

ANÁLISIS DEL MODELO DE MULTITRAYECTORIA EN CANALES POWER LINE CARRIER

MULTIPATH MODEL ANALYSIS IN POWER LINE CARRIER CHANNELS



AUTOR

Glenn Elmer Hernández Camelo
Magister (c) en Ingeniería, área
Telecomunicaciones
Unidades Tecnológicas de Santander
Docente Investigador
Ingeniería de Telecomunicaciones
glenn_hdz@yahoo.com
COLOMBIA

INSTITUCIÓN

Unidades Tecnológicas de Santander
UTS
Institución de Educación Superior
Calle de los Estudiantes No 9-82
cinv@uts.edu.co
COLOMBIA

Recepción: Junio 10 de 2009

Aceptación: Septiembre 16 de 2009

Temática abarcada por el artículo: Procesamiento de Señales, Electrónica y Modelado de Sistemas Físicos.

Tipo de Artículo: Artículo de Investigación Científico y Tecnológico

RESUMEN

El artículo presenta parte de los resultados de la investigación denominada "Caracterización de señales enviadas por la red eléctrica a través de Power Line Carrier" que, a través de la aplicación del método correlacional, tuvo como objetivo estudiar el comportamiento de la red eléctrica de baja tensión como canal de comunicaciones con el propósito de analizar la respuesta del modelo del canal ante la variación de parámetros que componen la función de transferencia, con el fin establecer atributos necesarios para realizar transmisión de información. Se mencionan los efectos físicos de la propagación de señales a través de redes eléctricas y los elementos intervinientes en el modelo del canal para establecer la capacidad de información que presenta el canal de transmisión. Finalmente, se presentan las conclusiones teniendo en cuenta la respuesta del modelo ante la variación del coeficiente de acople y la distancia a la cual viaja la señal a través de la red eléctrica, así como la atenuación presentada por las señales en función de la distancia.

PALABRAS CLAVES

CENELEC
Modelo del Canal
Multitrayectoria
PLC

ABSTRACT

The article presents some of the results of the research study " Characterization of signals sent by the electrical grid across Power Line Carrier" which, through the implementation of the correlational

method, aimed to study the behavior of low tension electrical grid behavior as a communications channel in order to analyze the response of the channel model to the variation of parameters that make the transfer function, to set attributes necessary for transmission of information. The article mentions the physical effects of the propagation of signals through power grids and elements involved in the channel model to establish the capacity of information presented by the channel. Finally, conclusions are presented taking into account the response of the model with the coupling coefficient variation and the distance at which the signal travels through the electrical grid and the signal attenuation by depending on the distance.

KEYWORDS

CENELEC

Channel Model

Multipath

PLC

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevas técnicas de modulación está permitiendo a investigadores, centros de investigación y a la academia, desarrollar aplicaciones que utilicen de manera eficiente, no sólo el ancho de banda, si no las características de los sistemas de telecomunicaciones. Gracias a la creciente evolución de las técnicas de modulación digital, de la mano de los sistemas de codificación y multicanalización, es posible integrar información proveniente de diferentes fuentes desde y hacia diferentes destinos a través del mismo medio de transmisión. Es así como los sistemas de modulación y las investigaciones alrededor de los mismos, permiten el uso eficiente del medio de transmisión, con el propósito de integrar diferentes servicios, brindando mejoras en la velocidad de transmisión y en los métodos y mecanismos utilizados para la detección y corrección de errores.

Cómo un resultado de los recientes desarrollos en telecomunicaciones, las redes eléctricas han evolucionado desde ser una red utilizada solamente para distribución de energía, a convertirse en un medio de transmisión multipropósito a través del cual se envía no solo energía eléctrica, sino voz y diversos servicios soportados en transmisión de datos. La transmisión de información a través de la red eléctrica se diferencia considerablemente en la topología, estructura y características físicas de los medios de transmisión convencionales tales como el par trenzado, cable coaxial y cables de fibra óptica. Por lo tanto, el medio utilizado por los sistemas PLC (Power Line Carrier) se diferencia de los anteriores por presentar características hostiles [6].

Los procesos, métodos y herramientas de simulación están permitiendo el análisis y modelamiento de parámetros que intervienen directamente en un sistema de telecomunicaciones compuesto por variables que, por sus características físicas, resulta difícil estimar y medir de manera directa, pues requieren para ello la inversión de alta sumas de dinero, así como la adecuación de lugares y ambientes controlados. Lo anterior está permitiendo, desde hace varios años, la aplicación de procesos de simulación, pues son un factor importante y decisivo en el diseño de sistemas de telecomunicaciones. Es así como las simulaciones orientadas a realizar el análisis de la función de transferencia o respuesta del sistema ante la variación de parámetros propios de la red eléctrica son de gran importancia e interés pues permiten establecer la respuesta del mismo, sin necesidad de realizar los montajes requeridos para tal fin.

El análisis a los modelos de líneas de transmisión PLC realizados por diferentes autores describen el comportamiento de una red a través del estudio de una gran cantidad de componentes distribuidos. Generalmente estos análisis se basan en las especificaciones de los componentes que caracterizan una red en particular (cables, empalmes, dispositivos conectados, etc). Según [6], es normalmente imposible determinar con suficiente precisión el valor de los parámetros necesarios, sin embargo en [7] se presenta un modelo que analiza a través de mediciones, la atenuación y el ruido de una red PLC.

El artículo presenta al análisis del modelo de la línea de transmisión, el cual considera el canal de comunicaciones como una caja negra y describe las características de transferencia a través de la respuesta en frecuencia en el rango de 20 KHz hasta 20 MHz. Este modelo permite integrar parámetros como pérdida del cable, reflexión, y factores de transmisión que son característicos del medio de transmisión a través del cual se envía la información. El artículo se organiza de la siguiente forma. En el capítulo 1 se mencionan los efectos físicos de la propagación de señales a través de redes eléctricas y los elementos que intervienen en el modelo. El modelo analizado, el cual se basa en los elementos anteriormente mencionados, se presenta en el capítulo 2. El análisis al modelo de la línea de transmisión en canales PLC, la respuesta del modelo a la variación del coeficiente de acople y la distancia, la capacidad de información que presenta el canal PLC para diferentes valores de ancho de banda y la atenuación presentada por las señales enviadas a través de la red eléctrica en función de la distancia, son analizadas en el capítulo 3. Finalmente en el capítulo 4 se presentan las conclusiones del análisis realizado.

1. PROPAGACIÓN DE SEÑALES A TRAVÉS DE LA RED ELÉCTRICA

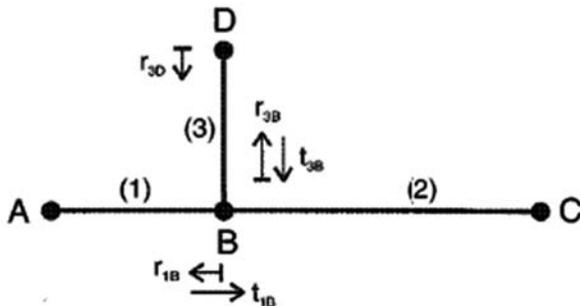
En este capítulo se presentan los principales efectos que influyen la transmisión de datos a través de las redes eléctricas y que derivan los fundamentos para el análisis de la respuesta de frecuencia que presenta el modelo.

1.1 TOPOLOGÍA DE LA RED

A diferencia de la estructura presentada por el sistema telefónico, que utiliza los hilos de cobre para el establecimiento de las comunicaciones, el sistema de transmisión de información a través de redes eléctricas no consiste en conexiones punto a punto entre las subestaciones y los servicios a los cuales acceden los clientes, sin embargo estas conexiones se representan como una topología bus. Un enlace de acceso entre una subestación y un usuario del servicio eléctrico consiste generalmente en un cable o en una conexión serial de cables ubicados desde la compañía generadora de energía eléctrica hasta el lugar de ubicación del usuario final, caracterizado por ramificaciones y valores de impedancia característica Z_i .

Los servicios de telecomunicaciones a través de PLC, terminan en el lugar de distribución de energía eléctrica en una vivienda, seguido por el cableado interno que puede ser modelado ó analizado desde el punto de vista de red de acceso por una compleja terminación de impedancias $Z_{H(f)}$. La impedancia que se presenta al interior de la vivienda es generalmente baja debido a los cables internos y al gran número de ramificaciones presentes en este tipo de lugares. Numerosas reflexiones son causadas por los empalmes de los cables, así como por las conexiones de los tomacorrientes ubicados al interior de la vivienda y por las conexiones de cables con diferentes valores de impedancia.

Figura 1. Señal de propagación en multitrayectoria



1.2 PROPAGACIÓN DE TRAYECTORIA MÚLTIPLE

La propagación de señales de información enviadas a través de la red de energía eléctrica no sólo ocurre a lo largo de un enlace directo entre el transmisor y el receptor, debido a esto es necesario considerar trayectorias adicionales denominadas ecos. Como resultado de lo anterior, es la existencia de un escenario de propagación con trayectoria múltiple con desvanecimiento selectivo de frecuencia. La propagación de trayectoria múltiple puede ser analizada a través de un ejemplo. Ver figura 1. El enlace a analizar tiene una sola ramificación y está compuesto por los segmentos 1, 2 y 3, con longitudes l_1 , l_2 y l_3 e impedancias Z_{1i} , Z_{2i} y Z_{3i} , respectivamente.

Para simplificar el análisis, los puntos A y C se consideran iguales, es decir $Z_A = Z_{1i}$ y $Z_C = Z_{2i}$. Los puntos restantes para las reflexiones son B y D, los cuales tienen valores de reflexión asumidos como, r_{1B} , r_{3D} y r_{3B} los factores de transmisión son denotados como t_{1B} y t_{3B} .

Con estas consideraciones, son posibles un número infinito de trayectorias de propagación, debido a múltiples reflexiones, es decir: A→B→C, A→B→D→B→C, A→B→D→B→D→B→C y así sucesivamente. Cada trayectoria i tiene un factor de acople g_i , que representa el producto de los factores de la reflexión y de transmisión a lo largo de la trayectoria analizada. Todos los factores de reflexión y transmisión en las líneas eléctricas son básicamente menores o iguales a uno, debido a que la transmisión ocurre solamente entre las uniones de los cables, donde la carga en una conexión paralela entre dos o más cables lleva una impedancia resultante que es más baja que la impedancia característica del cable de alimentación. Por lo tanto, el factor de acoplamiento g_i , que generalmente es producto de factores de transmisión y reflexión, es también menor o igual a uno.

$$|g_i| \leq 1 \quad (1)$$

A medida que aumenta el envío de información a través del canal PLC, es decir, al aumentar el número de transiciones y reflexiones a lo largo de una trayectoria, más pequeño el factor de ponderación será. Debido a lo anterior, para realizar el análisis del comportamiento del canal de transmisión, se aproxima el número infinito de trayectorias (N), a un número finito relacionado con las trayectorias dominantes, con el propósito de hacer N tan pequeño como sea posible. El retardo de una trayectoria τ_i puede ser calculado utilizando la constante dieléctrica ϵ_r del aislamiento del material, la velocidad de la luz C_o , y las longitudes de los cables l .

$$\tau_i = \frac{(d_i \sqrt{\epsilon_r})}{C_o} = \frac{d_i}{V_p} \quad (2)$$

Las pérdidas en los cables causan aumento de la atenuación $A(f, d)$ en función con la longitud del cable y la frecuencia enviada. Los componentes de las señales enviadas a través de las trayectorias individuales tienen que ser combinadas a través de superposición. Por lo tanto, la respuesta de frecuencia desde A hasta C puede ser expresado como

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i * A(f, d_i) * e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (3)$$

La propagación de señales enviadas a través de topologías más complejas, es decir, con mayor número de ramificaciones, pueden ser analizadas a través de particiones por tramos, utilizando la metodología mencionada anteriormente.

PÉRDIDAS EN LOS CABLES

Como se mencionó anteriormente, la propagación de señales a través de canales PLC es afectada por la atenuación, la cual se incrementa con la distancia y frecuencia. En esta sección se muestran de manera general las pérdidas en los cables y la relación de las mismas con el modelo matemático analizado. La respuesta en frecuencia $H(f)$ de una línea de transmisión de longitud l puede ser expresada a través de la constante de propagación que depende directamente de las constantes primarias R' , G' , C' y L'

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta \quad (4)$$

así como del voltaje $V(x)$ en un punto x a lo largo de la línea de transmisión.

$$H(f) = \frac{V(x=1)}{V(x=0)} = e^{-\gamma l} = e^{-\alpha(f)l} e^{-j\beta(f)l} \quad (5)$$

Los parámetros C' y L' pueden ser estimados a partir de las dimensiones geométricas y las propiedades del material en el cual fue elaborado el cable. Si se consideran frecuencias en el rango de los mega hertz, la resistencia por unidad de longitud R' está relacionada con el efecto piel y es proporcional \sqrt{f} a La conductancia por unidad de longitud G' es principalmente influenciada por el factor de disipación del material dieléctrico, usualmente PVC, y es proporcional a la frecuencia f . Con valores típicos en las propiedades geométricas y materiales del conductor, teniendo en cuenta el rango de frecuencia analizado, se presenta $R' \ll \omega L'$ y $G' \ll \omega C'$. Por lo tanto, se puede mencionar que los cables pueden presentar poca pérdida en comparación con la impedancia característica Z_0 . La constante de propagación se puede determinar a través de la aplicación de la siguiente expresión simplificada, que contiene las constantes K_1 , K_2 , K_3 , resumiendo los parámetros geométricos y de los

materiales en los cuales fue elaborado el cable.

$$\gamma = \frac{K_1 \sqrt{f} + K_2 f}{\text{Re}(\gamma) = \alpha} + \frac{jK_3 f}{\text{Im}(\gamma) = \beta} \quad (6)$$

La parte real de la constante de propagación, es decir, el factor de atenuación α , incrementa con la frecuencia. Sin embargo, la relación exacta entre α y f para un determinado tipo de cable, puede ser proporcional a \sqrt{f} , a f ó a una mezcla de los dos anteriores, dependiendo del factor que este siendo dominante entre K_1 y K_2 . De acuerdo a lo anterior y a investigaciones realizadas por [6] donde se tomaron mediciones de la respuesta en frecuencia, se pudo obtener una aproximación para el factor α , dando como resultado

$$\alpha(f) = \alpha_0 + \alpha_1 f^k \quad (7)$$

a través de la cual se puede caracterizar la atenuación de la línea eléctrica teniendo en cuenta tres parámetros que han sido adquiridos a través de las mediciones de la función de transferencia. A través de la aplicación de (5) y (7), la atenuación que presenta un cable al transmitir información utilizando el sistema PLC puede ser caracterizada por

$$A(f, d) = e^{-\alpha(f)d} = e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 f^k)d} \quad (8)$$

La ecuación anterior se deriva del análisis de los efectos físicos, los parámetros α_0 , α_1 y k se derivan de mediciones de la función de transferencia.

EL MODELO DEL CANAL PLC

2.1 MODELO GENERALIZADO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA LA PROPAGACIÓN DE SEÑALES EN MULTITRAYECTORIA

Combinando la propagación de multitrayectoria descrita en (3), con la frecuencia y longitud, que dependen de la atenuación, mostrada en (8), finalmente lleva a

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{|g_i(f)|}_{\text{Acoplamiento}} e^{j\phi g_i(f)} \underbrace{e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 f^k)d_i}}_{\text{Atenuación}} \underbrace{e^{-j2\pi f \tau_i}}_{\text{Retardo}} \quad (9)$$

Esta ecuación describe la propagación de la señal a lo largo de una trayectoria teniendo en cuenta el retardo y las características de acoplamiento propias de la impedancia. Aquí se puede observar que la atenuación en un trayecto de la red, incrementa con la distancia y la frecuencia. El factor de acoplamiento g_i resume el comportamiento de los factores de reflexión y transmisión a lo largo de una trayectoria de propagación.

2.2 MODELO SIMPLIFICADO

Las campañas de mediciones realizadas por [6] revelaron que es posible simplificar aún más las especificaciones del factor de acople, es decir, que no sea complejo y que no dependa de la frecuencia. Se menciona que en muchos casos prácticos, este valor puede ser asumido como un valor real. En redes heterogéneas, a menudo con varias trayectorias casi iguales, existen retardos los cuales no ameritan ser analizados desde el punto de vista de múltiples trayectorias, para lo cual solamente se analiza el peso, importancia ó prioridad del camino. Por lo tanto, utilizando la ecuación (2), la versión final de la respuesta en frecuencia está dada por un resultado que ha sido ampliamente demostrado en la práctica. [6].

Tabla 1. Parámetros del modelo de función de transferencia.

i	Número de trayectoria
a_0, a_1	Parámetros de Atenuación
K	Exponente del Factor de atenuación. Los valores típicos están entre 0.5 y 1
g_i	Factor de acoplamiento para la trayectoria i . Puede ser considerado como la combinación de factores de transmisión y reflexión.
d_i	Longitud de la trayectoria i
τ_i	Retardo de la trayectoria i

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{\text{Acoplamiento}} \underbrace{e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 f^k) d_i}}_{\text{Atenuación}} \underbrace{e^{-j2\pi f \left(\frac{d_i}{v_p}\right)}}_{\text{Retardo}} \quad (10)$$

La ecuación anterior (10) representa un modelo paramétrico, que describe la respuesta en frecuencia para los canales que son utilizados por PLC, abarcando todos los factores importantes que intervienen en la función de transferencia a través de un pequeño conjunto de parámetros, que pueden derivarse de mediciones de respuesta en frecuencia para un rango de frecuencias determinado. La tabla 1 explica los parámetros que intervienen en la ecuación.

Ver tabla 1.

3. ANÁLISIS DEL MODELO

En este capítulo se analizan diferentes parámetros que guardan relación con la respuesta ó función de transferencia que presenta el modelo ante la variación de rangos de frecuencia, distancias y coeficientes de acoplamiento de impedancias, con el propósito de comparar los resultados obtenidos en la simulación, con la respuesta en frecuencia mostrada en [6]. Las simulaciones realizadas están divididas en cuatro aspectos: El análisis del modelo simplificado de la función de transferencia para la propagación de señales en multitrayectoria, a través de la variación del número de trayectoria, el factor de acoplamiento y distancia del enlace. La estimación de la capacidad del canal PLC, a través de la variación del ancho de banda y de la relación señal a ruido. El análisis del modelo simplificado de la función de transferencia para la propagación de señales en multitrayectoria teniendo como parámetros fijos el número de la trayectoria, los parámetros de atenuación, los coeficientes de atenuación y la distancia del enlace. Finalmente se muestran las mediciones realizadas sobre la red eléctrica domiciliaria.

3.1 ANÁLISIS DEL MODELO SIMPLIFICADO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA LA PROPAGACIÓN DE SEÑALES EN MULTITRAYECTORIA (10), A TRAVÉS DE LA VARIACIÓN DE FACTORES COMO NÚMERO DE TRAYECTORIA, FACTOR DE ACOPLAMIENTO Y DISTANCIA DEL ENLACE.

Para la realización del análisis se utilizó la siguiente ecuación

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{\text{Acoplamiento}} \underbrace{e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 f^k) d_i}}_{\text{Atenuación}} \underbrace{e^{-j2\pi f \left(\frac{d_i}{v_p}\right)}}_{\text{Retardo}} \quad (10)$$

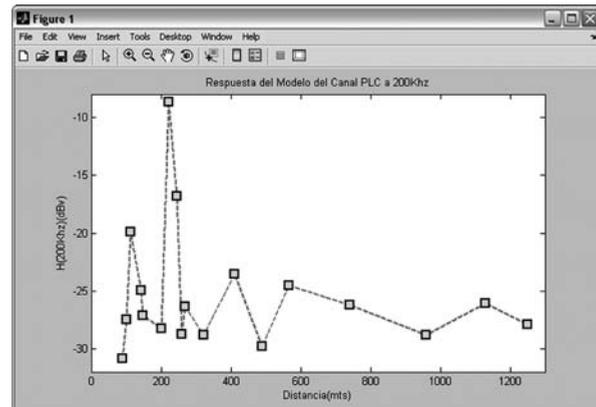
Para el análisis de la respuesta ó función de transferencia, se tomaron 19 trayectorias. Cada una de estas rutas está caracterizada por un factor de acople de impedancias que varía de acuerdo a la distancia. Cada una de las 19 trayectorias presenta diferentes distancias que oscilan entre los 90 metros hasta los 1250 metros. La selección de estas distancias obedece a que se quiere observar el comportamiento de estas señales en ambientes residenciales. Para observar la respuesta del modelo se optó por dejar como factor fijo la frecuencia, que para este caso se estableció en 200 KHz. Los valores de g_i y d_i fueron tomados de mediciones realizadas en [6]. En la tabla 2 se muestran los resultados la función de transferencia para la propagación de señales en multitrayectoria.

Tabla 2. Función de transferencia para la propagación de señales en multitrayectoria con $a_0 = 0$, $a_1 = 7.8 \cdot 10^{-10}$ s/m, $K = 1$ y $f = 200$ KHz

i	g_i	d_i (mts)	$H(f)$	$HdBu$	$HdBv$
1	0.029	90	0.0286	-28.65	-30.87
2	0.043	102	0.0423	-25.25	-27.47
3	0.103	113	0.1012	-17.67	-19.89
4	-0.058	143	0.0567	-22.70	-24.92
5	-0.045	148	0.0440	-24.91	-27.30
6	-0.040	200	0.0388	-26.00	-28.22
7	0.64	200	0.6203	-1.92	-4.14
8	0.38	221	0.3671	-6.48	-8.70
9	-0.15	244.8	0.0144	-14.59	-16.80
10	0.038	260	0.0365	-26.53	-28.75
11	0.05	267.5	0.0480	-24.15	-26.37
12	-0.038	322	0.0361	-26.63	-28.84
13	0.071	411	0.0666	-21.31	-23.53
14	-0.035	490	0.0324	-27.57	-29.78
15	0.065	567	0.0595	-22.29	-24.50
16	-0.055	740	0.0490	-23.97	-26.19
17	0.042	960	0.0362	-26.60	-28.82
18	-0.059	1130	0.0495	-23.88	-26.10
19	0.049	1250	0.0403	-25.67	-27.89

De lo anterior se puede concluir que para factores de acoplamiento de 0.64 y 0.38 el canal PLC presenta mejor respuesta, presentándose menos pérdida de la señal enviada a través de la red eléctrica. Caso contrario sucede con factores de acoplamiento de 0.24 y 0.43, pues se observó más atenuación en la respuesta del sistema. Ver tabla 2. De acuerdo a esto, se puede mencionar que existe una respuesta eficiente por parte del modelo planteado, para factores de acoplamiento mayores ó normalizados en el rango de 0.5 hasta 1.

Figura 2. Función de transferencia para la propagación de señales en multitrayectoria con $a_0 = 0$, $a_1 = 7.8 \cdot 10^{-10}$ s/m, $K = 1$ y $f = 200$ KHz



Además, de acuerdo a la respuesta del modelo analizado, teniendo en cuenta las características planteadas para esta etapa de simulación, se corrobora lo demostrado por [6], donde se afirma que la atenuación está en función de la distancia, es decir que a mayor distancia se presentan mayores pérdidas en la señal enviada. Además, se observa que el comportamiento de g_i es inversamente proporcional a las pérdidas presentadas, es decir, a la respuesta del modelo al canal PLC. Finalmente, al analizar la figura 2, que representa la respuesta del modelo al canal PLC en 200 KHz, se observa que se presentan menos pérdidas a distancias inferiores a los 400 metros, con lo cual se podría realizar transmisiones estables hasta 500 metros sin necesidad de la utilización de repetidores o de regeneradores de señal.

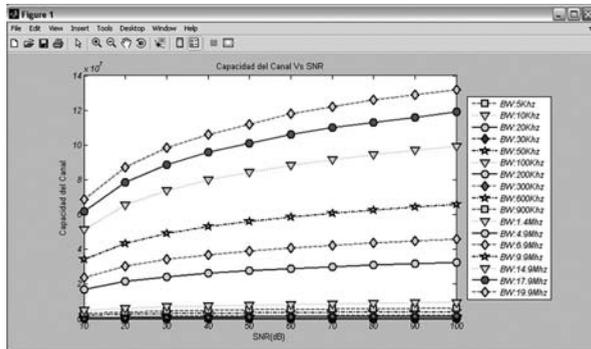
3.2 ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL CANAL PLC, A TRAVÉS DE LA VARIACIÓN DEL ANCHO DE BANDA Y DE LA RELACIÓN SEÑAL A RUIDO.

Para la realización de esta simulación se utilizó la ecuación del límite de Shannon para la capacidad de información:

$$C = B \log_2 \left[1 + \left(\frac{S_R}{N} \right) \right] \quad (11)$$

Esta ecuación permite obtener una aproximación de la cantidad de información que puede ser transmitida por un sistema de telecomunicaciones, teniendo en cuenta el ancho de banda destinado para tal fin. Es por esto que se realiza la simulación para diferentes anchos de banda, desde 5 KHz hasta 19.9 MHz, con variaciones de la relación señal a ruido en el orden de 10 dB hasta 100 dB. Los resultados de esta simulación se presentan en la figura 3.

Figura 3. Capacidad del canal PLC vs SNR



A partir de los resultados mostrados en la figura 3 se puede concluir que, de acuerdo a los parámetros utilizados para realizar la simulación, se observa que el canal PLC presenta mayor capacidad al utilizar un ancho de banda (BW) de 19.9 MHz y una relación señal a ruido (SNR) de 100 dB. Posteriores investigaciones indicarán sin es factible realizar transmisiones de información sobre estos canales utilizando BW del orden de los 20 MHz. Al realizar el análisis de la capacidad del canal PLC con valores de BW de 5 KHz y 19.9 MHz manteniendo 10 dB de SNR, se observa un incremento en la cantidad de información que soporta el canal, pasando de 17.2 Kbps con 5 KHz, a 68.8 Mbps con 19.9 MHz. Ver figura 3.

Al aumentar la SNR, la tendencia anterior se mantuvo, ahora para un BW de 5 KHz se obtuvo 33 Kbps, y para el valor máximo de BW 19.9 MHz, 132 Mbps. Se observa también que el comportamiento de la cantidad de información que puede ser transmitida es directamente proporcional a los valores de SNR y BW. Ahora bien, al observar la figura 3, se aprecia que el comportamiento del canal, asociado a la capacidad de información, presenta tres tendencias ó tres rangos en los cuales se encuentran los datos más significativos, estas tres tendencias tienen las siguientes características: 1. Valores de BW de 5 KHz a 30 KHz, con SNR de 100 dB, muestran como resultado 33 Kbps y 199 Kbps. 2. Valores de BW comprendidos entre 20 KHz y 900 KHz, con SNR de 100 dB, presentan como resultado 133

Kbps y 5.99 Mbps, respectivamente. 3. Valores de BW comprendidos entre 14.9 MHz y 19.9 MHz, con SNR de 100 dB, presentan como resultado tasas de transmisión de 99 Mbps y 132 Mbps, respectivamente.

3.3 ANÁLISIS DEL MODELO SIMPLIFICADO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA LA PROPAGACIÓN DE SEÑALES EN MULTITRAYECTORIA (10), TENIENDO COMO PARÁMETROS FIJOS EL NÚMERO DE LA TRAYECTORIA, LOS PARÁMETROS DE ATENUACIÓN, LOS COEFICIENTES DE ATENUACIÓN Y LA DISTANCIA DEL ENLACE.

En este punto se varían los rangos de frecuencia con el propósito de observar la respuesta del modelo. Para la realización de la simulación se utiliza la ecuación

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \underbrace{g_i}_{\text{Acoplamiento}} \underbrace{e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 f^k) d_i}}_{\text{Atenuación}} \underbrace{e^{-j2\pi f \left(\frac{d_i}{v_p}\right)}}_{\text{Retardo}} \quad (10)$$

Los rangos de frecuencia utilizados para la simulación se establecen desde 20 KHz hasta 20 MHz. Para el análisis de la respuesta ó función de transferencia, se realizan 20 variaciones de frecuencia entre los rangos anteriormente mencionados. Para este caso, el factor de acople de impedancias se le asigna un valor de 0.64. La asignación de este valor obedece a que es un valor promedio que se encuentra presente en la mayoría de instalaciones eléctricas residenciales, además, de acuerdo a las anteriores simulaciones, realizadas, presenta mejor rendimiento. La distancia utilizada para esta simulación es de 200 metros. Además, se utilizó una sola trayectoria, un factor de atenuación igual a uno. En la tabla 3 se muestran los resultados la función de transferencia para la propagación de señales en multitrayectoria a través de la variación de frecuencia.

Tabla 3. Función de transferencia para la propagación de señales en multitrayectoria con $\alpha_0 = 0$, $\alpha_1 = 7.8 \times 10^{-10}$ s/m, $K = 1$ y $f = 200$ KHz.

f	$H(f)$	$HdBv$
20 KHz	0.6380	-39.035
50 KHz	0.6350	-39.445
100 KHz	0.6301	-40.118
150 KHz	0.6252	-4.079
200 KHz	0.6203	-41.479
250 KHz	0.6155	-42.154
300 KHz	0.6107	-4.283
350 KHz	0.6060	-4.35

400 KHz	0.6013	-4.418
450 KHz	0.5966	-4.48
500 KHz	0.5920	-4.553
700 KHz	0.5738	-14.82
1 MHz	0.5476	-5.23
1.5 MHz	0.5065	-5.90
5 MHz	0.2934	-10.65
7 MHz	0.2147	-13.36
10 MHz	0.1345	-27.42
15 MHz	0.0616	-24.208
18 MHz	0.0386	-38.268
20 MHz	0.0283	-30.96

A partir del análisis de los resultados mostrados en la tabla 3 se puede concluir que efectivamente que la respuesta del modelo permite observar que el canal presenta menos pérdidas a frecuencias bajas, ubicadas en el rango de 20 KHz a 500 KHz. Además se observa que la respuesta del canal a rangos de frecuencia de 700 KHz, 10 MHz y 18 MHz aproximadamente, presenta pérdidas significativas que llegan a los -30 dB. Se observa estabilidad y poca atenuación de la señal en la respuesta del canal en los rangos comprendidos entre 20 KHz hasta 500 KHz, presentando valores en el orden de -3 dB a -4 dB, lo cual permite concluir que en estos rangos de frecuencia, la señal enviada a través del canal PLC presentará mejor rendimiento.

Al finalizar la simulación se comparó la respuesta obtenida con la respuesta planteada en el modelo presentado por Klaus Doster en [6], observándose similitudes, específicamente en la atenuación de la señal en frecuencias cercanas a 700 KHz, 10 MHz y 20 MHz, lo cual verifica el comportamiento del modelo a diferentes rangos de frecuencia. Ver figura 4 y figura 5. Sin embargo Klaus Doster en [6] se centra principalmente en rangos de frecuencia en el orden de los mega hertz y el modelo analizado en la presente investigación abarca un rango de frecuencia más amplio (desde los 20 KHz hasta los 20 MHz), pues las aplicaciones comerciales que trabajan con PLC utilizan en este último rango de frecuencias.

Figura 4. Función de transferencia del canal PLC a través del análisis del modelo de multitrayectoria.

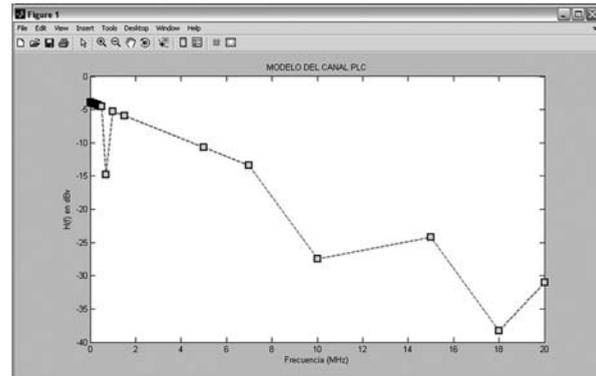
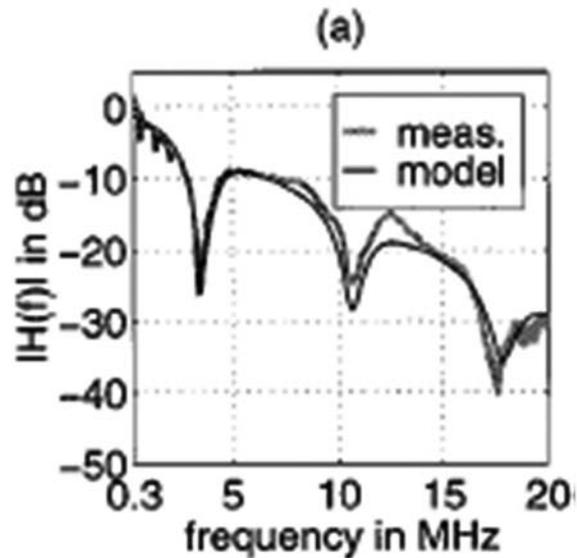


Figura 5. Función de Transferencia del Canal PLC suministrado por [2].



3.4 MEDICIONES REALIZADAS SOBRE LA RED ELÉCTRICA DOMICILIARIA.

Finalmente, a través de mediciones realizadas sobre la red eléctrica domiciliaría, se muestran los niveles de atenuación que presenta la señal enviada para diferentes valores de frecuencia en diferentes distancias.

Con el propósito de realizar pruebas que permitan verificar, no sólo el envío de señales por la red eléctrica, sino también el comportamiento de la misma a través del envío de diferentes formas de onda a determinadas frecuencias, se presenta el proceso mediante el cual se establece la caracterización del canal PLC empleando las bandas de frecuencia contempladas en el estándar 50065-1 de CENELEC (3 KHz a 148.5 KHz).

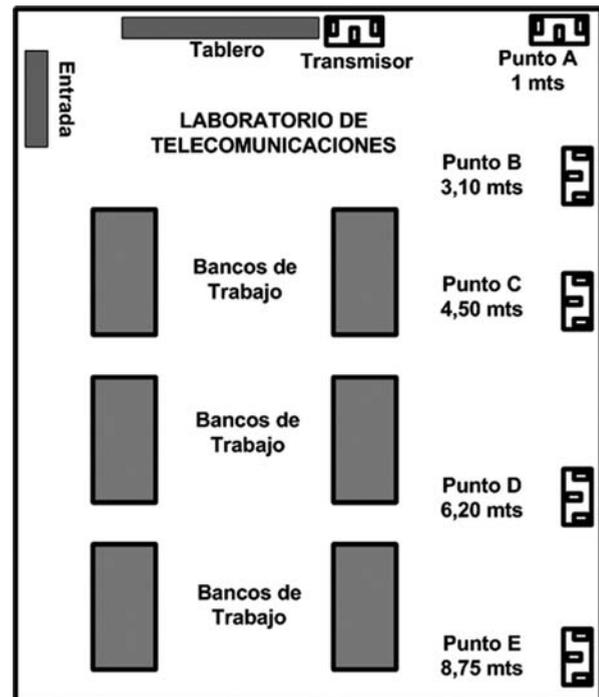
Las pruebas y mediciones realizadas se basan en la utilización de las bandas de frecuencia relacionadas en el estándar 50065-1. Para la realización de las mismas se utilizó como escenario la red eléctrica de baja tensión del laboratorio de telecomunicaciones de las Unidades Tecnológicas de Santander. La red eléctrica de este laboratorio tiene las siguientes características. Ver tabla 4.

Tabla 4. Características de la red eléctrica del laboratorio de telecomunicaciones.

Voltaje Fase-Neutro	116,7 Vac
Voltaje Neutro-Tierra	1,5 Vac
Tipo de Cable	AWG Calibre 14

Se definieron cinco puntos de prueba ubicados a diferentes distancias con el propósito de observar el comportamiento en frecuencia y nivel de amplitud de las señales enviadas a través de la red eléctrica. Ver figura 6. El punto de prueba A, se encuentra ubicado a 1 metro de distancia del circuito transmisor de señales. El punto de prueba B se encuentra separado 3.10 metros del punto inicial donde se ingresan las señales a la red PLC. Los siguientes puntos de prueba C, D y E, se encuentran distanciados 4.50 metros, 6.20 metros y 8.75 metros del punto inicial desde donde se ingresaron las señales al sistema PLC. La distancia de separación de cada uno de los puntos de prueba está definida de acuerdo a los tomacorrientes que se encuentran ubicados en el laboratorio de telecomunicaciones de las Unidades Tecnológicas de Santander. Ver figura 6.

Figura 6. Distribución de puntos de prueba en el laboratorio de telecomunicaciones



Las características de los instrumentos y equipos de laboratorio utilizados para la generación y posterior medición de las señales enviadas a través de la red eléctrica se observan en la tabla 5.

Tabla 5. Equipos de laboratorio utilizados para la realización de mediciones de señal

Instrumento	Característica
Generador de Frecuencia	Function Generator. Modelo GFG-80156
Osciloscopio	Leader 20 MHz. Modelo LS8022
Multímetro	Fluke.

El procedimiento utilizado para la realización de las pruebas, así como la toma de muestras de las variables asociadas al proceso se describe a continuación. Ubicando el generador de frecuencias en el punto inicial, se procede a realizar el envío de cada una de las frecuencias correspondientes al estándar 50065-1 de CENELEC.

Con el propósito de establecer el nivel de atenuación de la señal enviada, en cada punto de prueba, se selecciona el nivel máximo de amplitud entregado por el generador, el cual es de 11 Vp (Voltios Pico). El acople que se utilizó para la realización de las pruebas relacionadas con el envío de señales a través de PLC, es de tipo capacitivo. Se utilizó este tipo de acople pues permite menos pérdida de la señal enviada y los componentes que lo integran son de fácil adquisición. En cada uno de los puntos destinados para la toma de muestras, se realizaron mediciones de amplitud de la señal recibida, así como el valor de la frecuencia recibida. Ver figura 7.

En la figura 7 y en la tabla 6 se muestran los resultados de las mediciones de amplitud obtenidas, teniendo en cuenta las distancias mencionadas.

Figura 7. Mediciones de amplitud de las señales enviadas en el laboratorio de telecomunicaciones.

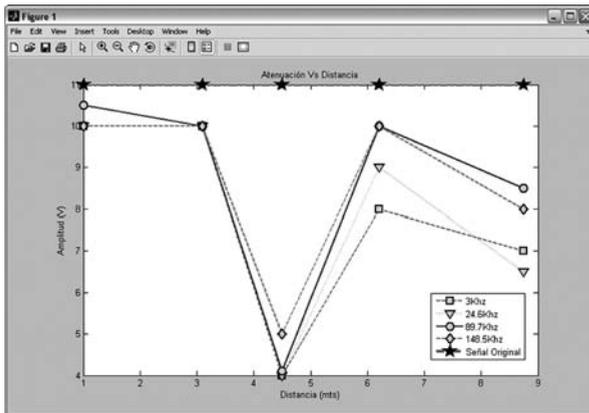


Tabla 6. Atenuación de las señales enviadas a través de la red eléctrica

F(Hz)	Distancia (mts) Amplitud (V)				
	1m	3.10 m	4.50 m	6.20 m	8.75 m
3KHz	10 V	10 V	4 V	8 V	7 V
24.6KHz	10 V	10 V	4 V	9 V	6.5 V
89.7KHz	10.5 V	10 V	4.1 V	10 V	8.5 V

4. CONCLUSIONES

Se analizó un modelo para la estimación del canal PLC derivado de los efectos físicos, es decir, de la propagación de la señal en multitrayectorias. El modelo analizado ofrece la posibilidad de llevar a cabo investigaciones con diferentes topologías de red y estudiar el impacto sobre el rendimiento del sistema PLC por medio de simulaciones, teniendo en cuenta atenuación y variaciones en los rangos de frecuencia, con el propósito de definir la normalización de este sistema. La utilización del modelo estudiado es de suma importancia para los futuros proveedores de servicios, ya que a través de la aplicación de este se podrá seleccionar las mejores características de los sistemas para las aplicaciones desarrolladas.

Con factores de acoplamiento de 0.64 y 0.38 el canal PLC presenta mejor respuesta, mostrando menos pérdida de la señal enviada a través de la red eléctrica. Caso contrario sucede con factores de acoplamiento de 0.24 y 0.43, pues se observó más atenuación en la respuesta del sistema. De acuerdo a esto, se puede concluir que existe una respuesta eficiente por parte del modelo planteado, para factores de acoplamiento mayores ó normalizados en el rango de 0.5 hasta 1. Además, de acuerdo a la respuesta del modelo analizado, teniendo en cuenta las características planteadas para esta etapa de simulación, se corrobora lo demostrado por Manfred Zimmermann y Klaus Dostert en [6], donde se afirma que la atenuación está en función de la distancia, es decir que a mayor distancia se presentan mayores pérdidas en la señal enviada. Así mismo, se observa que el comportamiento de es inversamente proporcional a las pérdidas presentadas, es decir, a la respuesta del modelo al canal PLC. Finalmente, al analizar la figura 2 que representa la respuesta del modelo al canal PLC en 200 KHz, se observa que se presentan menos pérdidas a distancias inferiores a los 400 metros, con lo cual se podría realizar transmisiones estables hasta 500 metros sin necesidad de la utilización de repetidores o de regeneradores de señal.

Se observó, a través del análisis realizado, que el canal PLC presentó mayor capacidad al utilizar un ancho de banda de 19.9 MHz y una relación señal a ruido de 100 dB. Futuras investigaciones indicarán si es factible realizar transmisiones de información sobre estos canales utilizando anchos de banda del orden de los 20 MHz. El análisis de la capacidad del canal PLC, seleccionando valores de ancho de banda de 5 KHz y 19.9 MHz manteniendo 10 dB de SNR, permitió observar un incremento en la cantidad de información que soporta el canal, pasando de 17.2 Kbps a 19.9 MHz respectivamente.

El análisis de la respuesta del modelo permitió concluir que el comportamiento de la cantidad de información

que puede ser transmitida es directamente proporcional a los valores de SNR y BW. Ahora bien, al observar la figura resultante (figura 3), se aprecia que el comportamiento del canal, asociado a la capacidad de información, presenta tres tendencias ó tres rangos en los cuales se encuentran los datos más significativos, estas tres tendencias, se caracterizan por mantener una relación directamente proporcional entre los valores de BW analizados y la capacidad del canal, siempre y cuando se mantenga estable la SNR.

La respuesta del modelo permite observar que el canal presenta menos pérdidas a frecuencias bajas, ubicadas en el rango de 20 KHz a 500 KHz. Además, se observa que la respuesta del canal a rangos de frecuencia de 700 KHz, 10 MHz y 18 MHz aproximadamente, presenta pérdidas significativas que llegan a los -30 dB. Se observa estabilidad y poca atenuación de la señal en la respuesta del canal en los rangos comprendidos entre 20 KHz hasta 500 KHz, presentando valores en el orden de -3 dB a -4 dB, lo cual permite concluir que en estos rangos de frecuencia, la señal enviada a través del canal PLC presentará mejor rendimiento.

Al finalizar la simulación se comparó la respuesta obtenida con la respuesta planteada en el modelo presentado por Manfred Zimmermann y Klaus Dostert en [6], observándose similitudes, específicamente en la atenuación de la señal en frecuencias cercanas a 700 KHz, 10 MHz y 20 MHz, lo cual verifica el comportamiento del modelo a diferentes rangos de frecuencia. Sin embargo Manfred Zimmermann y Klaus Dostert se centran principalmente en rangos de frecuencia en el orden de los mega hertz y el modelo analizado en la investigación que permitió la elaboración de este artículo, abarca un rango de frecuencia más amplio (desde los 20 KHz hasta los 20 MHz), pues las aplicaciones comerciales que utilizan PLC trabajan en este último rango de frecuencias.

Al realizar el análisis a las mediciones que permitieron comparar los rangos de frecuencia enviados desde el transmisor, con los rangos de frecuencia recibidos en cada uno de los puntos de prueba, se observó que el rango de frecuencia correspondiente a cada una de estas señales es similar a los rangos de frecuencia recibidos. Además, se observa una disminución de amplitud significativa alrededor del punto C, lo cual hace suponer que es causado por acoples defectuosos en los tomacorrientes ó a la presencia de bajos factores de acoplamiento al momento de realizar las mediciones. Finalmente, se presentan diferencias en cada una de los puntos de prueba. Estas diferencias están asociadas al rechazo, por parte de la red eléctrica, a diferentes rangos de frecuencia. Lo anterior permitió observar

que frecuencias inferiores a 50 KHz, presentan más atenuación a medida que aumenta la distancia. De acuerdo a esto se puede concluir que rangos iguales o inferiores a 50 KHz, no presentan características óptimas para el envío de información por canales PLC.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Haidine Abdelfatteh, Hrasnica Halid, Lehnert Ralf. *Broadband Powerline Communications Networks, Network Design*. Editorial John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. 2004. 273 pag.
- [2] Hernández C. Glenn E. "Caracterización del Canal PLC empleando las bandas de frecuencia establecidas en el estándar 50065-1 de CENELEC". *Revista Especializada en Sistemas Informáticos y Electrónicos de Telecomunicaciones RESETUTS*. ISSN 1909-258X. Número 3, Volúmen 1, 2008.
- [3] Hernández C. Glenn E. *Funciones de Monitoreo y Control de Signos Vitales a través del envío de datos, a distancia, usando la Red Eléctrica*; [online]. Vol 3. No 11 (2007). <http://www.revistaesalud.com/index.php/revistaesalud/article/view/170/460>.
- [4] Khan, S.; Omar, J.; O Khalifa, O.; Islam, M.R.; Adam, I.; Hassan, A.B., "Data Transfer over A Low Voltage Power Line for Data Acquisition and Monitoring of Electrical Appliances", *IEEE Trans. on Universities Power Engineering Conference, 2006. UPEC '06. Proceedings of the 41st International*, Sept 2006.
- [5] Klaus, Dostert. *Verlag, Franzis POWERLINE COMMUNICATIONS*. Upper Saddle River, NJ 07458: Editorial Prentice Hall PTR, 2001.336 pag.
- [6] Manfred Zimmermann and Klaus, Dostert. "A multipath model for the powerline channel", *IEEE Transactions*, Volume 50, number 4, April 2002.
- [7] Manfred Zimmermann and Klaus, Dostert. "A multipath signal propagation model for the powerline channel in the high frequency range", *IEEE Transactions*, Volume 42, Issue 4, April 2004. Page(s) 78 -86.
- [8] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multi-path signal propagation model for the powerline channel in the high frequency range," in *Proc. 3rd Int. Symp. Powerline Communications and its Applications*, Lancaster, U.K., 1999, pp. 45-51.

[9] Xiao Hui Zeng Xiangjun Fan Shaosheng Wu Xuebin Kuang Lang , "Medium-voltage power line carrier communication system", IEEE Trans on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004. 2004 International Conference, Nov 2004.

[10] <http://www.mathworks.com/>