

Modelo estadístico sobre el comportamiento del *throughput* en redes LAN sobre tecnología *power line communications*¹

Statistical Model on Throughput Behavior of LAN Networks over Power Line Communications Technology²

Modelo estadístico em comportamento do throughput em redes LAN sobre tecnologia *power line communications*³

Juan Carlos Vesga-Ferreira⁴

Gerardo Granados-Acuña⁵

SICI: 0123-2126(201212)16:2<433:MECLAN>2.0.TX;2-8

¹ Fecha de recepción: 12 de junio de 2011. Fecha de aceptación: 23 de febrero de 2012. Este artículo es desarrollado por el Grupo de Investigación Davinci, de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bogotá, Colombia.

² Submitted on: June 12, 2011. Accepted on: February 23, 2012. This article was developed by the research group *Davinci of Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, Bogota, Colombia

³ Data de recebimento: 12 de junho de 2011. Data de aceite: 23 de fevereiro de 2012. Este artigo foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa Davinci, da Universidade Nacional Aberta e a Distância. Bogotá, Colômbia.

⁴ Ingeniero electrónico, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Magíster en Ingeniería, área de Telecomunicaciones y candidato a doctor en Ingeniería, área de Telecomunicaciones, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. Docente Auxiliar Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería (ECBTI), Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: juan.vesga@unad.edu.co.

⁵ Ingeniero de sistemas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Especialista en Telecomunicaciones, Universidad Autónoma de Bucaramanga, Bucaramanga, Colombia. Candidato a magíster en Telemática, Universidad Autónoma de Bucaramanga, Bucaramanga, Colombia. Docente Auxiliar Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería (ECBTI), Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: gerardo.granados@unad.edu.co.

Resumen

El rendimiento es uno de los aspectos de mayor interés dentro del análisis global en las redes LAN, debido al efecto que produce sobre el usuario final. La definición del rendimiento se puede abordar desde diversos puntos de vista, lo cual permite incorporar otras formas de evaluación, según del objeto de interés en particular. Básicamente, los parámetros más comunes para evaluar el rendimiento de una red son: *throughput*, utilización del canal y diversas medidas de retardo. En este artículo se presenta un análisis experimental sobre el comportamiento del *throughput* en redes LAN sobre *power line communications* (PLC), bajo el uso de adaptadores de red soportados con el estándar HomePlug 1.0.

Palabras clave

Throughput, power line communications (PLC), HomePlug, análisis de varianza, modelo estadístico.

Abstract

The performance is without doubt one of the aspects of greatest interest in the global analysis in networks LAN, considering the effect it produces on the end user. The performance can be defined according to various points of view, allowing the incorporation of other forms of assessment depending on the object of interest in particular. Basically, the most common parameters for evaluating the performance of a network are: Throughput, use of the canal and various measures of retardation. This article is an experimental analysis of behavior of the Throughput in networks LAN on Power Line Communications (PLC), under the use of network adapters supported with standard HomePlug 1.0.

Key words

Throughput, PLC, HomePlug, ANOVA, statistic model.

Resumo

Rendimento é um dos aspectos mais interessantes da análise global nas redes LAN, devido ao efeito produzido sobre o utente final. A definição de rendimento pode ser abordado a partir de diferentes pontos de vista, o que lhe permite incorporar outras formas de avaliação, segundo o objeto de interesse em particular. Basicamente, os parâmetros mais comuns para avaliar o rendimento em uma rede são: *throughput*, utilização do canal e diversas medidas de retardo. Neste artigo apresenta-se análise experimental sobre o comportamento do *throughput* em redes LAN sobre *power line communications* (PLC), sob uso de adaptadores de rede suportados com o estándar HomePlug 1.0.

Palavras-chave

Throughput, power line communications (PLC), HomePlug, análise de variância, modelo estadístico.

Introducción

El rendimiento es uno de los aspectos de mayor interés dentro del análisis global en las redes LAN, debido al efecto que produce sobre el usuario final. Puede ser definido según diversos puntos de vista, lo cual permite incorporar otras formas de evaluación, según el objeto de interés en particular. Básicamente, los parámetros más comunes para evaluar el rendimiento de una red son: *throughput*, utilización del canal y las medidas de retardo *jitter*⁶ y *round-trip delay time* (RTT),⁷ entre las más importantes. En este artículo, el tema de investigación está centrado en el *throughput*.

El *throughput* es la capacidad de un enlace de transportar información útil; representa a la cantidad de información útil que puede transmitirse por unidad de tiempo. Puede variar en una misma conexión de red, según el protocolo usado para la transmisión y el tipo de datos de tráfico, entre otros factores (Carcele, 2006).

La mayoría de los métodos empleados para las mediciones se caracterizan por hacer evaluaciones de la conexión entre *hosts* enviando algún patrón de tráfico para luego realizar su evaluación. Estas mediciones se repiten varias veces y luego se promedian para obtener una mejor aproximación.

Un aspecto fundamental en el diseño de experimentos es decidir cuáles pruebas o tratamientos se van a ejecutar en el proceso y la cantidad de repeticiones de cada una, de manera que se obtenga la máxima información al mínimo costo sobre el objeto de estudio.

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 y cada uno de ellos permite estudiar situaciones

⁶ *Jitter* es la variación en los retardos en la llegada de los paquetes entre su origen y el destino.

⁷ El RTT es el tiempo que tarda un paquete en volver a su emisor luego de haber pasado por el receptor.

que ocurren en la vida práctica, ajustándose a las necesidades de investigador (Gutiérrez, 2008).

El tipo de diseño experimental seleccionado es de tipo factorial, cuyo objetivo es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas (*throughput*). Es decir, se busca estudiar la relación entre los factores y la respuesta, para comprender mejor esta relación y generar conocimiento que permita tomar acciones y decisiones que mejoren el desempeño del proceso (Montgomery, 2003)

Para estudiar cómo influye cada factor sobre la variable de interés, es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada factor. Con el diseño factorial completo se ejecutan aleatoriamente en el proceso todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles seleccionados (Gutiérrez, 2008).

Un diseño de experimentos factorial (o arreglo factorial) es el conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse al considerar todas las posibles combinaciones de los niveles por el número de factores (Montgomery, 2003). Los factores son aquellas variables que se investigan en el experimento, en relación con la forma cómo afectan a la variable o variables de respuesta. Los niveles son los valores que puede tomar cada uno de los factores. Por ejemplo, con $k = 2$ factores, y cada factor con dos niveles de prueba, se forma el diseño factorial de $2 \times 2 = 2^2$, que se compone de cuatro combinaciones o puntos experimentales.

Para el desarrollo del experimento se usaron adaptadores PLC-*ethernet*, con el fin de determinar la variación del *throughput* en la red LAN, según el tamaño del paquete, el número de estaciones activas en la red y la distancia en metros entre el PC-cliente y el PC-servidor. Cada factor presenta un número específico de niveles cuantitativos acorde con la tabla 1.

Tabla 1. Factores y niveles experimentales

Factor	Descripción	Niveles
1	Tamaño del paquete	6
2	Número de <i>hosts</i>	6
3	Distancia	4

Fuente: presentación propia de los autores.

En virtud de lo anterior, corresponde a un diseño factorial de $6 \times 4 \times 6$, es decir, 144 combinaciones de tratamientos o puntos experimentales. Dadas las condiciones experimentales, el criterio fue de cinco replicaciones en cada condición del experimento, teniendo en cuenta que en total se tomarían 720

muestras, lo cual es una cantidad suficiente para medir los efectos principales y las interacciones.

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. (Martínez y Martínez, 1997). En estadística, el análisis de la varianza es una colección de modelos estadísticos, en la cual la varianza está particionada en ciertos componentes debidos a diferentes variables explicativas (Kuehl, 2006).

El nombre análisis de varianza viene del hecho de que se utilizan coeficientes de varianzas para probar la hipótesis de igualdad de medias. La idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento (Kuehl, 2006). El análisis de varianza permite identificar si las muestras, tomadas en diferentes situaciones, denominadas factores” o “tratamientos” influyen significativamente, desde un punto de vista estadístico, sobre la variable de respuesta. Se establecen entonces hipótesis sobre el comportamiento de los factores y al final se aceptan o rechazan según los resultados arrojados por el análisis de varianza (Gutiérrez, 2008).

El análisis de varianza no obedece a realizar comparaciones por capricho o para descubrir lo evidente. La comparación de tratamientos surge como una necesidad para tomar una decisión, buscar la solución de un problema o como paso importante para el mejor entendimiento de un proceso (Montgomery, 2003). En el contexto de un problema de investigación surge la necesidad de realizar alguna comparación de tratamientos con el fin de elegir la mejor alternativa o comprender mejor el comportamiento de la variable de interés en cada uno de los distintos tratamientos.

La estrategia normalmente se basa en obtener una muestra representativa de mediciones de cada uno de los tratamientos y, con las medias y varianzas muestrales, construir un modelo estadístico que describa el comportamiento de esta comparación (Moreno, 2002). El modelo estadístico da cuenta del comportamiento de la variable observada y en cada diseño incorpora un término adicional por cada factor. Así, el modelo es una manera de expresar matemáticamente todo lo que se supone que puede influir sobre la variable de respuesta en un diseño dado (Montgomery, 2003).

El objetivo del análisis de varianza es determinar si ciertas variables pueden explicar una parte significativa de la variación, siendo la variación aleatoria pequeña frente a la variación explicable o determinista. Al finalizar el experimento, se buscó identificar si uno o más factores afectaron a la variable respuesta, y con

ello establecer una relación de causalidad, sentando las bases para el modelo empírico de predicción.

1. Descripción del experimento

En la actualidad, existen diferentes herramientas de *software* que permiten realizar mediciones sobre una red. La mayoría opera mediante configuraciones cliente/servidor: envía paquetes de un *host* a otro y genera situaciones de tráfico controladas y aleatorias, con lo cual permite variar el tipo de protocolo de transmisión (*transmission control protocol* [TCP] o *user datagram protocol* [UDP]), el tamaño del paquete y, en algunas ocasiones, la tasa de transferencia.

Entre las herramientas de *software* más utilizadas se encuentran: Chariot[®], MGEN[®], IPERF[®], SmokePing[®] y TTCIP[®]. Sin embargo, teniendo en cuenta las características y su uso constante en situaciones que requieren evaluar el rendimiento de una red, se utilizará IPERF como herramienta de *software* para la medición del *throughput* y de otros parámetros relacionados con retardos propios de la red LAN sobre *power line communications* (PLC) bajo el estándar HomePlug 1.0.

IPERF es una herramienta bajo código libre diseñada para medir el rendimiento del ancho de banda vía TCP y UDP. IPERF reporta *throughput*, retardo (*delay*), *jitter* (variación del retardo) y pérdidas de datagramas; además, permite manipular diversos parámetros del tráfico generado. La tabla 2 muestra las principales características de IPERF.

Tabla 2. Características de IPERF

TCP	UDP
Medida del ancho de banda	El cliente puede crear flujos UDP y especificar su tamaño
Reporta el tamaño de MSS/MTU	Medida de pérdida de paquetes
Soporte para ventana de TCP vía <i>socket buffers</i>	Soporta <i>multicast</i>
Conexiones múltiples simultáneas	Conexiones múltiples simultáneas

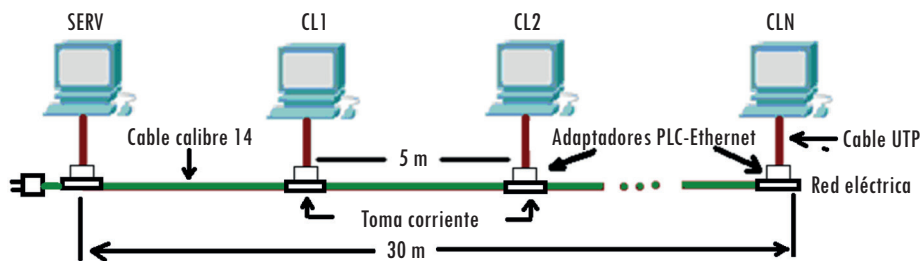
Fuente: presentación propia de los autores.

Para establecer una comunicación entre dos equipos, uno de ellos debe configurarse como servidor y otro como cliente. El experimento consistió en conectar diversos equipos de cómputo, usando adaptadores PLC-*ethernet* separados entre

sí a una distancia conocida. IPERF generó tráfico desde cada uno de los PC hacia el servidor según la configuración de parámetros establecida.

El experimento se desarrolló bajo un ambiente de laboratorio controlado, donde se implementó un sistema de red eléctrico conocido, acondicionado especialmente con tomacorrientes separados entre sí a una distancia de 5 m, hasta alcanzar la distancia máxima de 30 m. En la figura 1 se muestra el esquema de interconexión de cada uno de los elementos que forman parte de la red PLC experimental.

Figura 1. Esquema de interconexión física y configuración de la red PLC bajo un ambiente de laboratorio controlado



Fuente: presentación propia de los autores.

La tabla 3 muestra las características técnicas de los adaptadores de red PLC-ethernet bajo el estándar HomePlug 1.0 (figura 2).

Figura 2. Adaptadores PLC-ethernet



Tabla 3. Características de los adaptadores PLC-*ethernet*

Protocolo/estándares	Especificación HomePlug 1.0, IEEE 802.3 10/100 Ethernet (10 Mb/s) y IEEE 802.3 u <i>fast ethernet compliant</i>
	14 Mb/s
	Interconecta hasta 10 <i>plug IP</i>
Soporte de modulación	OFDM , DQPSK, DBPSK y ROBO
Ancho de banda	De 4,3 Mhz a 20,9 Mhz
Calidad del servicio	Soporta FEC
	Tiene cuatro niveles de prioridad de paquetes en forma aleatoria
	Usa algoritmos adaptativos bajo el uso de CSMA/CA
	Maneja encapsulamiento de paquetes
	Tiene baja latencia, alto <i>throughput</i> y <i>jitter</i> ajustable
Soporte de seguridad	Uso del algoritmo DES a 56 bits para encriptación
<i>Hardware</i>	Potencia mínima de 4,5 watts
Indicadores LED	Un <i>power</i> LED
	Un <i>powerline activity status</i> LED
	Un <i>ethernet link/activity status</i> LED

Fuente: Netgear

Los valores establecidos para cada una de las variables consideradas en el experimento son:

- Tamaño del paquete: 64, 128, 256, 512, 1024, 1470 bytes
- Número de PC activos en la red: 1, 2, 4, 6, 8, 10 (se toman diez como límite, según las especificaciones del fabricante).
- Distancia entre PC-cliente y servidor: 5 m, 10 m, 20 m y 30 m

El número de replicaciones del experimento es de cinco; por lo tanto, se tomaron 720 mediciones para la variable de respuesta.

2. Análisis de resultados

En un diseño factorial de tres factores ($a \times b \times c$) se supone que el comportamiento de la respuesta puede describirse mediante el modelo de efectos dado por Gutiérrez (2008):

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ij} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (1)$$

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

Donde:

a = tamaños del paquete considerados en el experimento

b = distancias entre estaciones

c = número de estaciones o host en la red PLC

n = número de réplicas del experimento

Y_{ijkl} = *Throughput* para un tamaño de paquete (i) a una distancia entre estaciones (j), con un número de estaciones en la red PLC (k), para la replicación (l).

(μ) Media general del *throughput* independiente de cualquiera de los factores considerados en el experimento.

A_i : Efecto del tamaño del paquete (i)

B_j : Efecto de la distancia entre estaciones (j)

C_k : Efecto del número de estaciones (k)

$(AB)_{ij}$: Efecto de la interacción entre los factores tamaño del paquete y distancia entre *hosts*

$(AC)_{ik}$: Efecto de la interacción entre los factores tamaño del paquete y número de *hosts*

$(BC)_{jk}$: Efecto de la interacción entre los factores distancia entre *hosts* y número de *host*

$(ABC)_{ijk}$: Efecto de la interacción de los tres factores

ε_{ijkl} : Error aleatorio

El estudio factorial de tres factores (A, B, C) permite investigar los efectos: A, B, C, AB, AC, BC y ABC; el nivel de detalle con el que pueden estudiarse depende del número de niveles utilizado en cada factor. Para el caso particular, se tienen siete efectos de interés sin considerar el nivel de detalle y con ellos se pueden plantear siete hipótesis nulas (H_0), cada una apareada con una hipótesis alternativa (H_A), (Gutiérrez, 2008). El análisis de varianza para probar cada una de estas hipótesis se ilustra más adelante (tabla 4).

Las hipótesis de interés para los tres factores del modelo anterior y sus interacciones son:

H_0 : Efecto A = 0, H_A : Efecto A \neq 0

H_0 : Efecto B = 0, H_A : Efecto B \neq 0

$$\begin{aligned}
 H_0: \text{Efecto } C &= 0, H_A: \text{Efecto } C \neq 0 \\
 H_0: \text{Efecto } AB &= 0, H_A: \text{Efecto } AB \neq 0 \\
 H_0: \text{Efecto } AC &= 0, H_A: \text{Efecto } AC \neq 0 \\
 H_0: \text{Efecto } BC &= 0, H_A: \text{Efecto } BC \neq 0 \\
 H_0: \text{Efecto } ABC &= 0, H_A: \text{Efecto } ABC \neq 0
 \end{aligned}$$

En los casos en los que todos los factores del experimento son fijos, es posible formular y probar fácilmente hipótesis acerca de los efectos principales y las interacciones. En el caso de modelos de efectos fijos, las pruebas para las hipótesis sobre cada efecto principal y las interacciones se pueden construir dividiendo el 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 1 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).

2.1. Validez de los resultados obtenidos experimentalmente

La validez de los resultados obtenidos en cualquier análisis de varianza queda supeditada a que los supuestos del modelo se cumplan. Estos supuestos del modelo de análisis de varianza son: normalidad, varianza constante (igual varianza de los tratamientos) e independencia (Gutiérrez, 2008). En el caso particular de este estudio, bajo el uso de gráficos de residuos se pudo comprobar que los datos obtenidos experimentalmente cumplen cada uno de los supuestos, lo cual garantiza que los resultados del experimento obedecen a una muestra aleatoria de distribución normal con media 0 y varianza constante (Moreno, 2002).

2.2 Análisis e interpretación de los efectos activos

Mediante del uso del *software* estadístico Statgraphics®, se realizó un análisis multifactorial de la varianza para *throughput*, el cual realiza varias pruebas y gráficos para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo en el *throughput* como variable de salida.

La tabla 4 muestra el resultado del análisis de varianza correspondiente al *throughput*:

Tabla 4. Análisis de varianza completo para *throughput*

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad	Cociente-F	Valor <i>p</i>
			(F ₀)	
A: Tamaño del paquete	502,750	5	1587,365517	0,000
B: Distancia	0,220	3	11,55119875	0,000
C: Número de <i>hosts</i>	984,718	5	3109,113956	0,000
Interacción AB	0,138	15	1,45069056	0,119
Interacción AC	384,542	25	2428,279771	0,000
Interacción BC	0,103	15	1086,900989	0,365
Interacción ABC	0,210	75	0,442644095	1,000
Error	3,649	576		
Total	1876,330	719		

Fuente: presentación propia de los autores.

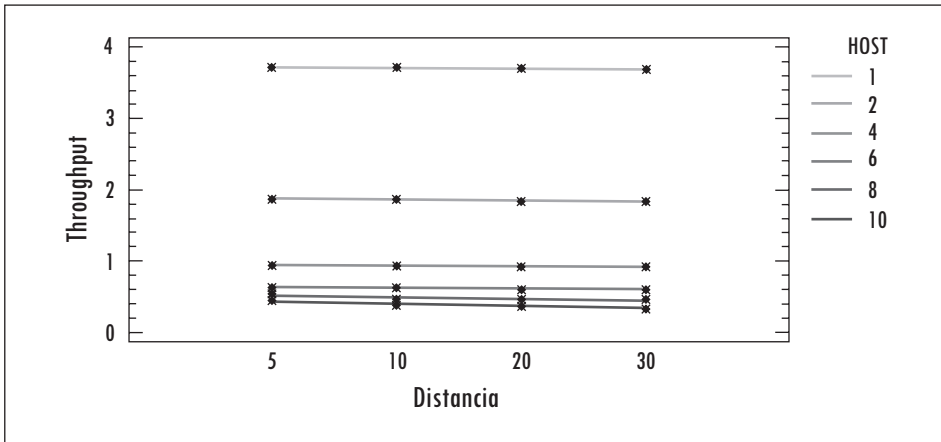
Al efecto cuyo valor *p* sea menor al valor especificado para α , se declara estadísticamente significativo o se dice que está activo (Moreno, 2002). Es decir, aquellos valores donde $p < 0,005$.

El cuadro de análisis de varianza descompone la variabilidad de *throughput* en las contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha elegido la suma de cuadrados tipo III (valor por defecto), se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los valores *p* comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que según el análisis de varianza existen cuatro efectos con $p < 0,005$ (*A*, *B*, *C* y *AC*), estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo en *throughput* del 95,0% de confianza y en ellos la hipótesis H_0 se rechaza.

Por otro lado, los efectos que no influyen estadísticamente en el modelo (*AB*, *BC* y *ABC*) se podrían eliminar enviando sus efectos sobre el modelo al término del error (ϵ). Es muy importante tener en cuenta que *AC* fue la única interacción estadísticamente significativa entre los factores, la cual corresponde a la interacción entre los factores tamaño del paquete y número de *hosts* o estaciones existentes en la red PLC.

En la figura 3 se evidencia una muy poca importancia de la interacción entre la distancia y el número de *hosts* existentes en la red, debido a que las líneas se encuentran paralelas entre sí. Por otro lado, el hecho de que la pendiente de las rectas sea muy cercana a 0 quiere decir que la influencia del factor distancia sobre el valor del *throughput* es muy bajo.

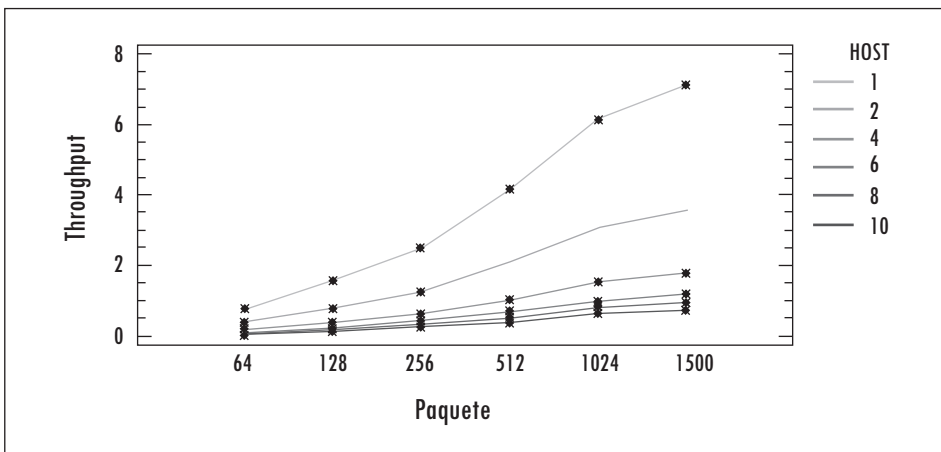
Figura 3. Interacción entre distancia y *hosts*



Fuente: Presentación propia de los autores (gráfica preparada en Statgraphics Plus 5.1)

En la figura 4 el aspecto quebrado de las líneas denota un efecto considerable en la interacción de los factores tamaño del paquete y número de estaciones. Por otro lado, debido a la pendiente de las rectas puede afirmarse que el *throughput* tiende a estabilizarse alrededor de 1 Mb/s a medida que aumenta el tamaño del paquete y el número de estaciones; así mismo, puede asegurarse que la mayor influencia sobre la variable de salida depende del número de estaciones que se encuentren activas en la red PLC.

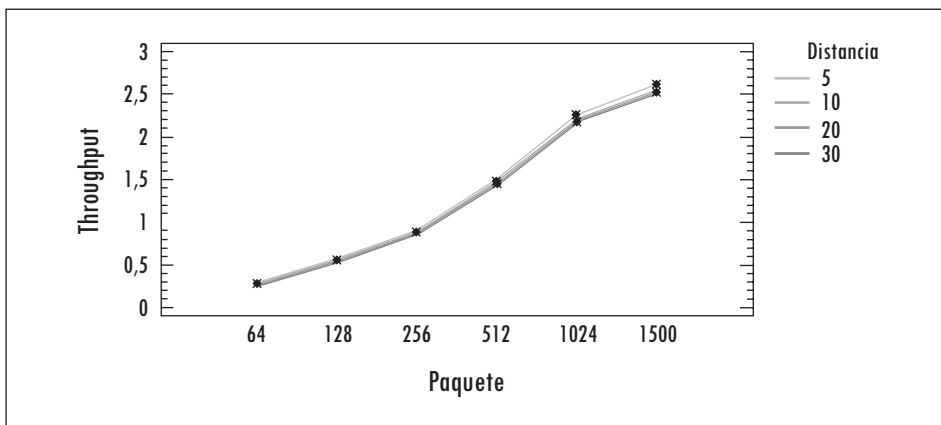
Figura 4. Interacción entre tamaño del paquete y *hosts*



Fuente: Presentación propia de los autores (gráfica preparada en Statgraphics Plus 5.1)

En la figura 5 se evidencia una muy poca importancia de la interacción entre el tamaño del paquete y la distancia entre estaciones, ya que las líneas se encuentran casi paralelas entre sí. Sin embargo, la pendiente de las rectas tiende a aumentar considerablemente a medida que aumenta el tamaño del paquete, lo cual refleja la fuerte influencia del tamaño del paquete en el valor del *throughput*.

Figura 5. Interacción entre tamaño del paquete y distancia



Fuente: Presentación propia de los autores (gráfica preparada en Statgraphics Plus 5.1)

3. Conclusiones

La red eléctrica representa un medio hostil para la transferencia de datos debido a que no ha sido diseñada para transmitir información. Al ser una tecnología emergente, la tecnología PLC enfrenta varios inconvenientes que afectan considerablemente su óptimo desempeño: niveles excesivos de ruido, atenuación de la señal a las frecuencias de interés, discontinuidades en la impedancia característica del canal, efecto *multipath*, entre otros. Adicionalmente, es muy difícil obtener un modelo significativo de este canal, debido a la constante conexión y desconexión de dispositivos.

Uno de los aspectos de mayor relevancia en los resultados obtenidos es el comportamiento de la tecnología PLC bajo las condiciones de la red eléctrica colombiana, considerando que la eficiencia de la red PLC depende de las condiciones en que se encuentre la red eléctrica. En Colombia y en muchos otros países, el cableado eléctrico no ha sido modificado ni adaptado para el uso adecuado de esta tecnología, tal como sí ha ocurrido en Alemania, por ejemplo, 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.

Una de las principales características de la tecnología PLC bajo el estándar HomePlug 1.0 es el uso de *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) como técnica de modulación, la cual implementa un esquema de transmisión adaptativa, analizando las condiciones del canal según la relación señal a ruido (*signal to noise ratio* [SNR]) presente en el medio en un momento dado. Esto es muy importante a la hora de analizar el comportamiento de la tecnología PLC durante el desarrollo del experimento.

La PLC ofrece una instalación simple y rápida: solo es necesario conectar un adaptador o módem PLC, así cualquier tomacorriente se convierte en un punto de acceso a la red, lo cual permite la transmisión simultánea de voz, datos y video sobre un mismo medio. Esto da origen a la prestación de múltiples servicios, como acceso a internet de banda ancha, telefonía vocal con protocolo de IP y aplicaciones multimedia (videoconferencia, televisión interactiva, video y audio bajo demanda, juegos en red, entre otras).

Una red PLC está sujeta a limitaciones relacionadas con la tecnología utilizada. Estas limitaciones hacen referencia a la velocidad de transmisión, la cual, en la mayoría de los casos, no corresponde a la tasa esperada, debido a que la red PLC trabaja bajo el uso de un medio compartido, donde el ancho de banda entre los usuarios disminuye a medida que aumenta la cantidad de estaciones activas en la red PLC. Un aspecto importante es que las estaciones que formen parte de la red PLC deben estar en la misma fase de la red eléctrica.

Un diseño experimental es una secuencia de etapas o actividades que deben realizarse para cumplir con éxito los objetivos que se persiguen. En vista de lo anterior y para óptimo desarrollo del presente estudio, fue seleccionado el tipo factorial, cuyo objetivo es estudiar el efecto de varios factores sobre una respuesta (*throughput*). Para el caso particular, se implementó un diseño factorial de $6 \times 4 \times 6 = 144$ combinaciones de tratamientos o puntos experimentales, con tres factores de tipo cuantitativo, el cual respondió satisfactoriamente a cada una de las necesidades en el proceso de investigación. El número de repeticiones del experimento fue de cinco, las cuales se consideraron suficiente garantía para medir los efectos principales y las interacciones, para un total de 720 mediciones de la variable de respuesta.

En todo modelo es importante saber combinar parámetros, variables, relaciones funcionales y restricciones que formen los componentes que desarrollan la función objetivo. El análisis de varianza (ANOVA) permitió descomponer la

variabilidad de *throughput* en cada una de las contribuciones por factor, bajo un nivel de confianza del 95,0%. El análisis de varianza identificó cuatro efectos estadísticamente significativos (*A*, *B*, *C* y *AC*). La única interacción estadísticamente significativa entre los factores fue la interacción *AC*, que corresponde a la interacción entre los factores tamaño del paquete y número de *hosts* o estaciones existentes en la red PLC.

Aunque existen herramientas de predicción que se encuentran disponibles comercialmente, su costo es muy elevado, lo cual limita su adquisición y aplicación en el entorno regional. Algunos ejemplos son: WinProp[®], SitePlanner[®], Cindoor[®]; sin embargo, el uso de IPERF como herramienta de *software* de libre distribución permitió realizar diversas pruebas sobre el entorno de red basado en PLC, las cuales brindaron el soporte para la definición del modelo empírico de predicción y la forma de interacción entre diversos factores inmersos en el proceso de comunicación.

Es importante considerar que los resultados obtenidos pueden estar sujetos a modificaciones y ajustes posteriores debido al grado de sensibilidad de los instrumentos utilizados para realizar la medición y las condiciones existentes en la red cuando se lleve a cabo el experimento.

Referencias

- CARCELE, X. *Power line communications in practice*. París: Artech House, 2006. 376 p. ISBN978-1-5969-3-335-4.
- GUTIÉRREZ, H. *Análisis y diseño de experimentos*, 2 ed. México: McGraw-Hill, 2008, pp. 25; pp. 100; pp. 192; pp. 298; pp. 571.
- HomePlug 1.0. Specification. HomePlugPowerline Alliance, June 2001.
- IPERF. Aspectos Básicos sobre el uso de IPERF. [Web en línea]. <http://seguridadyredes.wordpress.com/2008/06/18/iperf-midiendo-ancho-de-banda-entre-dos-hosts/>. [Consulta: 15-2-2011].
- KUEHL, R. O. *Diseño de experimentos: principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones*. 2da. Ed. México: Thomson, 2006. pp. 666 p.
- MARTÍNEZ, R. y MARTÍNEZ, N. *Diseño de experimentos análisis de datos estándar y no estándar*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1997. pp. 461 p. ISBN 958-9251-32-3.
- MONTGOMERY, D. C. *Diseño y análisis de experimentos*. 2da. Ed. México: Limusa-Wiley, 2003. pp. 686 p. ISBN 9789681861568.
- MORENO, W. *Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos*. Bucaramanga: Ediciones UIS, 2002, pp. 105; pp. 155; pp.151; pp. 330.
- NETGEAR. Productos. [en línea]. http://www.netgear.es/productos/ft_pdf/xe102_es.pdf. [Consulta: 10-3-2011].