

**MODELO EMPÍRICO QUE PERMITE EVALUAR EL RENDIMIENTO DE LA RED
LAN BASADA EN EL ESTÁNDAR HOMEPLUG AV PARA LA
TRANSMISIÓN DE VOZ SOBRE EL PROTOCOLO IP**

GERARDO GRANADOS ACUÑA

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
MAESTRÍA EN TELEMÁTICA – MODALIDAD A DISTANCIA
GRUPO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN TELEMÁTICA
BUCARAMANGA
ENERO 23 DEL 2014**

**MODELO EMPÍRICO QUE PERMITE EVALUAR EL RENDIMIENTO DE LA RED
LAN BASADA EN EL ESTÁNDAR HOMEPLUG AV PARA LA TRANSMISIÓN
DE VOZ SOBRE EL PROTOCOLO IP**

GERARDO GRANADOS ACUÑA

Trabajo de grado para optar al título de:

Magíster en Telemática

Director:

PhD(c) MSc Juan Carlos Vesga Ferreira

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
MAESTRÍA EN TELEMÁTICA – MODALIDAD A DISTANCIA
GRUPO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN EN TELEMÁTICA
BUCARAMANGA
ENERO 23 DEL 2014**

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

Bucaramanga, Enero 23 de 2014

DEDICATORIA

Dedico esta tesis al Ser Supremo, energía vital, de cuya inagotable océano de inspiración emergieron múltiples e interesantes ideas. A mí querida esposa Deysi, fuente de constante apoyo y motivación. A mi adorable hijo Nicolás, proyecto de vida, de quién espero repise mis mejores huellas y que sus sueños y anhelos le lleven muy lejos.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Al director del trabajo de investigación, PhD(c) Juan Carlos Vesga Ferreira, por valiosa asesoría y constante apoyo en todos los aspectos que se consideraron para el desarrollo de la presente tesis.

Al personal docente de la maestría en Telemática de la Universidad Autónoma de Bucaramanga, y en especial a los profesores Jorge Andrick Parra Valencia y José Daniel Cabrera Cruz, de quienes obtuve muy valiosos aportes y sugerencias.

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron con sus ideas, planteamientos y consejos, para el desarrollo de la investigación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
2. MARCO REFERENCIAL	17
2.1 TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN EN REDES ELÉCTRICAS	17
2.1.1 Tecnologías PLC.....	17
2.1.2 Fundamentos de operación de la tecnología PLC	19
2.2 TECNOLOGÍA PLC BAJO EL ESTÁNDAR HOMEPLUG AV	21
2.2.1 Evolución y normalización del estándar Homeplug.....	22
2.2.2 Prestaciones del estándar Homeplug AV.....	23
2.3 ELEMENTOS RELEVANTES A LAS TECNOLOGIAS PLC – HOMEPLUG AV....	25
2.3.1 Modulación OFDM	25
2.3.2 Ruido en redes LAN PLC	26
2.3.3 Calidad del Servicio	27
2.3.3.1 Clasificación de paquetes	28
2.3.3.2 Manejo de Prioridad.....	28
2.4 ARQUITECTURA DE LA RED LAN BAJO EL ESTÁNDAR HOMEPLUG AV	30
2.4.1 Niveles de Protocolos	30
2.4.2 Arquitectura de Red	32
2.4.3 Limitaciones técnicas de la red PLC bajo el estándar <i>Homeplug AV</i>	34
2.4.3.1 Propagación de la señal Homeplug AV	34
2.4.3.2 Interferencia en redes PLC	35
2.5 TECNOLOGÍA VOIP EN REDES LAN PLC	36
2.5.1 Voz sobre protocolo IP	37
2.5.2 Codificación de la Voz	39
2.5.3 Ancho de banda para Voz en IP	41
2.5.4 Calidad de Voz en redes IP.....	43
2.5.4.1 Retardos	43
2.5.4.2 Pérdida de paquetes.....	44
2.5.4.3 Jitter	44
2.5.4.4 Eco.....	44
2.5.4.5 Tamaño de paquetes.....	45
3. MÉTODO.....	46
3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL	46

3.2 PLANEACIÓN DEL EXPERIMENTO	48
3.2.1 Rendimiento	48
3.2.1.1 Throughput.....	48
3.2.2.2 Jitter	49
3.2.2.3 Retardo.....	49
3.2.2.4 Pérdida de paquetes	50
3.2.2 Dispositivos y especificaciones.....	50
3.2.3 Generador de Tráfico.....	52
3.2.4 Consideraciones adicionales.....	54
3.2.5 Tamaño de la muestra.....	54
3.3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	56
3.4 DATOS REUNIDOS A PARTIR DE LA EXPERIMENTACIÓN.....	59
4. RESULTADOS	63
4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS	63
4.2 MODELO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE VARIANZA PARA THROUGHPUT	64
4.3 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA EXPERIMENTACIÓN	68
4.3.1 Supuesto de Varianza Constante	68
4.3.2 Supuesto de Normalidad	69
4.3.3 Supuesto de Independencia.....	70
4.4 MODELO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE VARIANZA PARA JITTER.....	71
4.5 MODELO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE VARIANZA PARA RETARDO	76
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
5.1 CONCLUSIONES	82
5.2 RECOMENDACIONES	84
REFERENCIAS.....	87

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Homeplug 1.0 vs. Homeplug AV	22
Tabla 2. Dispositivos Homeplug AV certificados	24
Tabla 3. Tipos de Ruido asociados a canales PLC.....	26
Tabla 4. Mapeo entre la prioridad VLAN de Usuario y la prioridad CSMA.....	29
Tabla 5. Mapeo entre la clase de aplicación y la prioridad del usuario	29
Tabla 6. Telefonía tradicional vs. VoIP	38
Tabla 7. Codecs de Banda Angosta	39
Tabla 8. Codecs de Banda Ancha	39
Tabla 9. Ancho de Banda asociado a los codecs para VoIP.....	42
Tabla 10. Retardo introducido por los algoritmos de compresión	43
Tabla 11. Especificaciones técnicas del modem TP-LINK modelo TL-PA211	51
Tabla 12. Tamaño de muestra para diseño factorial con dos (2) factores	55
Tabla 13. Parámetros para el desarrollo de las pruebas	58
Tabla 14. Muestras tomadas por Codec VoIP y cantidad de estaciones	58
Tabla 15. Matriz de diseño para Throughput (en Kbit/s)	59
Tabla 16. Matriz de diseño para Desviación Estándar del Retardo (seg.)	61
Tabla 17. Matriz de diseño para Jitter promedio (seg.).....	62
Tabla 18. Throughput - Interacción de Factores A-B	66
Tabla 19. ANOVA completo para Throughput.....	67
Tabla 20. Jitter - Interacción de Factores A-B.....	73
Tabla 21. ANOVA completo para Jitter	74
Tabla 22. Retardo - Interacción de Factores A-B.....	78
Tabla 23. ANOVA completo para Retardo	79

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Adaptador – Modem PLC	13
Figura 2. Red PLC	18
Figura 3. Tecnologías PLC de alta y baja velocidad	19
Figura 4. Operación PLC	20
Figura 5. Homeplug AV actuando como puente entre redes Ethernet	24
Figura 6. FDM vs. OFDM	25
Figura 7. Nivel de ruido en un canal PLC	27
Figura 8. Diagrama de bloques para Homeplug AV	30
Figura 9. Arquitectura de capas del Protocolo Homeplug	31
Figura 10. Arquitectura de red Homeplug AV	33
Figura 11. Atenuación de una señal PLC	35
Figura 12. Espectro acústico de la voz y la música	36
Figura 13. Red VoIP	37
Figura 14. Proceso de digitalización de Voz	40
Figura 15. Transporte de Voz en redes PLC	41
Figura 16. Trama para codec G.711	42
Figura 17. Jitter Promedio	49
Figura 18. Modem Homeplug AV marca TP-LINK modelo TL-PA211	51
Figura 19. Generador de Tráfico D-ITG	52
Figura 20. Arquitectura modular de D-ITG	53
Figura 21. Configuración de Red Homeplug AV usada en el experimento	56
Figura 22. D-ITG operando bajo esquema SENDER	57
Figura 23. D-ITG operando bajo esquema RECEIVER	57
Figura 24. Factores y Tratamientos de prueba	63
Figura 25. Valores residuales vs. Valores estimados para Throughput	69
Figura 26. Valores residuales de Throughput en gráfica de probabilidad	69
Figura 27. Valores residuales de Throughput vs. Ord. de ejecución de la prueba	70
Figura 28. Valores residuales vs. Valores estimados para Jitter	75
Figura 29. Valores residuales de Jitter en gráfica de probabilidad	75
Figura 30. Valores residuales de Jitter vs. Ord. de ejecución de la prueba	76
Figura 31. Valores residuales vs. Valores estimados para Retardo	80
Figura 32. Valores residuales de Retardo en gráfica de probabilidad	81
Figura 33. Valores residuales de Retardo vs. Ord. de ejecución de la prueba	81

GLOSARIO

BER: Acrónimo para *Bit Error Rate* (Tasa de bits erróneos). Medida de rendimiento para usada en transmisiones digitales y equivalente al número de bits erróneos dividido por el número total de bits transmitidos durante un intervalo de tiempo.

CODEC: Acrónimo para COdificador-DECodificador. Dispositivo o programa de computador capaz de codificar y decodificar un flujo de datos digitales.

HOMEPLUG AV: Especificación desarrollada por *HomePlug Powerline Alliance* y caracterizada por soportar velocidades de transmisión de hasta 200 Mbps haciendo uso de la modulación OFDM. Puede interoperar con dispositivos *Homeplug 1.0*.

JITTER: Es un cambio indeseado y abrupto de la propiedad de una señal. Esto puede afectar tanto a la amplitud como a la frecuencia y la situación de fase. En las telecomunicaciones también se denomina *jitter* a la variabilidad del tiempo de ejecución de los paquetes. Este efecto es especialmente molesto en aplicaciones multimedia en Internet como radio por Internet o telefonía IP.

OFDM: Acrónimo para *Ortogonal Frecuencia División Multiplexing* (Multiplexación por división de frecuencias ortogonales). Técnica de codificación de señales de datos sobre múltiples frecuencias portadoras y muy apropiada para uso en canales dispersivos como los usados en PLC.

PLC: Acrónimo para *Power Line Communications* (Comunicaciones por Línea de Potencia). Tecnología o grupo de tecnologías caracterizadas por hacer uso de las líneas de energía eléctrica para la transmisión de señales de datos.

QoS: Acrónimo para *Quality of Service* (Calidad del Servicio). Conjunto de técnicas de telecomunicaciones orientadas a priorizar las comunicaciones de flujos multimedia y voz sobre IP (VoIP), en una red.

RTT: Acrónimo para *Round-Trip delay Time* (Retardo de ida y vuelta). Es el tiempo que tarda un paquete de datos, enviado desde un emisor, en regresar a este mismo emisor habiendo pasado por el receptor de destino.

THROUGHPUT: En redes datos, es la tasa promedio de paquetes exitosos entregados sobre un canal de comunicación. Usualmente se mide en bits por segundo (bit/s ó bps).

VOIP: Conjunto de mecanismos que hacen posible que la señal de voz viaje a través de las redes de datos empleando el protocolo de internet (IP).

MODELO EMPÍRICO QUE PERMITE EVALUAR EL RENDIMIENTO DE LA RED LAN BASADA EN EL ESTÁNDAR HOMEPLUG AV PARA LA TRANSMISIÓN DE VOZ SOBRE EL PROTOCOLO IP

Gerardo Granados Acuña (Autor)
Juan Carlos Vesga Ferreira (Director)

Línea de investigación en Telemática
Grupo de Tecnologías de la Información (GTI)

RESUMEN

La presente tesis de investigación plantea el desarrollo de un modelo experimental para evaluar el rendimiento de una red LAN operando con el estándar *Homeplug AV* y para la transmisión de VoIP.

Para el desarrollo del modelo empírico se plantearon escenarios de prueba considerando el uso de 1,2,5 y 10 estaciones en una red LAN intercambiando paquetes de información tipo VoIP. En las pruebas se utilizó el software generador de tráfico *Distributed Internet Traffic Generator* (D-ITG) versión 2.61 y se emplearon adaptadores *Homeplug* marca TP-LINK modelo TL-PA211. Se generó tráfico tipo aleatorio para los codecs de audio más representativos (G711, G723.1, G729) y se registraron datos de los siguientes parámetros de rendimiento: *throughput*, *jitter*, retardo y porcentaje de paquetes perdidos.

La investigación realizada permitió obtener un modelo estadístico de evaluación del comportamiento de la red eléctrica para la transmisión digital de información de voz (tráfico VoIP), teniendo en cuenta la cantidad de equipos (A) y los codecs usados (B) en una red LAN, operando bajo el estándar *Homeplug AV*.

Dentro de las conclusiones obtenidas a partir de la presente investigación se destaca que con respecto al parámetro pérdida de paquetes, en la totalidad de las mediciones realizadas se obtuvo un valor igual a cero (0). Con relación al *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.

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 y los efectos de la interacción AB no influyen estadísticamente en el modelo planteado. Para el Retardo se encontró que únicamente el número de estaciones (B) tiene un efecto estadísticamente significativo.

Palabras clave: Homeplug, Powerline communications, Análisis de Varianza, Modelo estadístico, Canal PLC, VoIP, Diseño experimental

INTRODUCCIÓN

El área de las telecomunicaciones representa uno de los aspectos que mayor impacto ha generado y aportado para la evolución de la sociedad, ya que gracias a los innumerables desarrollos en plataformas de comunicación, dispositivos y programación, se ha logrado optimizar y potenciar el uso de los medios de transmisión tanto cableados como inalámbricos.

Uno de los medios de comunicación que hasta hace unas décadas no se había comenzado a explotar a plenitud son las líneas de potencia eléctrica, cuya función primaria ha sido la del transporte de electricidad (Anatory, J. & Theethayi, 2010).

Las líneas de potencia, debido a sus características particulares y a los avances en tecnologías de comunicaciones, hoy representan un importante nicho de desarrollo para el transporte de información, debido a tecnologías emergentes como PLC (*Power Line Communications* / Comunicaciones por línea de potencia).

La tecnología PLC a pesar de llevar varias décadas de desarrollo e innovación a nivel mundial, no ha penetrado fuertemente en el contexto nacional debido, entre otras causas, al bajo conocimiento de los estándares, a la muy reducida oferta de equipos y productos asociados, al auge de otras tecnologías cableadas como Ethernet e inalámbricas como WiFi, y al escepticismo latente en el personal que implementa redes de comunicaciones y redes de datos (Toledo, 2005).

No obstante lo anterior, PLC se constituye en una tecnología de gran ayuda en escenarios donde se deseen implementar plataformas de comunicaciones de datos de baja cobertura que no impliquen cableado adicional, que aprovechen el uso de la red eléctrica existente facilitando una rápida instalación, y que no se vean afectadas por interferencias electromagnéticas u obstáculos locativos como paredes y muros. Además, en consideración con la contaminación electromagnética producida por las redes y tecnologías inalámbricas (WiFi, Zigbee, Bluetooth, etc.) (Trujillo, 2004) en entornos residenciales y corporativos, PLC es una alternativa que propende por la reducción de las fuentes contaminantes de tipo electromagnético.

La utilización de la red de potencia como medio de transmisión, otorga la posibilidad de desarrollar redes de comunicaciones de datos con bajos presupuestos, lo que permite obtener beneficios a partir de la infraestructura del cableado eléctrico existente. Con ello se aprovecha la cobertura de la red eléctrica al permitir conectar dispositivos de usuario final en cualquier tomacorriente

mediante el uso de un adaptador ó modem PLC (Figura 1). (Granados A. & Vesga F., 2012a)

Figura 1. Adaptador – Modem PLC



Fuente: <http://us.hardware.info/productinfo/33178/belkin>

La mayoría de planes del gobierno nacional y departamental de Colombia, contemplan el establecimiento y fortalecimiento de políticas públicas encaminadas a la difusión de la conectividad. Uno de los programas relevantes es el Plan Nacional de TICs donde se buscan fortalecer los procesos de conectividad en las organizaciones y favorecer las oportunidades de acceso a tecnologías de punta como PLC (Ministerio de las Tecnologías de la información y comunicaciones de Colombia, 2008).

El Plan Vive Digital, en su numeral 8.1.5 destaca la importancia de establecer estándares de conectividad para entornos residenciales y empresariales *“Actualmente, la prestación de servicios de telecomunicaciones para hogares y MiPyMEs se encuentra limitada por las dificultades para desplegar infraestructura de conectividad al interior de construcciones residenciales y comerciales. Hace falta estandarización y normatividad que facilite el despliegue de infraestructura al interior de las viviendas y edificaciones”* (Ministerio de las Tecnologías de la información y comunicaciones de Colombia, 2011). Bajo la premisa anterior, PLC se convierte en una importante alternativa para cumplir con el objetivo mencionado.

Por otra parte, el país presenta un atraso considerable con respecto al desarrollo de redes de alta velocidad, además de que carece de un marco regulatorio que promueva el desarrollo del sector de las telecomunicaciones (Departamento Nacional de Planeación, 2010). A nivel departamental, se aboga por la masificación de la banda ancha en hogares y empresas y según lo establece el Plan de Desarrollo Santander en serio *“la expansión de la banda ancha, con la finalidad de permitir mayor tráfico de información en las redes de datos y la masificación de los dispositivos electrónicos, es determinante para el avance de la industria de Contenidos Digitales”* (Gobernación de Santander, 2012).

La tecnología PLC es muy apropiada para alcanzar la convergencia en redes de área local como se establece en el documento Visión Colombia 2019 *“El sector de las telecomunicaciones deberá contribuir a consolidar una sociedad informada, conectada e integrada al entorno global, para lo cual deberá incorporar continuamente los últimos desarrollos tecnológicos, particularmente adecuarse a la convergencia de redes, terminales y servicios”* (Departamento Nacional de Planeación, 2005).

Con base en los argumentos precedentes, la implementación de una tecnología como PLC en un país en vías de desarrollo como Colombia, se convierte en un reto y la vez en una importante alternativa para la expansión de redes LAN en hogares y empresas donde se cuenten con las condiciones eléctricas adecuadas, se desee evitar cableado adicional, reducir costos y obtener los beneficios de banda ancha. Por ello, es necesario desarrollar estudios que permitan establecer la viabilidad de la tecnología PLC en el país, tomando como base la implementación de estándares de aceptación y reconocimiento a nivel mundial como *Homeplug AV*.

Además se debe resaltar que, aunque el país cuenta con el Código Eléctrico Colombiano (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC, 1998), en diversos sitios de la geografía nacional éste no se aplica correctamente, tanto a nivel de redes domiciliarias como empresariales, lo cual ocasiona que las redes eléctricas presenten altos niveles de ruido y se afecte notoriamente la implementación de redes de datos bajo PLC.

Una vez se implementa una red PLC bajo el estándar *Homeplug AV*, se genera múltiple tráfico en banda ancha proveniente de las aplicaciones de audio y video. Con referencia a las aplicaciones de audio, y en especial los sistemas de voz sobre IP, debido a sus exigencias de calidad del servicio, pueden generar consecuencias frustrantes para los usuarios finales si no operan adecuadamente y bajo condiciones óptimas de rendimiento.

Considerando la situación problemática anteriormente expuesta, el objetivo principal de la presente investigación se enfoca en el desarrollo de un modelo empírico, que permita evaluar el rendimiento de una red LAN operando bajo el estándar *Homeplug AV* para la transmisión de voz sobre el protocolo IP, partiendo de los múltiples resultados obtenidos experimentalmente mediante el uso de adaptadores PLC y equipos VoIP, con base en las configuraciones de la red de acceso y las condiciones de la red de potencia.

Por lo tanto, ésta investigación se constituye en un aspecto relevante dentro de la tecnología PLC teniendo en cuenta que, aunque mundialmente existe un buen acervo documental relacionado con la aplicación del estándar *Homeplug AV*, no se encuentran estudios específicos sobre el rendimiento del estándar con respecto al

tráfico de VoIP ni su impacto en redes de área local tanto residenciales como empresariales.

Asimismo, con respecto a las condiciones de la red eléctrica Colombiana, únicamente se ha presentado un estudio relacionado con el establecimiento de un modelo matemático para la predicción del *throughput* en una red LAN operando bajo *Homeplug* 1.0, desarrollado por el Director de la presente tesis y en el cual tuve la oportunidad de participar. (Granados A. & Vesga F., 2012b)

Desde el surgimiento de la tecnología PLC y su inclusión en las redes de datos, múltiples instituciones de carácter empresarial, académico y comercial se han dedicado al estudio, evaluación y planeación de aplicaciones, aunque en su mayoría centradas en entornos de control domótico y no en redes de datos y es allí donde surge la pregunta de investigación:

¿ Se puede desarrollar un modelo de evaluación del rendimiento en redes LAN soportadas bajo el uso del estándar *Homeplug* AV para optimizar el uso de VoIP en la red ?.

La hipótesis establecida ante la pregunta de investigación indica que, debido a que el tráfico VoIP sobre una red de telecomunicaciones es de tipo *Poisson*, puede ser modelado matemáticamente y, mediante campañas de muestreo, realizadas en escenarios reales acordes a las condiciones de la red eléctrica colombiana, se puede obtener un modelo empírico con base en el comportamiento de los parámetros del rendimiento considerados específicamente para el tráfico de voz (*throughput*, *jitter*, retardo y porcentaje de paquetes perdidos).

Con base en el modelo desarrollado, se logrará evaluar el comportamiento de la red eléctrica para la transmisión de información de voz teniendo en cuenta la cantidad de equipos y los codecs usados en una red LAN corporativa u residencial.

Por lo tanto, la investigación planteada en el presente documento de tesis, tiene por objetivo general “Elaborar el modelo empírico que permite evaluar el rendimiento de la red LAN basada en el estándar *Homeplug* AV para la transmisión de voz sobre el protocolo IP” y como objetivos específicos se relacionan los siguientes:

- Reunir la información del estado del arte relacionado con el estándar HOME PLUG AV y su utilización para la transmisión de voz en redes LAN mediante protocolo IP.

- Plantear el diseño experimental requerido para hacer la evaluación del rendimiento de la red LAN basada en el estándar *Homeplug AV* para la transmisión de voz sobre el protocolo IP.
- Desarrollar los experimentos propuestos, realizar los muestreos y la captura de datos utilizando los dispositivos de transmisión que operan bajo el estándar HOMEPLUG AV.
- Utilizar las técnicas de análisis estadístico para obtener el modelo empírico coherente con los datos obtenidos y que permite simular el rendimiento de la red LAN basada en el estándar *Homeplug AV* para la transmisión de voz sobre el protocolo IP.
- Realizar la evaluación del modelo obtenido para verificar su consistencia con los datos resultantes de los experimentos.

La estructura del documento de tesis incluye, además del presente capítulo introductorio, cuatro capítulos donde se consideran en detalle cada uno de los aspectos tenidos en cuenta para la investigación.

En el capítulo dos se presentan los referentes documentales necesarios y pertinentes para el estudio de tecnología de transmisión de datos en redes eléctricas. Se abordan temas como el estándar *Homeplug AV*, el análisis del ruido como factor influyente en redes tipo PLC, la arquitectura y las limitaciones técnicas asociadas las redes LAN PLC y los esquemas de transmisión de voz usados en redes PLC.

El capítulo tres se enfoca en el proceso investigativo y para ello se hace una descripción detallada método utilizado, la planeación y las técnicas de diseño experimental tenidas en cuenta, el desarrollo del experimento junto con los recursos y escenarios para las pruebas; la toma de datos y los resultados del experimento.

Todo lo referente al modelo construido se expone en el capítulo cuatro. Para ello se desarrolla del análisis de resultados a partir de la toma de datos del capítulo tres. Se presenta el modelo obtenido con base en el análisis de varianza y se hace una evaluación del mismo a partir los supuestos del modelo como son normalidad, varianza constante e independencia.

Finalmente, se incluye el capítulo cinco orientado a establecer los elementos de discusión generados por el modelo, los hallazgos y las conclusiones derivadas del proceso investigativo y todo lo relacionado con respecto a recomendaciones para trabajos futuros en la presente línea de investigación.

2. MARCO REFERENCIAL

La información considerada como relevante para la presente investigación comprende múltiples documentos en diversos formatos, seleccionados a partir de fuentes actualizadas en el área de las telecomunicaciones como IEEE, PROQUEST, EBSCOHOST, *Research Gate*, ACM DL, SCOPUS, UNIRED y *Google Scholar* entre otras.

2.1 TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN EN REDES ELÉCTRICAS

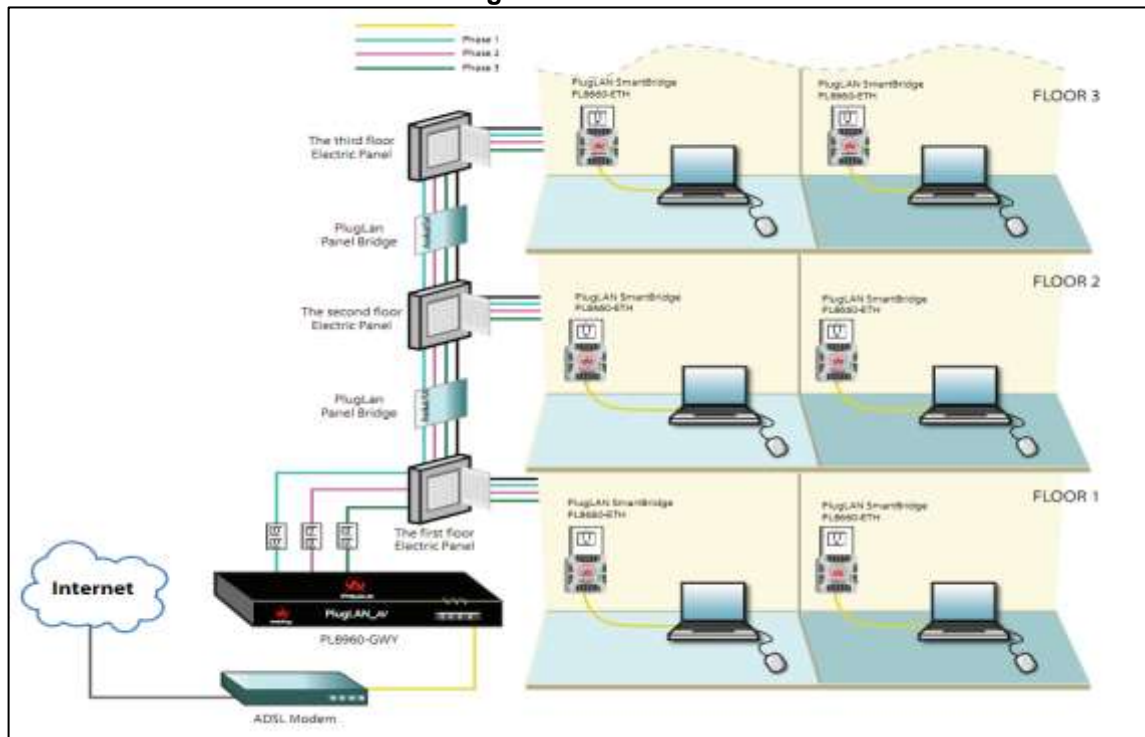
La distribución de contenido multimedia, al interior de hogares y oficinas, sigue siendo un desafío, sobre todo para los sitios que no se encuentran equipados con cableado especializado en apoyo de la alta velocidad de datos y comunicaciones multimedia (banda ancha). La reconversión de los edificios con cableado nuevo es muy costosa y las soluciones inalámbricas no proporcionan de forma fiable cobertura "toda la casa" para aplicaciones multimedia. Ante lo anterior, se presenta la necesidad de una nueva tecnología denominada *Comunicaciones por línea de potencia* que permite la "conectividad ubicua" dentro del hogar (Haniph A. Latchman, Srinivas Katar, Larry Yonge, 2013, p.24).

El uso de las redes eléctricas (o redes de potencia) para propósitos de comunicación es conocido internacionalmente como PLC (*Power line communications*) y ha evolucionado como una alternativa flexible para comunicaciones de banda ancha en hogares y oficinas (Figura 2). La ventaja de PLC radica en que durante la implementación se asegura una reducción de los costos operacionales debido al aprovechamiento de las redes eléctricas como medio de transporte y a que cada tomacorriente se convierte en un punto de acceso a la red.

2.1.1 Tecnologías PLC

La tecnología PLC es también conocida como *Power Line Carrier* (portador sobre línea de potencia), *Power line digital subscriber line* PDSL (línea de suscriptor digital por línea de potencia), *Power line networking* (red sobre línea de potencia) y *Broadband over power lines* BPL (Banda ancha sobre líneas de potencia).

Figura 2. Red PLC



Fuente: <http://asokatech.com/pluglan-page>

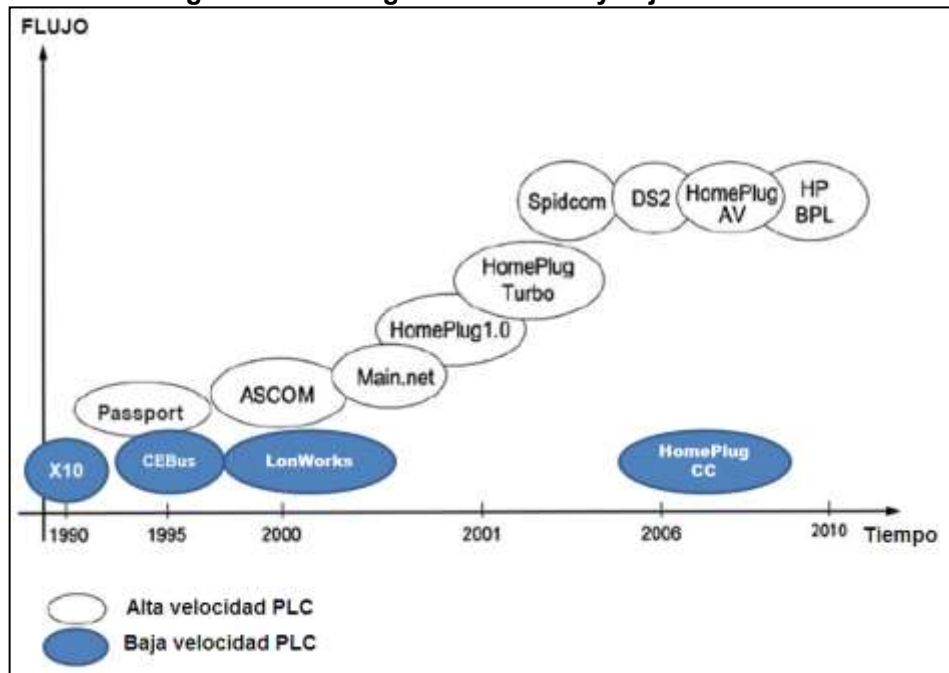
PLC ha venido usándose por parte de las empresas proveedoras de electricidad para propósitos de medición, tareas de control y para comunicaciones internas entre aplicaciones software y equipos eléctricos.

Además, se han desarrollado diversas variantes de la tecnología PLC a lo largo del tiempo y con bajas velocidades de transporte de datos (hasta 100 Kbps); algunas de ellas descritas a continuación (Figura 3):

- **X10**, por ejemplo, es una tecnología PLC que se utiliza para automatizar hogares y se encuentra en el mercado desde 1978 (Tanenbaum & Wheteral, 2011).
- **CAN-bus** es un sistema desarrollado para proveer funciones de comunicación de datos dentro del cableado eléctrico de un vehículo.
- **CeBus** (*Consumer Electronics Bus*) es un conjunto de estándares y protocolos de comunicación para que los dispositivos electrónicos transmitan comandos y datos. Es apropiado para comunicar dispositivos en hogares y oficinas. También es útil para elaborar interfaces de comunicaciones en la industria ligera.

- **Lonworks** (*local operation network*) es una plataforma de red diseñada especialmente para cubrir las necesidades de sistemas de control y automatización de edificios (ventilación, iluminación, vigilancia, etc.). Opera principalmente sobre cableado UTP, fibra óptica y líneas de potencia (Trujillo, 2004).

Figura 3. Tecnologías PLC de alta y baja velocidad



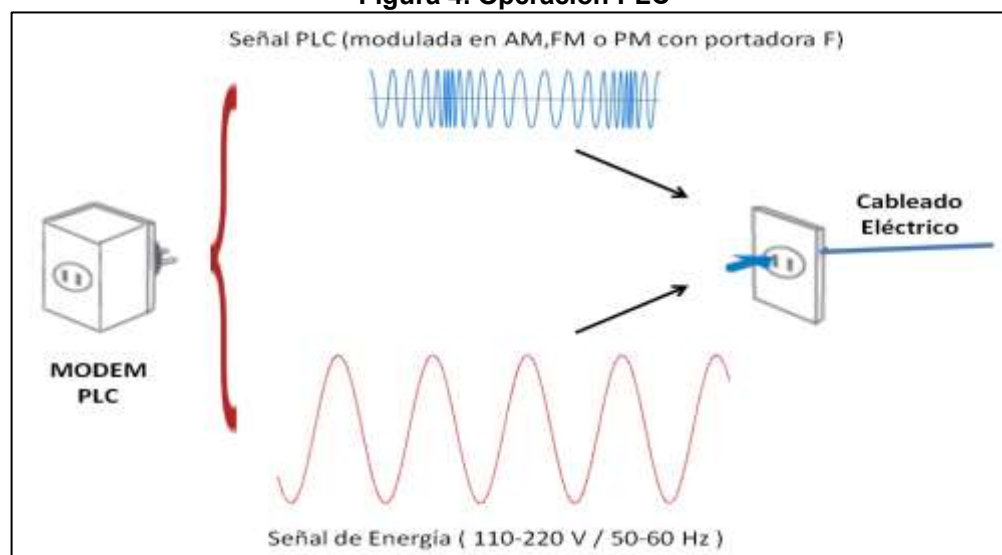
Fuente: CARCELLE, Xavier. Power Line Communications in practice. Pág. 21

Con respecto a la evolución de la tecnología PLC para operación a altas velocidades de transmisión, se ha desarrollado el estándar emergente *Homeplug* que será analizado en detalle en el ítem 2.2 (Pag. 21).

2.1.2 Fundamentos de operación de la tecnología PLC

El principio básico de operación de la tecnología PLC radica en el transporte de información usando la red eléctrica como medio de transmisión. Con el fin de transportar la señal PLC en este medio, la frecuencia de línea (por ejemplo 110V / 60Hz) del circuito eléctrico es complementada por una señal modulada de baja amplitud alrededor de una frecuencia portadora F (Figura 4).

Figura 4. Operación PLC



Fuente: Autor

La capa física consiste entonces en una señal modulada de baja amplitud, transportada en el cableado eléctrico a una frecuencia determinada por la tecnología PLC empleada, en concordancia con la normatividad vigente.

La tecnología PLC es apropiada para implementar en aquellos sitios donde, por razones de infraestructura y de costos, no se disponen de otras opciones de conexión. Este tipo de circunstancia aplica especialmente en zonas rurales, regiones apartadas y núcleos poblacionales con escasos recursos. Allí perfectamente se podría aplicar la premisa que donde llegue la electricidad también llega la banda ancha.

Con la transmisión de datos a alta velocidad en todos los tomacorrientes eléctricos de una residencia u oficina, existe el potencial de interconectar cualquier tipo de dispositivos de datos (computadores, impresoras, teléfonos y cámaras IP, etc.) junto con dispositivos eléctricos (nevera, cafeteras, alarmas, interruptores de luces, etc.) generando con ello un entorno de comunicación altamente inteligente y donde la domótica se torna más pragmática.

Las ventajas de PLC radican principalmente en los siguientes argumentos:

- Es una tecnología económica ya que los modem PLC tienen precios muy similares a las tarjetas de red reconocidas y no se requiere la instalación de cables adicionales.
- Haciendo uso del cableado eléctrico existente se pueden interconectar la totalidad de dispositivos de comunicación presentes (computadores, teléfonos, TVs, cámaras, alarmas, etc.) eliminando la necesidad de cableados adicionales

(cableado telefónico, cableado de red, cableado coaxial, cableado de sonido ambiental, cableado para alarmas y sensores, etc.).

- Cada espacio o cuarto de una oficina u residencia, posee una o varias tomas eléctricas que se constituyen en puntos de acceso a la red.
- Es una tecnología de fácil instalación y configuración.
- Una impresora o cualquier otro dispositivo que no necesite estar directamente conectado a un computador, simplemente se ubica próximo a la toma eléctrica más cercana.
- No requiere la instalación de tarjetas adicionales en los dispositivos de datos (PCs, portátiles, impresoras, etc.).

No obstante lo anterior, también es importante tener en cuenta que existen varios aspectos de la tecnología PLC que hacen que sea difícil compartir recursos de manera justa. El canal PLC es selectivo en frecuencia y variante con el tiempo, y presenta una notable variación entre ubicaciones, de acuerdo con la topología de red, el tipo de cables usados y las cargas conectadas (Piñero, Cortés, Cañete, & Manzanera-Lopez, 2011).

Por último, es importante destacar que PLC es muy apropiado para aplicaciones *Smart Energy* (energía inteligente). Dado que la energía es eléctrica por naturaleza, los dispositivos PLC conectados a las líneas eléctricas son los candidatos ideales para aplicaciones de monitoreo *Smart Grid*, control y optimización computacional. Por esta razón, se define una tendencia futura en la cual los electrodomésticos, medidores y otros dispositivos eléctricos y de datos contarán con un dispositivo *Smart Energy* PLC embebido que facilitará el monitoreo del consumo y el desarrollo del hogar inteligente (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2011).

2.2 TECNOLOGÍA PLC BAJO EL ESTÁNDAR HOMEPLUG AV

Homeplug Powerline Alliance (Homeplug, n.d.) es una organización industrial que actualmente agrupa más de 70 compañías especializadas en la operación de infraestructuras de telecomunicaciones. Fue constituida en el año 2000 con la finalidad de desarrollar y definir especificaciones para la tecnología de redes de área local en entornos empresariales y residenciales, mediante el uso de las líneas de potencia como canal de transmisión.

2.2.1 Evolución y normalización del estándar Homeplug

La primera versión del estándar *Homeplug*, denominada *Homeplug 1.0*, se presentó en junio del 2001 y se caracterizaba por operar con velocidades de transmisión de hasta 14 Mbit/s (Homeplug Powerline Alliance, 2001).

A comienzos de Julio del 2005, se estableció una segunda versión del estándar, denominada *Homeplug AV* (Homeplug Powerline Alliance, 2005). El sistema *Homeplug AV* soporta velocidades de transmisión de hasta 200Mbit/s, utiliza la técnica de modulación por división de frecuencias ortogonales (OFDM / *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) sobre un ancho de banda que oscila entre los 1.8-30 MHz. La modulación OFDM es particularmente útil para emplear en canales dispersivos como los presentes en la tecnología PLC (Ver Tabla 1).

Mientras que *Homeplug 1.0* fue diseñado principalmente para el acceso y distribución de internet, el estándar *Homeplug AV* se destaca por un enfoque orientado a la distribución de contenido multimedia (datos/audio/video) usando líneas de potencia (Afkhamie, Katar, Yonge, & Newman, 2005).

Tabla 1. Homeplug 1.0 vs. Homeplug AV

Característica	Homeplug 1.0	Homeplug AV
Velocidad de Transmisión	14 Mbit/s	200 Mbit/s
Throughput (max)	8 Mbps	120 Mbps
Throughput (Típico)	4-6 Mbps	50-70 Mbps
Ancho de Banda	4-21 MHz	2-30 MHz
Acceso al canal (QoS)	CSMA, CA(4)	TDMA, CSMA(8)
Modulación	DQPSK (OFDM)	1024-QAM (OFDM)
Aplicaciones	Datos	Datos, VoIP, Telefonía, HDTV, Teatro casero

Fuente: Autor

Dentro del amplio espectro de tecnologías disponibles para redes LAN, *Homeplug AV* es una de las varias opciones junto con los estándares WiFi (los cuales tienen la obvia ventaja de la movilidad), las redes Ethernet (ampliamente difundidas) y otros sistemas en evolución como los estándares MoCA (LAN sobre cable coaxial) y UWB (*Ultrawideband* / Banda ultra ancha) para altas velocidades de datos usando comunicaciones de corto alcance.

Aunque las tecnologías mencionadas proporcionan la infraestructura necesaria para implementar comunicaciones multimedia, un minucioso análisis puede revelar algunas de sus deficiencias. Por ejemplo, los protocolos IEEE 802.x no proporcionan un completo cubrimiento en las áreas residenciales y empresariales (con un único *Access Point*). Igualmente el estándar UWB, aunque que opera a un adecuado ancho de banda, su alcance no se extiende más allá de un simple cuarto debido a su limitada cobertura. El estándar MoCA, a pesar de ser una excelente solución para distribución de video en todos los puntos donde exista

una salida coaxial, no ofrece una amplia cobertura para otras aplicaciones como audio y VoIP dado que el cableado es usualmente limitado.

En el año 2005, la *IEEE Communications Society* (IEEE, n.d.) patrocinó el proyecto IEEE P1901 para definir un estándar IEEE global para sistemas PLC de alta velocidad. Varias propuestas provenientes de Europa, Asia y las Américas, originadas a partir de grupos de investigación y desarrollo, así como fabricantes de equipos PLC, fueron tenidas en cuenta. En el 2007, casi simultáneo a la liberación de la versión *HomePlug AV 1.1*, el grupo de trabajo IEEE 1901 seleccionó una propuesta consolidada tanto por *Homeplug Powerline Alliance* (Homeplug, n.d.) y *HD-PLC Alliance* (“HD-PLC Alliance,” n.d.). La propuesta final caracteriza tres (3) áreas de tecnología o *clusters* denominados: *In-Home cluster*, *Access cluster* y *Coexistency cluster*. El estándar IEEE 1901 fue publicado en diciembre del 2010 (IEEE, 2010).

Mientras que *Homeplug AV* y el nuevo estándar IEEE 1901 han contemplado y la coexistencia con sistemas de acceso PLC, los esfuerzos para desarrollar sistemas de acceso PLC se encuentran en etapas tempranas, y aunque la tecnología está disponible y es técnicamente viable, se han presentado múltiples experiencias fallidas comercialmente de sistemas de acceso a internet basadas en PLC, tanto en Europa como en Estados Unidos (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2011). Sin embargo, las tecnologías emergentes *Smart Grid* y *Smart Energy* promueven y orientan los nuevos desarrollos en ésta área para un futuro cercano (Ekanayake, Jenkins, & Liyanage, 2012).

2.2.2 Prestaciones del estándar Homeplug AV

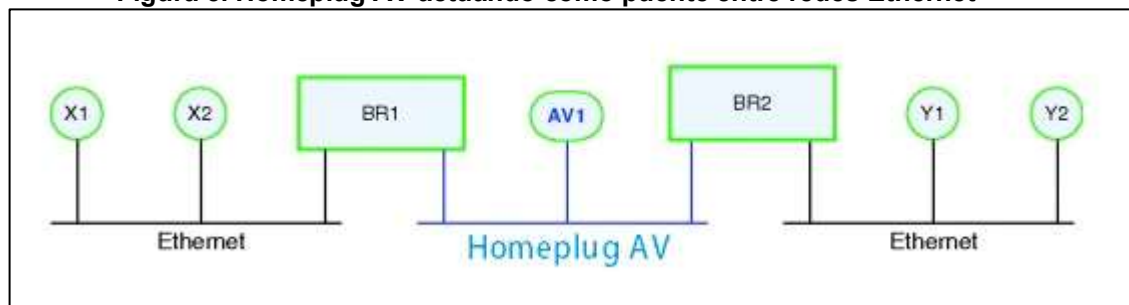
Un elemento relevante para la tecnología *Homeplug AV*, es su coexistencia con dispositivos *Homeplug 1.0* y con equipos que proveen acceso banda ancha sobre líneas de potencia de medio y bajo voltaje. Además, debido a su amplia difusión, los dispositivos *Homeplug AV* ya operan en configuraciones híbridas que facilitan la interconexión entre redes PLC y redes inalámbricas (*Homeplug Powerline Alliance*, 2009).

Los nodos *Homeplug AV* se comunican mediante transmisiones basadas en tramas (*frames*). Cada trama está compuesta de un preámbulo, un *frame* de control (FC) y una carga útil. El preámbulo se inserta al comienzo de cada trama y es común a todos los nodos *Homeplug AV* en la red. El FC maneja la información relacionada con los parámetros concretos adoptados para la transmisión de datos. La carga útil consta de los datos que se desean transmitir (Altolini, Benvenuto, Pupolin, & Riva, 2012).

Es importante resaltar que *Homeplug AV* soporta varias características claves que lo hacen particularmente atractivo frente a las demás tecnologías PLC existentes. Estas características se orientan principalmente en dos aspectos:

- **Estimación del Canal:** *Homeplug AV* permite medir las características del canal eléctrico para adaptarlas a la operación de la capa Física (PHY) de tal manera que se alcance un óptimo desempeño (ver Figura 8). La estimación del canal comprende la selección del método de modulación a usar en cada portadora y la selección de la tasa de corrección de errores (FEC / *Forward Error Correction*).

Figura 5. Homeplug AV actuando como puente entre redes Ethernet



Fuente: Autor

- **Facilidad de puenteo (*bridging*) con otras redes:** *Homeplug AV* permite comunicar redes tipo Ethernet y hacer de puente de tráfico de paquetes entre estas redes (ver Figura 5). Esto es una útil consecuencia debido a que la gran mayoría de productos *Homeplug AV* tienen con una interface tipo Ethernet.

La difusión de la tecnología PLC ha generado una amplia variedad de categorías de productos que cumplen con la especificación *Homeplug AV* (Tabla 2) y que se comercializan en todo el mundo gracias a al aval que otorga la certificación. *Homeplug* (Held, 2006)

Tabla 2. Dispositivos Homeplug AV certificados

	Enrutadores
	Puentes
	Adaptadores (PLC a USB)
	Adaptadores (PLC a Ethernet)
	Puntos de Acceso Inalámbricos
	Cámaras de Seguridad
	PCs con Homeplug integrado
	Extremos de audio y altavoces
	Teléfonos VoIP con Homeplug integrado

Fuente: Autor

2.3 ELEMENTOS RELEVANTES A LAS TECNOLOGIAS PLC – HOMEPLUG AV

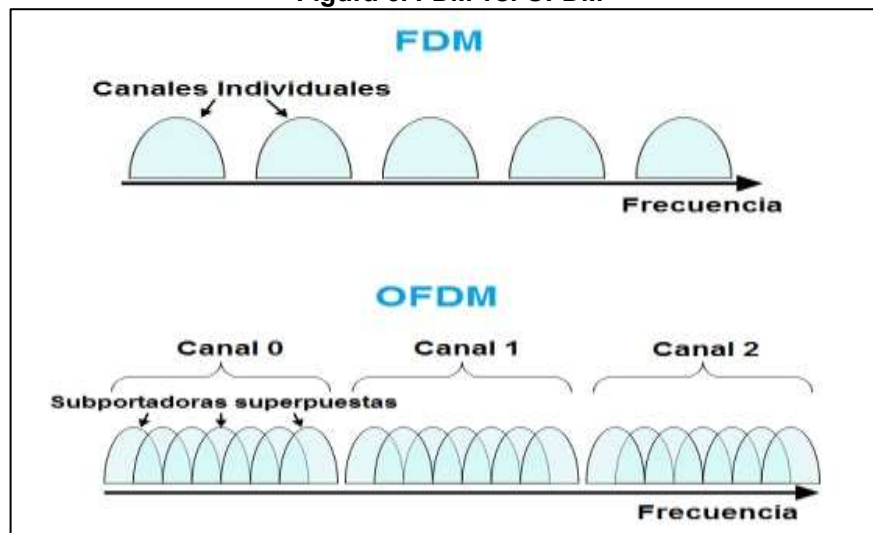
Teniendo en cuenta la cobertura del presente proyecto de investigación, es recomendable incluir algunos referentes temáticos adicionales, así como su correspondiente estado del arte. Los temas a abordar en este ítem son respectivamente: modulación OFDM, ruido en redes PLC y calidad del servicio.

2.3.1 Modulación OFDM

El estándar *Homeplug AV*, para transportar la información sobre las redes eléctricas, utiliza la técnica de modulación por división de frecuencias ortogonales (OFDM / *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) la cual, como su nombre lo indica, se basa en la multiplexación por división de frecuencias (FDM).

FDM representa una tecnología que habilita la transmisión simultánea de múltiples señales sobre un enlace de transmisión como cable coaxial, sistema inalámbrico o línea eléctrica (PLC) y allí cada señal se ubica sobre único canal o frecuencia (Figura 6).

Figura 6. FDM vs. OFDM



Fuente: Autor

Mediante OFDM, un gran número de subportadoras es utilizado y estas portadoras son espaciadas de manera precisa para crear múltiples canales, lo cual provee el factor de “ortogonalidad” asociado al término, y previene que los demoduladores vean frecuencias que no sean las suyas. Considerando lo anterior, OFDM es más

eficiente espectralmente y puede espaciar las frecuencias bastante más cerca hasta casi superponerlas (Held, 2006).

Para obtener un mejor rendimiento en el sistema OFDM se utilizan técnicas de estimación del canal. *Homeplug AV* proporciona un tipo especial de trama llamada “trama de sondeo” cuya carga útil consiste de varios símbolos OFDM, conocidos en ambos extremos de un enlace, y utilizados para realizar estimación de las características del canal. El uso de éstas tramas incide directamente en el rendimiento de la red y específicamente en la tasa de datos útiles transportado (*throughput*) ya que varios símbolos OFDM no transportan información útil (Altolini et al., 2012).

2.3.2 Ruido en redes LAN PLC

De acuerdo con la literatura analizada, comúnmente se encuentra que, sin la debida protección electromagnética las líneas eléctricas son sensibles a los ruidos externos generados por múltiples dispositivos de radiofrecuencia y equipos electromecánicos, lo cual ocasiona diversos problemas de interferencia electromagnética. El ruido en los sistemas PLC puede ser clasificado en cuatro clases: ruido de fondo, ruido de banda estrecha, ruido impulsivo y ruido armónico (Anatory, J. & Theethayi, 2010) (ver Tabla 3).

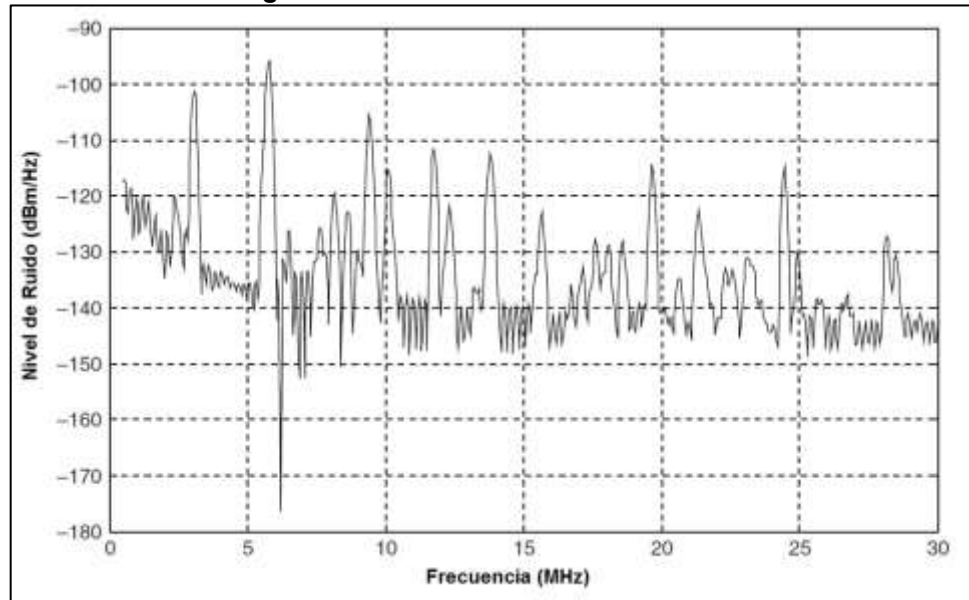
Tabla 3. Tipos de Ruido asociados a canales PLC

Tipo de Ruido	Descripción
Ruido de fondo	Es la sumatoria de varias fuentes de ruido de baja potencia.
Ruido de banda estrecha	Caracterizado por señales de amplitud modulada causadas por la inducción de señales de radio en las bandas media y de onda corta.
Ruido impulsivo	Causado por transitorios debido a fenómenos de iluminación o interruptores dentro de la red eléctrica.
Ruido armónico	Compuesto de múltiples frecuencias utilizadas por equipos eléctricos conectados a la red y que son múltiplos de la frecuencia de la línea (50 / 60 Hz).

Fuente: Autor

La densidad de potencia espectral para el ruido de fondo está alrededor de -145 dBm/Hz y esto es casi 30dB por encima del ruido térmico del piso. El ruido impulsivo tiene una amplitud máxima de 40 dBm/Hz y es bastante más alto que los ruidos de fondo y banda estrecha. Estas conclusiones se basan en el modelo de ruido desarrollado por Walter Y. Chen (Chen, 2004), el cual fue obtenido a partir de mediciones de un típico canal residencial. En la Figura 7 se aprecia el registro de un ruido típico en una red PLC.

Figura 7. Nivel de ruido en un canal PLC



Fuente: Autor

Adicional al ruido en la línea de potencia, los equipos conectados a la red eléctrica, o desconectados pero localizados en proximidad al cableado, crean un nivel perceptible de perturbaciones en el canal de transmisión. Este complejo asunto técnico es conocido como compatibilidad electromagnética (EMC). Desde el punto de vista de la EMC, cada dispositivo alimentado eléctricamente genera perturbaciones eléctricas, las cuales pueden ser conductivas (transportadas en el cableado eléctrico) o inductivas (emitidas en el entorno de radio del dispositivo).

Numerosos grupos de trabajo tanto en Europa (Cenélec) como internacionalmente (Comisión Electrotécnica Internacional) han establecido normas que especifican los límites autorizados para las perturbaciones producidas por cada categoría de equipo eléctrico, incluyendo los equipos PLC. Además, las organizaciones que desarrollan estándares de telecomunicaciones en Europa (ETSI) e internacionalmente (UIT) están estudiando los umbrales de perturbación con el fin de optimizar el canal de transmisión, y técnicas de procesamiento de señales para obtener el mejor desempeño de PLC. La IEEE también ha venido trabajando en estos aspectos para optimizar la capa física del modelo OSI (Carcelle, 2006).

2.3.3 Calidad del Servicio

Homeplug AV está diseñado para soportar varios tipos de aplicaciones multimedia dentro de las redes residenciales y de pequeñas oficinas. Por esta razón es crítico que las estaciones de *Homeplug AV* sean capaces de identificar el tipo de aplicación y le provean con la calidad del servicio (QoS / *Quality of Service*) requerido.

La calidad del servicio es un elemento esencial para la transmisión de datos en aplicaciones que operan en tiempo real, como en el caso de voz y video, y por lo general implica que la red funcione bajo unos parámetros estándar (ancho de banda garantizado, latencia, *jitter*, tasa de paquetes erróneos, etc.) y en unos niveles establecidos de acuerdo con el tipo de tráfico (Haniph A. Latchman, Srinivas Katar, Larry Yonge, 2013).

Para el caso de las aplicaciones de VoIP, usualmente se requiere muy baja latencia pero hay bastante tolerancia con respecto a la pérdida de paquetes. Las aplicaciones de video, por otra parte, requieren un ancho de banda garantizado así como una baja pérdida de paquetes. Finalmente, las aplicaciones de navegación web son muy tolerantes a variaciones en ancho de banda y latencia.

2.3.3.1 Clasificación de paquetes

La función de clasificación de paquetes en *Homeplug AV* es una parte de la capa de Convergencia (CL) y es responsable de procesar las tramas Ethernet (MSDUs / *MAC Service Data Unit*) que vienen del host y mapearlas en varias colas de transmisión o enlaces de acuerdo con los requerimientos de calidad del servicio. Esta función se realiza con base en varios campos de clasificación del paquete que vienen en la trama y que son los siguientes:

- Dirección origen Ethernet, dirección destino Ethernet, etiquetado VLAN
- Tipo de servicio IPv4, protocolo IPv4, dirección origen IPV4, dirección destino IPv4
- Clase de tráfico IPv6, etiqueta de flujo IPv6, dirección origen IPV6, dirección destino IPv6
- Puerto origen TCP, puerto destino TCP
- Puerto origen UDP, puerto destino UDP

Se requiere que todas las estaciones *Homeplug AV* soporten clasificación de paquetes con base en la dirección origen Ethernet, dirección destino Ethernet y etiquetado VLAN (LAN virtual). *Homeplug AV* también soporta reglas de clasificación que tienen en cuenta múltiples campos de la trama Ethernet para mapearla en un enlace.

2.3.3.2 Manejo de Prioridad

El campo de prioridad de usuario VLAN, en la etiqueta VLAN, es comúnmente usado por las estaciones *Homeplug AV* para priorizar tramas sin conexión. En la Tabla 4 se presenta el mapeo recomendado a partir de las ocho (8) prioridades de usuario indicadas en la etiqueta VLAN con respecto a las prioridades de acceso a

los 4 canales Homeplug AV CSMA (*Carrier Sense Multiple Access / Acceso múltiple por sensado de portadora*).

Tabla 4. Mapeo entre la prioridad VLAN de Usuario y la prioridad CSMA

Prioridad de Usuario	Prioridad Homeplug AV CSMA
0 (default)	1
1	0
2	0
3	1
4	2
5	2
6	3
7	3

Fuente: Autor

Una consecuencia del mapeo mostrado en la Tabla 4 es que las tramas que llevan la prioridad de usuario por defecto, tienen un tratamiento preferencial con respecto a las prioridades de usuario 1 y 2. En la Tabla 5 se definen las prioridades de usuario que deberían ser asignadas a las clases de aplicaciones.

Tabla 5. Mapeo entre la clase de aplicación y la prioridad del usuario

Prioridad de Usuario	Clase de Aplicación
7	Control de Red. Requerimientos para mantener y soportar la arquitectura de red.
6	Voz. Caracterizado por retardos >10ms y por lo tanto máximo <i>jitter</i> .
5	Video o Audio. Caracterizada retardos >100ms.
4	Carga Controlada. Aplicaciones de negocios que requieren hacer reservación del ancho de banda.
3	Excelente esfuerzo. Servicios de tipo "mejor esfuerzo" que una organización debería entregar a sus clientes más importantes.
0	Mejor esfuerzo. Trafico LAN como se conoce hoy (esta prioridad de usuario actualmente se concede a prioridades mayores que 1 y 2.
1,2	Transferencias a granel y otras actividades que son permitidas en la red pero que no deberían impactar el uso de la red por otros usuarios y aplicaciones.

Fuente: Autor

Las reglas precisas de clasificación de paquetes y las capacidades de las estaciones Homeplug AV dependen de la implementación, con motores de clasificación definidos en función de las aplicaciones para las cuales son usadas las estaciones Homeplug AV, como en el caso de las estaciones para VoIP por ejemplo.

2.4 ARQUITECTURA DE LA RED LAN BAJO EL ESTÁNDAR HOMEPLUG AV

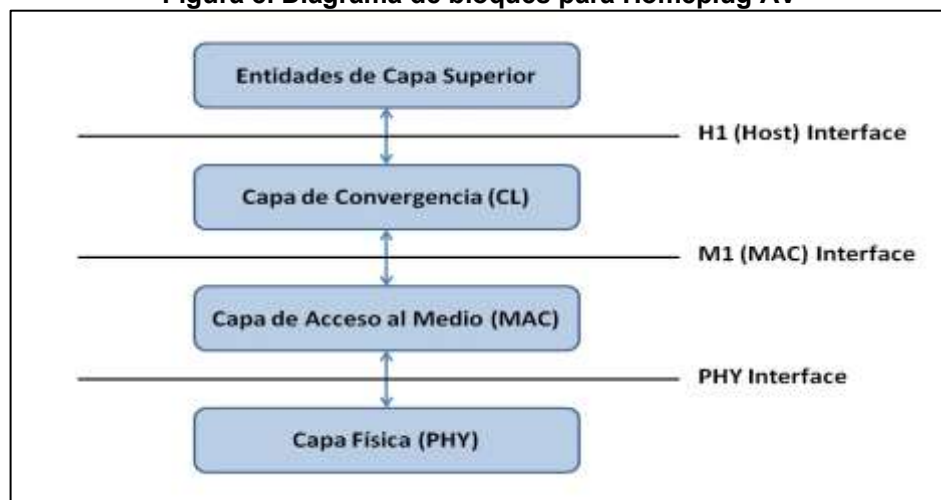
En éste ítem se presenta una descripción general de la arquitectura de una red LAN PLC operando bajo el estándar *Homeplug AV*. Se describen en detalle las capas física, de control de acceso y la capa de convergencia. Adicionalmente se detallan la topología *Homeplug AV*, los roles de las diferentes estaciones y el papel del coordinador central.

2.4.1 Niveles de Protocolos

Con relación al modelo de referencia OSI (*Open System Interconnect*) de la ISO (*International Standard Organization*), la especificación *Homeplug* cubre los dos niveles más bajos y correspondientes a las capas física y de enlace de datos.

Para plantear una abstracción comprensible, un sistema *Homeplug AV* consiste en una serie de niveles de protocolo como se aprecia en la Figura 8. Las funciones en el transmisor son implementadas en orden inverso al del receptor. La capa PHY (física) realiza corrección de errores FEC (*Forward Error Correction*) mapeando datos en símbolos OFDM y la generación de formas de onda en el dominio del tiempo. La capa de control de acceso al medio MAC (*Media Access Control*) determina la correcta posición de transmisión, los formatos de las tramas de datos en entidades de longitud fija para ser transmitidas en el canal, y asegura una entrega oportuna y libre de errores a través de solicitud de repetición automática ARQ (*Automatic Repeat Request*).

Figura 8. Diagrama de bloques para Homeplug AV



Fuente: Autor

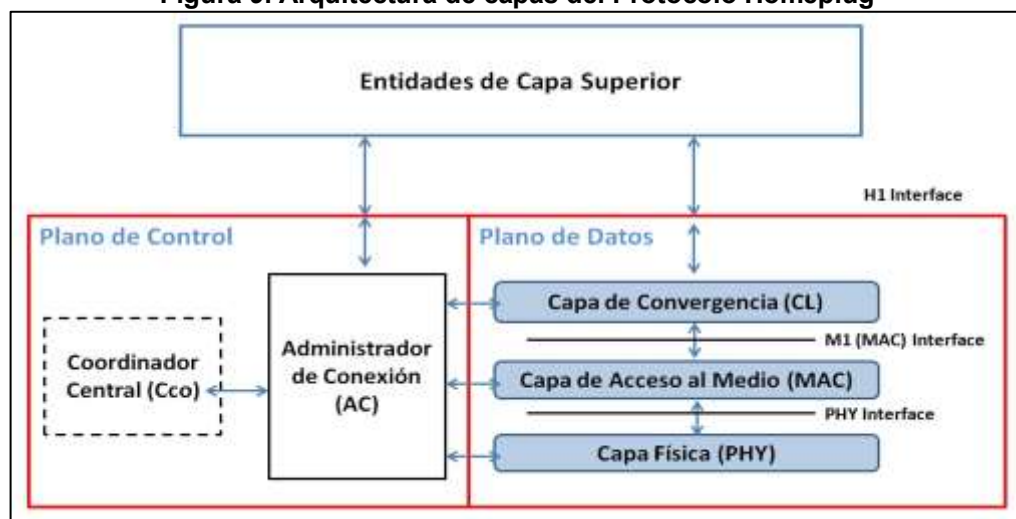
Una evolución de *Homeplug AV*, en contraste con las versiones anteriores del estándar, radica en que para la capa MAC se ofrece un sistema híbrido de acceso al medio con los protocolos CSMA / TDMA para apoyar el alto tráfico multimedia que se pueda generar al interior de la red LAN (Lee, Latchman, Ha, & Hwang, 2012).

Las capas MAC y PHY se encuentran separadas por una interfaz lógica PHY. La capa de Convergencia (CL) realiza puenteo, clasificación del tráfico en conexiones y funciones de entrega de datos. Las capas de Convergencia y MAC se encuentran separadas por una por una interfaz lógica M1 (MAC). La interfaz lógica H1 (Host) expone los servicios provistos por *Homeplug AV* a las entidades de capas superiores.

La Figura 9 muestra las entidades de protocolo definidas en la especificación *Homeplug*. Las entidades de protocolo que están directamente involucradas en la transferencia de la información útil del usuario constituyen el “plano de datos” de la pila de protocolos, mientras que las entidades de protocolo encargadas de crear, administrar y terminar el flujo de datos se encuentran definidas en el “plano de control”.

La especificación *Homeplug AV* además divide el plano de control en un componente denominado Coordinador Central (CCo) y en un componente de Administrador de Conexión (AC). En cada red lógica *Homeplug AV* una estación es definida como el CCo, y es responsable por instalar y mantener la red lógica, administrando el recurso de comunicación (cableado eléctrico) a la vez que coordina con las redes vecinas (EV).

Figura 9. Arquitectura de capas del Protocolo Homeplug



Fuente: Autor

Las funciones de control asociadas con el CCo son tratadas como parte del componente CCo del plano de control, mientras que las funciones asociadas con cada estación local caen dentro del componente AC del plano de control.

2.4.2 Arquitectura de Red

Una red PLC *Homeplug AV* consiste de un conjunto de estaciones *Homeplug* conectadas al cableado eléctrico. Desde el punto de vista físico, las estaciones en una residencia u oficina podrían ser capaces de comunicarse con estaciones en otra casa u oficina. Sin embargo, *Homeplug AV* habilita a las estaciones a estar lógicamente separadas gracias a un mecanismo de privacidad basado en un esquema de encriptación AES (*Advanced Encryption Standard* / Estándar de encriptación avanzada) de 128 bits asociado con una única clave de encriptación de red (CER). Una red *Homeplug AV* lógica consta de un conjunto de estaciones que poseen el mismo identificador de red (IDR) y una clave de membresía de red (CMR). En ciertas situaciones, el CCo puede desplegar múltiples CER (usando múltiples CMR) creando así varias subredes lógicas denominadas sub-AVRL. La coordinación, sincronización y planificación son realizadas para cada sub-AVRL.

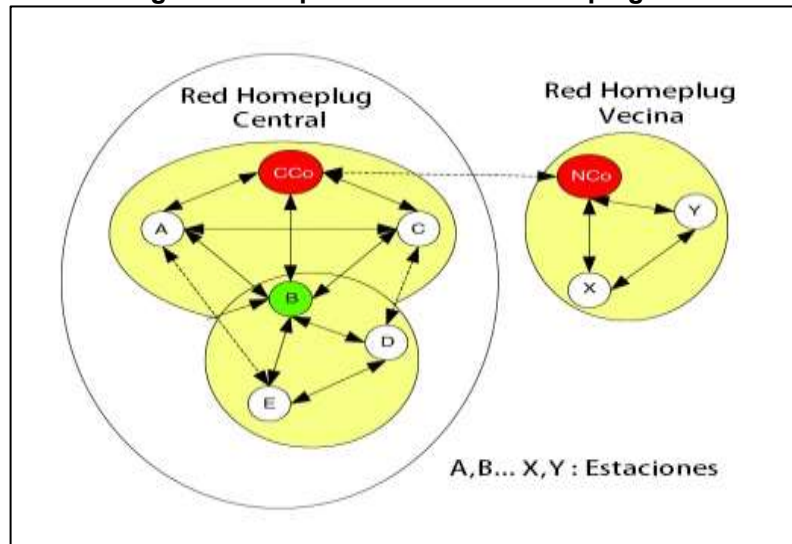
Cuando múltiples Sub-AVRLs coexisten en un mismo entorno o vecindario, teóricamente no se pueden comunicar pero comparten la misma capa física. Esto implica que los usuarios de *Homeplug AV* pueden compartir el rendimiento del sistema (*throughput*) con los vecinos y sin estar enterados. A partir de un estudio desarrollado en el Laboratorio para comunicaciones y aplicaciones LCA-EPFL en Suiza se determinaron tres conclusiones importantes (El Fawal & Le Boudec, 2011):

- Se comprobó que las estaciones *Homeplug AV* pueden comunicarse, aún sobre cables físicamente separados y por lo tanto las estaciones vecinas en el mismo o en diferentes Sub-AVRLs pueden compartir el mismo rendimiento.
- Cuando las estaciones se encuentran en diferentes Sub-AVRLs, el rendimiento del sistema es notablemente menor en comparación con tener las mismas estaciones en igual sitio pero sobre una única Sub-AVRL.
- Estaciones *Homeplug AV* de diferentes fabricantes interoperan pero presentan fuertes inconvenientes asociados al *throughput*. Los resultados sugieren que *Homeplug AV* no se desempeña satisfactoriamente en grandes instalaciones.

Cada sub-AVRL es administrada por el CCo (ver Figura 10), el cual se encarga de realizar funciones de administración tales como autenticación y asociación de las nuevas estaciones que se unan a la red *Homeplug AV*, sincronización del ciclo de intervalos de transmisión de la línea eléctrica (AC), y control de admisión y planificación para el acceso TDMA (*Time División Multiple Access* / Acceso

múltiple por división del tiempo) y CSMA (*Carrier Sense Multiple Access / Acceso múltiple por sentido de portadora*). Igualmente el CCo permite establecer puentes de conexión con otras redes *Homeplug* vecinas, mediante comunicación directa con otros CCo (NCo).

Figura 10. Arquitectura de red Homeplug AV



Fuente: Autor

Cada estación *Homeplug AV* es capaz de operar como CCo de la red lógica *Homeplug AV*. La selección de la estación que asume el rol de CCo es realizada de forma automática con base en las capacidades de la estación y la topología de la red. El usuario igualmente puede configurar una estación para que actúe como CCo (Por ejemplo, puede ser prudente asignar un Gateway/Router con capacidades *Homeplug AV* como el CCo por defecto). *Homeplug AV* define tres diferentes niveles de capacidad CCo:

- CCo de Nivel-0: Un CCo que sólo puede soportar acceso al canal mediante CSMA.
- CCo de Nivel-1: Un CCo que soporta acceso al canal basado en TDMA cuando no existan redes vecinas (soporta modo no-coordinado).
- CCo de Nivel-2: Un CCo que soporta acceso al canal basado en TDMA aún en presencia de redes vecinas (soporta modo coordinado).

Se requiere que al menos todas las estaciones como mínimo soporten funcionalidad CCo de Nivel-0. Adicionalmente, se requiere que todas las estaciones sean capaces de operar bajo los niveles 0,1 y 2.

2.4.3 Limitaciones técnicas de la red PLC bajo el estándar *Homeplug AV*

La red eléctrica representa un medio hostil para la transferencia de datos debido a que esta no ha sido diseñada para transmitir información. PLC, al ser una tecnología emergente, plantea varios inconvenientes que afectan considerablemente su óptimo desempeño y limitan su implementación. Dos de los problemas más importantes que enfrenta esta tecnología son: los niveles excesivos de ruido y la atenuación de la señal a las frecuencias de interés (Granados A. & Vesga F., 2012a). Por otro lado, la atenuación que sufre la señal de datos en las líneas de potencia es alta e impredecible en la mayoría de los casos. Adicionalmente, es muy difícil obtener un modelo significativo de este canal, debido a su drástica variación con el tiempo, por la constante conexión y desconexión de dispositivos (Hrasnica, Haidine, & Lehnert, 2004).

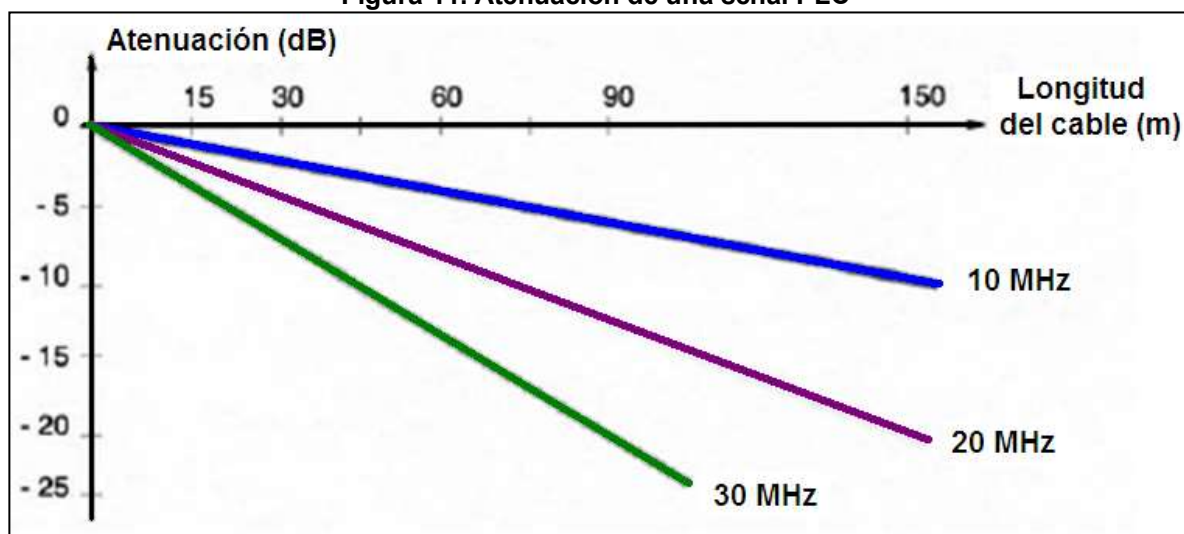
Entre los aspectos técnicos que hacen difícil el desarrollo de un sistema de comunicaciones PLC bajo el estándar *Homeplug AV* se destacan:

- El mal estado de las instalaciones eléctricas
- La distancia entre dispositivos *Homeplug AV*
- La Impedancia de la red eléctrica
- Atenuación de la señal
- Relación Señal-a-ruido (SNR)
- Número de hogares por transformador
- Problemas de Interferencia

2.4.3.1 Propagación de la señal *Homeplug AV*

Un aspecto de interés, al usar la tecnología *Homeplug AV*, tiene que ver con la alta velocidad de propagación de las señales sobre el cableado eléctrico. Además, debido a las propiedades resistivas del cableado, la propagación de la señal está sujeta a una atenuación proporcional a la longitud del cable. A partir de estudios realizados por fabricantes de dispositivos PLC se han establecido algunas cifras relativas con relación a la propagación de las señales sobre el cableado eléctrico. En la Figura 11 se observa claramente un aumento en la atenuación de la señal a medida que aumenta la frecuencia. En el estudio se utilizaron tres frecuencias (10MHz, 20MHz y 30MHz) a través de un cableado eléctrico que oscila entre 1,5mm y 2,5mm.

Figura 11. Atenuación de una señal PLC



Fuente: Autor

Por lo general en una vivienda la atenuación en la línea está entre 20dB y 60dB, la cual depende de la carga (Carcelle, 2006).

2.4.3.2 Interferencia en redes PLC

La interferencia es un aspecto esencial en las redes PLC debido a que la propagación de las señales produce una emisión electromagnética en el rango de 1 a 30MHz, generándose disturbios por los diversos dispositivos conectados al cableado eléctrico. Adicionalmente, un enlace entre dos estaciones no presenta las mismas características eléctricas en ambos sentidos, en donde las características físicas del medio de transmisión (impedancia, carga, capacitancia) pueden cambiar según la dirección de propagación de la señal (Guillén, López, & Barahona, 2008).

Por otro lado, los diversos organismos nacionales e internacionales como el Comité Internacional Especial sobre Radio Interferencia (CISPR / *International Special Committee on radio interference*) de la IEC, han establecido una reglamentación para determinar los límites de las emisiones electromagnéticas por dispositivos PLC que operen sobre la red eléctrica. Para el caso de dispositivos PLC, la potencia de la señal transmitida no debe ser superior a los 20dBm (100mW) en el rango de 1 a 30MHz y presenta un límite de emisiones electromagnéticas correspondiente a la densidad de potencia espectral PSD de -50 dBm/Hz definido en la norma IEC CISPR 22. [31]

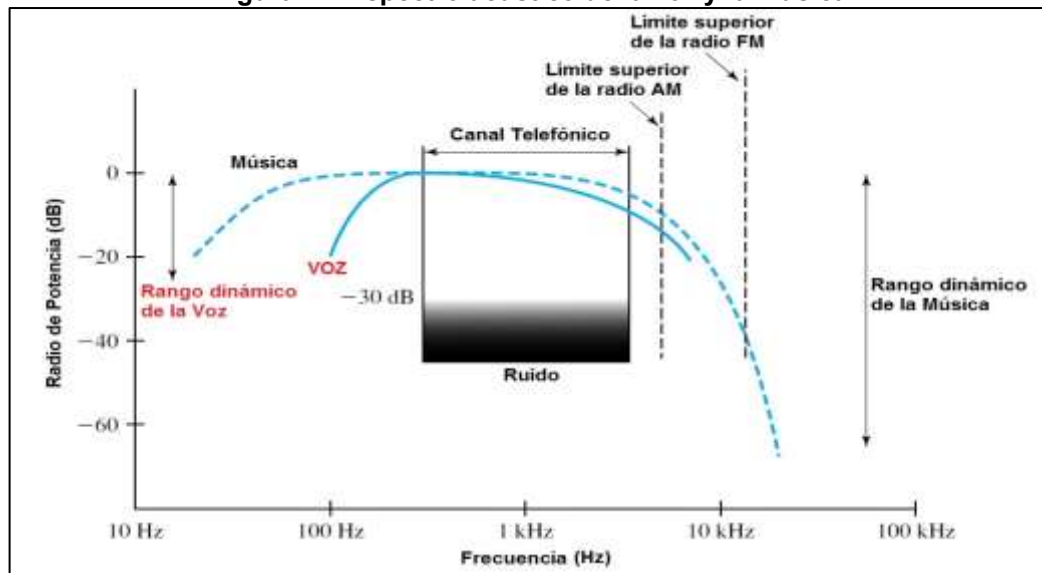
Las condiciones de interferencia pueden cambiar durante el transcurso del día, debido a la cantidad y tipo de dispositivos eléctricos conectados a la red eléctrica,

los cuales cambian permanentemente la topología y las condiciones físicas y eléctricas de la red.

2.5 TECNOLOGÍA VOIP EN REDES LAN PLC

En ciencias aplicadas el término audio generalmente comprende dos rangos distintos de sonido: el primero es la voz o habla y se refiere a los sonidos que se producen por la voz humana. Técnicamente se requiere un pequeño ancho de banda (100Hz - 7kHz) para transmitir voz y las aplicaciones de telefonía más usadas son correo de voz, audioconferencia y telemercado. El segundo tipo de sonidos corresponde a la música y comprende un espectro de frecuencias más amplio (10Hz - 11kHz) para soportar las aplicaciones de música (Stallings, 2007).

Figura 12. Espectro acústico de la voz y la música



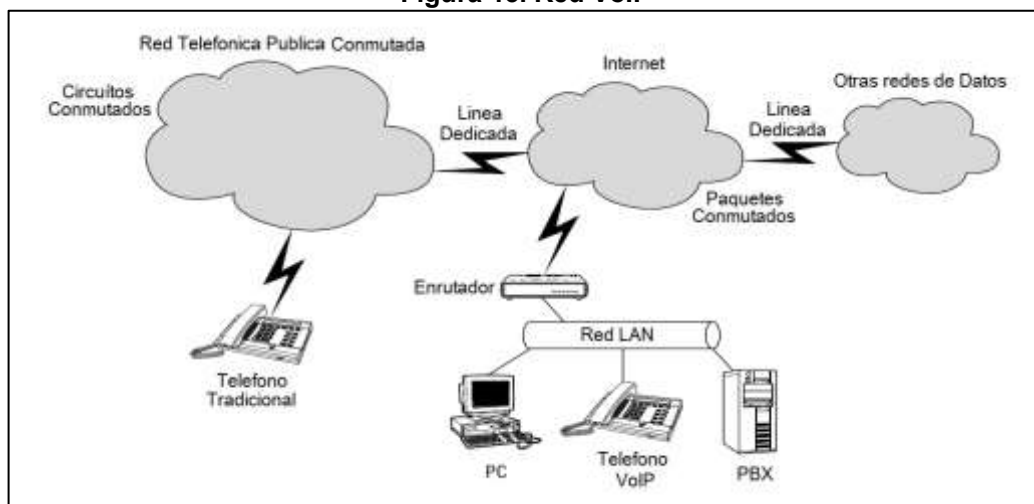
Fuente: Autor

La Figura 12 presenta el espectro acústico tanto para la voz como para la música. A pesar de que gran parte de la energía para la voz se concentra en las frecuencias más bajas, las pruebas han demostrado que las frecuencias por debajo de los 600 o 700 Hz, agregan muy poco a la inteligibilidad del habla en el oído humano. La voz típica tiene un rango dinámico de 25dB; esto es, la energía producida por el grito más alto la cual puede ser hasta 300 veces mayor que el más mínimo susurro. La Figura 12 también destaca el espectro acústico y el rango dinámico para la música.

2.5.1 Voz sobre protocolo IP

En el *website* de la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC / *Federal Commission Communications*)(FCC, n.d.), se define Voz sobre IP como una tecnología que permite realizar llamadas telefónicas usando una red de computadores sobre una red de datos como Internet. VoIP transforma las señales de voz provenientes de una llamada telefónica en una señal digital que atraviesa Internet y en el otro extremo las convierte nuevamente en señales analógicas. De esta forma, se puede llamar a alguien ubicado en otro computador o en un teléfono regular.

Figura 13. Red VoIP



Fuente: Autor

Cuando se realiza una llamada VoIP usando un teléfono con un adaptador, se escucha el tono dial y se digita el número de manera transparente. VoIP permite realizar llamadas directamente desde un computador utilizando un teléfono convencional (con su respectivo adaptador) o un micrófono.

El encargado del transporte de las llamadas en una red que utiliza VoIP es el protocolo de internet (IP), perteneciente a la pila de protocolos TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*). IP provee un conjunto de facilidades para administrar el envío de información de voz sobre redes de datos, de tal manera que la voz proveniente de una llamada es digitalizada y segmentada en paquetes, los cuales viajan por múltiples rutas en las redes de computadores y se reensamblan en el equipo destino, dando la sensación de cero interrupción.

En la Tabla 6 se presentan las principales diferencias entre la telefonía tradicional y la tecnología VoIP.

Tabla 6. Telefonía tradicional vs. VoIP

Característica	Telefonía Tradicional	VoIP
Tecnología de Transmisión	Conmutación de Circuitos	Conmutación de Paquetes
Funciones básicas de señalización	Supervisión, Direccionamiento, Informacional	Supervisión, Direccionamiento, Informacional
Protocolos y métodos de señalización	Digital: SS7, ISDN, QSIG Analógica: Inicio de Bucle, inicio inmediato, retardo de inicio, pulso	H.323, SIP, MGCP, SCCP
Método de transmisión	Circuito dedicado	Conjunto de tramas UDP

Fuente: Autor

Es importante destacar que las redes IP deben proveer un número de servicios para soportar adecuadamente las transmisiones de voz mediante la tecnología VoIP. Estos servicios incluyen seguridad, previsibilidad, mesurabilidad y algún nivel de garantía de entrega. Es función de los administradores de red alcanzar estos niveles de servicio mediante gestión de retardos, variación de retardos, aprovisionamiento de ancho de banda y ajuste de parámetros de pérdidas de paquetes usando técnicas de calidad del servicio (QoS / *Quality of Service*).

Anterior a la convergencia de las redes de datos y las redes telefónicas, la ingeniería de redes se enfocaba en la conectividad. Las velocidades a las que viajaba la información en la red se traducían en un flujo de ráfagas de datos, lo que conllevó a que los paquetes de datos se apoderaran del ancho de banda del canal de transmisión en cualquier momento. La priorización del acceso a la red se daba sobre la base de “*a quién primero llegaba primero se le servía*” y la velocidad de datos disponible para cualquier usuario variaba dependiendo del número de usuarios accediendo a la red en cualquier momento.

Considerando los elementos anteriormente expuestos, es necesario resaltar que, dependiendo del tipo de tráfico (archivos, correo, voz, video, etc.) se tienen que generar unos parámetros de calidad del servicio que provean un funcionamiento adecuado de las aplicaciones que operan en la red.

Para el caso de VoIP, los paquetes que generan los protocolos de transmisión (H.323) son pequeños (64-128 bits) y requieren que el retardo durante su viaje por la red no supere los 150 milisegundos. Para la medición de QoS en VoIP, existen cuatro parámetros como el ancho de banda, el retraso temporal (*delay*), la variación de retraso (*jitter*) y la pérdida de paquetes.

La no atención de cualquiera de estos parámetros descritos se traducirá en fastidiosos retardos, pobre calidad de la comunicación, interrupción de las llamadas etc., lo cual afectará notoriamente el desempeño de VoIP (Wallace, 2011).

2.5.2 Codificación de la Voz

La voz humana (analógica), para ser transmitida eficientemente en redes de datos, necesita una transformación a formato digital, mediante un proceso reconocido como digitalización de voz y el cual es realizado por un dispositivo denominado CoDec (Codificador / Decodificador). Los codecs pueden ser caracterizados de acuerdo con los siguientes factores:

- La tecnología (de “forma de onda”, de “síntesis de voz”)
- La tasa de bits: usualmente expresada en bits por segundo (bps)
- La calidad resultante del audio codificado
- La complejidad
- El retardo que introducen: expresado en milisegundos (ms)

De acuerdo con el ancho de banda de la señal de entrada, los codecs más representativos del mercado se clasifican en codecs de banda angosta y codecs de banda ancha (Ver Tabla 7 y Tabla 8).

Tabla 7. Codecs de Banda Angosta

Codec	Nombre	Tasa de Bits (kbps)	Retardo (ms)	Observaciones
G.711	PCM: Pulse Code Modulation	64, 56	0.125	Codec “base”, utiliza dos posibles leyes de compresión: μ -law y A-law
G.723.1	Hybrid MPC-MLQ and ACELP	6.3, 5.3	37.5	Desarrollado originalmente para videoconferencias en la PSTN, es altamente usado en sistemas VoIP
G.728	LD-CELP: Low-Delay code excited linear prediction	40, 16, 12.8, 9.6	1.25	Creado para aplicaciones DCME (Digital Circuit Multiplex Encodig)
G.729	CS-ACELP: Conjugate Structure Algebraic Codebook Excited Linear Prediction	11.8, 8, 6.4	15	Ampliamente utilizado en aplicaciones de VoIP a 8 kbps
AMR	Adaptive Multi Rate	12.2 a 4.75	20	Utilizado en redes celulares GSM

Fuente: Autor

Dentro de la categoría de banda angosta se incluyen los codecs cuya frecuencia de muestreo de voz es a 8000 muestras por segundo. Para el caso de banda ancha, las frecuencias son bastante mayores y oscilan entre 16000 y 32000 muestras por segundo.

Tabla 8. Codecs de Banda Ancha

Codec	Nombre	Tasa de Bits (kbps)	Retardo (ms)	Observaciones
G.722.1	Transform Coder	24, 32	40	Útil en audio y videoconferencias
G.722.2	AMR-WB	6.6 a 23.85	25.9375	Estándar en común con 3GPP y con gran inmunidad a los ruidos de

				fondo especialmente en ambientes adversos (ej: celulares)
G.711.1	Wideband G.711	64, 80, 96	11.875	Amplia el ancho de banda del Codec 711, optimizando su uso para VoIP
G.729.1	Wideband G.729	8 a 32	<49	Amplia el ancho de banda del Codec G.729, optimizando su uso para VoIP
RtAudio	Real Time Audio	8.8, 18	40	Codec propietario de Microsoft, usado en comunicaciones unificadas (OCS)

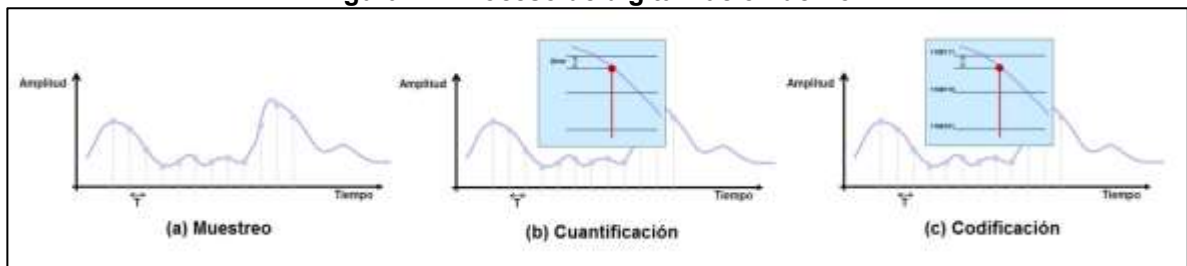
Fuente: Autor

Con los codecs de banda ancha se incrementa la calidad del sonido y por ello se genera una mayor cantidad de datos, los cuales a su vez requieren un mayor ancho de banda para su transporte y esto hace que sean adecuados sólo para sistemas VoIP en redes LAN y WAN de alta velocidad (Wittenberg, 2009).

De acuerdo con su adecuación y utilización para VoIP, los codecs usualmente más relacionados con éste tipo de tecnología son respectivamente G711 (UIT-T, 1988), G723 (UIT-T, 2006) y G729 (UIT-T, 2007) (ver Observaciones en Tabla 7 y Tabla 8).

El proceso de digitalización de la voz comprende tres etapas respectivamente: muestreo, cuantificación y codificación (ver Figura 14).

Figura 14. Proceso de digitalización de Voz



Fuente: Autor

- **Muestreo:** Se toman muestras de la señal de voz a intervalos periódicos. Se recomienda que los intervalos estén en coherencia con el teorema del muestreo, el cual indica que la frecuencia mínima a la cual puede ser muestreada una señal para luego ser reconstruida, debe ser el doble de la frecuencia máxima de dicha señal (Tanenbaum & Wheteral, 2011, pág 94).
- **Cuantificación:** Para cada valor muestreado en la etapa anterior se realiza una cuantificación en unidades discretas. La cantidad total de valores discretos debe minimizar el posible ruido de cuantificación.

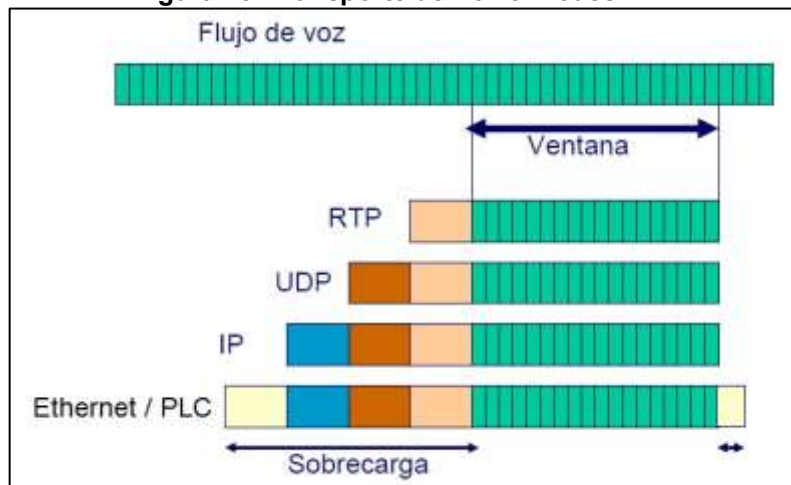
- **Codificación:** Los valores cuantificados se codifican en números que pueden ser posteriormente transmitidos y procesados digitalmente. Esta función es particularmente realizada por el codec de voz utilizado.

2.5.3 Ancho de banda para Voz en IP

Teniendo en cuenta que para el transporte de información de voz sobre redes, es necesario ensamblar paquetes, el ancho de banda requerido dependerá de la sobrecarga que generen estos paquetes.

Para el envío de voz sobre redes LAN PLC se utiliza el protocolo RTP (*Real-Time Transport Protocol* / Protocolo de transporte en tiempo-real). Éste protocolo a su vez se encapsula sobre el protocolo de transporte UDP (*User Datagram Protocol* / Protocolo de Datagrama de usuario), el que a su vez se encapsula sobre el protocolo de Internet (IP) y viaja sobre la red PLC (ver Figura 15).

Figura 15. Transporte de Voz en redes PLC

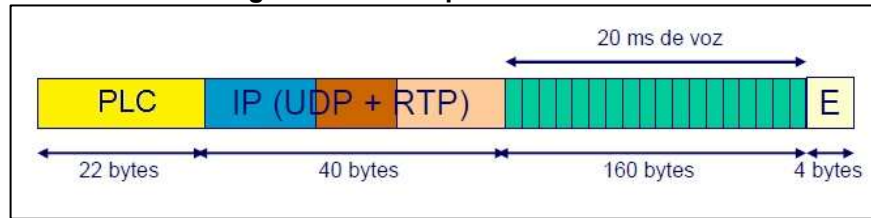


Fuente: Autor

La suma de los diferentes protocolos utilizados hace que el ancho de banda requerido para el tráfico de voz sobre PLC sea mayor que el ancho de banda del audio original. A continuación se presenta un ejemplo para el códec G.711.

Para una ventana de 20ms y codificación de audio G.711, se obtienen 160 bytes de voz por trama (ver Figura 16).

Figura 16. Trama para codec G.711



Fuente: Autor

$$\text{Bytes de voz/trama} = 64 \text{ kbps} * 20 \text{ ms} / 8 = 160 \text{ bytes}$$

El encapsulamiento IP (incluyendo los protocolos RTP y UDP) agrega 40 bytes adicionales.

$$\text{Bytes de paquete IP} = 160 + 40 = 200 \text{ bytes}$$

La trama PLC adiciona otros 26 bytes:

$$\text{Bytes de trama PLC} = 200 + 26 = 226 \text{ bytes}$$

Para el ejemplo presentado se observa que cada 20ms se generan 226 bytes que se deben transportar por la red LAN PLC. Ello corresponde a un ancho de banda de 90,4 Kbps, el cuál es bastante mayor que el flujo de audio (64 kbps).

$$\text{Ancho de banda LAN} = 226 * 8 / 20 \text{ ms} = 90.4 \text{ kbps}$$

Es necesario destacar que los cálculos fueron realizados para el envío de audio en una sola dirección. Pueden emplearse técnicas de supresión del silencio, en las que no se envían paquetes cuando no hay audio presente. En estos casos, el ancho de banda en cada dirección es un poco más de la mitad del cálculo anterior.

Tabla 9. Ancho de Banda asociado a los codecs para VoIP

Tipo de Codec	Duración de trama (ms)	Bytes de Voz/Trama	Bytes de paquete IP	Bytes de trama PLC	Ancho de Banda LAN PLC (kbps)
G.711 (64 kbps)	10	80	120	146	116.8
	20	160	200	226	90.4
	30	240	280	306	81.6
G.723.1 (6.3 kbps)	30	24	64	90	23.9
G.723.1 (5.3 kbps)	30	20	60	86	22.9
G.729 (8 kbps)	10	10	50	76	60.8
	20	20	60	86	30.4
	30	30	70	96	25.6

Fuente: Autor

En la Tabla 9 se presentan los anchos de banda para los códec más representativos en el manejo de VoIP en redes LAN PLC (G.711, G.723 y G.729).

Como allí se aprecia, el ancho de banda puede variar considerablemente dependiendo de códec usado y de la ventana seleccionada.

2.5.4 Calidad de Voz en redes IP

La transmisión de voz en redes de datos enfrenta las problemáticas asociadas principalmente con la calidad del servicio (QoS) y la calidad de la experiencia (QoE / *Quality of Experience*). Estos inconvenientes pueden deberse a diversos factores como retardos, pérdida de paquetes, *jitter* (diferencia de retardos), eco y tamaño de paquetes, entre otros. Para que la tecnología VoIP pueda usarse a nivel corporativo y residencial, y en especial sobre redes con tecnología PLC, es esencial garantizar una calidad de voz aceptable. A continuación se analizarán en detalle los factores mencionados.

2.5.4.1 Retardos

Los retardos se consideran un elemento que afecta notoriamente la calidad de voz y son producidos por los siguientes factores:

- Retardo ocasionado por los algoritmos de codificación: Entre mayor sea el nivel de compresión de un proceso de transmisión de voz, los codecs toman más tiempo para codificar cada muestra (ver Tabla 10)

Tabla 10. Retardo introducido por los algoritmos de compresión

Algoritmo de muestreo/compresión	Retardo introducido
G.711 (64 kbps)	125 μ s
G.723 (5.3 o 6.4 kbps)	37.5 ms
G.729 (8 kbps)	10 ms

Fuente: Autor

- Retardo de procesamiento: Es el tiempo asociado con el procesamiento de la voz debido a la implementación de los protocolos.
- Retardo de red (latencia): Es un factor originado por la velocidad de transmisión, la congestión y los retardos introducidos en los equipos de red (módems, *bridges*, pasarelas, *routers*, etc.).

Los retardos no inciden directamente en la calidad de la voz sino en la calidad de una conversación. Si los retardos son inferiores a los 100ms son tolerables. Entre 100ms y 200ms las demoras son notadas. Al acercarse a los 300ms la

conversación se convierte en poco natural y pasando de los 300ms se hace muy crítica.

2.5.4.2 Pérdida de paquetes

Generalmente en las redes de datos los protocolos de manejo de voz no usan confirmaciones de recepción de “paquetes de audio” ya que se genera demasiado tráfico. El porcentaje de pérdida de paquetes es directamente proporcional con la degradación de la voz y existen técnicas para hacer menos sensible la degradación de calidad de la voz frente a la pérdida de paquetes. Una de éstas técnicas consiste en repetir el último paquete recibido. Además, se consideran como perdidos los paquetes que llegan fuera de orden o a destiempo.

2.5.4.3 Jitter

Se considera al *Jitter* como la variación en los retardos (latencias). En un caso particular, si dos extremos comunicados reciben un paquete cada 20ms en promedio, pero en cierto instante, un paquete llega a los 30ms y luego otro a los 10ms, el sistema tendrá un *Jitter* de 10ms.

El receptor debe recibir los paquetes a intervalos constantes, para regenerar en forma adecuada la señal original. Considerando que el *Jitter* es inevitable en una red de datos, los dispositivos receptores disponen de un almacenamiento de entrada (*buffer*), con el objetivo de suavizar el efecto de la variación de los retardos. Éste *buffer* recibe los paquetes a intervalos variables, y los entrega a intervalos constantes.

A mayor presencia de retardos (*Jitter*) mayor deberá ser el *buffer* de almacenamiento y ello introducirá mayores demoras en el sistema VoIP.

2.5.4.4 Eco

Un efecto de eco se percibe cuando el lapso tiempo transcurrido desde que se habla hasta que se escucha la propia voz es mayor a 30ms o cuando el nivel de retorno se encuentra por encima del os -25dB, Los teléfonos IP *hardware* pueden generar un leve retorno acústico si se emplean “manos libres”. Los teléfonos IP *software* pueden generar retorno tanto en las diademas como en la tarjeta del sonido del PC.

2.5.4.5 Tamaño de paquetes

Este factor incide en la calidad de voz mediante dos aspectos: Los retardos ocasionados y el ancho de banda requerido. Para enviar “voz codificada” en una red VoIP, es importante ensamblar paquetes según el protocolo IP.

Debido a lo anterior, es necesario esperar a recibir varias muestras para ensamblar y enviar el paquete, generándose con ello un retardo en la transmisión. Así, sería considerable ensamblar paquetes con la mínima cantidad de voz (por ejemplo un paquete por cada muestra). Sin embargo, hay que destacar que cada paquete tiene una cantidad mínima de información de control (encabezado, dirección origen, dirección destino, etc.), la cual “sobrecarga” el paquete afectando su tamaño total y el ancho de banda requerido.

3. MÉTODO

La metodología presentada a continuación, comprende los diversos aspectos considerados para la toma de datos y el análisis de resultados, producto de la experimentación. Se describen en detalle las fases relacionadas con el diseño experimental, la planeación del experimento y la descripción del experimento. Para finalizar, se presentan los resultados del desarrollo experimental completamente tabulados.

3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Un aspecto esencial en el diseño de experimentos, es decidir cuáles pruebas o tratamientos se van a ejecutar en un proceso y la cantidad de repeticiones de cada una, de manera que se obtenga la máxima información al mínimo costo sobre el elemento de estudio. Sin embargo, la mayoría de las veces gran cantidad de pruebas se realizan de manera improvisada, siguiendo el proceso ensayo-error, con base en la experiencia e intuición personal y sin seguir un plan experimental que garantice una respuesta adecuada a los problemas que se planean resolver.

Comúnmente, cuando se desea optimizar un proceso, existen dos (2) enfoques para obtener la información necesaria: el primero es mediante la observación y el monitoreo a partir de herramientas estadísticas, hasta obtener patrones útiles que permitan modificarlo. El segundo consiste en la experimentación, que implica realizar cambios provocados y estratégicos en un proceso a fin de obtener señales útiles del mismo.

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 que se persiguen. Actualmente, existen diversos tipos de diseños experimentales en donde cada uno de ellos permite estudiar situaciones que ocurren en la vida práctica, a partir de las necesidades de investigador. Por lo tanto, es muy importante saber cómo elegir el más adecuado para el problema que se quiere resolver (Gutiérrez, 2008).

Debido a que la presente investigación se ubica dentro del contexto de las ciencias aplicadas, se usará el diseño experimental, empleando métodos

estadísticos y el proceso inductivo-deductivo para obtener un modelo empírico de evaluación del rendimiento de la red *Homeplug AV* operando con VoIP.

El proceso de diseño experimental implica una serie de etapas debidamente establecidas y que apuntan a una obtención de resultados precisos y repetibles. Las etapas consideradas son las siguientes (Gutiérrez, 2008, pág 10):

- **Planeación:** Es una de las etapas claves para el desarrollo del experimento, ya que una inadecuada planeación puede ocasionar resultados errados y con ello no cumplir a satisfacción el objetivo principal de la investigación. Dentro de ésta etapa se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:
 - Comprender y delimitar el problema u objeto de investigación
 - Seleccionar la(s) variable(s) objeto de estudio
 - Determinar los factores que deben investigarse, acorde con la influencia que estos podrían tener sobre la(s) variable(s) objeto de estudio.
 - Seleccionar los niveles de cada factor (muestras, repeticiones, etc.).
 - Planear y organizar el trabajo experimental.
 - Realizar el experimento.
- **Análisis:** Teniendo en cuenta que los resultados experimentales son observaciones muestrales, los métodos estadísticos a emplear deben ser inferenciales. La principal técnica en el análisis de experimentos es el 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, pág 60).
- **Interpretación:** Partiendo del análisis estadístico planteado en la etapa anterior, se debe generar discusión sobre los resultados obtenidos. Por ello es importante realizar un comparativo entre las conjeturas (hipótesis iniciales) y los resultados del experimento, hasta determinar los nuevos aprendizajes resultantes del proceso, verificar los supuestos y seleccionar el mejor tratamiento.
- **Conclusiones finales:** Aquí se detallan cada uno de los resultados obtenidos en el desarrollo del experimento, y lo más recomendable es establecer las medidas requeridas para implementar y generalizar el resultado del estudio realizado.

3.2 PLANEACIÓN DEL EXPERIMENTO

Tomando como base lo expuesto en el ítem anterior, a continuación se hará una descripción detallada de los principales elementos a tener en cuenta para el desarrollo experimental relacionado con la construcción del modelo de evaluación del rendimiento de la red *Homeplug AV* para tráfico de VoIP.

3.2.1 Rendimiento

El rendimiento es uno de los elementos de mayor interés al analizar redes de datos, especialmente redes LAN, debido a los efectos que produce en los usuarios. Toda arquitectura de red de datos posee diversas características de rendimiento debido a las decisiones de diseño empleadas y por lo general el rendimiento final se obtiene a partir de la evaluación de unos parámetros básicos como: *Throughput*, *jitter*, retardo y porcentaje de paquetes perdidos.

3.2.1.1 *Throughput*

Throughput, es considerado como la capacidad de un enlace de transportar información útil, y por lo tanto representa la cantidad de información válida que puede transmitirse por unidad de tiempo. Este parámetro puede variar en una misma conexión de red dependiendo del protocolo usado para la transmisión y del tipo de tráfico (voz, video, datos, etc.), entre otros factores. Actualmente los algoritmos más eficientes para maximizar el *throughput* de un sistema *Homeplug AV* y garantizar un BER (*Bit Error Rate* / Tasa de bits erróneos) mínimo se enfocan en el uso de turbo-códigos y en *bit loading* (Guerrini & Veronesi, 2011).

Considerando que el interés de la investigación consiste en plantear un modelo empírico, el cual permitirá predecir el valor de *Throughput* para una estación, en un ambiente de red bajo el uso de tecnología *Homeplug AV*, es importante partir de la expresión matemática que por definición describe éste parámetro: (Vesga F., 2011)

$$Thr = \frac{L_M - L_C}{[T_M + T_{ACC}]}$$

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

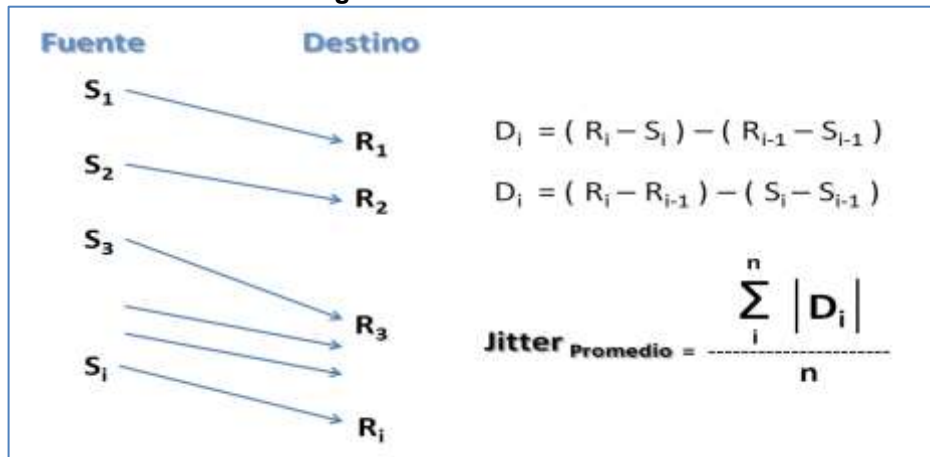
La mayoría de los métodos empleados para la realización de mediciones se caracterizan por hacer muestreos de la conexión entre estaciones, enviando algún patrón de tráfico (voz, video, datos, etc.) para luego efectuar su evaluación. Obviamente estas mediciones se repiten varias veces y luego se promedian para llegar a una aproximación más exacta.

3.2.2.2 Jitter

Otra de las variables que se tomó en consideración para el experimento es el *Jitter*. El *Jitter* es la variación en 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 et al., 2004).

El valor calculado para *Jitter* es un valor promedio, el cual es obtenido de acuerdo con la fórmula planteada en la Figura 17.

Figura 17. Jitter Promedio



3.2.2.3 Retardo

El retardo obtenido es calculado como 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:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2}$$

donde,

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

3.2.2.4 Pérdida de paquetes

La probabilidad de pérdida de paquetes también depende del tipo de red, dado que esto determina el número de rutas se pueden establecer simultáneamente con la finalidad de reducir considerablemente la cantidad de *buffering* o almacenamiento intermedio usado (Gebali, 2008, p.533).

3.2.2 Dispositivos y especificaciones

Para el desarrollo experimental de la investigación planteada, se utilizarán dispositivos hardware como los siguientes: PCs, cables, y módems PLC.

- **PCs:** Los equipos utilizados correspondieron a portátiles marca DELL, con tarjeta de red marca Broadcom tipo Ethernet 1 Gbps y sistema operativo Windows 7.
- **Cableado:** El cableado eléctrico ubicado en las instalaciones donde se realizaron los experimentos, está instalado con alambre AWG (*American Wire Gauge* / Calibre de cable americano) número 12 con alimentación a 110 Voltios y operando en frecuencia de 60Hz. 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.
- **Modems PLC:** Para la realización de la totalidad de las pruebas, se emplearon Modems PLC certificados para operar con el estándar *Homeplug AV*. Los módems usados son marca TP-LINK (TP-LINK Industries, n.d.) modelo PA-211 (ver Figura 18). Un completo detalle de las especificaciones técnicas de los módems se presentan en la Tabla 11 (TP-LINK Industries, n.d.).

Figura 18. Modem Homeplug AV marca TP-LINK modelo TL-PA211



Fuente: <http://www.tp-link.com/co>

Tabla 11. Especificaciones técnicas del modem TP-LINK modelo TL-PA211

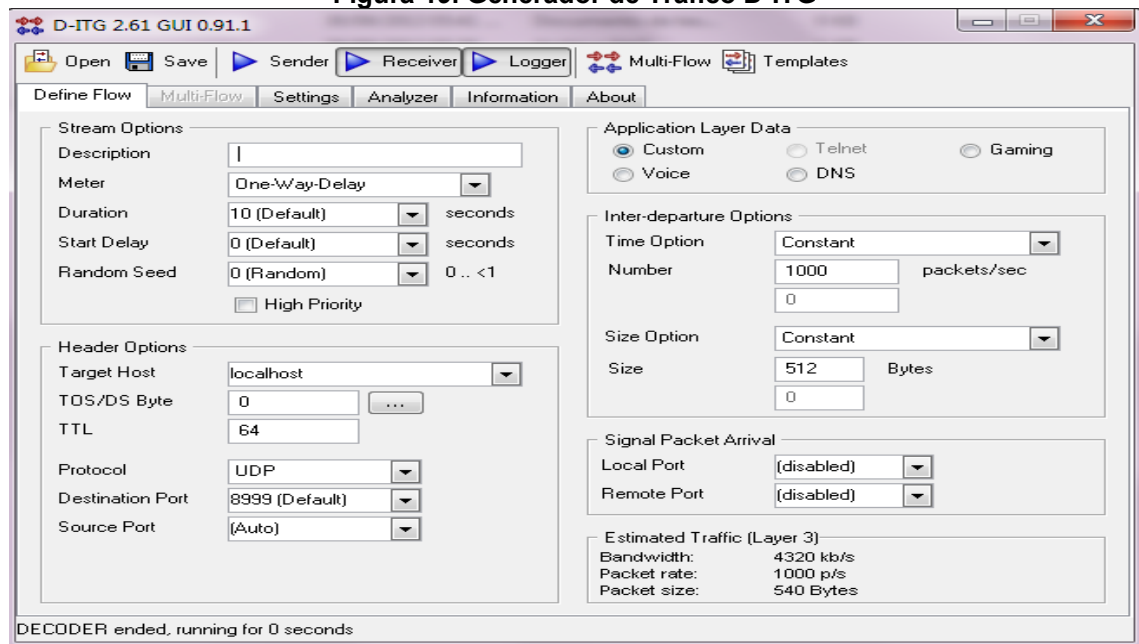
Característica	Detalle
Estándares y protocolos	HomePlug AV, IEEE802.3, IEEE802.3u
Interfaces	Puerto Ethernet a 10/100/1000 Mbps
Tipo de Enchufe	Unión Europea, Estados Unidos, Reino Unido, Australia
Botones	Botón de emparejamiento
Peso	103 Gramos
Indicador LED	PWR, PLC, ETH
Dimensiones (W X D X H)	3,6 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: <http://www.tp-link.com/co>

3.2.3 Generador de Tráfico

Con la finalidad de obviar los procesos de generación de tráfico IP (especialmente VoIP) y a fin de reducir los tiempos de medición para cada una de las pruebas realizadas, se utilizó un software de generación de tráfico denominado Generador de Tráfico Distribuido de Internet v2.61 (D-ITG / *Distributed Internet Traffic Generator*) desarrollado en el Departamento de Informática y Sistemática de la Universidad “Federico II” de Italia (Avallone, n.d.).

Figura 19. Generador de Tráfico D-ITG



Fuente: Autor

D-ITG es una herramienta de libre distribución, amplia aceptación y muy utilizada para generación y análisis de tráfico en todo tipo de redes de datos, operando sobre diversos medios de transmisión (Botta, Dainotti, & Pescapé, 2012). Además incorpora las principales características que debe poseer un generador de tráfico como son:

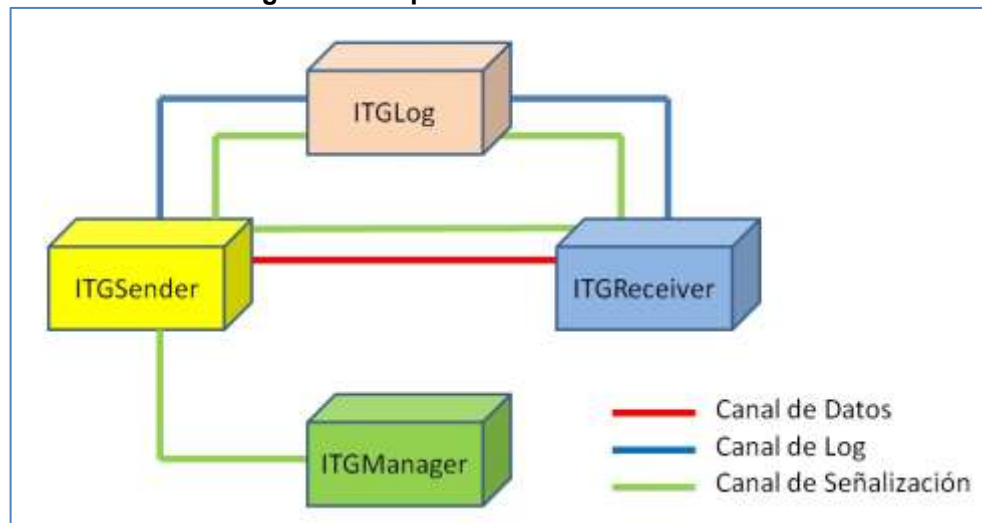
- Adaptabilidad a redes heterogéneas multidimensionales.
- Manejo de tráfico multimedia (Video, Voz, etc.).
- Incorporación de los principales codecs de audio (G711, G723 y G729).
- Soporte de múltiples protocolos (IPv4, IPv6, ICMP, TCP, UDP, SCTP, etc.).
- Control distribuido remoto tanto para emisores como para receptores de tráfico.
- Generación de múltiples flujos de tráfico hacia diferentes receptores en la red.
- Configuración de cantidad y tamaño de paquetes emitidos, además de sus correspondientes tiempos de emisión.

- Medición de múltiples métricas de red, asociadas con el rendimiento, como *throughput*, *jitter*, retardos, porcentaje de paquetes perdidos, etc.

La arquitectura de la herramienta D-ITG es modular y comprende 4 bloques claramente definidos y representados en la Figura 20. Los respectivos bloques y su función se describen a continuación:

- **ITGSender:** Es el componente emisor de la plataforma de generación de tráfico. Puede funcionar en tres (3) modos diferentes: (i) un solo modo de flujo; (ii) múltiples modos de flujo (multihilo); (iii) modo demonio (controlado remotamente por ITGManager). Para reunir estadísticas del proceso de generación de tráfico, ITGSender puede registrar información detallada acerca de los flujos generados (ya sea en forma local o remota mediante ITGLog).

Figura 20. Arquitectura modular de D-ITG



Fuente: Autor

- **ITGReceiver:** Componente que opera como un demonio que permanentemente esta “escuchando” las nuevas conexiones. Cuando llega una solicitud de conexión, ITGReceiver genera un nuevo proceso que es responsable por la administración de la comunicación con el emisor. Éste componente, al igual que ITGSender, puede almacenar información local o remotamente utilizando el componente ITGLog.
- **ITGLog:** Es un “servidor de registro” que recibe y almacena la información generada por los múltiples emisores y receptores. La actividad de registro es controlada utilizando un canal de señalización y puede ser enviada mediante un canal fiable (TCP) o no fiable (UDP).

- **ITGManager:** Componente encargado de supervisar la operación precisa de cada uno de los demás componentes. Opera como un demonio y se encuentra en permanente ejecución.

3.2.4 Consideraciones adicionales

El tipo de diseño experimental acorde con la investigación planteada es el factorial mixto, cuyo enfoque principal se orienta 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 pretende es analizar la relación entre los factores y la respuesta, con la finalidad de comprender cómo se comporta esta relación y generar conocimiento que permita tomar acciones y decisiones que mejoren el desempeño del proceso (transmisión de VoIP sobre *Homeplug AV*).

Para estudiar la forma cómo 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 ejecutan aleatoriamente en el proceso todas las posibles combinaciones que pueden obtenerse con los niveles seleccionados (Gutiérrez, 2008).

Cada uno de los métodos de diseño experimental recomienda el uso de una técnica estadística para el análisis e interpretación de los datos. En el caso particular del diseño factorial, 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.

Al concluir el experimento se pretende inferir si uno o más factores afectaron a la variable de respuesta, y con ello plantear una relación de causalidad. Con ello, se buscan establecer los fundamentos del modelo empírico de evaluación del rendimiento en redes LAN *Homeplug AV* para tráfico VoIP.

3.2.5 Tamaño de la muestra

Considerando que el experimento a realizar comprende el análisis del rendimiento en una red LAN PLC con tráfico VoIP, a partir de dos (2) factores representativos como son Codec utilizado y número de estaciones en la red; es importante determinar el tamaño de muestra requerida por cada prueba a realizar.

Como el estudio a realizar es de carácter empírico o experimental, las variables que intervienen en la determinación del tamaño de la muestra son las siguientes (Morales Vallejo, 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:** Esta variable se refiere 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:** Establece el tamaño del efecto con respecto a la relación que se desea detectar y normalmente 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 3 niveles (Codecs G.711, G.723 y G.729) y el factor Número de estaciones comprende 4 niveles (1, 2, 5 y 10 PCs) se aplicará un tamaño de muestra para una relación 3 x 4 de acuerdo con las variables descritas y según la Tabla 12 formalmente establecida:

Tabla 12. Tamaño de muestra para diseño factorial con dos (2) factores

Niveles Factor1 x Niveles Factor2	Potencia ($1 - \beta$)	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)

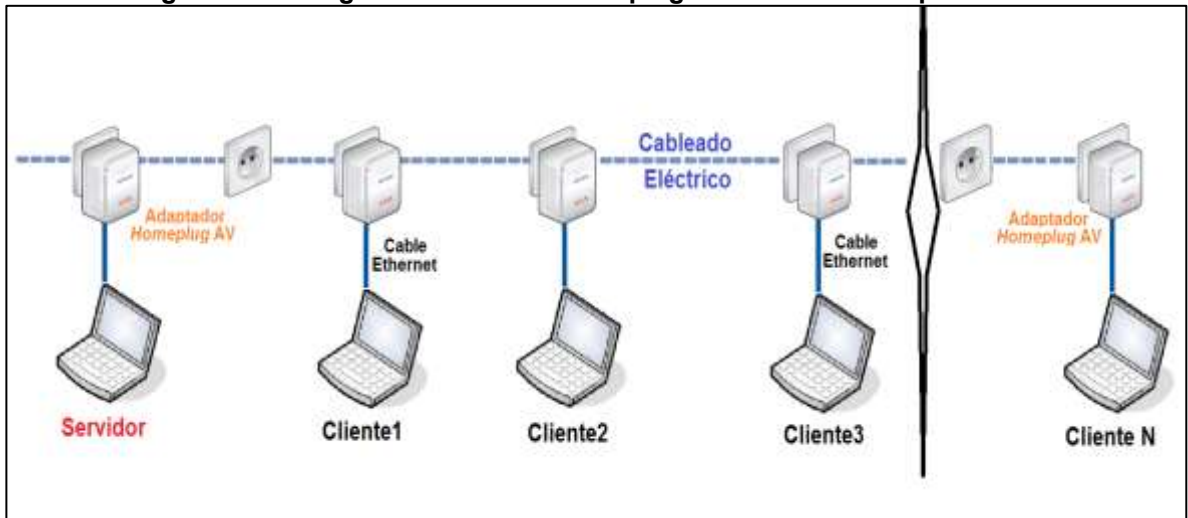
De acuerdo con la Tabla 12, el valor resultante para el tamaño de muestra es igual a cinco (5).

3.3 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Considerando la totalidad de los aspectos expuestos en el ítem precedente, en los siguientes párrafos se plantea el experimento a desarrollar junto con las diferentes opciones de prueba y/o tomas de datos.

Para el desarrollo del experimento se dispone la configuración de una red LAN operando sobre el cableado eléctrico y haciendo uso de adaptadores *Homeplug AV* marca TP-LINK, modelo TL-PA211 (ver Tabla 11) en cuyos extremos se conectan los equipos de usuario final (PCs) con cables *ethernet*. Los equipos utilizados se configuran con direcciones de red tipo IP clase C y su esquema de conexión se aprecia en la Figura 21.

Figura 21. Configuración de Red Homeplug AV usada en el experimento

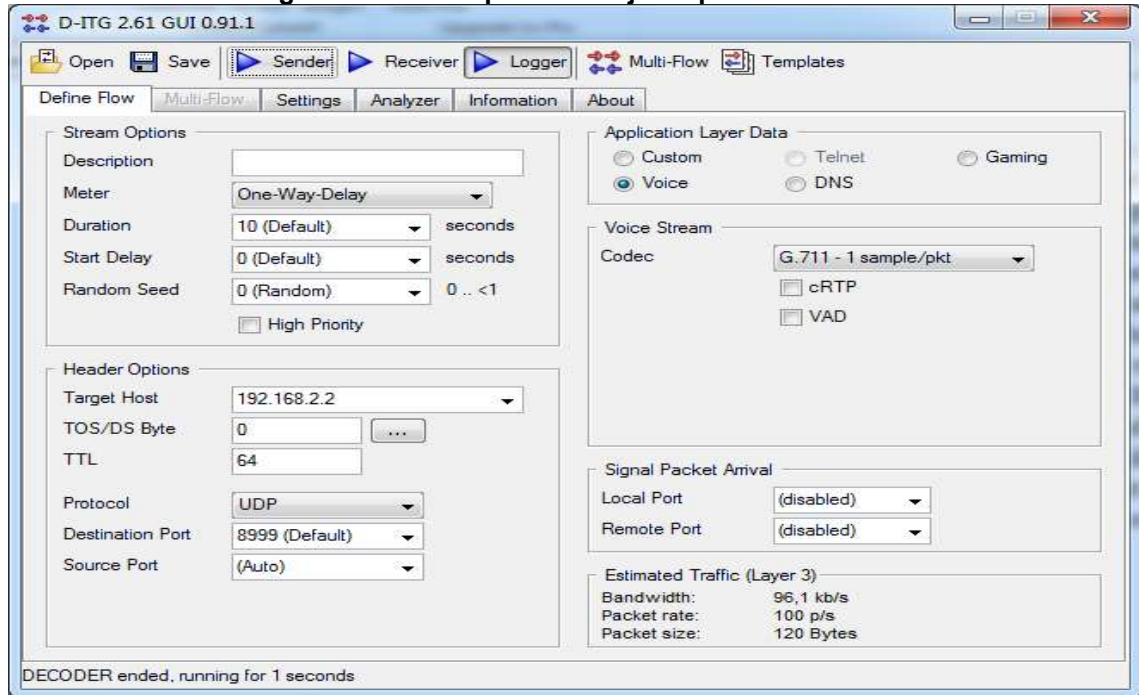


Fuente: Autor

De los equipos seleccionados, uno se configura como servidor y los restantes como clientes. Los clientes tienen la función de generar tráfico tipo VoIP (paquetes UDP) en forma aleatoria y en el servidor se realiza la captura y el análisis de los paquetes que circulan por la red *Homeplug AV*.

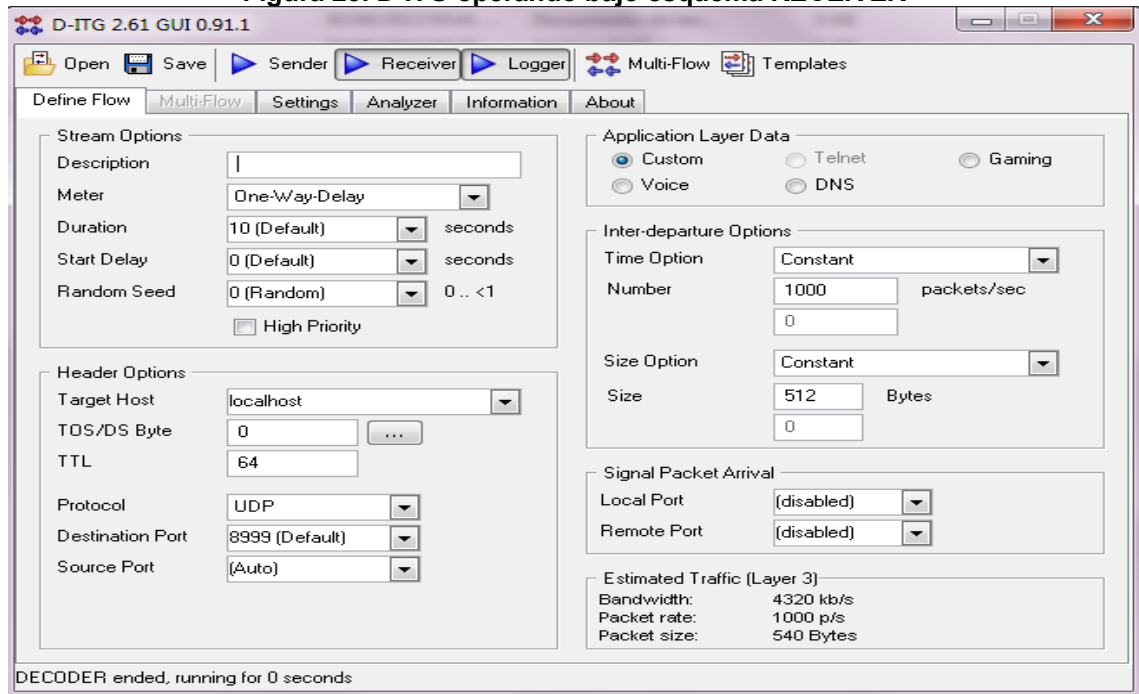
En el equipo servidor se habilita el software D-ITG bajo esquema *Receiver* y los en los equipos clientes se habilita el componente D-ITG bajo esquema *Sender* (Ver Figura 22 y Figura 23).

Figura 22. D-ITG operando bajo esquema SENDER



Fuente: Autor

Figura 23. D-ITG operando bajo esquema RECEIVER



Fuente: Autor

Los parámetros específicos para el desarrollo de las pruebas y la consecuente captura de datos se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Parámetros para el desarrollo de las pruebas

Característica	Detalle
Adaptadores Usados	Homeplug AV marca TP-LINK modelo TL-PA211
Equipos servidor y clientes	Portátiles con tarjeta de red tipo Ethernet de 1 Gbps.
Cables Ethernet	Tipo UTP Categoría 5e
Tiempo de duración x Toma de datos	30 segundos
Cantidad de paquetes x Toma de datos	1000 paquetes
Direccionamiento usado en las estaciones	IP clase C
Tipo de paquetes generados	Paquetes VoIP para codecs G.711 (1 sample), G.711 (2 samples), G.723, G.729 (2 samples) y G.729 (3 samples).
Tamaño de paquete	Establecido por el Codec utilizado. Ver Tabla 9.
Cantidad de clientes x Toma de datos	1, 2, 5 y 10 estaciones

Fuente: Autor

Con la finalidad de considerar los codecs más utilizados en plataformas VoIP para redes LAN, se tuvieron en cuenta los codecs G.711, G.723 y G.729 respectivamente. El cuadro resumen con la cantidad de muestras tomadas para cada códec y número de estaciones clientes se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14. Muestras tomadas por Codec VoIP y cantidad de estaciones

Estaciones	G711 1 muestra x paquete	G711 2 muestras x paquete	G723.1	G729 2 muestras x paquete	G729 3 muestras x paquete
1	5 muestras	5 muestras	5 muestras	5 muestras	5 muestras
2	5 muestras	5 muestras	5 muestras	5 muestras	5 muestras
5	5 muestras	5 muestras	5 muestras	5 muestras	5 muestras
10	5 muestras	5 muestras	5 muestras	5 muestras	5 muestras

Fuente: Autor

Debido a que se analizarán los cuatro (4) parámetros del rendimiento (*Throughput*, *Jitter*, retardos y porcentaje de paquetes perdidos), por cada uno de ellos se seleccionarán muestras de la siguiente manera:

$$\text{Muestras x Parámetro} = \Sigma (\text{Estaciones}) \times \Sigma (\text{Codecs}) \times \Sigma (\text{Muestras x Codec})$$

$$\text{Muestras x Parámetro} = 4 \times 5 \times 5$$

$$\text{Muestras x Parámetro} = 100 \text{ muestras}$$

Teniendo en cuenta la cantidad de parámetros analizados se obtiene un gran total de 400 muestras.

Con base en la información precedente, para el desarrollo del presente proyecto de investigación fue seleccionado un diseño factorial mixto de **400** combinaciones de tratamientos o puntos experimentales. Como se puede evidenciar, los niveles de los cuatro factores seleccionados son cuantitativos. Dadas las condiciones experimentales descritas, se considera que las cinco replicaciones del experimento son suficiente garantía para medir los efectos principales y las interacciones que puedan darse.

Por último es necesario resaltar que, debido a que se utilizan codecs de VoIP, cada uno de ellos establece por defecto un tamaño de paquete estándar y la opción de temporización entre paquetes (ver Tabla 9). Por ésta razón, no se consideran las variables tamaño de paquete y tiempo entre paquetes.

3.4 DATOS REUNIDOS A PARTIR DE LA EXPERIMENTACIÓN

A partir del desarrollo experimental se obtuvo un gran volumen de datos que fue organizado en tablas, de acuerdo con cada parámetro del rendimiento, y que se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 15. Matriz de diseño para Throughput (en Kbit/s)

No. de Estaciones	Codec VoIP utilizado				
	G711 1 muestra x paquete	G711 2 muestras x paquete	G723.1	G729 2 muestras x paquete	G729 3 muestras x paquete
1 PC	73.621045	68.843601	8.746788	12.808112	11.098460
	73.622087	68.843601	8.747080	12.807685	11.099099
	73.623104	68.845897	8.747080	12.807685	11.098729
	73.621178	68.846720	8.745873	12.809346	11.097867
	73.623283	68.842013	8.748092	12.806309	11.099658
2 PCs	147.101932	137.668834	17.492408	25.592322	22.194495
	147.165661	137.664243	17.488322	25.610244	22.164297
	148.179700	137.650472	17.491240	25.602560	22.186460
	147.008920	137.648923	17.509859	25.594872	22.185239
	147.097032	137.673443	17.471454	25.608545	22.178262

5 PCs	365.321157	342.971087	43.311849	63.559380	54.872979
	365.055805	342.879926	43.160634	63.529879	55.034770
	364.970743	341.190862	43.258946	63.454293	54.978386
	365.048874	342.785635	43.278437	64.482384	55.019849
	365.182929	341.908948	43.209182	62.546651	54.904241
10 PCs	727.750783	681.478781	86.416788	126.419337	109.037270
	729.338266	679.590683	86.285225	126.411116	107.952464
	723.069097	678.452614	86.598969	127.000860	109.561609
	728.457283	677.289677	86.548334	126.299823	109.029985
	724.981481	682.391708	86.318987	126.921052	108.670911

Fuente: Autor

Tabla 16. Matriz de diseño para Desviación Estándar del Retardo (seg.)

No. de Estaciones	Codec VoIP utilizado				
	G711 1 muestra x paquete	G711 2 muestras x paquete	G723.1	G729 2 muestras x paquete	G729 3 muestras x paquete
1 PC	0.000756	0.000752	0.000780	0.000780	0.000743
	0.000762	0.000813	0.000857	0.000619	0.000719
	0.000790	0.000823	0.000735	0.000717	0.000805
	0.000715	0.000875	0.000872	0.000792	0.000713
	0.002810	0.000717	0.000709	0.000616	0.000798
2 PCs	0.001326	0.002196	0.001451	0.001803	0.006192
	0.000761	0.005879	0.003720	0.001689	0.000873
	0.001840	0.003877	0.001979	0.000902	0.001979
	0.006374	0.004587	0.001783	0.000178	0.002437
	0.001668	0.003381	0.002984	0.002751	0.003592
5 PCs	0.002184	0.004040	0.002250	0.003352	0.002321
	0.005428	0.002932	0.004826	0.004766	0.004203
	0.004455	0.002014	0.003303	0.001761	0.003332
	0.003872	0.003487	0.002674	0.004738	0.002534
	0.004173	0.002504	0.004245	0.001848	0.004037
10 PCs	0.006295	0.006747	0.008039	0.007727	0.007293
	0.007475	0.008626	0.008214	0.006977	0.006358
	0.006934	0.006943	0.008140	0.006465	0.007342
	0.006482	0.008329	0.008045	0.007492	0.006621
	0.007321	0.006548	0.008217	0.006621	0.007374

Fuente: Autor

Tabla 17. Matriz de diseño para Jitter promedio (seg.)

No. de Estaciones	Codec VoIP utilizado				
	G711 1 muestra x paquete	G711 2 muestras x paquete	G723.1	G729 2 muestras x paquete	G729 3 muestras x paquete
1 PC	0.000270	0.000370	0.000745	0.000374	0.000743
	0.000302	0.000466	0.000710	0.000227	0.000529
	0.000306	0.000447	0.000579	0.000383	0.000597
	0.000266	0.000413	0.000781	0.000276	0.000721
	0.000515	0.000442	0.000575	0.000380	0.000525
2 PCs	0.000302	0.000415	0.000777	0.000395	0.000894
	0.000297	0.000613	0.000752	0.000492	0.000664
	0.000344	0.000440	0.000785	0.000386	0.000615
	0.000697	0.000543	0.000703	0.000478	0.000679
	0.000401	0.000436	0.000840	0.000371	0.000770
5 PCs	0.000410	0.000753	0.000905	0.000586	0.000784
	0.000591	0.000555	0.001038	0.000688	0.000826
	0.000561	0.000489	0.000973	0.000525	0.000916
	0.000582	0.000531	0.001006	0.000581	0.000889
	0.000459	0.000667	0.000938	0.000618	0.000795
10 PCs	0.001394	0.001518	0.001474	0.001718	0.001427
	0.001670	0.002233	0.001673	0.001526	0.001351
	0.001294	0.001458	0.001753	0.001205	0.001877
	0.001384	0.002019	0.001595	0.001762	0.001428
	0.001521	0.001454	0.001672	0.001204	0.001675

Fuente: Autor

Para finalizar con éste capítulo es muy importante destacar que, con referencia al parámetro Pérdida de paquetes, en la totalidad de las mediciones realizadas se obtuvo un valor igual a cero (0). Lo anterior 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 fortaleza de la tecnología para el desempeño en redes LAN PLC de tipo residencial y empresarial.

4. RESULTADOS

A partir de la información recolectada en el capítulo anterior, se procederá a utilizar una técnica estadística que permita describir y/o modelar efectivamente el comportamiento de los datos. Para ello se plantea el análisis de varianza (ANOVA).

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En múltiples situaciones se presenta el estudio de los efectos de dos o más factores sobre una variable de estudio y por esta razón los diseños factoriales son los más eficientes para éste tipo de experimentos. En un diseño factorial, para cada ensayo del experimento, se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores (Montgomery, 2004).

Para el caso de la presente investigación, se determina que existen dos factores a analizar (código VoIP usado y número de estaciones) para cada una de las variables de estudio (*throughput*, *jitter*, retardo) que hacen parte del rendimiento de la red LAN Homeplug AV. Por lo tanto, el factor A (Codec) tiene 5 tratamientos, el factor B (Nro. de estaciones) tiene 4 tratamientos (ver Figura 24) y cada réplica contiene todas las combinaciones de las pruebas.

Figura 24. Factores y Tratamientos de prueba

Factor A: Codec usado		Factor B: Número de Estaciones	
Tratamiento 1	G711 (1 muestra x paquete)	Tratamiento 1	1 PC
Tratamiento 2	G711 (2 muestras x paquete)	Tratamiento 2	2 PCs
Tratamiento 3	G723.1	Tratamiento 3	5 PCs
Tratamiento 4	G729 (2 muestras x paquete)	Tratamiento 4	10 PCs
Tratamiento 5	G729 (3 muestras x paquete)		

Fuente: Autor

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 que se refiere a los factores de interés primario en el experimento.

4.2 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):

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

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

donde,

a= Codec utilizado

b= número de estaciones en la red *Homeplug AV*

n= número de réplicas del 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 Código y número de estaciones

ε_{ijkl} =Error aleatorio

El estudio factorial para dos (2) factores (A,B) permite analizar los efectos A,B,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:

$$\begin{array}{ll} H_0: \text{Efecto A} = 0, & H_A: \text{Efecto A} \neq 0 \\ H_0: \text{Efecto B} = 0, & H_A: \text{Efecto B} \neq 0 \\ H_0: \text{Efecto AB} = 0, & H_A: \text{Efecto AB} \neq 0 \end{array}$$

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

Para el caso de modelos de efectos fijos, las pruebas para probar las hipótesis sobre cada efecto principal y sus interacciones se pueden construir dividiendo el cuadrado medio (CM) correspondiente del efecto o la interacción por el 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, 2002).

El procedimiento que se sigue es el siguiente:

Variable dependiente: *Throughput*

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

Número de muestras experimentales: 100

A continuación se presenta el análisis de varianza para el *throughput* a partir de los datos tomados de la Tabla 15.

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

$$FC = \frac{Y^2}{abn}$$

Teniendo en cuenta los datos de la Tabla 15 el valor FC es:

$$FC = \frac{Y^2}{abn} = \frac{243,8288827}{5 \times 4 \times 5} = 2,438288827$$

Para el cálculo de las sumas de cuadrados (SC) se usarán las siguientes fórmulas matemáticas:

$$SC_{TOT} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^n Y_{ijl}^2 - FC = 6,688642193 - 2,438288827 = 4,250353366$$

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i...}^2}{bn} - FC$$

$$SC_A = \frac{(6,5638406)^2 + (6,14346767)^2 + (0,7795755)^2 + (1,14267246)^2 + (0,9854653)^2}{20} - 2,4382888$$

$$SC_A = 1,747249921$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{j..}^2}{an} - FC$$

$$SC_B = \frac{(0,8756009)^2 + (1,7512294)^2 + (4,3459178)^2 + (8,6422731)^2}{25} - 2,4382888$$

$$SC_B = 1,458085884$$

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. Con el fin de 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 18. Throughput - Interacción de Factores A-B

No. de Estaciones	Codec VoIP utilizado				
	G711 1 muestra x paquete	G711 2 muestras x paquete	G723.1	G729 2 muestras x paquete	G729 3 muestras x paquete
1 PC	0,36811070	0,34422183	0,04373491	0,06403914	0,05549381
2 PCs	0,73655325	0,68830592	0,08745328	0,12800854	0,11090875
5 PCs	1,82557951	1,71173646	0,21621905	0,31757259	0,27481023
10 PCs	3,63359691	3,39920346	0,43216830	0,63305219	0,54425224

Fuente: Autor

$$SC_{Celdas-AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^b \frac{Y_{i.k.}^2}{n} - FC$$

Tomando como base los datos de la Tabla 18 se tiene:

$$SC_{Celdas-AB} = \frac{33,44294983}{5} - 2,4382888 = 4,250301139$$

$$SC_{AB} = SC_{Celdas-AB} - SC_A - SC_B$$

$$SC_{AB} = 4,250301139 - 1,747249921 - 1,458085884 = 1,044965334$$

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

$$SC_E = SC_{TOT} - SC_{Celdas-AB}$$

$$SC_E = 4,25035337 - 4,250301139 = 0,0000522310$$

En la Tabla 19 se presenta el resultado del análisis de varianza correspondiente al *throughput*:

Tabla 19. ANOVA completo para Throughput

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SC)	Gr. Lib	Cuadrado Medio (CM)	Cociente-F (Fo)	p-Valor
A: Códec	1,747249921	4	0,4368124802	669097,2272251370	<0,0001
B: Nro. de estaciones	1,458085884	3	0,4860286281	744485,1558449640	<0,0001
Interacción AxB	1,044965334	12	0,0870804445	133387,4067181610	<0,0001
Error	0,0000522310	80	0,0000006528		
TOTAL	4,25035337	99			

Fuente: Autor

De acuerdo con la Tabla 19, 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. Debido a que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha realizado 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.

4.3 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA EXPERIMENTACIÓN

Por lo general, los resultados obtenidos a partir de un análisis de varianza están relacionados con que los supuestos del modelo se cumplan. Los supuestos del modelo ANOVA son: normalidad, varianza constante e independencia. Esto significa que la respuesta (Y) debe tener una distribución normal, con similar varianza en cada experimento y las mediciones deben ser independientes. Los supuestos sobre (Y), mencionados anteriormente, se aplican sobre el elemento error (ε) en los diversos modelos (Gutiérrez, 2008, p.100)

Tradicionalmente se emplean los gráficos de residuos para verificar los supuestos del modelo, debido especialmente a que si los supuestos se cumplen, los residuos se pueden apreciar como una muestra aleatoria de distribución normal con varianza constante y media cero (0).

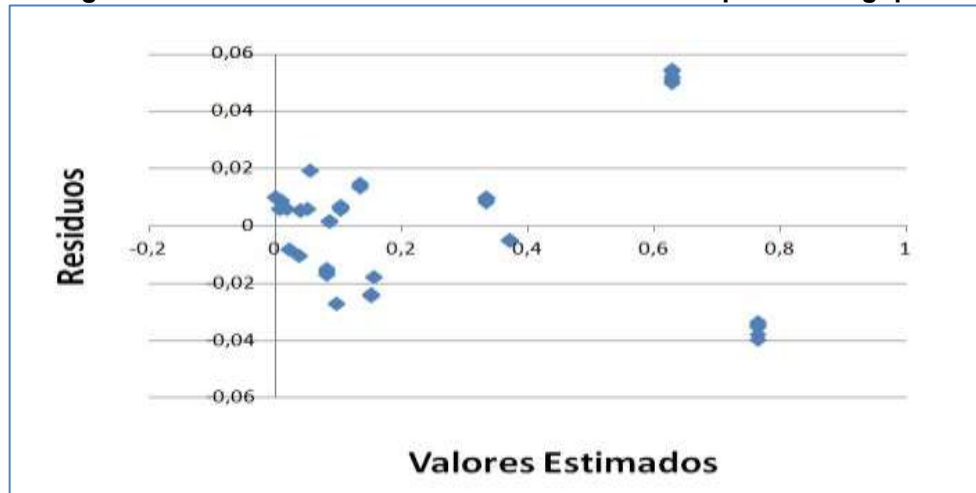
Además, es importante resaltar que los supuestos del modelo ANOVA deben ser verificados antes de dar por válidas las conclusiones de la etapa de interpretación en donde se supone que los residuos se distribuyen de manera normal, independientes y con varianza constante. La verificación es fundamental ya que de comprobarse la violación de alguno de los supuestos, se producirían impactos erróneos sobre las conclusiones establecidas.

En los siguientes párrafos se presentan los respectivos análisis para cada uno de los supuestos mencionados:

4.3.1 Supuesto de Varianza Constante

Para verificar el supuesto de varianza constante o el que las pruebas tienen varianza similar, se realiza un gráfico entre los valores estimados y los residuos (\hat{Y}_{ij} vs. ε_{ij}). En el eje X se ubican los valores \hat{Y}_{ij} y en el eje Y los valores correspondientes a los residuos ε_{ij} . Si los datos en la gráfica se distribuyen aleatoriamente en una banda horizontal sin ningún patrón claro, esto indica que se cumple con el supuesto que las pruebas tienen varianza similar. De otro modo, si se destaca un patrón claro como una cometa o un embudo, ello es señal de que no se está cumpliendo con el supuesto de varianza constante. En especial, la parte angosta al presentarse un embudo indica que en esos niveles estimados para la variable de respuesta se espera una menor variabilidad, y por lo tanto se debe analizar si estos valores ayudan a maximizar o minimizar el resultado requerido (Moreno, 2002, p.106).

Figura 25. Valores residuales vs. Valores estimados para Throughput



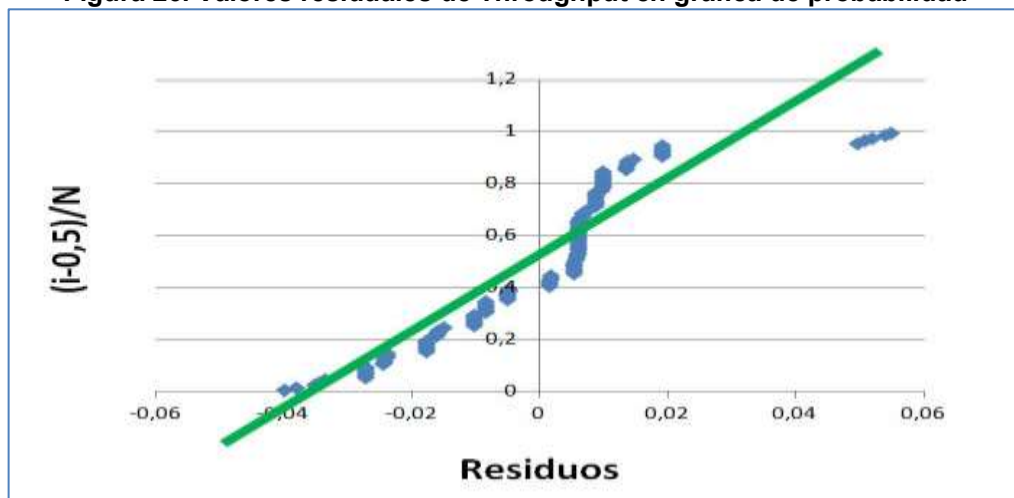
Fuente: Autor

En la Figura 25 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.

4.3.2 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 26. Valores residuales de Throughput en gráfica de probabilidad



Fuente: Autor

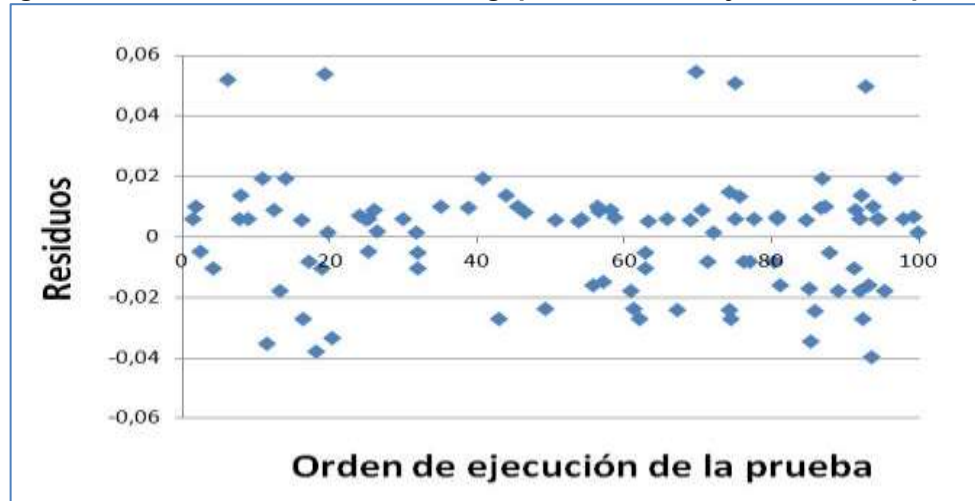
En la Figura 26, correspondiente a la gráfica de probabilidad normal, se aprecia el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos, ya que estos se encuentran ajustados sobre una recta.

4.3.3 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; ó, 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 27. Valores residuales de Throughput vs. Ord. de ejecución de la prueba



Fuente: Autor

En la Figura 27, 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.

4.4 MODELO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE VARIANZA PARA JITTER

Con base en los procedimientos descritos en los numerales 4.2 y 4.3, en éste ítem se desarrollará el modelo estadístico, análisis de varianza y la validación de los resultados obtenidos experimentalmente para la variable *Jitter*.

Teniendo en cuenta el *Jitter*, un diseño factorial de dos (2) factores posee una respuesta (Y) que puede describirse mediante el modelo de efectos dado por la siguiente fórmula:

$$Y_{ijl} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \varepsilon_{ijl}$$
$$i = 1,2,\dots,a; \quad j = 1,2,\dots,b; \quad l = 1,2 \dots n$$

donde,

a= Codec utilizado

b= número de estaciones en la red *Homeplug AV*

n= número de réplicas del experimento

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

μ =Media general del *Jitter* 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,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:

$$\begin{array}{ll} H_0: \text{Efecto } A = 0, & H_A: \text{Efecto } A \neq 0 \\ H_0: \text{Efecto } B = 0, & H_A: \text{Efecto } B \neq 0 \\ H_0: \text{Efecto } AB = 0, & H_A: \text{Efecto } AB \neq 0 \end{array}$$

El procedimiento que se sigue es el siguiente:

Variable dependiente: *Jitter*

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

Número de muestras experimentales: 100

A continuación se presenta el análisis de varianza para el *Jitter* a partir de los datos tomados de la Tabla 17.

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

$$FC = \frac{Y^2}{abn}$$

Teniendo en cuenta los datos de la Tabla 17 el valor FC es:

$$FC = \frac{Y^2}{abn} = \frac{0,00688601}{5 \times 4 \times 5} = 0,0000688601$$

Para el cálculo de las sumas de cuadrados (SC) se usarán las siguientes fórmulas matemáticas:

$$SC_{TOT} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^n Y_{ijl}^2 - FC = 0,0000916029 - 0,0000688601 = 0,0000227427$$

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i..}^2}{bn} - FC$$

$$SC_A = \frac{(0,013566)^2 + (0,016262)^2 + (0,020274)^2 + (0,014175)^2 + (0,018705)^2}{20} - 0,0000688601$$

$$SC_A = 0,0000016565$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{an} - FC$$

$$SC_B = \frac{(0,011942)^2 + (0,014089)^2 + (0,017666)^2 + (0,039285)^2}{25} - 0,0000688601$$

$$SC_B = 0,0000190003$$

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. Con el fin de 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 20. Jitter - Interacción de Factores A-B

No. de Estaciones	Codec VoIP utilizado				
	G711 1 muestra x paquete	G711 2 muestras x paquete	G723.1	G729 2 muestras x paquete	G729 3 muestras x paquete
1 PC	0,00165900	0,00213800	0,00339000	0,00164000	0,00311500
2 PCs	0,00204100	0,00244700	0,00385700	0,00212200	0,00362200
5 PCs	0,00260300	0,00299500	0,00486000	0,00299800	0,00421000
10 PCs	0,00726300	0,00868200	0,00816700	0,00741500	0,00775800

Fuente: Autor

$$SC_{Celdas-AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^b \frac{Y_{i.k.}^2}{n} - FC$$

Tomando como base los datos de la Tabla 20 se tiene:

$$SC_{Celdas-AB} = \frac{0,0004499343}{5} - 0,0000688601 = 0,0000211267$$

$$SC_{AB} = SC_{Celdas-AB} - SC_A - SC_B$$

$$SC_{AB} = 0,0000211267 - 0,0000016565 - 0,0000190003 = 0,0000004700$$

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

$$SC_E = SC_{TOT} - SC_{Celdas-AB}$$

$$SC_E = 0,0000227427 - 0,0000211267 = 0,000001616$$

En la Tabla 21 se presenta el resultado del análisis de varianza correspondiente al *Jitter*:

Tabla 21. ANOVA completo para Jitter

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SC)	Gr. Lib	Cuadrado Medio (CM)	Cociente-F (Fo)	p-Valor
A: Códec	0,0000016565	4	0,0000004141	20,5007956689	<0,0001
B: Nro. de estaciones	0,0000190003	3	0,0000063334	313,5361965203	<0,0001
Interacción AxB	0,0000004700	12	0,0000000392	1,9388937665	0,0384
Error	0,0000016160	80	0,0000000202		
TOTAL	0,0000227427	99			

Fuente: Autor

De acuerdo con la Tabla 21, 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) Por lo tanto, se tomarán como estadísticamente significativos los valores cuyo p – Valor < 0,05.

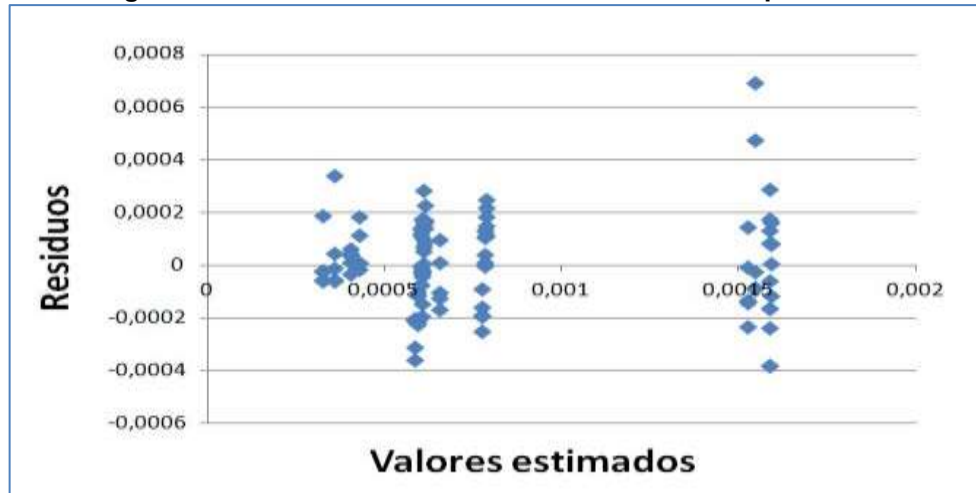
La tabla ANOVA permite descomponer la variabilidad del *Jitter* en las contribuciones debidas a varios factores. Debido a que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha realizado la medición de cada factor teniendo en cuenta la eliminación del resto de los factores. Los p – Valor determinan la importancia estadística de cada uno de los factores. Considerando que en el análisis de varianza existen dos (2) efectos con p – Valor inferiores a 0,05 (A, B), 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 otro lado, los efectos que no influyen estadísticamente en el modelo (Interacción AB), se podría considerar el eliminarlos enviando sus efectos sobre el modelo al término del error (ϵ).

Con respecto a la validación de los resultados obtenidos a partir de la experimentación para la variable *Jitter*, en los siguientes párrafos se presentan los respectivos análisis para cada uno de los supuestos mencionados:

En la Figura 28 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.

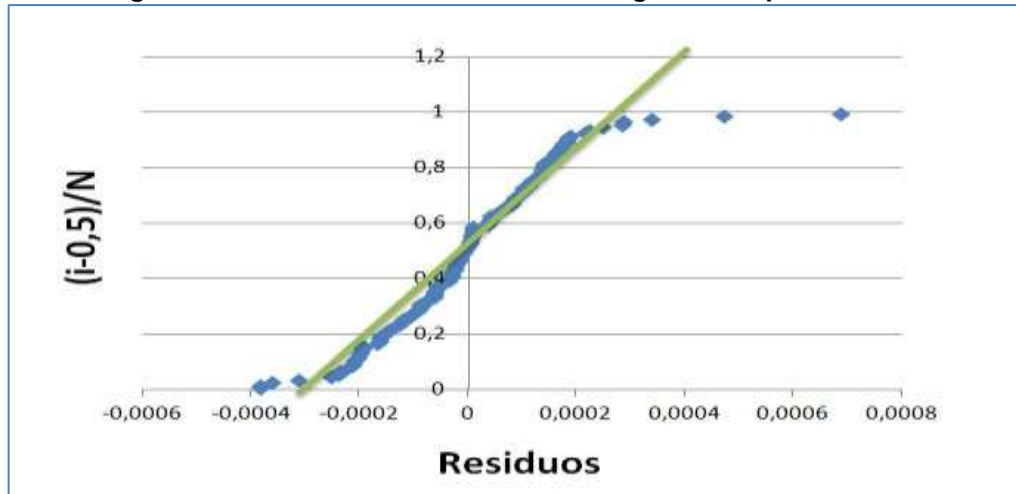
Figura 28. Valores residuales vs. Valores estimados para Jitter



Fuente: Autor

En la Figura 29, 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.

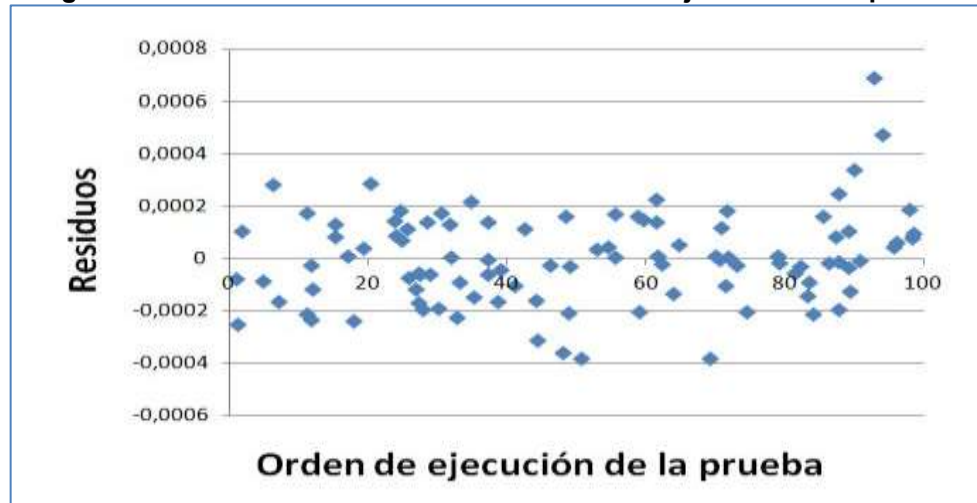
Figura 29. Valores residuales de Jitter en gráfica de probabilidad



Fuente: Autor

En la Figura 30, 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.

Figura 30. Valores residuales de Jitter vs. Ord. de ejecución de la prueba



Fuente: Autor

4.5 MODELO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE VARIANZA PARA RETARDO

Con base en los procedimientos descritos en los numerales 4.2 y 4.3, en éste ítem se desarrollará el modelo estadístico, análisis de varianza y la validación de los resultados obtenidos experimentalmente para la variable *Retardo*.

Teniendo en cuenta el *Retardo*, un diseño factorial de dos (2) factores posee una respuesta (Y) que puede describirse mediante el modelo de efectos dado por la siguiente fórmula:

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

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

donde,

a= Codec utilizado

b= número de estaciones en la red *Homeplug AV*

n= número de réplicas del experimento

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

μ =Media general del *Retardo* 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,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:

$$\begin{array}{ll} H_0: \text{Efecto } A = 0, & H_A: \text{Efecto } A \neq 0 \\ H_0: \text{Efecto } B = 0, & H_A: \text{Efecto } B \neq 0 \\ H_0: \text{Efecto } AB = 0, & H_A: \text{Efecto } AB \neq 0 \end{array}$$

El procedimiento que se sigue es el siguiente:

Variable dependiente: *Retardo*

Factores: (A): Codec usado

(B): Número de estaciones en la red

Número de muestras experimentales: 100

A continuación se presenta el análisis de varianza para el *Retardo* a partir de los datos tomados de la Tabla 16.

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

$$FC = \frac{Y^2}{abn}$$

Teniendo en cuenta los datos de la Tabla 16 el valor FC es:

$$FC = \frac{Y^2}{abn} = \frac{0,12614857}{5 \times 4 \times 5} = 0,0012614857$$

Para el cálculo de las sumas de cuadrados (SC) se usarán las siguientes fórmulas matemáticas:

$$SC_{TOT} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^n Y_{ijl}^2 - FC = 0,0019303971 - 0,0012614857 = 0,0006689114$$

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i...}^2}{bn} - FC$$

$$SC_A = \frac{(0,072421)^2 + (0,07607)^2 + (0,073823)^2 + (0,062594)^2 + (0,070266)^2}{20} - 0,0012614857$$

$$SC_A = 0,0000053444$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{an} - FC$$

$$SC_B = \frac{(0,021068)^2 + (0,066202)^2 + (0,085279)^2 + (0,182625)^2}{25} - 0,0012614857$$

$$SC_B = 0,0005565529$$

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. Con el fin de 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 22. Retardo - Interacción de Factores A-B

No. de Estaciones	Codec VoIP utilizado				
	G711 1 muestra x paquete	G711 2 muestras x paquete	G723.1	G729 2 muestras x paquete	G729 3 muestras x paquete
1 PC	0,00583300	0,00398000	0,00395300	0,00352400	0,00377800
2 PCs	0,01196900	0,01992000	0,01191700	0,00732300	0,01507300
5 PCs	0,02011200	0,01497700	0,01729800	0,01646500	0,01642700
10 PCs	0,03450700	0,03719300	0,04065500	0,03528200	0,03498800

Fuente: Autor

$$SC_{Celdas-AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^b \frac{Y_{i.k.}^2}{n} - FC$$

Tomando como base los datos de la Tabla 22 se tiene:

$$SC_{Celdas-AB} = \frac{0,0092199097}{5} - 0,0012614857 = 0,0005824962$$

$$SC_{AB} = SC_{Celdas-AB} - SC_A - SC_B$$

$$SC_{AB} = 0,0005824962 - 0,0000053444 - 0,0005565529 = 0,0000205990$$

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

$$SC_E = SC_{TOT} - SC_{Celdas-AB}$$

$$SC_E = 0,0006689114 - 0,0005824962 = 0,0000864151$$

En la Tabla 21 se presenta el resultado del análisis de varianza correspondiente al *Retardo*:

Tabla 23. ANOVA completo para Retardo

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SC)	Gr. Lib	Cuadrado Medio (CM)	Cociente-F (Fo)	p-Valor
A: Códec	0,0000053444	4	0,0000013361	1,2369012986	0.3002
B: Nro. de estaciones	0,0005565529	3	0,0001855176	171,7454639796	<.0001
Interacción AxB	0,0000205990	12	0,0000017166	1,5891528556	0.107
Error	0,0000864151	80	0,0000010802		
TOTAL	0,0006689114	99			

Fuente: Autor

De acuerdo con la Tabla 23, 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) Por lo tanto, se tomarán como estadísticamente significativos los valores cuyo *p-Valor* < 0,05.

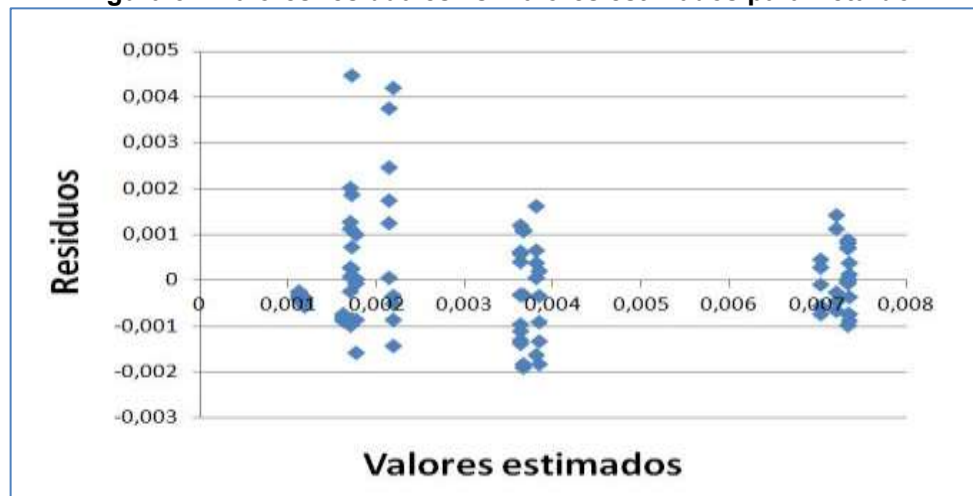
La tabla ANOVA permite descomponer la variabilidad del *Retardo* en las contribuciones debidas a varios factores. Debido a que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha realizado la medición de cada factor teniendo en cuenta la eliminación del resto de los factores. Los *p* – *Valor* determinan la importancia estadística de cada uno de los factores. Considerando que en el análisis de varianza existe un efecto con *p* – *Valor* inferiores a 0,05 (B), se destaca que este factor tiene un efecto estadísticamente significativo del *Retardo* en un 95 % de confianza para los cuales la hipótesis H_0 se rechaza.

Por otro lado, los efectos que no influyen estadísticamente en el modelo (A, Interacción AB), se podría considerar el eliminarlos enviando sus efectos sobre el modelo al término del error (ϵ).

Con respecto a la validación de los resultados obtenidos a partir de la experimentación para la variable *Retardo*, en los siguientes párrafos se presentan los respectivos análisis para cada uno de los supuestos mencionados:

En la Figura 31 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.

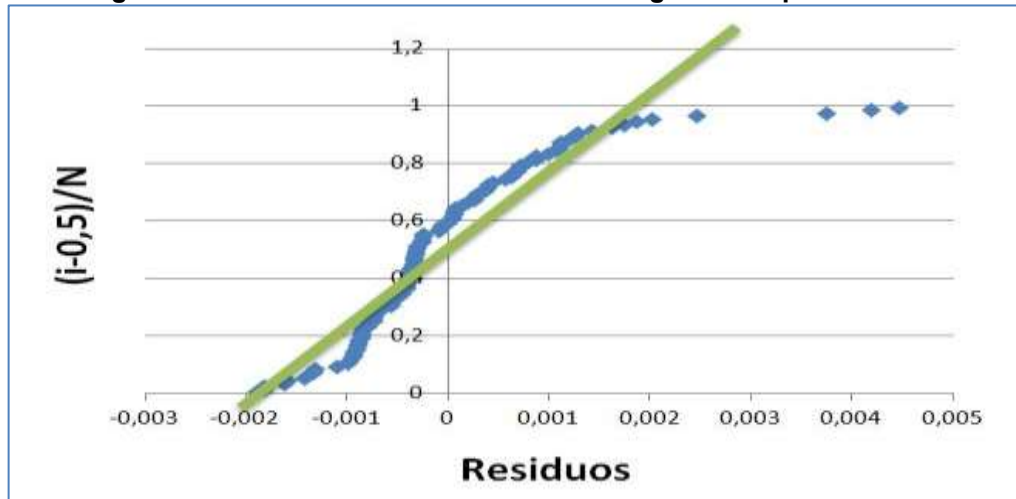
Figura 31. Valores residuales vs. Valores estimados para Retardo



Fuente: Autor

En la Figura 32, 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.

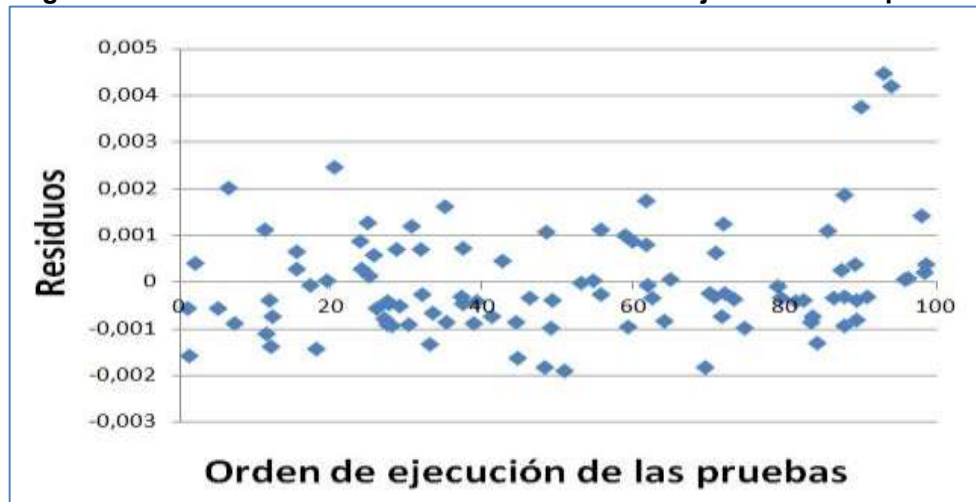
Figura 32. Valores residuales de Retardo en gráfica de probabilidad



Fuente: Autor

En la Figura 33, 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.

Figura 33. Valores residuales de Retardo vs. Ord. de ejecución de la prueba



Fuente: Autor

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como capítulo esencial de todo trabajo de investigación, a continuación se presenta una relación detallada de las principales conclusiones obtenidas, así como una serie de propuestas, a nivel de recomendación, para futuros trabajos en el área.

5.1 CONCLUSIONES

La tecnología PLC a pesar de llevar varias décadas de desarrollo e innovación a nivel mundial, no ha penetrado fuertemente en el contexto nacional debido, entre otras causas, al bajo conocimiento de los estándares, a la muy reducida oferta de equipos y productos asociados, al auge de otras tecnologías cableadas como Ethernet e inalámbricas como WiFi, y al escepticismo latente en el personal que implementa redes de comunicaciones y redes de datos.

Dentro del ámbito nacional y después de una ardua investigación del estado del arte con respecto a la tecnología PLC en Colombia, específicamente orientado al estándar *Homeplug AV*, se establece que se presenta una mínima documentación referida al tema. La información encontrada se enfoca a breves informes descriptivos de la tecnología y ningún informe derivado de investigaciones relacionadas con el impacto o evaluación del uso del estándar en el país.

El tema considerado en 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, sobre escenarios construidos a partir de la redes de datos de área local, operando en redes eléctricas del entorno empresarial y domiciliario.

En éste trabajo de investigación se planteó un modelo empírico de rendimiento específicamente centrado en aplicaciones tipo VoIP, delimitación que permitió un enfoque muy preciso en los principales parámetros (*Throughput*, *Jitter*, Retardo y pérdida de paquetes). Con ello se lograron establecer escenarios de prueba muy puntuales, los cuales facilitaron la toma de datos y su posterior análisis.

Toda investigación basada en el análisis y estudio del comportamiento de una red de datos requiere el uso de herramientas de generación de tráfico y, para el caso particular de la presente investigación, fue crucial el generador de tráfico D-ITG por su versatilidad para operar simultáneamente en entornos multihilo, por su arquitectura cliente/servidor y por su potencia para simular los codecs de audio más relevantes en las redes actuales.

Teniendo en cuenta el rendimiento de la red *Homeplug AV* para tráfico VoIP se analizaron los parámetros *Throughput*, *Jitter*, pérdida de paquetes y retardo. Con respecto al parámetro pérdida de paquetes, en la totalidad de las mediciones realizadas se obtuvo un valor igual a cero (0). Lo anterior 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 fortaleza de la tecnología para el desempeño en redes LAN PLC de tipo residencial y empresarial.

El uso de la técnica ANOVA permitió estructurar una función objetivo para cada uno de los tres parámetros relevantes (*Throughput*, *Jitter* y Retardo). A partir de ello, 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 manera individual como de su respectiva interacción.

Con relación al *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.

La evaluación de los resultados obtenidos a partir de la experimentación, para cada uno de los parámetros de rendimiento considerados (*Throughput*, *Jitter* y

Retardo) se realizó mediante la verificación de los supuestos para el modelo ANOVA como son normalidad, varianza constante e independencia.

Con respecto al supuesto de varianza constante, en las gráficas de valores estimados versus residuos (\hat{Y}_{ij} vs. ε_{ij}), para los tres parámetros analizados, se cumplió con el argumento de que las pruebas realizadas tienen varianza similar ya que los datos se distribuyeron aleatoriamente en la banda horizontal sin reflejar un patrón claro.

Para verificar el supuesto de normalidad, se ubicaron los valores residuales de cada parámetro (*Throughput*, *Jitter* y Retardo) en una gráfica de probabilidad normal y se encontró que al dibujar los residuos en cada gráfica, estos siguieron una agrupación muy similar a una línea recta, con lo cual se comprobó la validez del supuesto.

La evaluación del modelo empírico con base en el supuesto de independencia para los parámetros analizados (*Throughput*, *Jitter* y Retardo) se realizó mediante los gráficos de los valores residuales versus el orden de ejecución de cada prueba. Debido a que en la totalidad de las gráficas se encontró una distribución aleatoria de los puntos en la franja horizontal, se consideró el cumplimiento del supuesto de independencia para el modelo.

5.2 RECOMENDACIONES

La implementación de una tecnología como PLC, en un país en vías de desarrollo como Colombia, se convierte en un reto y la vez en una importante alternativa para la expansión de redes LAN en hogares y empresas donde se cuenten con las condiciones eléctricas adecuadas, se desee evitar cableado adicional, reducir costos y obtener los beneficios de banda ancha. Bajo esta premisa es importante desarrollar estudios que permitan establecer la viabilidad de la tecnología PLC en el país, tomando como base la implementación de estándares de aceptación y reconocimiento a nivel mundial como *Homeplug AV*.

Colombia al ser un país con una extensa área rural (95% del territorio) pobremente atendida (Jaramillo, 2006), mediante la implantación de soluciones tecnológicas de conectividad al interior de hogares y basadas en *Homeplug AV*, podrá llevar la información a miles de usuarios y propender por la reducción de la brecha tecnológica existente, lo cual propiciará la generación de un impacto positivo que ayude mitigar la crisis del sector rural.

La información resultado del presente proyecto de investigación, se enfocó en el desarrollo de un modelo estadístico de evaluación del rendimiento del estándar Homeplug AV para el tráfico de información tipo VoIP. Con base en éste documento y como sugerencia particular para futuras investigaciones en el área, se sugiere el desarrollo del modelo de predicción del rendimiento de la red LAN Homeplug basado en modelos de regresión lineal para los parámetros *throughput*, *jitter* y *retardo*.

Igualmente, se recomienda tomar como base la presente investigación para el desarrollo de un simulador de red específicamente enfocado en la tecnología PLC y en especial para el estándar Homeplug. El simulador propuesto debe integrar tanto las capas física (PHY) como de acceso al medio (MAC) y permitir optimizar la implementación de redes PLC en ambientes residenciales y empresariales. Debido al uso de Homeplug, el simulador debería estar en capacidad de predecir el comportamiento del tráfico multimedial en la red (voz, video, datos).

Teniendo en cuenta que a la fecha de finalización del presente proyecto de investigación, están tomando auge dos nuevas versiones del protocolo Homeplug, denominadas Homeplug AV y Homeplug PHY con especificaciones mejoradas en cuanto a velocidades de transmisión y calidad de servicio (QoS), se recomienda iniciar estudios sobre el rendimiento de estos protocolos para tráfico multimedial.

Por último y considerando el panorama futuro de las comunicaciones por línea de potencia se encuentra que existen tres aspectos tecnológicos que impiden un desarrollo y difusión a plena escala de la tecnología PLC: interoperabilidad, radio interferencia y el uso de tecnologías inalámbricas.

- **Interoperabilidad:** A pesar de los esfuerzos de organizaciones como *Homeplug Alliance*, actualmente una gran cantidad de productos PLC fabricados por diferentes proveedores, acusan el problema de la interoperabilidad por falta de regulación. Ante ello la tendencia es hacia el desarrollo de especificaciones de amplia aceptación como IEEE1901 (IEEE, 2010) e IEEE1675 (IEEE, 2008), y la fabricación de productos altamente compatibles.
- **Radio interferencia:** Este impedimento es ocasionado por el uso de equipos OFDM y la recomendación es que las entidades gubernamentales de orden nacional, como el Ministerio de Minas y la Comisión de Regulación de Energía, establezcan normatividad orientada a la aplicación de blindajes y a minimizar los factores de riesgo asociados a la instalación de tecnología PLC en entornos residenciales y empresariales.
- **Tecnologías Inalámbricas:** Se requiere un mayor desarrollo de estudios encaminados a analizar las ventajas comparativas de la tecnología PLC sobre tecnologías inalámbricas (WiFi, UWB, ZigBee, etc.). Por ahora es evidente la

minimización de la contaminación radioeléctrica, la eliminación de la interferencia generada por las paredes y el aumento del ancho de banda digital, entre otros.

REFERENCIAS

- Afkhamie, K. H., Katar, S., Yonge, L., & Newman, R. (2005). An overview of the upcoming HomePlug AV standard. *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2005.*, 400–404. doi:10.1109/ISPLC.2005.1430539
- Altolini, D., Benvenuto, N., Pupolin, S., & Riva, R. (2012). Preamble-based channel estimation in HomePlug AV systems. *2012 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 176–181. doi:10.1109/ISPLC.2012.6201326
- Anatory, J. & Theethayi, N. (2010). *Broadband Power-Line Communication Systems: Theory and Applications*. (1a ed., p. 193). Southampton, England: WIT Press.
- Avallone, S. . P. A. (n.d.). D-ITG Distributed Internet Traffic Generator. Retrieved November 02, 2013, from <http://traffic.comics.unina.it/software/ITG/>
- Botta, A., Dainotti, A., & Pescapé, A. (2012). A tool for the generation of realistic network workload for emerging networking scenarios. *Computer Networks*, 56(15), 3531–3547. doi:10.1016/j.comnet.2012.02.019
- Carcelle, X. (2006). *Powerline communications in practice* (1a ed., p. 349). Londres, Inglaterra: Artech House.
- Chen, W. Y. (2004). *Home Networking Basis: Transmission Environments and Wired/Wireless Protocols* (1ed. ed., p. 576). Saddle River, NJ: Pearson-Prentice Hall.
- Departamento Nacional de Planeación. (2005). Vision Colombia II Centenario 2019. Resumen Ejecutivo. Retrieved from https://www.dnp.gov.co/Portals/0/archivos/documentos/2019/Libro_4ta_ed/resumen_ejecutivo.pdf
- Departamento Nacional de Planeación. (2010). Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014. Prosperidad para Todos. Retrieved from <https://www.dnp.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=4-J9V-FE2pl=&tabid=1238>

- Ekanayake, J., Jenkins, N., & Liyanage, K. (2012). *Smart grid: technology and applications* (1a ed., p. 293). West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- El Fawal, a., & Le Boudec, J. (2011). Coexistence of Multiple HomePlug AV Logical Networks: A Measurement Based Study. *2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011*, 1–5. doi:10.1109/GLOCOM.2011.6133818
- FCC. (n.d.). Federal Communications Commission. Retrieved September 12, 2013, from <http://www.fcc.gov/>
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2011). *Guía de Redes Inteligentes de energía y comunicación* (p. 193). Madrid, España: Gráficas Arias Montano.
- Gebali, F. (2008). *Analysis of Computer and Communication Networks* (1a ed., p. 684). New York, USA: Springer.
- Gobernación de Santander. (2012). Plan de Desarrollo, Santander en Serio, el gobierno de la gente, 2012-2015. Gobernación de Santander. Retrieved from <http://www.asambleadesantander.gov.co/Doc/Foro/pddsantander.pdf>
- Granados A., G., & Vesga F., J. C. (2012a). Análisis sobre el comportamiento del Throughput en redes LAN bajo tecnología Power Line Communications. *Revista Iteckne, Universidad Santo Tomás*, 9(2), 22–32.
- Granados A., G., & Vesga F., J. C. (2012b). Modelo estadístico sobre el comportamiento del throughput en redes LAN sobre tecnología power line communications. *Revista Ingeniería y Universidad, Universidad Javeriana*, 16(2), 443–447.
- Guerrini, E., & Veronesi, D. (2011). Bit Loading Algorithm Based on a Probabilistic Approach for HomePlug AV. In *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, 2011 IEEE (pp. 1–6). doi:10.1109/GLOCOM.2011.6133994
- Guillén, 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*, 33.
- Gutiérrez, H. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (1a ed., p. 562). Mexico D.F., Mexico: McGraw Hill.

- Haniph A. Latchman, Srinivas Katar, Larry Yonge, S. G. (2013). *Homeplug AV and IEEE 1901: A Handbook for PLC Designers and Users* (1a ed., p. 384). New Jersey, USA: Wiley-IEEE Press.
- HD-PLC Alliance. (n.d.). Retrieved August 14, 2013, from <http://www.hd-plc.org/>
- Held, G. (2006). *Understanding broadband over power line* (1a ed., p. 191). Boca Raton, USA: Auerbach Publications.
- Homeplug. (n.d.). Homeplug Powerline Alliance. Retrieved January 21, 2013, from <https://www.homeplug.org/home/>
- Homeplug Powerline Alliance. (2001). Homeplug 1.0 Technology White Paper.
- Homeplug Powerline Alliance. (2005). HomePlug AV White Paper. <http://www.homeplug.org/products/whitepapers/>.
- Homeplug Powerline Alliance. (2009). HomePlug Powerline Alliance Fact Sheet.
- Hrasnica, H., Haidine, A., & Lehnert, R. (2004). *Broadband Powerline Communications Networks Network Design* (1a ed., p. 292). West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- IEEE. (n.d.). IEEE Communications Society. Retrieved September 13, 2013, from <http://www.comsoc.org/>
- IEEE. (2008). IEEE Standard for Broadband Over Power Line Hardware. doi:10.1109/IEEESTD.2008.4747595
- IEEE. (2010). 1901-2010 - IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications. Retrieved from <http://grouper.ieee.org/groups/1901/>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC. (1998). Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050).
- Jaramillo, P. S. (2006). El sector rural en Colombia y su crisis actual. *Revista Colombiana de Sociología*, (27), 47–62.
- Lee, Y., Latchman, H. a., Ha, H., & Hwang, M. (2012). QoS augmented CSMA/CA MAC protocol for high speed multimedia powerline communications. *2012 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 236–241. doi:10.1109/ISPLC.2012.6201279

- Martinez, R., & Martinez, N. (1997). *Diseño de Experimentos. Análisis de datos estándar y no estándar*. (U. N. de Colombia, Ed.) (1 ed., p. 461). Bogotá D.C.
- Ministerio de las Tecnologías de la información y comunicaciones de Colombia. (2008). Plan Nacional de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. 2008-2019.
- Ministerio de las Tecnologías de la información y comunicaciones de Colombia. (2011). Plan Vive Digital Colombia. Documento Vivo del Plan. Retrieved from http://www.vivedigital.gov.co/files/Vive_Digital_Lanzamiento_Plan.pdf
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos* (2a ed., p. 692). Mexico D.F., Mexico: Limusa Wiley.
- Morales Vallejo, P. (2012). Tamaño necesario de la muestra : ¿ Cuántos sujetos necesitamos ?, 24. Retrieved from <http://www.upcomillas.es/personal/peter/investigacion/Tama%F1omuestra.pdf>
- Moreno, W. (2002). *Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos*. (E. UIS, Ed.) (p. 330p). Bucaramanga.
- Piñero, P. j., Cortés, J. A., Cañete, F. J., & Manzanares-Lopez, P. (2011). A Realistic HomePlug-AV Simulator for In-home Network Services Planning. *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE*, 1–5.
- Stallings, W. (2007). *Data and Computer Communications* (8a ed., p. 901). New Jersey, USA: Pearson-Prentice Hall.
- Tanenbaum, A., & Wheteral, D. (2011). *Computer Networks* (5a ed., p. 962). Boston, USA: Pearson-Prentice Hall.
- Toledo, C. F. (2005). *Acceso a Internet mediante red eléctrica domiciliaria*. Universidad Industrial de Santander.
- TP-LINK Industries. (n.d.). TP-LINK. Retrieved October 15, 2013, from <http://www.tp-link.com/en/products/details/?model=TL-PA211#spec>
- Trujillo, P. J. (2004). *Transmisión de datos por líneas de distribución de Baja tensión*. Universidad Industrial de Santander.
- UIT-T. (1988). Recommendation G.711: Pulse Code Modulation (PCM) of voice frequencies. Retrieved from <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.711-198811-l/en>

- UIT-T. (2006). Recommendation G.723.1 : Dual rate speech coder for multimedia communications transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s. Retrieved from <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.723.1-199603-S/en>
- UIT-T. (2007). Recommendation G.729: Coding of speech at 8 kbits using Conjugate- Structure Algebraic-Code-Excited Linear-Prediction (CS-ACELP). Retrieved from <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.729-199603-S/en>
- 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).
- Wallace, K. (2011). *Implementing Cisco Unified Communications Voice over IP and QoS (CVOICE) Foundation Learning Guide* (1a ed., p. 730). Indianapolis, USA: Cisco Press.
- Wittenberg, N. (2009). *Understanding Voice over IP technology* (1a ed., p. 396). New York, USA: Delmar Cengage Learning.