

Modelo híbrido sobre el estado de un canal PLC

Martha Fabiola Contreras Higuera
Universidad Nacional Abierta y a Distancia

José Antonio Vesga Barrera
Unidades Tecnológicas de Santander

Fecha de Recepción: 01/07/15 – Fecha de Aceptación: 13/09/15

Resumen

Power Line Communications (PLC), hace referencia a un grupo de tecnologías que permiten establecer procesos de comunicación mediante el uso de la red eléctrica como medio físico de transmisión, en donde HomePlug AV (HPAV) es uno de los estándares de mayor aceptación sobre la tecnología PLC el cual utiliza CSMA/CA y TDMA como mecanismo de acceso al medio, en donde CSMA/CA está destinado para la transmisión de paquetes de datos, mientras que TDMA se utiliza para la transmisión de paquetes de voz y video, con el fin de ofrecer adecuados niveles de QoS. El artículo presenta un esquema correspondiente al modelo híbrido sobre el estado del canal PLC durante los diversos procesos de transmisión que podrán presentarse en el interior de una red de comunicaciones.

Palabras clave: CSMA/CA, Modelo Híbrido, HomePlug, AFR

Abstract

Power Line Communications (PLC), refers to a group of technologies that establish communication processes by using the grid as a physical transmission medium, where HomePlug AV (HPAV) is one of the standards most widely accepted on PLC technology which uses CSMA / CA, and TDMA as an access mechanism to the medium, wherein CSMA / CA is designed for transmitting data packets, while TDMA is used for transmitting voice packets and video, in order to provide adequate levels of QoS. The article presents an outline corresponding to the hybrid model on the PLC channel status during the various processes of transmission may be submitted within a communications network.

Keywords: CSMA / CA, Model Hybrid, HomePlug, AFR

I. INTRODUCCIÓN

CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*) es una técnica de acceso aleatorio orientada a

escuchar la existencia de ondas portadoras en el medio de transmisión y verificar que este se encuentre libre de ellas antes de enviar información a través de él. CSMA/CA evita que las transmisiones de varios dispositivos se puedan llevar a cabo en el medio, al mismo tiempo; reduciendo con ello las colisiones, pero no impidiendo que estas ocurran por completo [7].

En *Ethernet*, el CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection*) es un protocolo de control de acceso al medio presente en cada estación, detectando las colisiones que se presentan en el medio cuando dos o más estaciones intentan comunicar de manera simultánea a través de la red [4]. En el caso de PLC, las colisiones no pueden ser detectadas, debido a que para detectar una colisión, una estación debe ser capaz de escuchar y transmitir al mismo tiempo y esto no sucede en PLC, ya que la frecuencia de transmisión y detección es la misma [6].

Por lo tanto, una estación no puede escuchar su propia transmisión, y en caso de que se produzca una colisión, la estación seguirá transmitiendo, dando como resultado una pérdida global en el rendimiento de la red. En vista de lo anterior, el papel de CSMA/CA no será esperar a que se produzca una colisión para reaccionar como lo hace CSMA/CD, sino evitar que ocurran las colisiones y para ello CSMA/CA hace uso de varias técnicas, entre ellas el algoritmo de *back-off*. [1]

El estándar HPAV hace uso de CSMA/CA como uno de los métodos de control de acceso al canal de transmisión. Cuando una estación PLC desea transmitir, debe esperar un periodo de tiempo denominado “tiempo de *back-off*”, cuyo valor es asignado de forma aleatoria en el intervalo $[0, CW)$, donde CW se define como la ventana de contención (CW), la cual corresponde al número de slots de tiempo máximo que una estación deberá esperar mientras el medio se encuentre libre para iniciar un proceso de transmisión. El valor de CW oscilará entre los valores CW_{min} y CW_{max} , los cuales se encuentran predefinidos por el estándar. Es importante destacar

mentar, que si hay varias estaciones que deseen realizar procesos de transmisión, cada una de ellas calculará un algoritmo de *back-off* diferente, ignorando la existencia de las demás estaciones que forman parte de la red. Si dos o más estaciones realizan el mismo cálculo de tiempo de *back-off*, en el momento en el cual el medio sea liberado, existe la probabilidad de que estas inicien su proceso de transmisión presentándose colisiones [2][8]. La expresión matemática utilizada para calcular el tiempo de *back-off* es:

$$T_{Back-off} = Random(0, CW) * time\ slot$$

$Random(0, CW)$ es un valor pseudoaleatorio que oscila entre $[0, CW - 1]$. De esta forma, el algoritmo genera varios valores de tiempo por cada estación. Cuando una estación no logra transmitir de manera exitosa, el valor de CW se duplica hasta alcanzar el valor máximo ($CW_{max} + 1$). La expresión para calcular el valor de CW es:

$$CW_{nuevo} = 2 * CW_{actual} + 1$$

El algoritmo de *back-off* para HomePlug hace uso de tres contadores: Contador de procedimiento de *back-off* (BPC), contador de postergación (DC) y contador de *back-off* (BC). BC corresponde al número de *slots* de tiempo que deberá esperar el proceso de contención, cuyo valor se asigna de forma aleatoria entre $[0, CW]$. El valor de CW se define acorde a los criterios de prioridad del tráfico a transmitir (CAP) y al número de retransmisiones por efectos de colisiones o errores durante la transmisión (BPC). Cada estación inicia su proceso de contención para el canal al inicializar a BPC en 0. Por otro lado, los valores de DC y BC dependen del valor de BPC acorde con la Tabla 1. [3]

Tabla 1. CW y DC en función de BPC y CAP

BPC	CAP3 y CAP2	CAP1 y CAP0
BPC=0	CW=7 DC=0	CW=7 DC=0
BPC=1	CW=15 DC=1	CW=15 DC=1
BPC=2	CW=15 DC=3	CW=31 DC=3
BPC>2	CW=31 DC=15	CW=63 DC=15

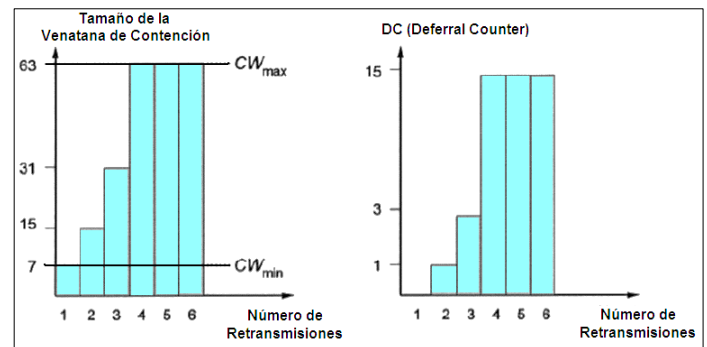
Fuente: Autor

Si el medio permanece libre durante un intervalo de tiempo, los nodos disminuyen su BC el cual se seguirá decrementando en 1 hasta llegar a cero y con ello se produce la transmisión. No obstante, si el medio está ocupado deben pausar su BC y esperar al intento de transmisión siguiente. Una vez se ha completado la transmisión, el transmisor espera un acuse de recibo selectivo (SACK) desde el receptor después de un tiempo definido entre tramas (IFS). Sin embargo, en caso de no recibir el acuse de recibo o con la recepción del SACK indicando errores en la transmisión la estación emisora

intentará retransmitir manteniendo detenidos los contadores BC en las demás estaciones. Por cada intento de retransmisión el procedimiento utiliza el mecanismo de aplazamiento del contador (DC) con el fin de evitar colisiones. La idea de este mecanismo es el de evitar la ocurrencia de colisiones cuando la probabilidad de que estas ocurran es muy alta. Dependiendo del valor del contador DC, BC deberá reiniciarse. Si ocurre una colisión o el medio se encuentre ocupado, tanto DC como BC adoptarán un valor de CERO y el valor de BPC se incrementará en 1. Cada vez que el valor de BPC sea modificado los valores de DC y BC serán reiniciados.

En la Figura 1 se ilustra la variación de la ventana de contención CW y el contador DC acorde con el número de retransmisiones. Estos valores cambian desde un valor inicial hasta alcanzar un valor de umbral, que generalmente indica un problema general con la red PLC en la estación que desea transmitir. [5]

Figura 1 Variación del tamaño de la ventana de contención acorde con el algoritmo de *back-off*



Fuente: HELD Gilbert. Understanding Broadband over Power Line. P.75

Un aspecto importante que se debe tener en cuenta en las redes PLC, es que el algoritmo de *back-off* puede ser utilizado solo cuando no ocurren colisiones. Una estación incrementará el valor de su BPC (*Back-Off Procedure Counter*) tan pronto se detecta una colisión o cuando BPC sea igual a cero. [3]

II. MODELAMIENTO DEL ACCESO AL MEDIO POR CSMA/CA PARA HPAV

Para evaluar el comportamiento del protocolo HPAV es necesario suponer que la red está conformada por un número finito de estaciones, bajo el mismo mecanismo de acceso al medio. En vista de ello, se considerará un estado de saturación, en donde cada estación siempre dispondrá de paquetes listos para ser transmitidos. Con el fin de facilitar el análisis se define p como la probabilidad de colisión de un paquete de datos, la cual se considerará

constante e independiente del número de colisiones que el paquete haya presentado en el pasado.

Sea τ la probabilidad de que una estación transmita un paquete en un *slot* de tiempo seleccionado aleatoriamente. Si se considera que todas las estaciones en estado estable tienen una probabilidad de transmisión τ , entonces se puede decir que la probabilidad de que ocurra una colisión p en donde al menos una de las $N - 1$ estaciones restantes transmita en el mismo *slot* de tiempo está dada por:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{N-1}$$

Throughput en Saturación.

En este escenario se hará uso del concepto de saturación del *throughput* para un número N finito de estaciones. Para ello se asumirá que el tamaño del paquete es fijo de L bits a una tasa de C Mbps. El estado de saturación se define como el límite alcanzado por el sistema debido a que la carga de entrada supera la capacidad del canal [9]. Para estimar el *throughput* del sistema se analizará qué sucede al seleccionar aleatoriamente un *slot* de tiempo. Sea P_{tr} la probabilidad de que al menos una estación transmita, teniendo en cuenta que cada estación transmite con una probabilidad τ . La expresión para P_{tr} es:

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^N$$

Una colisión tiene lugar cuando dos o más estaciones inician simultáneamente un proceso de transmisión. Por lo tanto, se define a P_s como la probabilidad en la cual una estación transmita satisfactoriamente y que las $N-1$ estaciones restantes mantengan un estado de escuchar la red. El valor de P_s está dado por:

$$P_s = \frac{N \cdot \tau \cdot (1 - \tau)^{N-1}}{P_{tr}} = \frac{N \cdot \tau \cdot (1 - \tau)^{N-1}}{1 - (1 - \tau)^N}$$

La longitud promedio de un *slot* de tiempo $E[slot]$ está dada por:

$$E[slot] = (1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} \cdot P_s \cdot T_s + P_{tr} \cdot (1 - P_s) \cdot T_c$$

donde:

σ : Duración de un *slot* de tiempo vacío en condiciones de canal libre

T_s : Tiempo que tarda una transmisión exitosa

T_c : Tiempo que tarda en ser detectada una colisión

$1 - P_{tr}$: Probabilidad de que un *slot* de tiempo transcurra normalmente o en estado de canal libre.

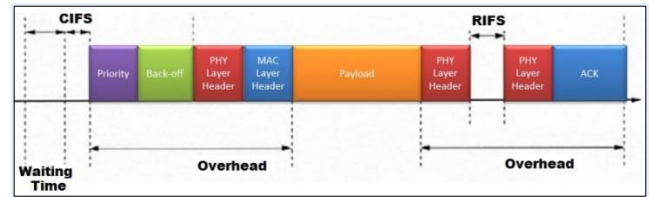
$P_{tr} \cdot P_s$: Probabilidad de contener una transmisión exitosa

$P_{tr} \cdot (1 - P_s)$: Probabilidad de contener una colisión

Un aspecto a destacar, es que el intervalo de tiempo entre dos *slots* de tiempo consecutivos para una estación puede ser mucho mayor que el tiempo σ , el cual corresponde al tamaño de un *slot* de tiempo en condiciones de conteo normal (Para el caso de HPAV $\sigma = 35.84\mu s$), debido a que podría presentarse un proceso de transmisión por parte de otra estación, provocando que el contador de *back-off* se detenga cuando el medio se encuentra ocupado y es reanudado cuando el medio se encuentra libre. En virtud de lo anterior y considerando las restricciones referenciadas en [9], el *throughput* del sistema S puede ser expresado al dividir la carga transmitida satisfactoriamente en un *slot* de tiempo con la longitud promedio de un *slot* de tiempo.

$$S = \frac{P_{tr} \cdot P_s \cdot L}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} \cdot P_s \cdot T_s + P_{tr} \cdot (1 - P_s) \cdot T_c}$$

Figura 2. Esquema de una trama HPAV en la región CSMA



Fuente: Autor

Teniendo en cuenta la estructura de trama representada en la Figura 2, los valores de T_c y T_s dependen del mecanismo de acceso al medio [10][11] y pueden ser definidos de la siguiente forma:

$$T_s = PRS0 + PRS1 + T_{Backoff} + T_{Header} + \frac{E[L_{pld}]}{C} + RIFS + T_{res} + CIFS$$

$$T_c = PRS0 + PRS1 + T_{Backoff} + T_{Header} + \frac{E[L_{pld}]}{C} + CIFS$$

Donde C es el bit-rate, $E[L_{pld}]$ es el tamaño promedio del paquete, T_{Header} y T_{res} son los tiempos requeridos para transmitir el paquete de encabezado de *payload* y recibir el acuse de recibo (ACK) respectivamente.

$$T_{Header} = \frac{MAC_{HDR}}{C} + \frac{PHY_{HDR}}{C_{Control}}$$

$$T_{Ack} = \frac{L_{Ack}}{C_{Control}} \approx T_{res}$$

MAC_{HDR} y PHY_{HDR} corresponden a la MAC y el encabezado físico (bits) respectivamente. $C_{Control}$ es la tasa en la cual los bits de control son transmitidos y L_{Ack} es la longitud del acuse de recibo.

Tabla 2. Parámetros para la especificación HomePlug AV

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Max_FL	2501,12 μ s	Head Time HPAV	110,48 μ s
Tiempo de respuesta (T_{res})	140,48 μ s	Frame Head	26 bytes
RIFS Default	100 μ s	Slot time (σ)	35,84 μ s
RIFS_AV	30 - 160 μ s	B2BIFS	90 μ s
CIFS	100 μ s	BIFS	20 μ s
PRS0,PRS1	35,84 μ s	EIFS_AV	2920,6 μ s
PB Payload (PB_{pld})	512 bytes	PBsize	520 bytes
PB Head	8 bytes		

Fuente: Autor

Para calcular el valor de $E[L_{pld}]$ se debe tener en cuenta que el tiempo máximo para la transmisión del *payload* en una trama sobre HPAV (Max_FL) no puede ser mayor a 2501.12 μ s incluido el RIFS. Por lo tanto, la cantidad máxima de bits transmitidos por una estación depende del PHY_rate . Adicionalmente, la cantidad de bits debe ser múltiplo del tamaño del bloque PHY_PB adoptado por HPAV como mecanismo de encapsulamiento de la información ($PBsize$). En la Tabla 2 se resume el valor de los parámetros más importantes que forman parte de las especificaciones técnicas del estándar HPAV.

La expresión con el fin de calcular el valor de $E[L_{pld}]$:

$$E[L_{pld}] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\lfloor \frac{C_i(Max_FL - RIFS)}{PBsize} \right\rfloor \cdot PBsize$$

Donde L_i es la cantidad de bits que una estación i transmite cada vez que tiene acceso al canal, N es el número de estaciones en contención, C_i es el PHY_rate de la estación i y $PBsize$ corresponde al tamaño del bloque.

HPAV incluye un nuevo modelo para retransmitir los paquetes perdidos o que no se han recibido de manera adecuada, denominado AFR (*Aggregation with Fragment Retransmission*). Un AFR es un esquema en el cual la información es dividida en múltiples bloques (PB) de

longitud constante (PB_{size}), los cuales son agregados y transmitidos en un solo *frame* de gran longitud. La capa MAC transmite el gran *frame* y solo retransmite los fragmentos corruptos que no alcanzaron pasar la verificación del FCS por parte del receptor.

$$S_{AFR} = \frac{P_{tr} \cdot P_s \cdot E[L]}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} \cdot P_s \cdot T_s + P_{tr} \cdot (1 - P_s) \cdot T_c}$$

$E[L]$ no representa el tamaño de la carga útil, sino el número de bits esperado para ser transmitidos con éxito.

Probabilidad de paquetes descartados. Es la probabilidad en la que un paquete se descarte por una estación k y se presenta cuando el límite de intentos es alcanzado. En consecuencia, este valor de probabilidad es independiente del mecanismo de acceso al medio utilizado.

Sea P_{Drop} la probabilidad de pérdida de paquetes en función del número de estaciones que forman parte de la red, puede ser estimado de la siguiente forma:

$$P_{Drop} = 1 - (1 - \tau)^{N-1}$$

III. MODELO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN SOBRE UN CANAL PLC EN ESTADO DISCRETO

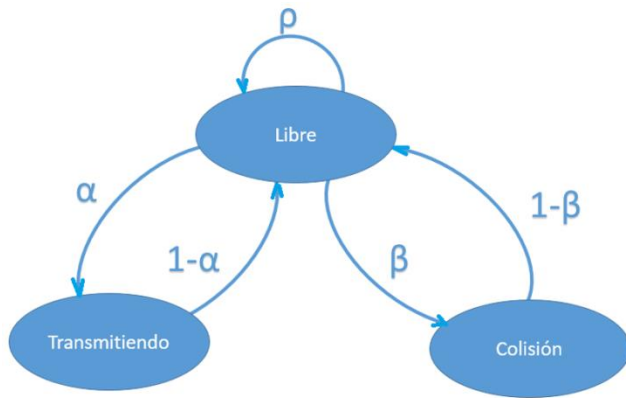
El canal PLC durante el proceso de transmisión podrá estar presente en cualquiera de los siguientes estados[12][13]:

- **Estado Libre:** El canal alcanzará este estado siempre y cuando ninguna estación desee transmitir o se haya presentado alguna colisión
- **Estado de Transmisión:** El canal alcanzará este estado cuando alguna de las estaciones que forma parte de la red inicie un proceso de transmisión.
- **Estado de Colisión:** El canal presentará un estado de colisión cuando dos estaciones trataron de realizar un proceso de transmisión al mismo tiempo. Aspecto por el cual, no solo se presenta una pérdida de información, sino que además es necesario esperar un tiempo de relajación en el cual el canal retorne a su estado normal.

Modelo del sistema de transmisión en estado híbrido

A continuación se ilustra el diagrama de estados correspondiente al modelo híbrido sobre el estado del canal PLC.

Figura 3. Modelo híbrido sobre el estado del canal PLC



Donde:

α : Probabilidad de que el canal pase del estado libre a iniciar un proceso de transmisión. Su valor está dado por la expresión $\alpha = P_{tr} \cdot P_s$

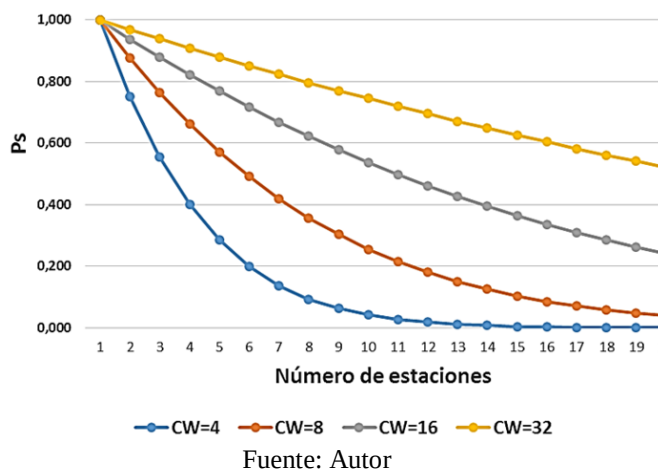
β : Probabilidad de que el canal pase del estado libre y ocurra una colisión. Su valor está dado por la expresión $\beta = P_{tr} \cdot (1 - P_s)$

ρ : Probabilidad de que el canal permanezca en estado libre. Su valor está dado por la expresión $\rho = (1 - P_{tr})$

IV. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos producto del modelamiento del sistema en StateFlow.

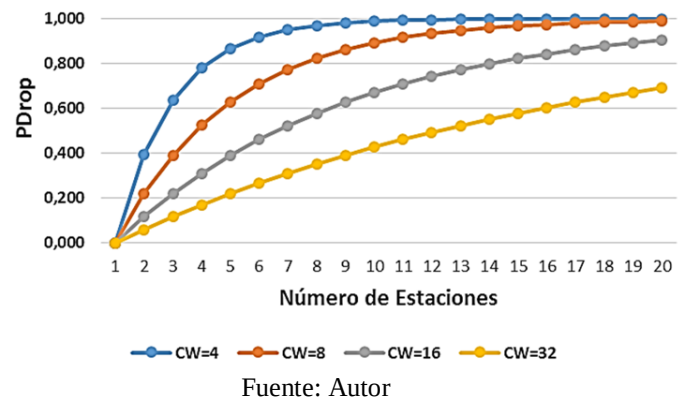
Figura 4. Probabilidad de transmitir exitosamente vs Número de estaciones y CW



En la Figura 4 se aprecia que la probabilidad de transmitir exitosamente un *frame* disminuye considerablemente en la medida en la cual el número de estaciones que forman parte de la red PLC va en aumento. Sin embargo, su valor

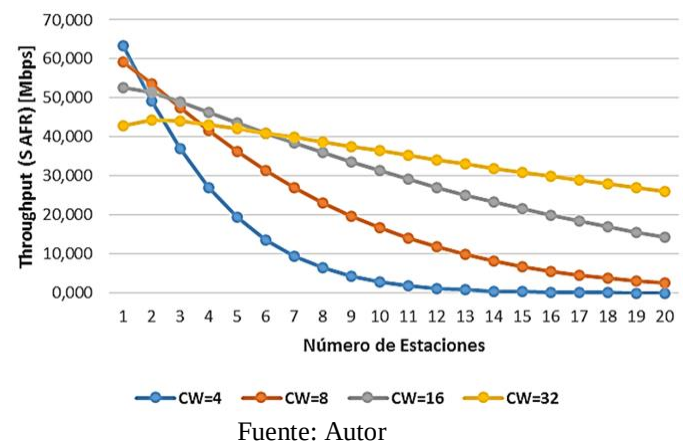
puede mejorar en relación con el tamaño de la ventana de contención.

Figura 5. Probabilidad de Pérdida de Paquetes vs Número de estaciones y CW



En la Figura 5 se observa que el número de estaciones y el tamaño de la ventana de contención son parámetros que afectan de manera significativa la probabilidad de paquetes perdidos en una red PLC, bajo CSMA/CA como mecanismo de acceso al medio.

Figura 6. *Throughput* en Saturación (S_AFR) vs Número de estaciones y CW



En la Figura 6 se observa que el valor del *throughput* bajo un esquema AFR en una red PLC, depende de igual forma, de los parámetros anteriores de manera significativa en función del número de estaciones y el tamaño de la ventana de contención. Sin embargo, se aprecia que los cambios en su valor no son muy significativos cuando la cantidad de estaciones es inferior a 5. Aspecto que puede ser considerado de gran importancia cuando se desee implementar redes de tamaño reducido, como puede llegar a presentarse en entornos residenciales.

V. CONCLUSIONES

Los resultados de simulación obtenidos correspondientes al modelo híbrido sobre el estado del canal PLC permiten evidenciar el grado de influencia que el número de estaciones puede ejercer sobre diversos factores tales como Throughput, Paquetes perdidos, probabilidades de transmisión y colisión al interior de una red de datos. Este modelo podría ser considerado en futuros trabajos de investigación que deseen profundizar sobre la eficiencia de una red de datos sobre Power Line Communitacions.

VI. REFERENCIAS

- [1] C. Jin and T. Kunz, "Smart home networking: Combining wireless and powerline networking," in *2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, 2011, pp. 1276–1281.
- [2] D. Zhang, Y. Wang, and J. Lu, "QoS aware relay selection and subcarrier allocation in cooperative OFDMA systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 14, no. 4, pp. 294–296, Apr. 2010.
- [3] B. O'Neill, "A problem of rights arbitration from the Talmud," *Math. Soc. Sci.*, vol. 2, no. 4, pp. 345–371, 1982.
- [4] I. Curiel, *Cooperative game theory and applications: cooperative games arising from combinatorial optimization problems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997, p. 190.
- [5] G. T. Andreou, I. G. Dimoulkas, M. I. Mazneikou, T. A. Papadopoulos, and D. P. Labridis, "Performance of Commercially Available Residential PLC Modems," in *2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 2007, pp. 116–120.
- [6] "HD-PLC Alliance." [Online]. Available: <http://www.hd-plc.org/>.
- [7] IEEE, "1901-2010 - IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications," 2010.
- [8] B. Jensen, H. Slavensky, and S. Kjaersgaard, "Benchmarking and QoS of In-House Powerline Equipment for AV Streaming Applications," *2006 IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Its Appl.*, pp. 160–165, 2006.
- [9] and V. V. Chatzimisios, P., Anthony C. Boucouvalas, "Performance analysis of the IEEE 802.11 MAC protocol for wireless LANs," *International J. Commun. Syst.*, vol. 18, no. 6, pp. 545–569, 2005.
- [10] A. Woo and D. Culler, "A transmission control scheme for media access in sensor networks," *Proc. 7th Annu. Int.*, 2001.
- [11] J. Weinmiller, H. Woesner, J. Ebert, and A. Wolisz, "Analyzing the RTS/CTS mechanism in the DFWMAC media access protocol for wireless LANs," 1995.
- [12] F. Canete, J. Cortes, and L. Diez, "A channel model proposal for indoor power line communications," IEEE, 2011.
- [13] A. Tonello and F. Versolatto, "Bottom-up statistical PLC channel modeling—Part I: Random topology model and efficient transfer function computation," *IEEE Trans. Power*, 2011.

BIOGRAFÍA



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.



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.