Evaluación del Jitter en redes de área local bajo tecnología PLC

José Antonio Vesga Barrera
Unidades Tecnológicas de Santander

Martha Fabiola Contreras Higuera
Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Fecha de Recepción: 10/05/15 – Fecha de Aceptación:20/07/15

Resumen

El *Jitter* se define como la variación en el tiempo de llegada de los paquetes, causado por congestión en las redes, la pérdida de sincronización y otros factores que influyen generando retardos notorios en la transmisión. Es un efecto muy frecuente en las redes de datos no orientadas a la conexión, basadas en mecanismos de conmutación de paquetes.

Actualmente, el *Jitter* es tema de gran preocupación para los ingenieros que desarrollan componentes de alta velocidad tales como: transmisores, receptores y canales de datos. Los sistemas de comunicación seriales de alta velocidad requieren operar bajo márgenes muy ajustados; con la provisión de datos extremadamente veloces operando con baja probabilidad de errores, y la tecnología PLC (*Power Line Communication*s) no es la excepción. En la actualidad es posible alcanzar velocidades de transmisión cercanas a los 200 Mbps en las redes PLC, gracias a los avances en los esquemas de modulación tales como OFDM (*Orthogonal frecuency division multiplexing*).

Desde el punto de vista tecnológico, el hacer uso de la red eléctrica como medio físico de transmisión ha sido considerado como una excelente alternativa en la prestación de servicios de interconexión de última milla. El uso de adaptadores de red basados en PLC permiten fácilmente el diseño de redes LAN y comunicaciones de banda ancha a través de la red eléctrica, convirtiendo cualquier toma corriente en un punto de conexión para el usuario, sin la necesidad de cableados adicionales a los existentes.

En este artículo se presenta un análisis experimental sobre el comportamiento del *Jitter* en redes LAN sobre PLC, bajo el uso de adaptadores de red soportados con el estándar HomePlug 1.0.

Palabras clave: Jitter, PLC, HomePlug, ANOVA Modelo estadístico

Abstract

The Jitter is defined as the variation in the time of arrival of the package, caused by network congestion, loss of synchronization or other factors that influence the generation of delays in the sent and reception of the same. It is a very common effect in data networks not connection-oriented, based on packet switching.

Currently, the Jitter is subject of great concern for engineers who develop components of high speed such as: transmitters, receivers and data channels. High speed serial communication systems required to operate under tight margins; with the provision of technology and low probability of errors and extremely fast data PLC (Power Line Communication) is no exception. Currently it is possible to reach speeds of transmission networks 200 Mbps PLC, thanks to advances in such as OFDM modulation schemes (Orthogonal Frequency division multiplexing).

From the technological point of view, making use of the grid as a physical means of transmission has been considered as an excellent alternative in the provision of interconnection of last mile services. The use of PLC-based network adapters allow easily design LANs and broadband communications through the electrical network, making any outlet in a point of connection for the user, without the need for wiring additional to existing ones.

This article is an experimental analysis of behavior of the Jitter in LANs on PLC, under the use of network adapters supported with standard HomePlug 1.0.

Key words: Jitter, PLC, HomePlug, ANOVAStatistic Model

I. INTRODUCCIÓN

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. El arreglo constituído por las diferentes condiciones de proceso que serán ejecutadas, incluyendo las repeticiones recibe el nombre de "matriz de diseño".

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, ajustándose a las necesidades del investigador. Es muy importante saber cómo elegir el más adecuado para el problema que se quiere resolver.[1]

Cuando se desea realizar un experimento, se deben establecer claramente cada una de las siguientes etapas:[2]

- **Planeación:** Es una de las etapas más importantes para el desarrollo del experimento, debido a que si no se realiza adecuadamente, podría generar posteriormente resultados errados y con ello no cumplir a satisfacción el objetivo principal de la investigación. Dentro de esta etapa, se debe identificar claramente el problema de investigación, determinar los factores que deben estudiarse acorde con la influencia que estos podrían tener sobre la variable objeto de estudio, elegir las variables de respuesta que serán medidas en cada punto del diseño garantizando que se miden de manera confiable, seleccionar el diseño experimental de acuerdo con los factores que se analizan y al objetivo del experimento, planear y organizar el trabajo experimental y finalmente realizar el experimento.

- **Análisis:**Se debe determinar el modelo de análisis de varianza ANOVA[3] y la técnica estadística que mejor describa el comportamiento de los datos.

- **Interpretación:**Se debe ir más allá del análisis estadístico formal, en donde se analice con detalle lo que ha ocurrido con el experimento, desde contrastar las conjeturas iniciales con los resultados del experimento, hasta observar los nuevos aprendizajes que se lograron en el proceso, verificar los supuestos y establecer el mejor tratamiento.

- **Conclusiones finales:**Se describen cada uno de los resultados obtenidos en el desarrollo del experimento, en donde se recomienda establecer las medidas requeridas para implementar y generalizar el resultado del estudio realizado.

A continuación, se explica en forma general cada una de las etapas para el desarrollo del proyecto de investigación, acorde con las recomendaciones para el diseño de experimentos descritas anteriormente.

II. PLANEACION Y DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El rendimiento es uno de los aspectos de mayor interés dentro del análisis global en las redes LAN, debido al efecto que éste produce sobre el usuario final. Puede ser definido según diversos puntos de vista, permitiendo con ello incorporar otras formas de evaluación dependiendo del objeto de interés en particular. Básicamente, los parámetros más comunes para evaluar el rendimiento de una red son: *Throughput*,[4] utilización del canal, *Jitter* y RTT[5], entre las más importantes. En este caso en particular, el tema de investigación está centrado en el *Jitter*.

El *Jitter*, es un efecto de las redes de datos no orientadas a conexión y basadas en conmutación de paquetes. Se define técnicamente como la variación en el tiempo en la llegada de los paquetes, causada por congestión de red, perdida de sincronización o por las diferentes rutas seguidas por los paquetes para llegar al destino[2]. Las comunicaciones en tiempo real (como VoIP) son especialmente sensibles a este efecto en donde su valor recomendado debe ser inferior a 100ms.

Para el desarrollo del experimento se hará uso de adaptadores Ethernet-PLC con el fin de determinar la variación del *Jitter* 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.

Clasificación y selección del diseño experimental

Existe una gran variedad de diseños experimentales adaptables a diversas situaciones o problemas que son objeto de estudio. Es necesario saber cómo elegir el más adecuado para el problema que se quiere resolver, y por ende, conocer cómo es que se clasifican los diseños de acuerdo a su objetivo y alcance.

[1] GUTIERREZ P., Humberto, "Análisis y diseño de experimentos", México, 2008. P.25

[2] Ibid., p.30

[3] ANOVA es el acrónimo del término Analysis of Variance (Análisis de Varianza)

[4] *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 y puede variar en una misma conexión de red dependiendo del protocolo usado para la transmisión, el tipo de datos de tráfico, entre otros factores.

[5] RTT (Round-Trip delay Time) es un término generalmente usado en redes de computadores y corresponde al tiempo que tarda un paquete enviado desde un emisor en volver a este mismo emisor habiendo pasado por el receptor de destino.

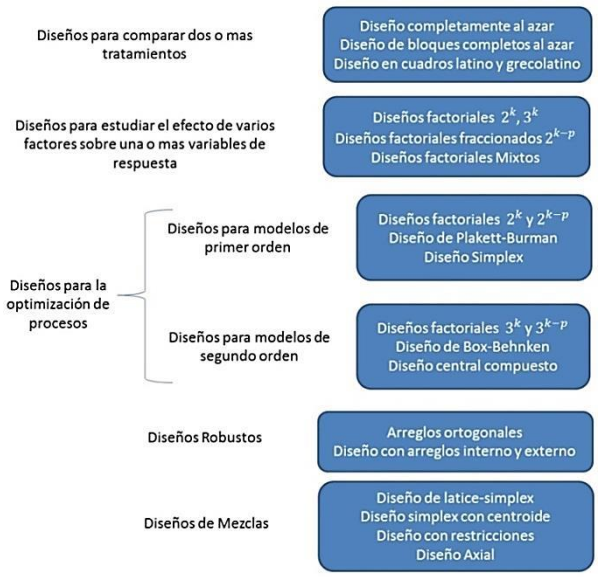
Los cinco aspectos que más influyen en la selección de un diseño experimental son los siguientes [9]:

- El objetivo del experimento
- El número de factores a controlar
- El número de niveles que se prueban en cada factor
- Los efectos de interés en la investigación (relación factores-respuesta)
- El costo del experimento, tiempo y precisión deseada.

Estos cinco puntos no son independientes entre sí, pero es importante señalarlos de manera separada, ya que al cambiar cualquiera de ellos, podría cambiar el diseño experimental a utilizar.[9] El objetivo del experimento se ha utilizado como un criterio general de clasificación de los diseños experimentales, mientras que los otros cuatro puntos son útiles para subclasificarlos. En este sentido, los diseños experimentales se pueden clasificar como[8]:

1. Diseños para comparar dos o más tratamientos
2. Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre una o más variables de respuesta
3. Diseños para determinar el punto óptimo de operación del proceso
4. Diseños para la optimización de una mezcla
5. Diseños para hacer el producto insensible a factores no controlables.

Figura 1. Clasificación general de los diseños experimentales de acuerdo con su objetivo [7]



En la figura 1 se presenta la clasificación general de los diseños experimentales de acuerdo con su objetivo. Dentro de cada rama se pueden clasificar deacuerdo al número de factores, al tipo de efectos que se pretende estudiar y según el número de restricciones existentes.

El tipo de diseño experimental seleccionado es el tipo factorial, cuyo objetivo consiste en estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas (*Jitter*). Es decir, lo que se busca es estudiar la relación entre los factores y la respuesta, con la finalidad de conocer mejor cómo es esta relación y generar conocimiento que permita tomar acciones y decisiones que mejoren el desempeño del proceso. [9] Para estudiar la manera 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 completo se ejecutan, aleatoriamente en el proceso, todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles seleccionados.[6]

Un diseño de experimentos factorial o arreglo factorial es el conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles por el número de factores. [9]Los factores son aquellas variables que se investigan en el experimento, con relación a la forma cómo afectan a la(s) variable(s) de respuesta. Los niveles son aquellos 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 $2x2=2^2$ que consiste de cuatro combinaciones o puntos experimentales.

Para el presente trabajo de investigación se consideraron tres factores: tamaño del paquete, número de PCs activos en la red y distancia entre el PC (Cliente) y el Servidor. Cada factor presenta un número específico de niveles cuantitativos acorde con el siguiente Tabla.

Tabla 1. Factores vs Niveles

Factor	Descripción	No. Niveles
1	Tamaño del paquete	**6**
2	Número de host	**6**
3	Distancia	**4**

En vista de lo anterior, corresponde a un diseño factorial de 6x4x6=144 combinaciones de tratamientos o puntos experimentales. El número de replicaciones del experimento es de cinco (5), por lo tanto, se tomaron 720 mediciones por cada variable respuesta.

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. [4]En estadística, el **análisis de la varianza**

[6]GUTIERREZ. Op. Cit., p. 150

(*ANOVA*, según terminología inglesa) es una colección de modelos estadísticos, en la cual la varianza está particionada en ciertos componentes debidos a diferentes variables explicativas.[8]

El nombre de análisis de varianza (ANOVA) corresponde al usode 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 la que contribuye cada fuente de variación en el experimento.[8][9]El análisis de la varianza permite identificar si las muestras tomadas en diferentes situaciones llamadas "factores" o "tratamientos", influyen significativamente desde un punto de vista estadístico sobre la variable respuesta. A partir de este criterio, se establecen hipótesis sobre el comportamiento de los factores y al final se aceptan o rechazan según los resultados arrojados por el ANOVA.[1][6][8]

El uso del análisis de varianza no obedece a realizar comparaciones por capricho o para descubrir lo evidente. La comparación de tratamientos surge como una necesidad en la lógica de pretender tomar una decisión, en la solución de un problema o como paso importante para el mejor entendimiento de un proceso. [9]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 tener una mejor comprensión del 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 base en las medias y varianzas muestrales construir un modelo estadístico que describa el comportamiento de esta comparación.[4][6][8]El modelo estadístico permite describir el comportamiento de la variable observada y en cada diseño incorpora un término adicional por cada factor. El modelo es una manera de expresar matemáticamente todo lo que se supone puede influir sobre la variable de repuesta en un diseño dado.[9]

El objetivo del ANOVA 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 busca identificar si uno o más factores afectaron a la variable respuesta, y con ello establecer una relación de causalidad, sentando las bases para el modelo empírico de predicción.

III. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

En la actualidad, existen diferentes herramientas software que permiten realizar mediciones sobre una red. La mayoría de herramientas operan mediante configuraciones cliente/servidor, enviando paquetes de un *host* a otro, generando situaciones de tráfico controladas y aleatorias, permitiendo variar el tipo de protocolo de transmisión, TCP o UDP, el tamaño del paquete, y en algunas ocasiones la tasa de transferencia.

Entre las herramientas software más utilizadas se encuentran: Chariot, MGEN, Iperf, SmokePing, TTCP, entre otras. 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 software para la medición del *Jitter* y otros parámetros relacionados con retardos propios de la red LAN sobre PLC bajo el estándar HomePlug 1.0.

Iperf, es una herramienta 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, permitiendo manipular diversos parámetros del tráfico generado.

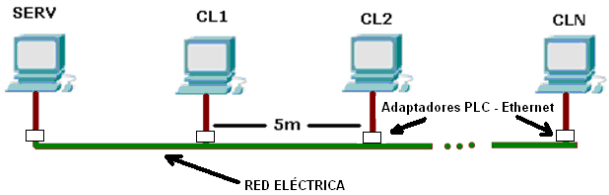
Para establecer una comunicación entre dos equipos, uno de ellos debe configurase como servidor y otro como cliente. En primer lugar debe configurarse el servidor, y una vez que éste está activo, se configura el cliente. El tráfico fluye de cliente a servidor durante el tiempo que dure la conexión. Una vez finalizada, el servidor permanece activo, a la espera de que el cliente realice otra petición. Algunas de sus características son:

Tabla 2. Características generales de Iperf para el protocolo TCP y UDP

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 socket buffers.	Soporta Multicast.
Conexiones múltiples simultáneas.	Conexiones múltiples simultáneas.

El experimento consiste en conectar diversos equipos de cómputo, haciendo uso de adaptadores PLC-ethernet separados entre sí a una distancia conocida. Iperf generará tráfico desde cada uno de los PC hacia el Servidor acorde con la configuración de parámetros establecida.

Figura 2. Esquema de conexión y configuración de la red PLC con fines experimentales



Fuente: El autor

La figura 2 muestra una topología bus utilizada para la implementación de la red PLC y la forma de conexión de cada uno de los equipos.

Tal como se mencionó anteriormente, se consideraron para el desarrollo del experimento tres factores: tamaño del paquete, número de PCs activos en la red y distancia entre el PC (Cliente) y el Servidor. Los valores establecidos para cada uno de los factores son:

- Tamaño del Paquete: 64,128,256,512,1024,1500 bytes
- Número de PCs activos en la red: 1,2,4,6,8,10 (Tomándose 10 como límite según especificaciones del fabricante)
- Distancia entre PC-Cliente y Servidor: 5m,10m, 20m, 30m

Dadas las condiciones experimentales descritas se considera que las cinco replicaciones del experimento son suficiente garantía para medir los efectos principales y las interacciones.

IV. ANALISIS DE RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

Se debe determinar el modelo de análisis de varianza ANOVA o la técnica estadística que mejor describa el comportamiento de los datos.

La distribución de probabilidad de la media muestral $\overline{X}$ señala qué valores se espera que tome $\bar{X}$, de acuerdo a los supuestos que se han asumido. De esta forma la distribución de probabilidad hace que lo aleatorio no sea capricho y modela los posibles valores de un estadístico muestral con lo que al observar una realización específica de un estadístico se pueden corroborar o rechazar supuestos (pruebas de hipótesis) o bien darse una idea de algunas características particulares de la población y cómo estimar qué posibles valores toma algún parámetro poblacional.[7]

Las distribuciones de probabilidad de mayor utilización en intervalos de confianza y pruebas de hipótesis son las distribuciones: normal, T de student, ji-cuadrado y F. Las cuatro distribuciones están relacionadas entre sí ya que las distribuciones T de Student, ji-cuadrado y F se definen en términos de la distribución normal estándar. Las distribuciones normal y T de Student sirven para hacer inferencia sobre las medias; la distribución ji-cuadrado será de utilidad para hacer inferencias sobre varianzas y la distribución F se utilizará para comparar varianzas. Es por esto que la distribución F es la de mayor relevancia en el diseño de experimentos, dado el análisis de la variabilidad que se observó en un experimento se hace comparando varianzas.[8]

Modelo Estadístico y Análisis De Varianza para *Jitter*

En un diseño factorial de tres factores $(axbxc)$ se supone que el comportamiento de la respuesta Y puede describirse mediante el modelo de efectos dado por:[9]

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

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

En donde:

a
$= Tamaños\ del\ paquete\ considerados\ en\ el\ experimento$
$b = distancias\ entre\ estaciones$
$c = Número\ de\ estaciones\ o\ host\ en\ la\ red\ PLC$
$n = Número\ de\ réplicas\ del\ experimento$

$Y_{ijkl} =$ *Jitter* 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 *Jitter* 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 Host
$(AC)_{ik}$ =Efecto de la interacción entre los factores Tamaño del paquete y Número de host
$(BC)_{jk}$ =Efecto de la interacción entre los factores Distancia entre Host 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; donde el nivel de desglose o detalle con el que pueden estudiarse depende del número de niveles utilizado en cada factor.

[7] GUTIERREZ. Op. Cit., p. 90

[8] MARTINEZ B., Ricardo, MARTINEZ R. Nhora. Diseño de Experimentos Análisis de datos estándar y no estándar. Bogotá D.C, 1997 p. 189

[9] Ibid., p 192

Para el caso particular, se tienen siete efectos de interés sin considerar desglose y con ellos se pueden plantear siete hipótesis nulas (H_o) y cada una apareada con una hipótesis alternativa (H_A).[10]El ANOVA para probar cada una de estas hipótesis se ilustra en el Tabla 3.

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

$$H_o: Efecto\ A = 0, \quad H_A: Efecto\ A \neq 0$$
$$H_o: Efecto\ B = 0, \quad H_A: Efecto\ B \neq 0$$
$$H_o: Efecto\ C = 0, \quad H_A: Efecto\ C \neq 0$$
$$H_o: Efecto\ AB = 0, \quad H_A: Efecto\ AB \neq 0$$
$$H_o: Efecto\ AC = 0, \quad H_A: Efecto\ AC \neq 0$$
$$H_o: Efecto\ BC = 0, \quad H_A: Efecto\ BC \neq 0$$
$$H_o: Efecto\ ABC = 0, \quad H_A: Efecto\ ABC \neq 0$$

Para casos en los que todos los factores del experimento son fijos, es posible formular y probar fácilmente hipótesis acerca de los efectos principales y las interacciones. Para el caso de modelos de efectos fijos, los test para probar las hipótesis sobre cada efecto principal y las interacciones se pueden construir dividiendo el CMcorrespondiente 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.[11]

Resumen del Procedimiento

Variable dependiente: *Jitter*
Factores:
- Distancia entre estaciones
- Número de host o estaciones activas en la red PLC
- Tamaño del Paquete

Número de muestras experimentales: 720

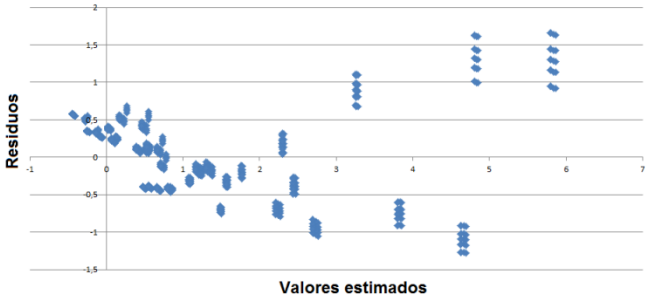
V. VALIDEZ DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

La validez de los resultados obtenidos en cualquier análisis de varianza queda supeditada a que los supuestos del modelo se cumplan. Los supuestos del modelo de ANOVA son: normalidad, varianza constante (igual varianza de los tratamientos) e independencia. Esto es, la respuesta (Y) debe tener una distribución normal, con la misma varianza en cada tratamiento y las mediciones deben ser independientes. Los supuestos sobre (Y) se traducen en supuestos sobre el término error (ε) en los diferentes modelos.[12]

Es muy común el utilizar los gráficos de residuos para comprobar los supuestos del modelo, ya que si los supuestos se cumplen los residuos se pueden ver como una muestra aleatoria de distribución normal con media cero y varianza constante. Los supuestos del modelo de análisis de varianza deben verificarse 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. Es muy importante verificar el cumplimiento de los supuestos, ya que de violarse alguno de ellos podría tener impactos errados sobre las conclusiones.[13] A continuación se realiza el análisis para cada uno de los tres supuestos:

Supuesto de Varianza Constante. Una forma de verificar el supuesto de varianza constante (o que los tratamientos tienen la misma varianza) es graficando los valores estimados contra los residuos ($\hat{Y}_{ij}\ vs\ \varepsilon_{ij}$). Generalmente, $\hat{Y}_{ij}$va en el ejeX (horizontal) y los residuos en el eje vertical.[14]

Figura 3. Valores residuales vs Valores estimados para *Jitter*



Fuente: El autor

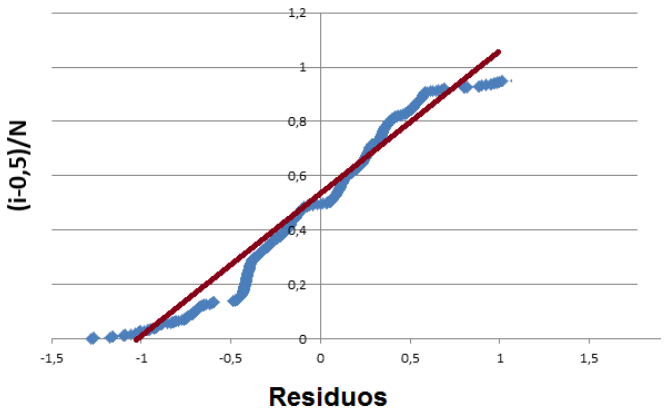
En la figura anterior, donde se relacionan los valores residuales contra los valores estimados, se observa una ligera violación al supuesto de varianza constante, debido a una semejanza al patrón tipo "corneta" que adoptan los residuos a medida que el valor estimado va en aumento. Sin embargo, esta violación no es tan fuerte como para generar un impacto significativo en el momento de emitir conclusiones sobre el modelo propuesto.

Debe tenerse en cuenta en la interpretación de esta gráfica que aunque existan diferencias pequeñas, estadísticamente no se consideran como diferencias significativas. Adicionalmente, deben tomarse en cuenta la cantidad de observaciones realizadas en cada uno de los factores, ya que este hecho puede llegar a impactar en la dispersión aparente de cada tratamiento.

[10]GUTIERREZ. Op. Cit., p. 298
[11]MORENO T., Wilfrido. Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos. Bucaramanga, 2002. P.151
[12]GUTIERREZ. Op. Cit., p. 100
[13]Ibid, p. 102
[14] MORENO. Op. Cit., p. 105

Supuesto de Normalidad. Un procedimiento para verificar el supuesto de normalidad de los residuos, consiste en graficar los residuos en una gráfica de probabilidad normal, la cual se incluye en la mayoría de los programas estadísticos.[15]

Figura 4. Valores residuales de *Jitter* en papel ordinario

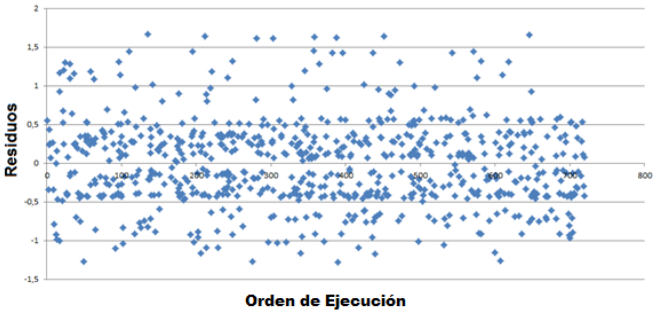


Fuente: El autor

En la figura anterior, correspondiente a la gráfica de probabilidad, se observa el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos, debido a que estos se encuentran ajustados sobre la recta graficados en papel ordinario.

Supuesto de Independencia. El supuesto de independencia en los residuos puede verificarse si se grafica el orden en que se tomó un dato contra el residuo correspondiente.

Figura 5. Residuos según el orden en la toma de los datos



Fuente: El autor

En la figura anterior, en donde se ilustra la relación entre los valores residuales y el orden en el que fueron tomados los datos experimentalmente se observa el cumplimiento del supuesto de independencia en donde los valores residuales se encuentran distribuidos de manera aleatoria sobre la horizontal.

VI. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS EFECTOS ACTIVOS

A través del uso del software estadístico Statgraphics, se realizó un análisis multifactorial de la varianza para *Jitter*, el cual realiza varios tests y gráficos para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo en el *Jitter* como variable de salida.

Análisis de Varianza Jitter

El Tabla ANOVA descompone la variabilidad de JITTER 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 $p-values$ comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Según el análisis de varianza, 6 $p-values$ son inferiores a 0,05, lo cual indica que estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo en el *Jitter*, para un 95,0% de confianza. Por ende la hipótesis H_o se rechaza para estos elementos. Estos valores se muestran en el Tabla 3.

Tabla 3. ANOVA completo para Jitter

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SC)	Gr. Lib	Cuadrado Medio (C.M)	Cociente-F (Fo)	p-Valor
A: Tamaño del Paquete	18133,229	5	3626,6458	23047,3310	0,0000
B: Distancia	41,623	3	13,8743	88,1709	0,0000
C: No. De Host	11593,213	5	2318,6426	14734,9716	0,0000
Interacción AxB	3,865	15	0,2577	1,6375	0,0598
Interacción AxC	9530,129	25	381,2051	2422,5584	0,0000
Interacción BxC	6,325	15	0,4217	2,6797	0,0006
Interacción AxBxC	27,800	75	0,3707	2,3556	0,0000
Error	90,637	576	0,1574		
TOTAL	39426,821	719			

Fuente: El autor

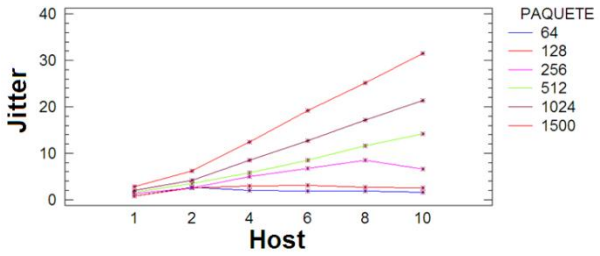
Al efecto cuyo $p-value$ sea menor al valor especificado para α, se declara estadísticamente significativo o se dice que está activo.[16] Es decir, aquellos valores donde $p-value < 0{,}05$.

[15] MORENO. Op. Cit., p. 101

[16] MORENO. Op. Cit., p. 155

Por otro lado, para los efectos que no influyen estadísticamente en el modelo (*AB*), se podría considerar el eliminarlos enviando sus efectos sobre el modelo al término del error (ε). Vale la pena mencionar que la única interacción significativa estadísticamente entre los factores fue la correspondiente a la interacción AC, la cual corresponde a la interacción entre los factores Tamaño del Paquete y Número de host o estaciones existentes en la red PLC.

Figura 6. Interacción Host – Tamaño del Paquete

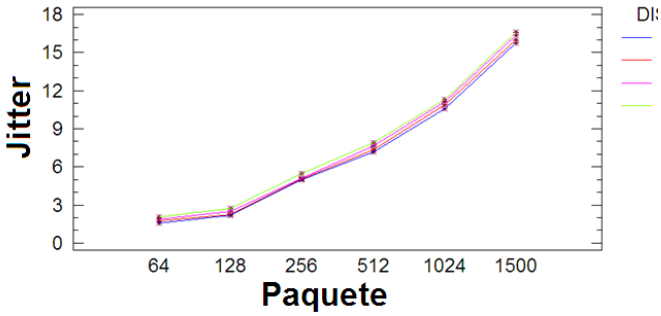


Fuente: Statgraphics Plus 5.1

Es muy importante tener en cuenta que las interacciones que arrojaron efectos significativos estadísticamente entre los factores corresponden a aquellas que tienen en común al factor C (número de host conectados a la red), lo cual es muy coherente considerando que entre más estaciones se encuentren activas en la red, mayor congestión de tráfico se presentará dentro de la misma y por ende aumentará el valor del *Jitter*.

En la figura anterior se evidencia de manera visual un efecto considerable en la interacción de los factores tamaño del paquete y número de estaciones, debido al aspecto quebrado de las líneas. Por otro lado, debido a la pendiente de las rectas puede afirmarse que el *Jitter* tiende a aumentar considerablemente a medida que aumenta el tamaño del paquete y el número de estaciones activas en la red PLC.

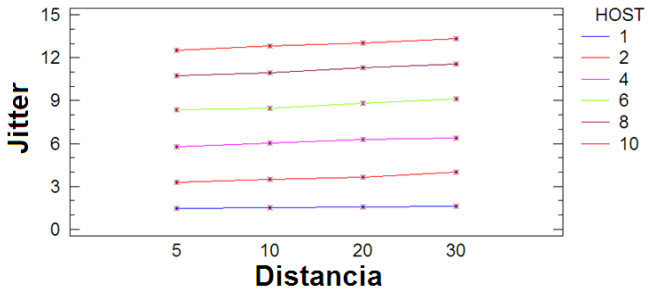
Figura 7. Interacción Tamaño del Paquete – Host



Fuente: Statgraphics Plus 5.1

En la figura anterior se evidencia de manera visual una muy poca importancia de la interacción entre el tamaño del paquete y la distancia entre estaciones, debido a que las líneas se encuentran casi paralelas entre sí. Sin embargo, debido a que la pendiente de las rectas tiende a aumentar considerablemente a medida que aumenta el tamaño del paquete, refleja la fuerte influencia del tamaño del paquete como factor importante sobre el valor del *Jitter*.

Figura 8. Interacción Distancia - *Host*



Fuente: Statgraphics Plus 5.1

En la figura anterior se evidencia de manera visual una muy poca importancia de la interacción entre la distancia y el número de host existentes en la red, debido a que las líneas se encuentran paralelas entre sí. Por otro lado, debido a que las pendientes de las rectas son muy cercanas a cero, quiere decir que la influencia del factor distancia sobre el valor del *Jitter* es muy bajo. Este análisis explica con mayor detalle el aporte correspondiente a la interacción BC, el cual no fue muy claro en el análisis de varianza inicial.

VII. CONCLUSIONES

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 se enfrenta a varios inconvenientes tales como: niveles excesivos de ruido, la atenuación de la señal a las frecuencias de interés, discontinuidades en la impedancia característica del canal, efecto *multipath*, entre otros aspectos; afectando considerablemente su óptimo desempeño. 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 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.

Una de las principales características de la tecnología PLC bajo el estándar HomePlug 1.0 es el uso de OFDM como técnica de modulación, la cual implementa un esquema de transmisión adaptativa, analizando las condiciones del canal acorde con la relación SNR presente en el medio en un momento dado. Esto juega un papel muy importante a la hora de analizar el comportamiento de la tecnología PLC durante el desarrollo del experimento.

La implementación de redes PLC no debe ser considerado como un reemplazo de las tecnologías existentes, sino como una solución complementaria que trabaja en conjunto con otras tecnologías de acceso. PLC ofrece una instalación simple y rápida en donde solo es necesario conectar un adaptador o MÓDEM PLC, convirtiendo cualquier toma de corriente en un punto de acceso a la red; permitiendo la transmisión simultánea de voz, datos y video sobre un mismo medio; originando la prestación de múltiples servicios, tales como: acceso a Internet de Banda Ancha, telefonía vocal con protocolo de IP, aplicaciones multimedia (videoconferencia, televisión interactiva, vídeo y audio bajo demanda, juegos en red), entre otros servicios.

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, en 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 formarán 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 consiste en estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas (*Jitter*). Para el caso particular se implementó un diseño factorial de 6x4x6=144 combinaciones de tratamientos o puntos experimentales, con tres factores de tipo cuantitativo (tamaño del paquete, número de estaciones activas en la red y la distancia en metros entre el PC-Cliente y el PC Servidor), el cual respondió satisfactoriamente a cada una de las necesidades en el proceso de investigación. El número de replicaciones del experimento fue de cinco (5), las cuales se consideraron suficiente garantía para medir los efectos principales y las interacciones, para un total de 720 mediciones de la variable 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 del *Jitter* en cada una de las contribuciones por factor, bajo un nivel de confianza del 95,0%. El análisis de varianza para el *Jitter* identificó 6 factores con un efecto estadísticamente significativo, observando que las interacciones que arrojaron efectos significativos estadísticamente entre los factores corresponden a aquellas que tienen en común al factor C (número de *host* conectados a la red), lo cual es muy coherente considerando que entre más estaciones se encuentren activas en la red, mayor congestión de tráfico se presentará dentro de la misma y por ende aumentará el valor del Jitter.

La validez de los resultados obtenidos en cualquier análisis de varianza queda supeditada a que los supuestos del modelo (normalidad, varianza contante e independencia) se cumplan. En el caso particular, bajo el uso de gráficos de residuos se pudo comprobar los supuestos del modelo propuesto para el Jitter, cumplen a satisfacción con cada uno de los supuestos, garantizando con ello que los resultados del experimento obedecen a una muestra aleatoria de distribución normal con media cero y varianza constante.

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 software de libre distribución permitió realizar diversas pruebas sobre el entorno de red basado en PLC, las cuales arrojaron resultados bastante interesantes; brindando las herramientas para la definición del modelo empírico de predicción y la forma de interacción entre diversos factores inmersos en el proceso de comunicación.

La intención final de este estudio es establecer las bases para evaluar el comportamiento del *Jitter*, el cual se encuentra directamente relacionado con el rendimiento de la red PLC implementada, considerando la influencia de cada uno de los siguientes factores: el número de estaciones activas en la red, la distancia entre ellas y el tamaño del paquete; bajo las condiciones de la red eléctrica existentes en ambientes corporativos y residenciales. Sin embargo, 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 en el momento de llevar a cabo el experimento.

REFERENCIAS

[1]GUTIERREZ P., Humberto, “Análisis y diseño de experimentos”, 2 Ed. México: McGraw-Hill, 2008. 571 p. ISBN 970-10-4017-1

[2]HRASNICA Halid, HAIDINE Abdelfatteh, LEHNERT Ralf. Broadband Powerline Communications Networks. NJ USA: John Wiley & Sons Ltd, 2004. 273 p. ISBN 0-470-85741-2

[3]MARTINEZ B., Ciro, "Estadística y Muestreo", 9 Ed. México: Ecoe ediciones, 2006. ISBN 958-9074-16-2

[4]MARTINEZ B., Ricardo, MARTINEZ R. Nhora. Diseño de Experimentos Análisis de datos estándar y no estándar. 1 Ed Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia, 1997. 461 p. ISBN 958-9251-32-3

[5]MONTGOMERY, Douglas C. RUNGER, George. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. 2 Ed. México: McGraw-Hill, 2002. 895 p. ISBN 0-471-54041-2

[6]MORENO T., Wilfrido. Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos. Bucaramanga: Ediciones UIS, 2002. 330 p.

[7] VICENTE, Lina, GIRON, Pedro. Diseño de Experimentos. Madrid. Prentice Hall, 2005. 383 p. ISBN 84-205-4409-4

[8] KUEHL, Robert O. Diseño de Experimentos "Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones". 2 Ed. México. Thomson, 2006. 666 p. ISBN 0-534-36834-4

[9] MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y Análisis de Experimentos. 2 Ed. México. Limusa-Wiley, 2003. 686 p. ISBN 9789681861568

[10] HomePlug 1.0 Specification, HomePlugPowerline Alliance, June 2001.

[11] GROTE Walter, Fixed or adaptive rate maximum throughput análisis. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 15 Nº 3, 2007, pp. 320-327

[12] GUILLEN, Edward P., LÓPEZ Julián J., BARAHONA Cesar Y..Throughput Analysis over Power Line Communication Channel in an Electric Noisy Scenario. World Academy of Science, Engineering and Technology Volume 33 September 2008 ISSN 2070-3740

[13] HELD Gilbert. Understanding Broadband over Power Line. NJ USA: Taylor & Francis Group, 2006. 191 p. ISBN 0-8493-9846-0

[14] HRASNICA Halid, HAIDINE Abdelfatteh, LEHNERT Ralf. Broadband Powerline Communications Networks. NJ USA: John Wiley & Sons Ltd, 2004. 273 p. ISBN 0-470-85741-2

[15] JENSEN Bente, SLAVENSKY Henning, KJÆRSGAARD Søren, "Benchmarking and QoS of In-House Powerline Equipment for AV- Streaming Applications", IEEE Proceedings of ISPLC2006, Orlando, pp. 160-165, (2006).

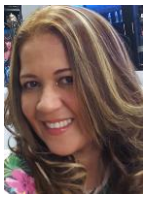
[16] LEE M. K., NEWMAN R., LATCHMAN H. A., KATAR S., YONGE L. HomePlug 1.0 Powerline Communication LANs –Protocol Description and Comparative Performance Results. accepted for publication in the Special Issue of the International Journal on Communication Systems on Powerline Communications, pages 447-473, May, 2003

[17] LIN Yu, LATCHMAN HA, LEE MK, KATAR S.A power line communication network infrastructure for the smart home. IEEE Wireless Communications, Dec 2002; 9(6): 104–111.

[18] CARCELE, Xavier. Power Line Communications in practice. Paris: Artech House. 2006. 376 p. ISBN 978-1-59693-335-4

BIOGRAFIA

Jose 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..



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.