mediante el modelo de efectos dado por la siguiente fórmula” (Martinez & Martinez, 1997, p.191):

$$Y_{ijl} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \varepsilon_{ijl}$$

Ecuación (44)

$$i = 1, 2, \dots, a; \quad j = 1, 2, \dots, b; \quad l = 1, 2, \dots, n$$

Donde:

a = Número de Host en la red Homeplug AV.

b = Códec Utilizado.

n = número de réplicas por experimento.

Y_{ijl} = Throughput para un codec (*i*) con un número de estaciones en la red Homeplug AV (*b*), para la replicación (*l*).

μ =Media general del *Throughput* independiente de cualquiera de los factores considerados en el experimento.

A_i =Efecto del número de Host (*i*).

B_j =Efecto del Codec usado (*j*).

$(AB)_{ij}$ =Efecto de la interacción entre los factores Códec y número de estaciones.

ε_{ijkl} =Error aleatorio.

El estudio factorial para dos (2) factores (A,B) permite analizar los efectos A,B y AB; donde el nivel de detalle con el que pueden estudiarse depende del número de niveles usados para cada factor. Para el experimento realizado, se tienen tres (3) efectos de interés con los cuales se plantean tres (3) hipótesis nulas (H_0) y cada una emparejada con una hipótesis alternativa (H_A) (Gutiérrez, 2008).

Las hipótesis de interés para los dos (2) factores y sus interacciones son:

$$H_0: \text{Efecto } A = 0, \quad H_A: \text{Efecto } A \neq 0 \quad \text{Ecuación (45)}$$

$$H_0: \text{Efecto } B = 0, \quad H_A: \text{Efecto } B \neq 0 \quad \text{Ecuación (46)}$$

$$H_0: \text{Efecto } AB = 0, \quad H_A: \text{Efecto } AB \neq 0 \quad \text{Ecuación (47)}$$

Para casos en los que todos los factores del experimento son fijos, es posible formular y probar fácilmente hipótesis acerca de los efectos principales y sus interacciones.

Para el caso de modelos de efectos fijos, los test para probar las hipótesis sobre cada efecto principal y sus interacciones se debe construir dividiendo el cuadrado medio (CM) correspondiente del efecto o la interacción, por el cuadrado medio del error (CME).

“Los grados de libertad para cada efecto principal son los niveles del factor menos uno y el número de grados de libertad para una interacción es el producto del número de grados de libertad asociados con los componentes individuales de esta” (Moreno, p. 151, 2002).

El procedimiento es el que se refleja a continuación:

Variable dependiente: **Retardo**

Factores: (A): Número de host en la red.

(B): Codec usado.

Número de muestras experimentales: 60

A continuación se presenta el análisis de varianza para el Retardo a partir de los datos tomados del cuadro 19.

La expresión matemática para el cálculo del Factor de Corrección (FC) es la siguiente:

$$FC = \frac{Y^2}{abn} \quad \text{Ecuación (48)}$$

Teniendo en cuenta los datos, el valor FC es:

$$FC = \frac{Y^2}{abn} = \frac{506,8689^2}{3 \times 4 \times 5} = 4281,9361 \quad \text{Ecuación (49)}$$

$$FC = 4281,9361$$

Para el cálculo de las sumas de cuadrados (SC) se usarán las siguientes fórmulas matemáticas, basandonos en el metodo ANOVA:

$$SC_{TOT} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^n Y_{ijl}^2 - FC = 6568,2346 - 4281,9361 = 2286,2993 \quad \text{Ecuación (50)}$$

$$SC_{TOT} = 2286,2993$$

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i..}^2}{bn} - FC \quad \text{Ecuación (51)}$$

$$SC_A = \frac{(90,8377)^2 + (238,7838)^2 + (177,24741)^2}{20} - 4281,9361 = 552,3563$$

$$SC_A = 552,3563$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{an} - FC \quad \text{Ecuación (52)}$$

$$SC_B = \frac{(114,1041)^2 + (156,1667)^2 + (92,8747)^2 + (143,7233)^2}{15} - 4281,9361$$

$$= 164,0590$$

$$SC_B = 164,0590$$

Para calcular las sumas de cuadrados (SC) de las interacciones de dos (2) factores, se calculan las SC de las celdas correspondientes y se les restan las SC de los dos (2) efectos principales. Para facilitar los cálculos se recomienda ajustar los cuadros de dos (2) factores para calcular las SC de las celdas correspondientes.

Las expresiones matemáticas para calcular las interacciones de dos factores son las siguientes:

A: Codec Utilizado

B: Número de Host en la red

Tabla 9. Retardo - Interacción de Factores A-B

No. de Host	CÓDEC DE VIDEO UTILIZADO			
	MPEG	MP4	FLV	AVI
1 Host	24,905393	25,848137	15,873834	24,210411
2 Host	52,323486	65,090813	38,367245	83,002256
3 Host	36,875306	65,227778	38,633638	36,510689

Fuente: Autores del Proyecto.

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^b \frac{Y_{i.k.}^2}{n} - FC - SC_A - SC_B \quad \text{Ecuación (53)}$$

Tomando como base los datos, se tiene:

$$SC_{AB} = \frac{25902,5481}{5} - 4281,9361 - 552,3563 - 164,0590 = \mathbf{182,1580} \quad \text{Ecuación (54)}$$

$$SC_{AB} = \mathbf{182,1580}$$

La suma de cuadrados para el error (SC_E) se determina mediante la siguiente expresión:

$$SC_E = SC_{TOT} - SC_A - SC_B - SC_{AB} \quad \text{Ecuación (55)}$$

$$SC_E = 2286,2993 - 552,3563 - 164,0590 - 182,1580 = \mathbf{1387,7258}$$

$$SC_E = \mathbf{1387,7258}$$

En la Tabla 1010, se presenta el resultado del análisis de varianza correspondiente al Retardo:

Tabla 10. ANOVA completo para Retardo

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SC)	Gr. Lib	Cuadrado Medio (CM)	Cociente-F (Fo)	p-Valor
A: Nro. de Host	552,3563	2	276,17815	9,5527	0.3002
B: Códec	164,0590	3	54,6863	1,8915	<0,0001
Interacción AxB	182,1580	6	30,3596	1,0501	0.107
Error	1387,7258	48	28,9109		
TOTAL	2286,2993	59			

Fuente: Autores del Proyecto.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos en el cuadro 26, “el efecto cuyo *p – Valor* sea menor al valor especificado para α , se establece como estadísticamente significativo, lo que equivale a decir que se encuentra activo” (Moreno, 2002, p.155). Por lo tanto, se tomarán como estadísticamente significativos los valores cuyo *p – Valor* < 0,05.

La tabla ANOVA permite descomponer la variabilidad del *Retardo* en las contribuciones debidas a varios factores. Ya que se eligió la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se hizo la medición de cada factor teniendo en cuenta la eliminación del resto de los factores. Los *p – Valor* determinan la importancia estadística de cada uno de los factores. Considerando que en el análisis de varianza existen tres (3) efectos con *p – Valor* inferiores a 0,05 (A, B y AB), se

destaca que estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo del *Retardo* en un 95 % de confianza para los cuales la hipótesis H_0 se rechaza.

Por otra parte, los efectos que no influyen estadísticamente en el modelo son número de Host (A, Interacción AB), se considera eliminarlos enviando sus efectos sobre el modelo al término del error (ϵ).

7.5 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA EXPERIMENTACIÓN

La validez de los resultados obtenidos a partir de un análisis de varianza queda sujeto a que los supuestos del modelo Anova se cumplan. Estos supuestos son: normalidad, varianza constante (igual varianza de los tratamientos) e independencia. Lo que quiere decir que la respuesta (Y) debe tener una distribución normal, con similar varianza en cada experimento y las mediciones deben ser independientes. Estos supuestos sobre (Y) se traducen en supuestos sobre el término error (ϵ) en los diferentes modelos. (Gutiérrez, 2008)

Por lo general se emplean los gráficos de residuos para verificar los supuestos del modelo, ya que si los supuestos se cumplen los residuos se podrán ver como una muestra aleatoria de distribución normal con media cero y varianza constante (0).

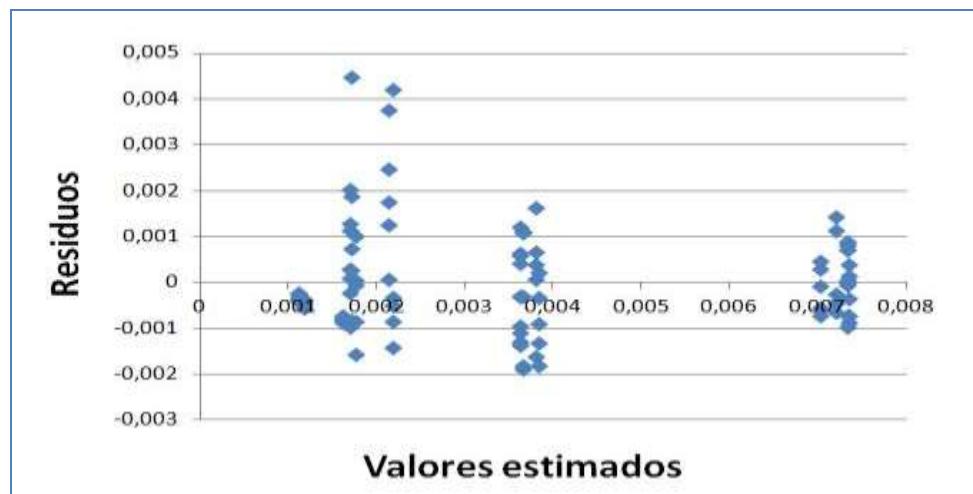
Los supuestos del modelo ANOVA (análisis de varianza) deben ser verificados y validados antes de dar por ciertas las conclusiones de la etapa de interpretación en donde se supone que los residuos se distribuyen de manera normal, independientes y con varianza constante.

Es fundamental la verificación ya que de comprobarse la violación de alguno de los supuestos, pueden producirse impactos errados sobre las conclusiones

establecidas. A continuación se realiza el análisis para cada uno de los tres supuestos:

7.5.1 Supuesto de Varianza Constante. Una forma de verificar el supuesto de varianza constante (o que los tratamientos tienen la misma varianza) es graficando los valores estimados contra los residuos (\hat{Y}_{ij} vs ε_{ij}). Generalmente, \hat{Y}_{ij} va en el eje X (horizontal) y los residuos en el eje vertical. Si los puntos de la gráfica de residuos contra los estimados se distribuyen aleatoriamente en una banda horizontal, sin ningún patrón claro y contundente, entonces es señal de que cumple con el supuesto de que los tratamientos tienen igual varianza. Por el contrario, si se distribuyen con algún patrón claro y contundente, como por ejemplo una corneta o un embudo, entonces es señal de que no se está cumpliendo el supuesto de varianza constante. En particular, la parte estrecha del embudo indica que en esos niveles estimados para la variable respuesta, se espera una menor variabilidad, por lo que se debe analizar si estos valores ayudan a maximizar o a minimizar el resultado deseado. (Moreno, 2002).

Figura 45. Valores residuales vs. Valores estimados para Retardo

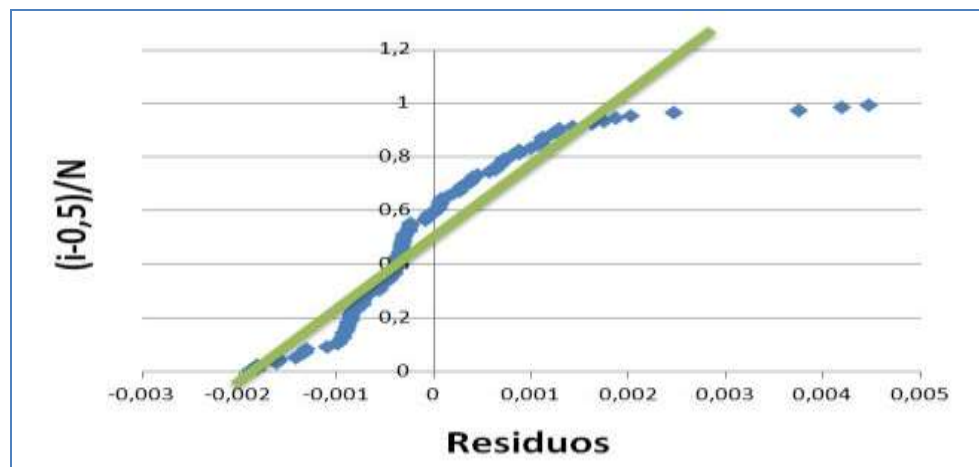


Fuente: Autores del Proyecto.

En la Figura 45, se aprecia que se cumple el supuesto de varianza constante ya que los datos se distribuyen aleatoriamente en la banda horizontal sin ningún patrón claro.

7.5.2 Supuesto de Normalidad. Un procedimiento usualmente utilizado para verificar el supuesto de normalidad de los residuos, se basa en ubicar los residuos en una gráfica de probabilidad normal. Esta gráfica de tipo X-Y tiene las escalas de tal manera que si los residuos siguen una distribución normal, al graficarlos tienden a estar alineados en una línea recta; si esto no ocurre, se concluye que el supuesto de normalidad no es correcto.

Figura 46. Valores residuales de Retardo en gráfica de probabilidad



Fuente: Autores del Proyecto.

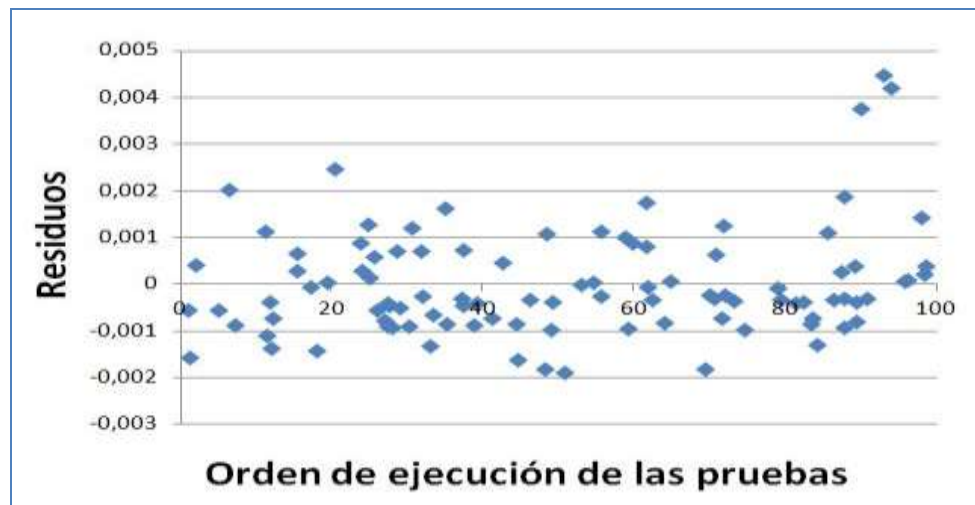
En la Figura 46, correspondiente a la gráfica de probabilidad normal, se aprecia el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos, ya que estos se encuentran ajustados sobre una recta.

7.5.3 Supuesto de Independencia. Para comprobar el supuesto de independencia se grafica el orden en que se tomó un dato contra el residuo correspondiente. De esta manera, al graficar en el eje horizontal (orden de

ejecución de la prueba) y en el eje vertical (residuos) se puede detectar una tendencia hacia un patrón no aleatorio claramente definido. Si esto ocurre, es evidencia de que existe una correlación entre los errores y el supuesto de independencia no se cumple.

Si el comportamiento de los puntos es aleatorio dentro de la franja horizontal se considera que el supuesto de independencia se cumple. La violación de éste supuesto ocurre por lo general debido a deficiencias en la planeación y ejecución del experimento, ya que puede ser que no se aplicó en forma correcta el principio de aleatorización de las pruebas; o, en la medida en que se realizaron las pruebas, se presentaron otros factores que alteraron la respuesta y que no fueron tenidos en cuenta durante el experimento.

Figura 47. Valores residuales de Retardo vs. Ord. de ejecución de la prueba



Fuente: Autores del Proyecto.

En la Figura 47, en donde se presenta la relación entre los valores residuales y el orden en el que fueron ejecutadas las pruebas experimentalmente, se aprecia el cumplimiento del supuesto de independencia ya que los valores residuales se encuentran distribuidos de manera aleatoria sobre la franja horizontal.

7.6 MODELO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL *JITTER*

Tomando como base los procedimientos desarrollados en los numerales 3.2 y 3.3, en éste aparte se desarrollará el modelo estadístico de la misma manera que para el throughput, análisis de varianza y la validación de los resultados obtenidos experimentalmente para la variable de *Jitter*.

Como se mencionó anteriormente “Un diseño factorial de dos (2) factores posee una respuesta (Y) que puede describirse mediante el modelo de efectos dado por la siguiente fórmula” (Martinez & Martinez, 1997, p.191):

$$Y_{ijl} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \varepsilon_{ijl} \quad \text{Ecuación (56)}$$

$$i = 1, 2, \dots, a; \quad j = 1, 2, \dots, b; \quad l = 1, 2 \dots n$$

Donde:

a = Número de *Host* en la red *Homeplug AV*.

b = *Codec* Utilizado.

n = número de réplicas por experimento.

Y_{ijl} = Throughput para un *codec* (*i*) con un número de estaciones en la red *Homeplug AV* (*b*), para la replicación (*l*).

μ =Media general del *Throughput* independiente de cualquiera de los factores considerados en el experimento.

A_i =Efecto del número de *Host* (*i*).

B_j =Efecto del *Codec* usado (*j*).

$(AB)_{ij}$ =Efecto de la interacción entre los factores *Códec* y número de estaciones.

ε_{ijkl} =Error aleatorio.

El estudio factorial para dos (2) factores (A,B) permite analizar los efectos A,B y AB; donde el nivel de detalle con el que pueden estudiarse depende del número de niveles usados para cada factor. Para el experimento realizado, se tienen tres (3) efectos de interés con los cuales se plantean tres (3) hipótesis nulas (H_0) y cada una emparejada con una hipótesis alternativa (H_A) (Gutiérrez, 2008).

Las hipótesis de interés para los dos (2) factores y sus interacciones son:

$$H_0: \text{Efecto } A = 0, \quad H_A: \text{Efecto } A \neq 0 \quad \text{Ecuación (57)}$$

$$H_0: \text{Efecto } B = 0, \quad H_A: \text{Efecto } B \neq 0 \quad \text{Ecuación (58)}$$

$$H_0: \text{Efecto } AB = 0, \quad H_A: \text{Efecto } AB \neq 0 \quad \text{Ecuación (59)}$$

Para casos en los que todos los factores del experimento son fijos, es posible formular y probar fácilmente hipótesis acerca de los efectos principales y sus interacciones.

Para el caso de modelos de efectos fijos, los test para probar las hipótesis sobre cada efecto principal y sus interacciones se debe construir dividiendo el cuadrado medio (CM) correspondiente del efecto o la interacción, por el cuadrado medio del error (CME).

“Los grados de libertad para cada efecto principal son los niveles del factor menos uno y el número de grados de libertad para una interacción es el producto del número de grados de libertad asociados con los componentes individuales de esta” (Moreno, p. 151, 2002).

El procedimiento es el que se refleja a continuación:

Variable dependiente: **Jitter**

Factores: (A): Número de host en la red.
 (B): Codec usado.

Número de muestras experimentales: 60

A continuación se presenta el análisis de varianza para el throughput a partir de los datos tomados de la tabla 10.

La expresión matemática para el cálculo del Factor de Corrección (FC) es la siguiente:

$$FC = \frac{Y^2_{\dots}}{abn} \quad \text{Ecuación (60)}$$

Teniendo en cuenta los datos, el valor FC es:

$$FC = \frac{Y^2_{\dots}}{abn} = \frac{4632,7993^2}{3 \times 4 \times 5} = 357713,833 \quad \text{Ecuación (61)}$$

$$FC = 357713,833$$

Para el cálculo de las sumas de cuadrados (SC) se usarán las siguientes fórmulas matemáticas, basándonos en el método ANOVA:

$$SC_{TOT} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^n Y_{ijl}^2 - FC = 812385,451 - 357713,833 = 454671,619 \quad \text{Ecuación (62)}$$

$$SC_{TOT} = 454671,619$$

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i\dots}^2}{bn} - FC \quad \text{Ecuación (63)}$$

$$SC_A = \frac{(1046,9865)^2 + (1783,8138)^2 + (1801,9982)^2}{20} - 357713,833 = \mathbf{18554,6937}$$

$$SC_A = \mathbf{18554,6937}$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{j-}^2}{an} - FC \quad \text{Ecuación (64)}$$

$$SC_B = \frac{(921,4689)^2 + (263,3771)^2 + (1063,4902)^2 + (2384,4630)^2}{15} - 357713,83$$

$$= \mathbf{162587,1}$$

$$SC_B = \mathbf{162587,199}$$

Para calcular las sumas de cuadrados (SC) de las interacciones de dos (2) factores, se calculan las SC de las celdas correspondientes y se les restan las SC de los dos (2) efectos principales. Para facilitar los cálculos se recomienda ajustar los cuadros de dos (2) factores para calcular las SC de las celdas correspondientes.

Las expresiones matemáticas para calcular las interacciones de dos factores son las siguientes:

A: *Codec* Utilizado

B: Número de *Host* en la red

Tabla 11. Jitter - Interacción de Factores A-B

No. de Host	CODEC DE VIDEO UTILIZADO			
	MPEG	MP4	FLV	AVI
1 Host	260,459277	162,857666	420,890788	202,778815
2 Host	305,299232	48,618888	160,712323	1269,183443
3 Host	355,710445	51,900594	481,887143	912,50076

Fuente: Autores del Proyecto.

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^b \frac{Y_{i,k}^2}{n} - FC - SC_A - SC_B \quad \text{Ecuación (65)}$$

Tomando como base los datos, se tiene:

$$SC_{AB} = \frac{3238952,89}{5} - 357713,83 - 18554,6937 - 162587,199 = \mathbf{108934,852} \quad \text{Ecuación (66)}$$

$$SC_{AB} = \mathbf{108934,852}$$

La suma de cuadrados para el error (SC_E) se determina mediante la siguiente expresión:

$$SC_E = SC_{TOT} - SC_A - SC_B - SC_{AB} \quad \text{Ecuación (67)}$$

$$SC_E = 454671,619 - 18554,6937 - 162587,199 - 108934,852 = \mathbf{164594,874}$$

$$SC_E = \mathbf{164594,874}$$

En la Tabla 12, se presenta el resultado del análisis de varianza correspondiente al *Jitter*:

Tabla 12. ANOVA completo para Jitter

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SC)	Gr. Lib	Cuadrado Medio (CM)	Cociente-F (Fo)	p-Valor
A: Nro. de Host	18554,6937	2	9277,34685	2,7055	<0,0001
B: Códec	162587,199	3	54195,733	15,8048	<0,0001
Interacción AxB	108934,852	6	18155,8086	5,2946	0.0384
Error	164594,874	48	3429,0598		
TOTAL	454671,619	59			

Fuente: Autores del Proyecto.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos en la Tabla 12, “el efecto cuyo *p – Valor* sea menor al valor especificado para α , se establece como estadísticamente significativo, lo que equivale a decir que se encuentra activo” (Moreno, 2002, p.155). Por lo tanto, se tomarán como estadísticamente significativos los valores cuyo *p – Valor* < 0,05.

La tabla ANOVA permite descomponer la variabilidad del *Retardo* en las contribuciones debidas a varios factores. Ya que se eligió la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se hizo la medición de cada factor teniendo en cuenta la eliminación del resto de los factores. Los *p – Valor* determinan la importancia estadística de cada uno de los factores. Considerando que en el análisis de varianza existen tres (3) efectos con *p – Valor* inferiores a 0,05 (A, B y AB), se

destaca que estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo del *Jitter* en un 95 % de confianza para los cuales la hipótesis H_0 se rechaza.

Por otra parte, los efectos que no influyen estadísticamente en el modelo (Interacción AB), se considera eliminarlos enviando sus efectos sobre el modelo al término del error (ϵ).

7.7 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA EXPERIMENTACIÓN

La validez de los resultados obtenidos a partir de un análisis de varianza queda sujeto a que los supuestos del modelo Anova se cumplan. Estos supuestos son: normalidad, varianza constante (igual varianza de los tratamientos) e independencia. Lo que quiere decir que la respuesta (Y) debe tener una distribución normal, con similar varianza en cada experimento y las mediciones deben ser independientes. Estos supuestos sobre (Y) se traducen en supuestos sobre el término error (ϵ) en los diferentes modelos. (Gutiérrez, 2008)

Por lo general se emplean los gráficos de residuos para verificar los supuestos del modelo, ya que si los supuestos se cumplen los residuos se podrán ver como una muestra aleatoria de distribución normal con media cero y varianza constante (0).

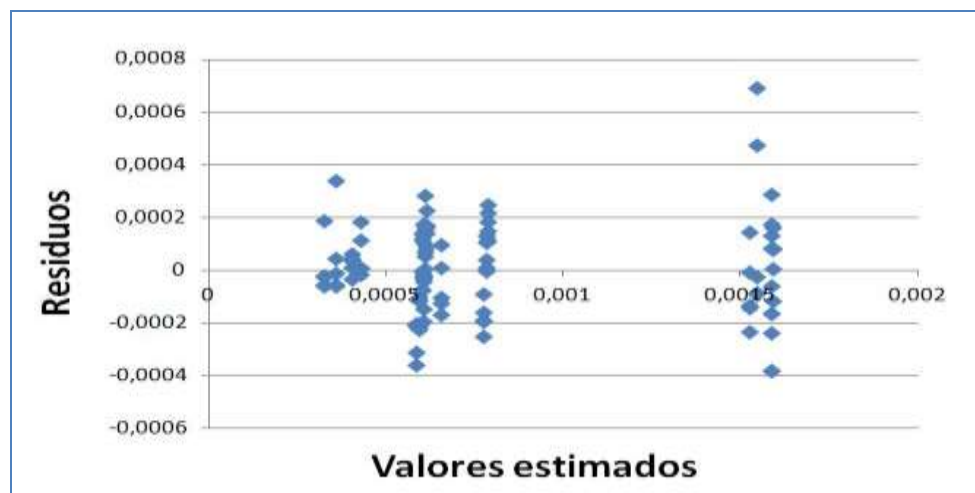
Los supuestos del modelo ANOVA (análisis de varianza) deben ser verificados y validados antes de dar por ciertas las conclusiones de la etapa de interpretación en donde se supone que los residuos se distribuyen de manera normal, independientes y con varianza constante.

Es fundamental la verificación ya que de comprobarse la violación de alguno de los supuestos, pueden producirse impactos errados sobre las conclusiones

establecidas. A continuación se realiza el análisis para cada uno de los tres supuestos:

7.7.1 Supuesto de Varianza Constante. Una forma de verificar el supuesto de varianza constante (o que los tratamientos tienen la misma varianza) es graficando los valores estimados contra los residuos (\hat{Y}_{ij} vs ε_{ij}). Generalmente, \hat{Y}_{ij} va en el eje X (horizontal) y los residuos en el eje vertical. Si los puntos de la gráfica de residuos contra los estimados se distribuyen aleatoriamente en una banda horizontal, sin ningún patrón claro y contundente, entonces es señal de que cumple con el supuesto de que los tratamientos tienen igual varianza. Por el contrario, si se distribuyen con algún patrón claro y contundente, como por ejemplo una corneta o un embudo, entonces es señal de que no se está cumpliendo el supuesto de varianza constante. En particular, la parte estrecha del embudo indica que en esos niveles estimados para la variable respuesta, se espera una menor variabilidad, por lo que se debe analizar si estos valores ayudan a maximizar o a minimizar el resultado deseado. (Moreno, 2002).

Figura 48. Valores residuales vs. Valores estimados para Jitter

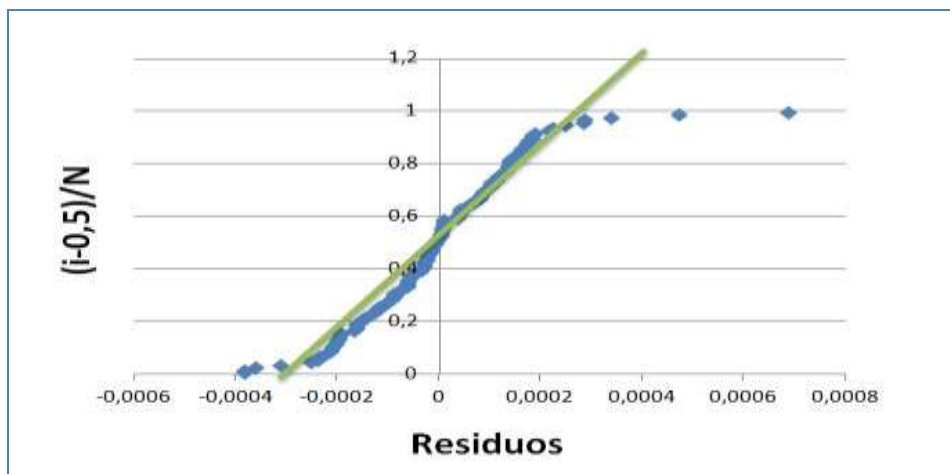


Fuente: Autores del Proyecto.

En la Figura 48, se aprecia que se cumple el supuesto de varianza constante ya que los datos se distribuyen aleatoriamente en la banda horizontal sin ningún patrón claro.

7.7.2 Supuesto de Normalidad. Un procedimiento usualmente utilizado para verificar el supuesto de normalidad de los residuos, se basa en ubicar los residuos en una gráfica de probabilidad normal. Esta gráfica de tipo X-Y tiene las escalas de tal manera que si los residuos siguen una distribución normal, al graficarlos tienden a estar alineados en una línea recta; si esto no ocurre, se concluye que el supuesto de normalidad no es correcto.

Figura 49. Valores residuales de Jitter en gráfica de probabilidad



Fuente: Autores del Proyecto.

En la Figura 49, correspondiente a la gráfica de probabilidad normal, se aprecia el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos, ya que estos se encuentran ajustados sobre una recta.

7.7.3 Supuesto de Independencia. Para comprobar el supuesto de independencia se grafica el orden en que se tomó un dato contra el residuo correspondiente. De esta manera, al graficar en el eje horizontal (orden de

ejecución de la prueba) y en el eje vertical (residuos) se puede detectar una tendencia hacia un patrón no aleatorio claramente definido. Si esto ocurre, es evidencia de que existe una correlación entre los errores y el supuesto de independencia no se cumple.

Si el comportamiento de los puntos es aleatorio dentro de la franja horizontal se considera que el supuesto de independencia se cumple. La violación de éste supuesto ocurre por lo general debido a deficiencias en la planeación y ejecución del experimento, ya que puede ser que no se aplicó en forma correcta el principio de aleatorización de las pruebas; o, en la medida en que se realizaron las pruebas, se presentaron otros factores que alteraron la respuesta y que no fueron tenidos en cuenta durante el experimento.

Figura 50. Valores residuales de *Jitter* vs. Ord. de ejecución de la prueba



Fuente: Autores del Proyecto.

En la Figura 50, en donde se presenta la relación entre los valores residuales y el orden en el que fueron ejecutadas las pruebas experimentalmente, se aprecia el cumplimiento del supuesto de independencia ya que los valores residuales se encuentran distribuidos de manera aleatoria sobre la franja horizontal.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

Un aspecto de relevancia en los resultados obtenidos, se debe al comportamiento de la tecnología PLC bajo las condiciones de la red eléctrica en nuestra ciudad y en general en nuestro país, considerando que la eficiencia de la red PLC depende de las condiciones generales en las que se encuentre la red eléctrica. En Colombia y en muchos países, el cableado eléctrico no ha sido modificado, ni adaptado para el uso adecuado de esta tecnología, tal como ha ocurrido en países europeos como Alemania, en donde se han realizado diversos estudios y ajustes a su infraestructura en las redes de potencia con el fin de optimizar su comportamiento y eficiencia de transmisión, garantizando niveles de confiabilidad y seguridad, aunque cabe resaltar que en Europa no hay casi redes de línea abierta aérea.

Una fortaleza y principal característica de la tecnología PLC bajo el estándar *HomePlug AV* es el uso de Multiplexación por división de frecuencias ortogonales (*OFDM*) como técnica de modulación, la cual utiliza un esquema de transmisión adaptativa, analizando las condiciones del canal acorde con la relación SNR presente en el medio en un momento dado. Esta técnica realizó un papel importante a la hora de analizar el comportamiento de la tecnología PLC durante el desarrollo de la investigación.

Es importante tener en cuenta que la implementación de redes PLC nunca debe ser considerada como un reemplazo de las tecnologías existentes, debe verse como una solución complementaria que trabaja en unión con otras tecnologías de acceso. Con la tecnología PLC se tiene una instalación simple y rápida en donde solo es necesario conectar un adaptador o MÓDEM PLC, convirtiendo cualquier toma de corriente en un punto de acceso a la red eso si teniendo en cuenta que

debe estar en la misma fase eléctrica; permitiendo la transmisión simultánea de voz, datos y video sobre un mismo medio; de esta manera otorga la prestación de múltiples servicios, tales como: acceso a Internet de Banda Ancha, telefonía IP, aplicaciones multimedia (videoconferencia, televisión interactiva, vídeo y audio bajo demanda, juegos en red), entre otros servicios.

El tema de la presente investigación, se constituye en uno de los estudios pioneros acerca del rendimiento de la tecnología *Power Line Communications* usando el estándar *Homeplug AV* en el entorno Colombiano y con base en datos netamente experimentales ya que en la actualidad se encuentra documentación en lo referente a voz y a datos pero no en la transmisión de video, sobre escenarios contruados a partir de la redes de datos de área local, operando en redes eléctricas del entorno empresarial y domiciliario.

Cada uno de los modelos de estimación planteados para *Throughput*, *Retardo* y *Jitter* propuestos, buscaron verificar y evaluar el rendimiento de la red PLC implementada, teniendo en cuenta la influencia los siguientes factores: el número de host activas en la red, *codecs* de transmisión para el video; bajo las condiciones de la red eléctrica existentes en ambientes corporativos y residenciales. Cabe resaltar, que es factible considerar que los resultados obtenidos pueden sufrir modificaciones y ajustes posteriores debido al grado de sensibilidad de los instrumentos utilizados para realizar la medición y las condiciones existentes en la red en el momento de llevar a cabo el experimento.

En esta tesis de investigación se planteó un modelo de rendimiento centrado específicamente en la transmisión de Video, esta delimitación permite un enfoque muy preciso en los principales parámetros de una red LAN, los cuales son: *Throughput*, *Jitter*, *Retardo* y pérdida de paquetes. De esta manera se logró establecer unos escenarios de pruebas puntuales, los cuales permitieron la toma de datos y su posterior análisis.

Cualquier investigación que esté basada en el análisis y estudio del comportamiento de una red LAN requiere el uso de herramientas informáticas de generación de tráfico, para el caso del proyecto de investigación, fue utilizado VLC por su versatilidad para operar simultáneamente en entornos multihilo, por su arquitectura cliente/servidor y por su potencia para simular los codecs de video más relevantes en las redes actuales, también se utilizó Wireshark con el cual se pudo scanear la red y realizar los diferentes cálculos.

Para medir el rendimiento de la red *Homeplug AV* para el tráfico de Video se analizaron los parámetros más relevantes de una red LAN como se mencionó anteriormente son: *Throughput*, *Jitter*, pérdida de paquetes y retardo. Es importante recalcar que con respecto al parámetro pérdida de paquetes, existió una tendencia muy definida de las mediciones realizadas a un valor igual a cero (0). Como se explicó en su momento esto es consecuencia de la versatilidad y funcionalidad de la tecnología *Homeplug AV* para adaptarse a las condiciones de línea de potencia imperantes en el experimento y a la capacidad de la tecnología para el desempeño en redes LAN PLC de tipo residencial y empresarial.

El uso de la técnica de análisis de varianza (ANOVA) permitió formular una función objetivo para cada uno de los tres parámetros relevantes en este caso de investigación que fueron (*Throughput*, *Jitter* y Retardo). Tomándolo como base, se analizó el comportamiento de cada función con respecto a las contribuciones (efectos) de los factores considerados (Codec utilizado, número de estaciones en la red), tanto de forma individual como de su respectiva interacción.

En el *Throughput*, se encontró que los factores códec utilizado y número de estaciones en la red, así como su interacción, tienen un efecto estadísticamente significativo para un porcentaje equivalente al 95% de confianza, lo cual es

coherente con la expresión matemática presentada para la función objetivo planteada.

Por otra parte, el análisis de varianza para el *Jitter* estableció que los factores códec (A) y número de estaciones (B) en la red tienen efectos individuales estadísticamente significativos para un porcentaje del 95% de confianza. Los efectos de la interacción AB no influyen estadísticamente en el modelo planteado y su valor se puede agrupar junto con el término del error (ϵ) de la función objetivo.

El análisis de varianza para el parámetro Retardo estableció que únicamente el número de estaciones (B) tiene un efecto estadísticamente significativo para un porcentaje del 95% de confianza. El factor *Codec* utilizado (A) y la interacción de los factores AB no inciden en el resultado del Retardo. Esto es bastante coherente ya que, entre mayor número de estaciones se encuentren activas en la red *Homeplug AV*, se presentarán mayores retrasos en los paquetes VoIP.

Para poder realizar la respectiva validación de los resultados obtenidos en el proyecto de investigación de cada uno de los parámetros considerados (*Throughput*, *Jitter* y *Retardo*) se realizó mediante la verificación de los supuestos para el modelo de análisis de varianza (*ANOVA*) como son normalidad, varianza constante e independencia.

La evaluación del modelo con base en el supuesto de varianza constante, se pudo observar en las gráficas de valores estimados versus residuos (\hat{Y}_{ij} vs ϵ_{ij}), para los tres parámetros analizados, se puede concluir que se cumplió con el argumento de que los test realizados tienen varianza similar debido a que los datos se distribuyeron aleatoriamente en una banda horizontal sin reflejar un patrón.

La evaluación del modelo con base en el supuesto de normalidad se pudo comprobar su validez por que los valores residuales de cada parámetro (*Throughput, Retardo y Jitter*) en la gráfica de probabilidad normal los residuos siguieron una agrupación similar a una línea recta.

La evaluación del modelo con base en el supuesto de independencia para los parámetros analizados, se realizó por medio de las gráficas de los valores residuales versus el orden de ejecución de cada prueba, ya que en la totalidad de las gráficas se evidencio una distribución aleatoria de los puntos en la franja horizontal.

Se verificó que es posible sincronizar dispositivos PLC de diferentes marcas.

Se valida que para la transmisión de video el ruido generado a nivel de hogar no tiene un impacto relevante en la nitidez y definición del mismo.

8.2 RECOMENDACIONES

Colombia al ser un país con una extensa área rural (95% del territorio) mal atendida (Jaramillo, 2006) en aspectos como los servicios públicos, acceso a internet, acceso a educación, etc. A tomado medidas para propender por la reducción de la brecha tecnológica existente con el plan vive digital pero si a su vez se realiza la implantación de soluciones tecnológicas de conectividad al interior de hogares y basadas en la tecnología *Homeplug AV*, puede propiciar la generación de un impacto positivo que ayude mitigar la crisis del sector rural, llevando el internet de banda ancha y de esta manera entregar la información a miles de usuarios.

La implementación de la tecnología PLC, en países en vía de desarrollo en especial en Colombia, se convierte en una alternativa llamativa para la expansión

de redes LAN en hogares y/o empresas, el reto es contar con las condiciones eléctricas adecuadas, esta tecnología aplica especialmente donde se desee evitar cableado adicional, reducir costos y obtener los beneficios de banda ancha. Bajo esta proposición es importante desarrollar unos estudios serios que permitan establecer la viabilidad o no de la tecnología PLC en nuestro país, teniendo como referencia estándares de aceptación y reconocimiento a nivel mundial como lo es *Homeplug AV*.

Es importante resaltar que a pesar de los esfuerzos de organizaciones como *Homeplug Alliance*, actualmente una gran cantidad de productos *PLC* fabricados por diferentes proveedores, incrementan el problema de la interoperabilidad por falta de regulación.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, J.; García, V.; González, D.; González-Moriyón, G.; Rodríguez, D.; Rubio, M. & Valencia, D. (2004). Transmisión de datos por la red eléctrica. Recuperado el 5 de mayo de 2015, de www.victorgarcia.org/files/PLC-v2.0RC.pdf

BP Blogspot (2001). Tabla de *PLC* y el modelo OSI. Recuperado el 15 de septiembre de 2014, de http://4.bp.blogspot.com/-ZEU0X1q6IXQ/T8UkLIBN6SI/AAAAAAAAABc/Wz8L_CbuaXg/s1600/capa.png.

BP Blogspot (2008). Tipos de filtros instalados en los equipos de *PLC*. Recuperado el 15 de septiembre de 2014, de <http://1.bp.blogspot.com/-NspKBgb8ReQ/T8Um-pcdl9I/AAAAAAAAACc/rNAoGV4Ddcs/s1600/filtros.png>

CARCELE, Xavier. Power Line Communications in practice. Paris. p. 22

Casa Domo (2007). Arquitectura de red indoor *PLC*. Recuperado el 13 de agosto de 2014, de <http://www.casadomo.com/noticiasdetalle.aspx?id=9313&c=6&idm=10&pat=10&nwl=s 11.3>

Cid, J.; Díaz, F.; Moreno, A. & Torres, L. (2001). Procesado de Información en Comunicaciones. Figueras Vidal, Anibal Ramon (Comps.). Una Panorámica de las Telecomunicaciones (200 – 243). Madrid: Pearson Educación.

Comisión Regulación de Energía y Gas (2008). Resolución CREG 097, Normatividad.

Conectronica (2008). Frecuencia usada por PLC en la línea eléctrica. Recuperado el 10 de septiembre de 2014, de <http://www.conectronica.com/PLC/Tecnolog%C3%ADa-PLC-de-Banda-Ancha-%20para-las-Comunicaciones-del-Hogar.html>

ETSI, Power Line Telecommunications (PLT) Channel Characterization and Measurement Methods, Technical Report ETSI TR 102 175 v1.1.1 (2003-03), European Telecommunications Standards Institute, 2003. Available online under www.etsi.org.

Fantacci, R.; Morosi, S. & Seravalle, R. (2001). Comparison of CDMA and OFDM systems for broadband downstream communications on low voltage power grid, 5th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC2001), Malmö, Sweden April 4–6.

Gamboa, D.; Quiguiri, C.; Narváez, J. & Martínez, R. (2012). Elemento de red dentro del Hogar. Recuperado el 8 de septiembre de 2014, de <http://impacto-PLC.blogspot.com/>

Grote, W. (2007). Fixed or adaptive rate maximum throughput análisis. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 15 N° 3, p. 320-327

Guillen, E.; López, J. & Barahona, C. (2008). Throughput Analysis over Power Line Communication Channel in an Electric Noisy Scenario. World Academy of Science, Engineering and Technology Volume 33. ISSN 2070-3740

Gutiérrez, H. (2008). Análisis y diseño de experimentos. 2^a Ed. México: McGraw-Hill, 571 p.

Held, G. (2006). Understanding Broadband over Power Line. NJ USA: Taylor & Francis Group. 191 p.

HomePlug Powerline Alliance (2001). HomePlug 1.0 Specification.

Hooijen, O. (1997). A channel model for the low voltage power line channels; measurement and simulation results. Int. Symp. Power-Line Communications and Its Applications, p. 51–56.

Hrasnica, H.; Haidine, A. & Lehnert, R. (2004). Broadband Powerline Communications Networks. NJ USA: John Wiley & Sons Ltd. 273 p.

Jensen, B.; Slavensky, H. & Kjærsgaard, S. (2006). Benchmarking and QoS of In-House Powerline Equipment for AV- Streaming Applications. IEEE Proceedings of ISPLC2006, Orlando, pp. 160-165.

Jensen, B.; Slavensky, H. & Kjærsgaard, S. (2007). Benchmarking and QoS of In-House Powerline Equipment under Noisy Conditions. IEEE Proceedings of ISPLC2006, Orlando, pp. 150-155.

Jung, M.; Chung, M & Lee, M. (2005). Throughput Analysis of HomePlug 1.0. IEEE Communications Letters, vol. 9, no. 2, pp. 184–186.

Kaizawa, Y. & Marubayashi, G. (1998). Needs for the power line communications. Proceedings of Internacional Symposium on Power-line Communications and its Applications, p. 153-157.

Lee, J. & Tripathi, K. (2007). Efficient High Speed Communications over electrical powerlines for a large number of users. Ninth IASTED International Conference Power and Energy System. January 2007.

Lee, M.; Newman, R.; Latchman, H. & Katar, S. (2006). Contention Window based Parameter Selection to Improve Powerline MAC Efficiency for Large Number of Users, proc. IEEE ISPLC, Orlando, Florida, Mar, p. 189-193.

Lee, M.; Newman, R.; Latchman, H.; Katar, S. & YONGE L. (2003). Theoretical and Field Performance Comparison between 802.11 Wireless and Powerline HomePlug 1.0 Protocols, accepted for publication in the IEEE Communications Magazine with Focus Theme on Powerline Local Area Networks, p. 54-63.

Lee, M.; Newman, R.; Latchman, H.; Katar, S. & Yonge, L. (2003). HomePlug 1.0 Powerline Communication LANs –Protocol Description and Comparative Performance Results. Accepted for publication in the Special Issue of the International Journal on Communication Systems on Powerline Communications, p. 447-473.

Lin, Y.; Latchman, H.; Lee M. & Katar, S. (2002). A power line communication network infrastructure for the smart home. IEEE Wireless Communications. p. 9(6): 104–111.

Lin, Y.; Newman, R. & Latchman, H. (2002). Power line Communication Network Infrastructure For Smart Homes, IEEE Wireless Communications, Volume 9, Issue 6, p.: 104-111.

Lin, Y.; Newman, R. & Latchman, H. (2003). A comparative performance study of wireless and power line networks,” IEEE Communications Magazine, vol. 41, no. 4, p. 54–63.

Martínez, C. (2006). Estadística y Muestreo. 9 Ed. México: Ecoe ediciones.

Martínez, R. & Martínez, N. (1997). Diseño de Experimentos Análisis de datos estándar y no estándar. 1 Ed Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia, 461 p.

Matiz, N. (2011). Rango de frecuencias de ADSL vs PLC. Recuperado el 5 de agosto de 2014, de <http://natymatiz.blogspot.com/2011/04/distribucion-del-espectro-de.html>

Meng, H. & Guan, Y. (2005). Modeling and Analysis of Noise Effects on Broadband Power-Line Communications”, In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2.

Montgomery, D. & Runger, G. (2002). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. 2 Ed. México: McGraw-Hill, 895 p.

Moreno, T. (2002) Wilfrido. Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos. Bucaramanga: Ediciones UIS, 330 p.

Ouzzif, M. & Le Masson, J. (2006). Channel Capacity Statistical Analysis for Indoor Power Line Transmissions. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 24, no. 7, p. 1304–1316.

PC Actual (2008). Arquitectura de una red PLC. Recuperado el 3 de agosto de 2014, de http://www.pcactual.com/articulo/laboratorio/especiales/7476/dispositivos_PLC_alternativa_wifi.html

PLC FORUM (2008). APTEL Brazil PLCforum. Recuperado el 25 de mayo de 2015, de http://www.PLCforum.com/frame_members.html

Promax (2005). Equipos PROPOWER para la evaluación de una red para transmisión PLC. Recuperado el 8 de septiembre de 2014, de <http://www.promax.es/esp/news/extdnew.php?text=49>

Tachikawa, S.; Nari, M. & Hamamura, M. (2002). Power line data transmission using OFDM and DS/SS systems, 6 th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC2002), Athens, Greece.

Tang, L.; So, P. & Gunawan, E. (2005). Performance analysis of OFDM systems for broadband power line communications under impulsive noise and multipath effects. In: IEEE Transactions, Vol. 20, No. 2.

Tang, L.; So, P.; Gunawan, E. & Chen, S. (2001). Characterization of in-house power distribution lines for high-speed data transmission. In Proc. Int. Power Eng. Conf., vol. 1, Singapore, p. 7–12.

UDEC (2003). Funcionamiento del PLC. Recuperado el 8 de mayo de 2015, de <http://www2.udec.cl/~fcisternas/DreamHC/PLC/page8.html>

Vesga F., J. C. (2011). Análisis simple del estándar HomePlug 1.0 aplicado a la transmisión de información utilizando la red eléctrica como medio físico de transmisión. *Generación Digital*, 9(16).

Wang, X. & Kar, K. (2004). Throughput Modelling and Fairness Issues in CSMA/CA Based Ad-Hoc Networks. Technical Report, Department of Electrical Computer and System Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute.

Zimmermann, M. & Dostert, K. (2000). An analysis of the broadband noise scenario in powerline networks. International Symposium on Powerline Communications and its Applications (ISPLC2000), Limerick, Ireland.

Zimmermann, M. & Dostert, K. (2000). The low voltage distribution network as last mile access network – signal propagation and noise scenario in the HF- range. *AEU International Journal of Electronics and Communications*, (1), 13–22.

Zimmermann, M. & Dostert, K. (2002). A multipath model for the powerline channel. *IEEE Transactions on Communications*, 50(4), 553–557.

Zimmermann, M. & Dostert, K. (2002). Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Volume 44, Issue 1, p. 249 – 258

ANEXOS

BITÁCORA DE LA EXPERIMENTACIÓN

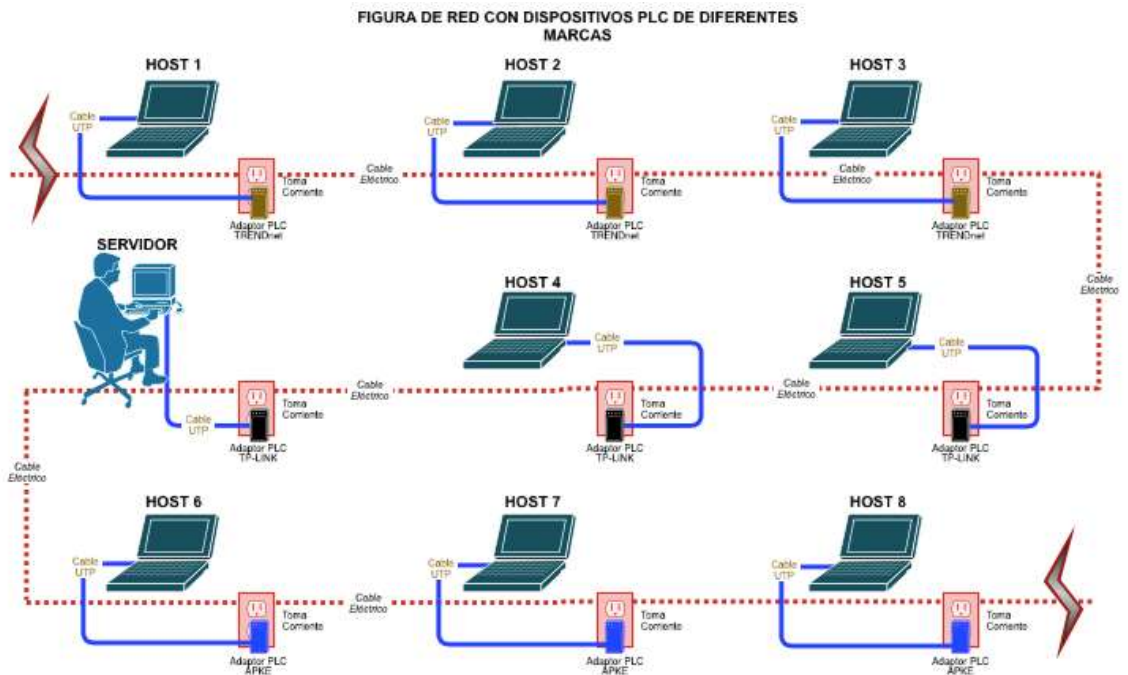
Aparte de la red diseñada y utilizado en el proyecto, se realizaron varias pruebas de campo para definir cual sería la red final, en las realizaciones de estas pruebas se obtuvieron unos resultados que se quisieron dejar documentados y que dan como resultado final este anexo.

1. Pruebas con diferentes marcas de dispositivos PLC

Como tener varios dispositivos PLC con la tecnología *Homeplug AV* era muy costoso, se decidió realizar pruebas con marcas diferentes de dispositivos, para el caso se utilizaron 3 marcas (*TP-LINK*, *TRENDnet*, *APKE*) se resalta que en la documentación encontrada en cada dispositivo sugieren que solo se utilicen en la misma red equipos de una sola marca; por esta razón se decidió realizar la experimentación utilizando el siguiente diseño de red que se ve en la figura 52.

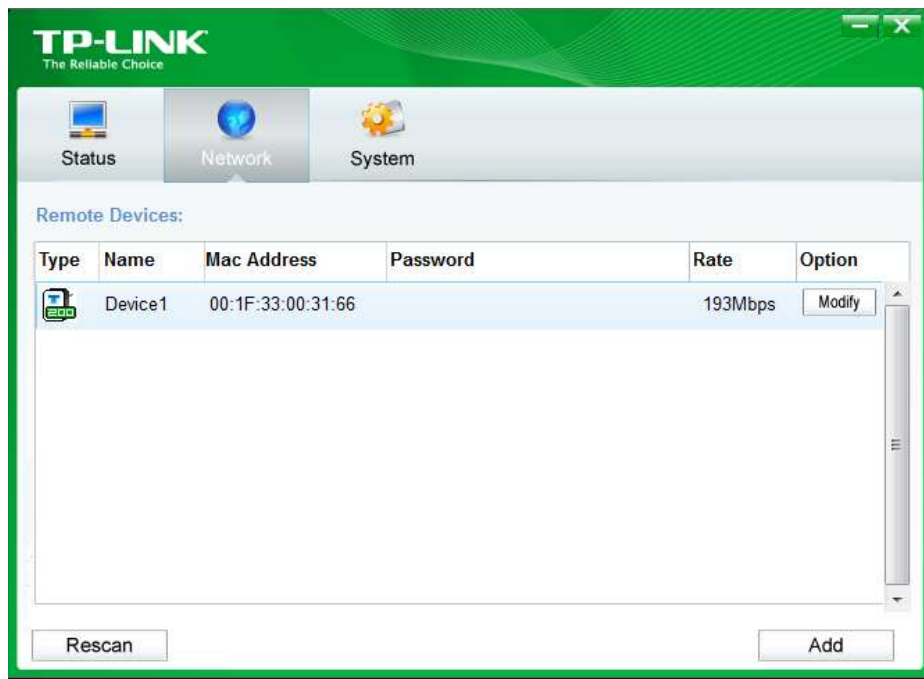
Para la realización de esta prueba se utilizó el laboratorio de la Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB) de la sede de Terrazas, donde se utilizaron como HOST equipos portátiles, como servidor se utilizó un equipo de escritorio y 6 dispositivos *PLC* de tres marcas (*TP-LINK*, *TRENDnet*, *APKE*), los software utilizados fueron: VLC, Wireshark y para poder configurar la red interna entre los dispositivos se utilizó el software de los dispositivos *TP-LINK* ver la figura 53, permitiendo la configuración de los seis dispositivos utilizados, de esta manera se pudo realizar la transmisión de video en todos los host.

Figura 51. Red con Dispositivos PLC de Diferentes Marcas



Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 52. Red con Dispositivos PLC de Diferentes Marcas



Fuente: Autores del Proyecto.

