

# Evaluación del rendimiento de las comunicaciones por red eléctrica para la transmisión de voz sobre el protocolo de internet, bajo un enfoque estadístico

Martha Fabiola Contreras Higuera  
Universidad Nacional Abierta y a Distancia

José Antonio Vesga Barrera  
Corporación Universitaria de Ciencia y Desarrollo – UNICIENCIA

Fecha de Recepción: 14/01/17 – Fecha de Aceptación: 16/04/17

## Resumen

Smart Grid, representa un nuevo concepto de la red, donde convergen la provisión de servicios de energía y comunicaciones, respaldados por IP (protocolo de Internet) e integrados como una red inteligente; que tiene como objetivo principal mejorar la eficiencia y fiabilidad de la red eléctrica, adaptada a las necesidades de la era digital [1]. Uno de los temas más debatidos dentro de Smart Grid ha sido la elección de la tecnología que se utilizará en el sistema de comunicación, ya que debe ser confiable y proporcionar seguridad y escalabilidad. Los desarrollos recientes se han dirigido al uso de tecnologías inalámbricas y PLC (Power Line Communications), debido a los beneficios que ofrecen estas tecnologías en cuanto a procesos de instalación, movilidad, ubicuidad y estabilidad [2], donde uno de los servicios que están haciendo mayor demanda es la transmisión de voz sobre IP. En vista de lo anterior, este artículo busca evaluar el desempeño de una red PLC para voz sobre IP, soportó el uso de estadísticas descriptivas e inferencia estadística. Al final del Artículo 4 asociado con la estimación de intervalos de confianza y 6 casos relacionados con casos de prueba de hipótesis se presentan, que proporcionan una idea clara sobre el grado de influencia desde el punto de vista estadístico que el tipo de códec y el número de host pueden tener en los parámetros del rendimiento convencional.

**Palabras clave:** Voz IP, Rendimiento, intervalos de confianza, contraste de hipótesis, Smart Grid.

## Abstract

Smart Grid, represents a new concept of the grid, where converge the provision of energy services and communications, backed by IP (Internet protocol) and integrated together as an intelligent network; which has as main objective to improve the efficiency and reliability of the electric grid, adapted to the needs of the digital age [1]. One of the most discussed issues within Smart Grid has been the choice of technology to be used in the communication system, because it must be reliable, providing security and scalability. Recent developments have been directed to the use of wireless and PLC (Power Line Communications)

technologies, due to the benefits that these technologies offer regarding installation processes, mobility, ubiquity and stability [2], where one of the services that are making greater demand is the transmission of voice over IP. In view of the above, this article seeks to evaluate the performance of a PLC network for voice over IP, supported the use of descriptive statistics and statistical inference. At the end of Article 4 associated with the estimation of confidence intervals and 6 cases related to hypothesis test cases are presented, which provide a clear idea about the degree of influence from the statistical point of view the codec type and host number may have on the parameters of conventional performance.

**Keywords:** IP Voice, Performance, confidence intervals, hypothesis contrast, Smart Grid.

## I. INTRODUCCIÓN

La red eléctrica es considerada un medio hostil para la transmisión de información en donde se pueden presentar numerosos problemas en el momento de establecer un proceso de comunicación como: alto componente de ruido, impedancia variable y posibles atenuaciones significativas. Estos son algunos de los retos que se deben afrontar debido a las diversas conexiones presentes en la red eléctrica, y a los cambios constantes en la topología de la red a causa de apertura o cierre de circuitos, lo cual genera la aparición de transitorios que causan reflexiones de señal y con ello cambios característicos en su impedancia y atenuación [3]. Esta situación de cambios constantes en la distribución de las redes PLC (Power Line Communications) se presenta comúnmente en las redes PLC hogareñas en donde cada interruptor puede generar cambios eventuales en su topología.

Uno de los aspectos de mayor relevancia es el comportamiento de la tecnología PLC para la transmisión de información, considerando el hecho de que la eficiencia de la red depende de las condiciones en que se encuentre la red eléctrica [4][5]. En Colombia y en muchos países, el cableado eléctrico no ha sido modificado, ni adaptado para el uso adecuado de esta tecnología, tal como ha ocurrido en

países como Alemania, en donde se han realizado diversos estudios y ajustes a su infraestructura en las redes de potencia con el fin de optimizar su comportamiento y eficiencia de transmisión, garantizando niveles de confiabilidad y seguridad [6][7].

Las aplicaciones multimedia para HD (high definition) TV, audio y la voz se vuelven cada día un tema de mayor investigación e interés en el contexto de Power Line Communications [8]. Las aplicaciones multimedia requieren gran ancho de banda, bajo retardo y jitter; para lo cual es muy importante contar con QoS (Quality Service) en la red [8]. Por lo general, las condiciones presentes en la red eléctrica no disponen de los recursos suficientes para ofrecer una calidad de servicio adecuada debido a que existen varios tipos de redes que hacen uso del mismo medio en el hogar. En [8] se presentan algunos de los problemas más comunes que se pueden enfrentar en torno a la QoS en la prestación de servicios multimedia sobre redes que hacen uso de la tecnología PLC. Los alcances del estudio son muy generales y se centran más en la arquitectura hardware que en el análisis de la QoS existente en la red PLC.

Una vez se implementa una red PLC bajo el estándar *Homeplug AV*, se genera múltiple tráfico en banda ancha a partir de las aplicaciones de audio y video. Con referencia a las aplicaciones de audio, 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 [9][10]. En vista de lo anterior, surge la pregunta ¿será que una red PLC podrá ser capaz de transmitir simultáneamente voz, datos y video con adecuados niveles de QoS?

De acuerdo con los argumentos expuestos anteriormente, el objetivo principal consiste en evaluar el rendimiento de una red LAN (Local Area Network) 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. Los resultados de este trabajo pueden ser relevantes 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.

## II. METODOLOGIA

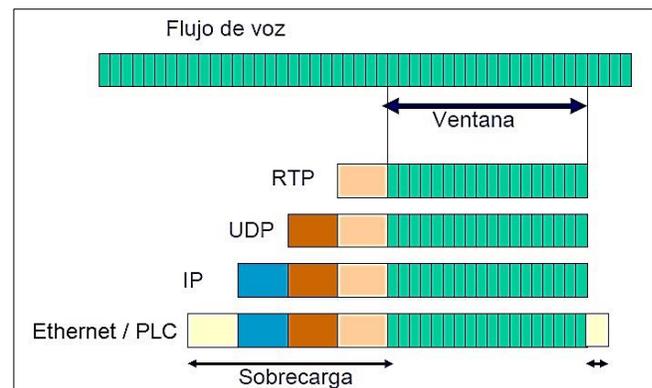
En el *website* de la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC / *Federal Commission Communications*)[11], se define Voz sobre IP como una tecnología que permite realizar llamadas telefónicas usando una red de computadores sobre una red de datos como

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.

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). 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.

Con los códec 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 [12]. De acuerdo con su adecuación y utilización para VoIP, los códec usualmente más relacionados con éste tipo de tecnología son respectivamente G711 [13], G723 [14] y G729 [15].

Figura 1. Transporte de Voz en redes PLC



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, tal como se ilustra en la figura 1.

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.

Tabla 1. Ancho de Banda asociado a los codecs para VoIP sobre PLC

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)
<b>G.711 (64 kbps)</b>	10	80	120	146	116.8
	20	160	200	226	90.4
	30	240	280	306	81.6
<b>G.723.1 (6.3 kbps)</b>	30	24	64	90	23.9
<b>G.723.1 (5.3 kbps)</b>	30	20	60	86	22.9
<b>G.729 (8 kbps)</b>	10	10	50	76	60.8
	20	20	60	86	30.4
	30	30	70	96	25.6

En la Tabla 1, se presentan los anchos de banda requeridos 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 requerido puede variar considerablemente dependiendo de códec usado y de la ventana seleccionada.

### III. PLANEACIÓN DEL EXPERIMENTO

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.

**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 [16]. La expresión para calcular el Throughput es la siguiente:

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

Donde,

- L<sub>M</sub>** Longitud total del mensaje
- L<sub>C</sub>** Bits de control del mensaje
- T<sub>M</sub>** Tiempo de transmisión del mensaje
- T<sub>ACC</sub>** 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.

**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 [7].

**Retardo:** Corresponde al promedio de las diferencias entre los tiempos de envío y recepción de los paquetes.

#### A. Hardware y Software

Para el desarrollo del experimento, 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 [17] modelo PA-211, tal como se ilustran en la figura 4. Un completo detalle de las especificaciones técnicas de los módems se presentan en la Tabla 2.

Figura 2. Modem Homeplug AV marca TP-LINK modelo TL-PA211



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

Tabla 2. Especificaciones técnicas del modem TP-LINK modelo TL-PA211

Característica	Detalle
<b>Estándares y protocolos</b>	HomePlug AV, IEEE802.3, IEEE802.3u
<b>Interfaces</b>	Puerto Ethernet a 10/100/1000 Mbps
<b>Tipo de Enchufe</b>	Unión Europea, Estados Unidos, Reino Unido, Australia
<b>Botones</b>	Botón de emparejamiento
<b>Peso</b>	103 Gramos
<b>Indicador LED</b>	PWR, PLC, ETH
<b>Dimensiones (W X D X H)</b>	3,6 x 2,2 x 1,2 pulgadas (93x56x30 mm)
<b>Consumo de Potencia</b>	< 3 W
<b>Alcance</b>	300 metros dentro de la casa/oficina
<b>Tecnología de modulación</b>	OFDM
<b>Funciones Avanzadas</b>	Función QoS (Calidad del Servicio), Selección inteligente de canal
<b>Encriptación</b>	Encriptación AES de 128 bits

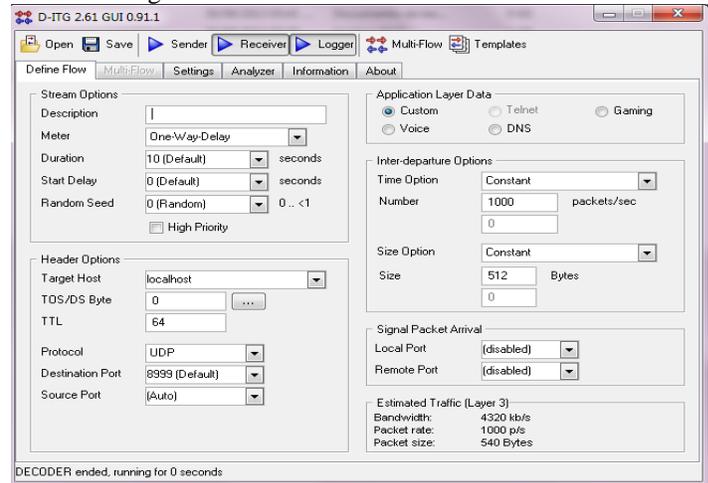
Fuente: <http://www.tp-link.com/co>

B. 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 [18].

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 [19].

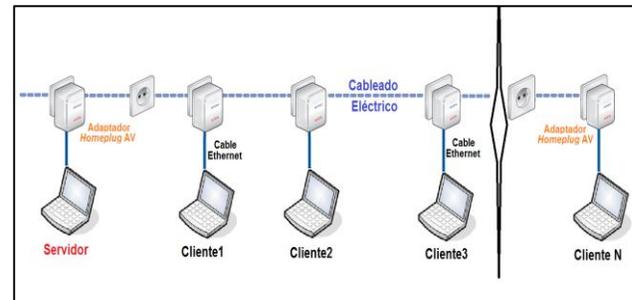
Figura 3. Generador de Tráfico D-ITG



IV. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

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 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 Figura4.

Figura 4. Configuración de Red Homeplug AV usada en el experimento



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. Los parámetros específicos para el desarrollo de las pruebas y la consecuente captura de datos se presentan en la Tabla3.

Tabla 3. 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.
Cantidad de clientes x Toma de datos	1, 2, 5 y 10 estaciones

Los datos que fueron obtenidos durante el desarrollo del experimento se resumen en las Tablas 4 ,5,6 y 7.

Tabla 4. Matriz de diseño para Throughput [kbps]

No. de Estaciones o Teléfonos	Codec VoIP utilizado				
	G711 1 muestra x paquete	G711 2 muestra x paquete	G723.1	G729 2 muestra x paquete	G729 3 muestra x paquete
1	76,107	73,032	9,519	13,162	11,318
	77,360	70,134	9,567	13,027	11,952
	76,593	74,227	9,484	13,902	11,822
	76,392	73,739	8,885	13,135	11,557
	76,149	74,540	8,792	13,043	11,133
2	150,866	150,701	17,911	25,888	22,267
	151,078	142,084	18,613	26,891	24,139
	150,623	141,761	19,027	27,530	22,316
	153,057	143,433	18,526	27,607	23,732
5	376,387	346,243	44,880	66,040	59,651
	385,237	371,126	45,040	68,031	59,459
	385,379	349,392	45,255	65,593	59,035
	391,367	361,643	44,757	65,389	57,981
	368,269	365,293	43,454	67,438	57,988
10	796,379	720,842	92,463	137,481	112,211
	737,871	743,042	90,308	137,915	117,805
	793,945	716,531	91,772	133,984	117,295
	729,304	711,950	88,573	134,157	117,098
	751,323	750,386	89,437	128,305	117,034

Tabla 5. Matriz de diseño para el retardo [ms]

No. de Estaciones o Teléfonos	Codec VoIP utilizado				
	G711 1 muestra x paquete	G711 2 muestra x paquete	G723.1	G729 2 muestra x paquete	G729 3 muestra x paquete
1	0,756	0,752	0,78	0,78	0,743
	0,762	0,813	0,857	0,619	0,719
	0,79	0,823	0,735	0,717	0,805
	0,715	0,875	0,872	0,792	0,713
	2,81	0,717	0,709	0,616	0,798
2	1,326	2,196	1,451	1,803	6,192
	0,761	5,879	3,72	1,689	0,873
	1,84	3,877	1,979	0,902	1,979
	6,374	4,587	1,783	0,178	2,437
5	1,668	3,381	2,984	2,751	3,592
	2,184	4,04	2,25	3,352	2,321
	5,428	2,932	4,826	4,766	4,203
	4,455	2,014	3,303	1,761	3,332
	3,872	3,487	2,674	4,738	2,534
10	4,173	2,504	4,245	1,848	4,037
	6,295	6,747	8,039	7,727	7,293
	7,475	8,626	8,214	6,977	6,358
	6,934	6,943	8,14	6,465	7,342
	6,482	8,329	8,045	7,492	6,621
	7,321	6,548	8,217	6,621	7,374

Tabla 6. Matriz de diseño para el Jitter [ms]

No. de Estaciones o Teléfonos	Codec VoIP utilizado				
	G711 1 muestra x paquete	G711 2 muestra x paquete	G723.1	G729 2 muestra x paquete	G729 3 muestra x paquete
1	0,27	0,37	0,745	0,374	0,743
	0,302	0,466	0,71	0,227	0,529
	0,306	0,447	0,579	0,383	0,597
	0,266	0,413	0,781	0,276	0,721
	0,515	0,442	0,575	0,38	0,525
2	0,302	0,415	0,777	0,395	0,894
	0,297	0,613	0,752	0,492	0,664
	0,344	0,44	0,785	0,386	0,615
	0,697	0,543	0,703	0,478	0,679
5	0,401	0,436	0,84	0,371	0,77
	0,41	0,753	0,905	0,586	0,784
	0,591	0,555	1,038	0,688	0,826
	0,561	0,489	0,973	0,525	0,916
	0,582	0,531	1,006	0,581	0,889
10	0,459	0,667	0,938	0,618	0,795
	1,394	1,518	1,474	1,718	1,427
	1,67	2,233	1,673	1,526	1,351
	1,294	1,458	1,753	1,205	1,877
	1,384	2,019	1,595	1,762	1,428
	1,521	1,454	1,672	1,204	1,675

Tabla 7. Matriz de diseño para Ancho de Banda Asignado [kpbs]

No. de Estaciones o Teléfonos	Codec VoIP utilizado				
	G711 1 muestra x paquete	G711 2 muestra x paquete	G723.1	G729 2 muestra x paquete	G729 3 muestra x paquete
1	84,048	124,789	15,003	21,178	15,975
	112,266	106,508	10,756	14,015	13,090
	115,257	89,113	15,051	23,210	14,651
	82,409	101,614	12,074	20,590	15,333
	89,606	109,352	11,260	14,333	13,725
2	155,932	163,655	27,568	34,326	29,244
	246,104	166,541	21,725	44,212	39,247
	214,882	253,581	32,385	32,732	39,095
	230,601	159,450	29,948	43,290	25,872
	241,843	140,781	23,637	27,553	29,427
5	408,932	360,942	46,775	82,263	109,169
	453,729	572,843	52,666	86,748	80,313
	414,811	530,409	58,642	107,601	77,833
	674,322	607,430	55,924	104,010	105,868
	505,204	656,494	53,747	68,283	69,258
10	849,352	1163,783	117,345	228,828	151,717
	1261,350	943,342	154,437	233,025	129,365
	1363,205	819,823	160,419	211,077	190,307
	768,678	905,656	112,454	194,847	141,782
	807,550	949,768	139,074	171,675	158,159

V. RESULTADOS

En esta sección se presenta un análisis estadístico de los datos obtenidos experimentalmente, orientado especialmente al uso de diversas expresiones relacionadas con la estimación de intervalos de confianza y contraste de hipótesis, las cuales fueron utilizadas acorde con las necesidades e intereses particulares de investigación.

A. Intervalos de confianza

A continuación, se presentan cuatro casos en los cuales se estiman los intervalos de confianza bajo diversos métodos específicos y acorde a los resultados obtenidos experimentalmente:

**Caso 1.** Se ha obtenido una muestra de 5 valores por factor para evaluar el rendimiento de una red PLC con 10 host, durante la prestación de servicios de Voz sobre IP, con el fin de estimar el valor promedio para los factores de Throughput, retardo, Jitter y ancho de banda; en función del códec G711.1 obtenidos durante el desarrollo de la campaña de evaluación, la cual involucró tres tipos de codecs G711, G723.1 y G729. Se sabe que los valores correspondientes a la desviación típica para el Throughput, retardo, Jitter y

ancho de banda al transmitir Voz sobre IP son: 31.49, 0.51, 0.15 y 279.71 respectivamente. Se desea calcular los intervalos de confianza al 90% para la media correspondiente a cada uno de los factores establecidos. Para calcular los intervalos de confianza para la media de una población normal con varianza conocida se hace uso de la siguiente expresión:

$$\bar{X} - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Los resultados obtenidos para cada uno de los factores se resumen en la siguiente tabla con  $\alpha/2 = 0.05$ .

Factor	$\bar{X}$	$\sigma$	n	$Z(\alpha/2)$	Limf	Lsup
Throughput	761.76	31.49	5	1,64	738.6	784.92
Retardo	6.9	0,51	5	1,64	6.52	7.27
Jitter	1,45	0,15	5	1,64	1.34	1.56
Ancho de Banda	1010.03	279.71	5	1,64	804.27	1215.78

**Caso 2.** Se ha obtenido una muestra de 5 valores por factor para evaluar el rendimiento de una red PLC con 5 host, durante la prestación de servicios de Voz sobre IP, con el fin de estimar el valor promedio para los factores de Throughput, retardo, Jitter y ancho de banda; en función del códec G723.1 obtenidos durante el desarrollo de la campaña de evaluación. Se desea calcular los intervalos de confianza al 90% para la media correspondiente a cada uno de los factores establecidos asumiendo una varianza desconocida.

Para calcular los intervalos de confianza para la media de una población normal con varianza desconocida se hace uso de la siguiente expresión:

$$\bar{X} - t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n-1}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n-1}}$$

Los resultados obtenidos para cada uno de los factores se resumen en la siguiente tabla con  $\alpha/2 = 0.05$ .

Factor	$\bar{X}$	S	n	gl	$t(\alpha/2)$	Lin f	Lsup
Throughput	44,68	0,71	5	4	2,132	43,92	45,44
Retardo	3,46	1,07	5	4	2,132	2,32	4,60
Jitter	0,97	0,05	5	4	2,132	0,92	1,02
Ancho de Banda	53,55	4,42	5	4	2,132	48,84	58,26

**Caso 3.** Se ha obtenido una muestra de 5 valores por factor para evaluar el rendimiento de una red PLC con 10 host, durante la prestación de servicios de Voz sobre IP. Se sabe que los valores correspondientes a la desviación estándar soportados en el codec G729.3 para el Throughput, retardo, Jitter y ancho de banda al transmitir Voz sobre IP son: 2.3,

0.47, 0.22 y 22.89 respectivamente. Se desea calcular los intervalos de confianza al 90% para la varianza correspondiente a cada uno de los factores establecidos. Para dar solución al problema propuesto se hará uso de la expresión que permite calcular los intervalos de confianza para la varianza de una población normal con media conocida:

$$\frac{nS^2}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}} \leq \sigma^2 \leq \frac{nS^2}{\chi^2_{(1-\frac{\alpha}{2})}}$$

Los resultados obtenidos para cada uno de los factores se resumen en la siguiente tabla con  $\alpha/2 = 0.05$ .

Factor	S	n	$\chi^2(\alpha/2)$	$\chi^2(1-\frac{\alpha}{2})$	Linf	Lsup
<b>Throughput</b>	2.3	5	11,01	1,14	2.38	23.09
<b>Retardo</b>	0,47	5	11,01	1,14	0,099	0.964
<b>Jitter</b>	0,22	5	11,01	1,14	0,022	0,211
<b>Ancho de Banda</b>	22.89	5	11,01	1,14	236.64	2287.05

**Caso 4.** Se realizó un muestreo simple al azar de 5 valores por factor para estimar la proporción de valores que se encuentra por debajo del valor medio poblacional, cuando se encuentran 10 host conectados a la red PLC. Al realizar la comparación de cada uno de los valores obtenidos frente al valor promedio, se obtuvo como resultado que para el Throughput, Retardo, Jitter y Ancho de banda, la cantidad de valores que no superó el valor promedio ( $n_{criterio}$ ) es 3, 2, 1 y 2 respectivamente. Se desea calcular el Intervalo de confianza para la proporción de valores por factor que no supera la media poblacional al 80%. Para dar solución al problema propuesto, se procede a calcular los intervalos de confianza para la proporción de una característica mediante el uso de la siguiente expresión:

$$\hat{p} - Z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n}} \leq p \leq \hat{p} + Z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n}}$$

Los resultados obtenidos para cada uno de los factores se resumen en la siguiente tabla con  $\alpha/2 = 0.1$ .

Factor	n	$n_{criterio}$	$\hat{p}$	$Z(\alpha/2)$	Linf	Lsup
Throughput	5	3	0,6	1,28	0,32	0,88
Retardo	5	2	0,4	1,28	0,12	0,68
Jitter	5	1	0,2	1,28	-0,03	0,43
Ancho de Banda	5	2	0,4	1,28	0,12	0,68

**B. Contraste de hipótesis**

A continuación, se presentan tres casos en los cuales se plantean contrastes de hipótesis bajo diversos métodos específicos y acorde a los resultados obtenidos experimentalmente:

**Caso 1.** Se pretende contrastar al 5% de significancia la hipótesis de que el retardo promedio en una red PLC con 10 host, es el mismo para el códec G729.2 como para el códec G723. Para ello se tomaron dos muestras independientes de tamaño 5 cada una, con medias 7.06 ms y 8.13 ms respectivamente. Realizar el contraste suponiendo que las desviaciones típicas poblacionales son de 0.54 y 0.09 para los codecs G729 y G723 respectivamente.

Sean  $X$  y  $Y$  las V.A relacionadas con el retardo para el códec G729 y G723 respectivamente.

Para dar solución al problema propuesto se plantean las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu_x - \mu_y = 0$$

$$H_1: \mu_x - \mu_y \neq 0$$

Posteriormente, se procede a calcular el estadístico que permite realizar un contraste de hipótesis para identificar la diferencia de medias entre dos poblaciones normales con varianza conocida, mediante el uso de la siguiente expresión:

$$d = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - \mu_o}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{n_x} + \frac{\sigma_y^2}{n_y}}} = \frac{8.13 - 7.06}{\sqrt{\frac{0.09^2}{5} + \frac{0.54^2}{5}}} = 4.37$$

Teniendo en cuenta que  $Z_{\frac{\alpha}{2}} = 1.96$ , el rango en el cual la hipótesis nula es aceptada obedece a  $\{-1.96; 1.96\}$ . Al observar el resultado del estadístico para el problema propuesto se observa que el valor obtenido fue 4.37, el cual se encuentra ubicado fuera del rango establecido. Por lo tanto, se rechaza la  $H_0$  al 5% de significancia, aspecto por el cual se podría afirmar que existen diferencias significativas en el retardo que puede presentarse al transmitir Voz IP bajo el uso de los códec G729.2 y G723.

**Caso 2.** Se pretende contrastar al 5% de significancia la hipótesis de que el Jitter promedio en una red PLC es el mismo para 5 y 10 host, independientemente del tipo de códec utilizado. Para ello se tomaron dos muestras independientes de tamaño 25 cada una, con medias 0,7ms y 1.57ms y desviaciones típicas poblacionales es de 0,18 y 0,24 cuando están presentes 5 y 10 host respectivamente.

Sean  $X$  y  $Y$  las V.A relacionadas con el Jitter para 10 y 5 host respectivamente.

Para dar solución al problema propuesto se plantean las

siguientes hipótesis:

$$\begin{aligned} H_0: \mu_x - \mu_y &= 0 \\ H_1: \mu_x - \mu_y &\neq 0 \end{aligned}$$

Posteriormente, se procede a calcular el estadístico que permite realizar un contraste de hipótesis para identificar la diferencia de medias entre dos poblaciones normales con varianza conocida, mediante el uso de la siguiente expresión:

$$d = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - \mu_0}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{n_x} + \frac{\sigma_y^2}{n_y}}} = \frac{1.57 - 0.7}{\sqrt{\frac{0.24^2}{25} + \frac{0.18^2}{25}}} = 14.5$$

Teniendo en cuenta que  $Z_{\frac{\alpha}{2}} = 1.96$ , el rango en el cual la hipótesis nula es aceptada obedece a  $\{-1.96; 1.96\}$ . Al observar el resultado del estadístico para el problema propuesto se observa que el valor obtenido fue 14.5, el cual se encuentra ubicado fuera del rango establecido. Por lo tanto, se rechaza la  $H_0$  al 5% de significancia, aspecto por el cual se podría afirmar que el jitter depende significativamente del número de host que se encuentren activos en una red PLC.

**Caso 3.** Después evaluar el rendimiento de una red PLC el administrador de la red manifestó que el ancho de banda promedio requerido por host es de 100 kbps, para la transmisión de Voz sobre IP soportada en el códec G711.2, con una desviación típica poblacional de 13.77. Para contrastar la hipótesis establecida por el administrador de la red se realizó un muestreo de tamaño 5 el cual arrojó un valor promedio de 106.27 kbps. En vista de lo anterior, ¿es posible aceptar la hipótesis propuesta por el administrador de la red al 10% de significancia?

Para dar solución al problema propuesto se plantean las siguientes hipótesis:

$$\begin{aligned} H_0: \mu &= 100 \\ H_1: \mu &\neq 100 \end{aligned}$$

Posteriormente, se procede a calcular el estadístico que permite realizar un contraste de hipótesis para la media de una población normal con varianza conocida, mediante el uso de la siguiente expresión:

$$d = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} = \frac{106.27 - 100}{13.77/\sqrt{5}} = 1.018$$

Teniendo en cuenta que  $Z_{\frac{\alpha}{2}} = 1.64$ , el rango en el cual la hipótesis nula es aceptada obedece a  $\{-1.64; 1.64\}$ . Al observar el resultado del estadístico para el problema propuesto se observa que el valor obtenido fue 1.018, el cual se encuentra ubicado dentro del rango establecido. Por lo

tanto, se acepta la  $H_0$  al 10% de significancia.

**Caso 4.** Durante las campañas de monitoreo de una red PLC, el administrador de la red manifestó el valor promedio de ancho de banda requerido por host para la transmisión de Voz sobre IP con calidad de servicio (QoS) es de 20 kbps para un códec G723. Para contrastar la hipótesis establecida por el administrador de la red se realizó un muestreo de tamaño 5 el cual arrojó un valor promedio de 12.83 kbps con una desviación de 2.06. En vista de lo anterior, ¿es posible aceptar la hipótesis propuesta por el administrador de la red al 10% de significancia?.

Para dar solución al problema propuesto se plantean las siguientes hipótesis:

$$\begin{aligned} H_0: \mu &= 20 \\ H_1: \mu &\neq 20 \end{aligned}$$

Posteriormente, se procede a calcular el estadístico que permite realizar un contraste de hipótesis para la media de una población normal con varianza desconocida, mediante el uso de la siguiente expresión:

$$d = \frac{\bar{X} - \mu}{S} \sqrt{n-1} = \frac{12.83 - 20}{2.06} \sqrt{5-1} = -6.96$$

Teniendo en cuenta que el valor de  $t_{\frac{\alpha}{2}} = 2.13$ , con 4 grados de libertad, el rango en el cual la hipótesis nula es aceptada obedece a  $\{-2.13; 2.13\}$ . Al observar el resultado del estadístico para el problema propuesto se observa que el valor obtenido fue -6.96, el cual se encuentra ubicado fuera del rango establecido. Por lo tanto, se rechaza la  $H_0$  al 10% de significancia, aspecto por el cual se podría manifestar que la afirmación realizada por el administrador de la red no puede ser considerada como acertada.

**Caso 5.** Un usuario de 10 conectados a la red PLC, ha manifestado que el servicio de Voz sobre IP el cual está soportado en G729.3 ha estado durante el transcurso del día inestable, presentando un valor de varianza en los niveles de ancho de banda cercano a los 500. Para contrastar la hipótesis establecida por el usuario, el administrador de la red se realizó un muestreo de tamaño 5, el cual arrojó un ancho de banda promedio de 154.27 kbps con una desviación de 22.89. En vista de lo anterior, ¿es posible aceptar la hipótesis propuesta por el usuario de la red al 10% de significancia?.

Para dar solución al problema propuesto se plantean las siguientes hipótesis:

$$\begin{aligned} H_0: \sigma^2 &= 500 \\ H_1: \sigma^2 &\neq 500 \end{aligned}$$

Posteriormente, se procede a calcular el estadístico que permite realizar un contraste de hipótesis para la varianza de

una población normal con media conocida, mediante el uso de la siguiente expresión:

$$d = \frac{nS^2}{\sigma_o^2} = \frac{5(22.89)^2}{500} = 5.24$$

Teniendo en cuenta que  $\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2 = 11.07$  y  $\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 = 1.14$ , con 5 grados de libertad, el rango en el cual la hipótesis nula es aceptada obedece a  $\{1.14; 11.07\}$ . Al observar el resultado del estadístico para el problema propuesto se observa que el valor obtenido fue 5.24, el cual se encuentra ubicado dentro del rango establecido. Por lo tanto, se acepta la  $H_o$  al 10% de significancia, aspecto por el cual se podría manifestar que la afirmación realizada por el usuario de la red puede ser considerada como acertada.

**Caso 6.** El administrador de la red PLC ha manifestado que el 40% de los host, presentan un retardo por encima del valor promedio equivalente a 3.5ms al transmitir Voz sobre IP. Para contrastar la hipótesis establecida el administrador de la red realizó un muestreo de tamaño 5 de las cuales 3 arrojaron un retardo por encima del valor promedio establecido. En vista de lo anterior, ¿es posible aceptar la hipótesis propuesta por el administrador de la red al 10% de significancia?

Para dar solución al problema propuesto se plantean las hipótesis:

$$\begin{aligned} H_o: p &= 0.4 \\ H_1: p &\neq 0.4 \end{aligned}$$

Posteriormente, se procede a calcular el estadístico que permite realizar un contraste de hipótesis sobre la proporción de una característica, mediante el uso de la siguiente expresión:

$$d = \frac{\hat{p} - p_o}{\sqrt{p_o q_o / n}} = \frac{(3/5) - 0.4}{\sqrt{0.4(0.6)/5}} = -0.91$$

Teniendo en cuenta que  $Z_{\frac{\alpha}{2}} = 1.64$ , el rango en el cual la hipótesis nula es aceptada obedece a  $\{-1.64; 1.64\}$ . Al observar el resultado del estadístico para el problema propuesto se observa que el valor obtenido fue -0.91, el cual se encuentra ubicado dentro del rango establecido. Por lo tanto, se acepta la  $H_o$  al 10% de significancia, aspecto por el cual se podría manifestar que la afirmación realizada por el administrador de la red puede ser considerada como acertada.

## VI. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se pudo evaluar el rendimiento de una red PLC durante la prestación de servicios de Voz sobre IP, en donde se pudo estimar el valor promedio para los factores de Throughput, retardo, Jitter y ancho de banda; en función de tres tipos de codecs G711,

G723.1 y G729, bajo diferentes escenarios. Los resultados permitieron identificar el comportamiento de cada códec y su nivel de eficiencia, soportado en el uso de herramientas estadísticas, las cuales pueden ser utilizadas por el administrador de la red para resolver situaciones del mundo real, que pueden llegar a presentarse en un momento dado.

## VII. REFERENCIAS

- [1] J. Ekanayake, N. Jenkins, and K. Liyanage, *Smart grid: technology and applications*, 1a ed. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2012.
- [2] C. Jin and T. Kunz, "Smart home networking: Combining wireless and powerline networking," in *2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, 2011, pp. 1276–1281.
- [3] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multipath model for the powerline channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 4, pp. 553–559, Apr. 2002.
- [4] L. D. Andreou G., Manitsas E., "Finite element characterization of LV power distribution lines for high frequency communications signals," *Proc. 7th Int. Symp. Power-Line Commun. its Appl.*, pp. 109–119, 2003.
- [5] G. S. Banwell T., "A new approach to the modelling of the transfer function of the power line channel," *Proc. 5th Int. Symp. Power-Line Commun. its Appl.*, pp. 319–324, 2009.
- [6] B. G., "System architecture for power-line communication and consequences for modulation and multiple access," *7 th Int. Symp. Power-Line Commun. its Appl.*, 2003.
- [7] H. Hrasnica, A. Haidine, and R. Lehnert, *Broadband Powerline Communications Networks Network Design*, 1a ed. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2004.
- [8] P. J. Piñero-Escuer, J. Malgosa-Sanahuja, and P. Manzanares-Lopez, "Homeplug-AV CSMA/CA Evaluation in a Real In-Building Scenario," *IEEE Commun. Lett.*, no. June, pp. 683–685, 2011.
- [9] S. Katar, B. Mashburn, R. Newman, and H. Latchman, "Allocation Requirements for Supporting Latency Bound Traffic in HomePlug AV Networks," *IEEE Globecom 2006*, pp. 1–6, Nov. 2006.
- [10] H. H. Chen, "Video Streaming Over In-Home Power Line Networks," *IEEE Trans. Multimed.*, vol. 11, no. 3, pp. 523–534, Apr. 2009.
- [11] FCC, "Federal Communications Commission." [Online]. Available: <http://www.fcc.gov/>.
- [12] N. Wittenberg, *Understanding voice over IP technology*, 1a ed. New York, USA: Delmar Cengage Learning, 2009.
- [13] UIT-T, "Recommendation G.711: Pulse Code Modulation (PCM) of voice frequencies," 1988.
- [14] UIT-T, "Recommendation G.723.1: Dual rate speech coder for multimedia communications transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s," 2006.

- [15] UIT-T, “Recommendation G.729: Coding of speech at 8 kbits using Conjugate- Structure Algebraic-Code-Excited Linear-Prediction (CS-ACELP),” 2007.
- [16] E. Guerrini and D. Veronesi, “Bit Loading Algorithm Based on a Probabilistic Approach for HomePlug AV,” in *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, 2011 IEEE, 2011, pp. 1–6.
- [17] TP-LINK Industries, “TP-LINK,” 2013. [Online]. Available: <http://www.tp-link.com/en/products/details/?model=TL-PA211#spec>.
- [18] S. . P. A. Avallone, “D-ITG Distributed Internet Traffic Generator.” [Online]. Available: <http://traffic.comics.unina.it/software/ITG/>.
- [19] A. Botta, A. Dainotti, and A. Pescapé, “A tool for the generation of realistic network workload for emerging networking scenarios,” *Comput. Networks*, vol. 56, no. 15, pp. 3531–3547, Oct. 2012.

### BIOGRAFÍA



**José Antonio Vesga Barrera.** Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander, Especialista en docencia universitaria de la Universidad Cooperativa de Colombia, Magíster en Potencia Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander. Actualmente, se desempeña como Docente Investigador de la Corporación Universitaria de Ciencia y Desarrollo UNICIENCIA.



**Martha Fabiola Contreras H.** Ingeniera Electrónica (Universidad de Pamplona), Especialista en Telecomunicaciones (Universidad Industrial de Santander) y Magister en Ingeniería área Telecomunicaciones (En curso con la Universidad Pontificia Bolivariana). Docente e Investigadora desde el año 2010.