

# Optimización de una red HAN sobre PLC mediante el uso de la teoría de juegos cooperativos en un escenario realista

J.C. Vesga, G. Granados, J. Sierra

**Abstract**— This paper presents a proposal based on the use of OFDMA and game theory as a strategy to optimize the performance of a Home Area Network (HAN), under the use of Power Line Communications (PLC) technology. PLC makes use of OFDM as adaptive modulation technique and hasn't a resources optimization mechanism suitable. In view of the foregoing, it is makes use of the theory of games supported in the value of Shapley, as a strategy to optimize the allocation of bandwidth to each node in accordance with the type of traffic and demand on the service, looking to offer adequate levels of QoS to the inside of the network PLC.

**Keywords**— Game Theory, Home Area Network, OFDMA, Power Line Communication

## I. INTRODUCCIÓN

EN el mundo crece el interés por desarrollar políticas y regulaciones que incentiven la creación de conciencia social sobre la importancia del medio ambiente y el uso adecuado de los recursos energéticos que éste nos provee. Con base en ello, surge el proyecto denominado *Smart Grid*, el cual tiene como principal objetivo mejorar la eficiencia y la fiabilidad de la red eléctrica, adaptándola a las necesidades de la era digital [1]. *Smart Grid*, es un nuevo concepto de la red eléctrica, en donde convergen la prestación de servicios energéticos y de comunicaciones integrados en una red inteligente, orientada a ambientes corporativos y residenciales.

Con base en *Smart Grid*, emerge un nuevo concepto denominado *Home Area Network* (HAN), la cual se define como una red implementada en un contexto residencial que involucra a cualquier dispositivo electrónico que pueda encontrarse en el hogar con posibilidad de establecer procesos de comunicación sobre el protocolo IP, y bajo el uso de cualquier tecnología que le permita formar parte de la red. La implementación de una HAN bajo arquitectura *Smart Grid* requiere, en la mayoría de los casos, la transmisión simultánea de voz, datos y video con QoS; generando la prestación de múltiples servicios, entre los cuales se destacan: acceso a Internet de Banda Ancha, VoIP, aplicaciones multimedia (videoconferencia, televisión interactiva, vídeo y audio bajo demanda, juegos en red, televigilancia) y telemetría, entre otros servicios [2][3]. En [4] se presentan los estándares más

aceptados por la IEEE para implementar una arquitectura *Smart Grid*, en donde se resalta a HomePlug AV (HPAV) y su particularidad HomePlug-GP como uno de los estándares de mayor importancia durante el proceso de implementación de una HAN.

HPAV es uno de los estándares de mayor aceptación sobre la tecnología PLC, el cual hace uso de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) como técnica de multiplexación de la información sobre el canal PLC. Opera en el rango de 1.8MHz a 28MHz, dividiendo el espectro en 1055 subportadoras, de las cuales solo 917 están activas para el sistema americano. HPAV emplea modulación adaptativa para cada subportadora dependiendo de las condiciones del canal: BPSK (1 bit), QPSK (2 bit), 8QAM (3 bit), 16QAM (4 bit), 64QAM (6 bit), 256QAM (8 bit) o 1024QAM (10 bit) [5]. 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 buenos niveles de QoS. HPAV establece un periodo de tiempo de dos ciclos de red de la señal de potencia (120V/60Hz) sobre el cual se distribuyen los tiempos para la transmisión de tramas tanto en CSMA/CA como para TDMA y realiza los procesos de sincronización con otros adaptadores PLC. Adicionalmente, HPAV hace uso de un coordinador central denominado CCo, el cual está encargado de realizar la asignación de recursos y acceso a la red PLC [5].

OFDM es considerado un sistema eficiente y bastante flexible para trabajar en un medio hostil como lo es la red eléctrica, debido a que permite que los equipos se adapten dinámicamente a las condiciones del medio. Sin embargo, al existir un dominio de colisión común, el rendimiento de la red disminuye considerablemente a medida que aumenta el número de nodos que conforman la red PLC, debido a que solo uno de los nodos puede transmitir a la vez [6]. En vista de lo anterior y considerando que HPAV no cuenta con un mecanismo de optimización de recursos adecuado, se propone hacer uso de OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) como técnica de multiplexación, al permitir que múltiples nodos puedan transmitir simultáneamente [7].

## II. METODOLOGÍA

OFDMA es conocida como la versión multiusuario de OFDM, en donde múltiples nodos pueden compartir el espectro de un canal mediante la distribución de recursos tanto en frecuencia como en tiempo, con el fin de optimizar el

---

J.C. Vesga, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia, juan.vesga@unad.edu.co

G. Granados, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia, juan.vesga@unad.edu.co

J. Sierra, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, javier.sierra@upb.edu.co

rendimiento de la red, garantizando así diferentes niveles de QoS en función del ancho de banda asignado [8]. Una de las ventajas de OFDMA es que se pueden usar diversas técnicas de modulación a lo largo del espectro de manera simultánea, en donde la constelación asignada para cada subportadora dependerá de la relación Señal a Ruido (SNR), la cual obedece a las condiciones de canal y se comporta de forma dinámica en función de la frecuencia [7]. Adicionalmente, al hacer uso de OFDMA no solo se busca transmitir la mayor cantidad de bits cuando las condiciones del canal sean favorables, sino que además se intenta garantizar una Tasa de Error de Bit (BER) promedio establecida, pese a que en algunas subportadoras, las condiciones de transmisión no sean tan favorables. Adicionalmente, es importante mencionar que la asignación de subportadoras que forman parte de un Subcanal se puede realizar de dos formas: asignación Pseudo-aleatoria (diversidad en frecuencia – aplicada a soluciones móviles) y asignación de frecuencias contiguas (diversidad multiusuario – aplicada a HPAV).

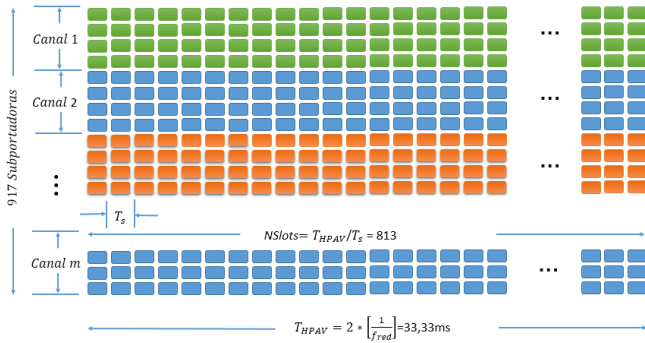


Figura 1. Asignación de frecuencias a un subcanal bajo un escenario de diversidad multiusuario. Fuente: Los Autores

En la figura 1 se presenta el mapa propuesto correspondiente a la distribución de tiempo y frecuencia para un canal PLC sobre OFDMA, en el cual se observa en el dominio de la frecuencia las 917 subportadoras, asociando en cada uno de los  $m$  canales una vecindad de frecuencias estimada de manera equitativa. Por otro lado, en el dominio del tiempo se observa que el periodo adoptado por HPAV ( $T_{HPAV}$ ) es igual a  $33,33ms$ , equivalente a dos ciclos de red de  $60Hz$ . Adicionalmente, el número de slots de tiempo es de 813, los cuales corresponden a la relación entre  $T_{HPAV}$  y el tiempo de un símbolo OFDM ( $T_s = 40,96\mu s$ ) para el caso particular de HPAV [5]. Es precisamente sobre este mapa de frecuencia-tiempo sobre el cual se realizará la posterior asignación de recursos de forma óptima y acorde con las condiciones del canal, la topología de red, el número de estaciones y la intensidad de tráfico por clase en cada nodo; mediante el uso del valor de Shapley.

#### A. Estimación del número de bits por subportadora (Bit-loading)

Para calcular el número óptimo de bits para cada una de las subportadoras acorde con la SNR, se hace uso de la Ecuación (1) [9]:

$$b_k = \log_2 \left[ 1 + \frac{SNR_k}{\Gamma} \right] \quad (1)$$

donde :

$b_k$ : Número de bits de la subportadora  $k$

$SNR_k$ : Relación Señal a Ruido presente en la subportadora  $k$

$\Gamma$  : Se conoce como SNR gap.

$\Gamma$  es un parámetro muy utilizado en diversos sistemas de comunicación modernos, el cual representa la pérdida en SNR en la que se incurre por el hecho de utilizar un esquema de codificación discreto específico. En [10] se sugiere que el valor de  $\Gamma$  puede ser calculado para efectos prácticos de la mediante la Ecuación (2):

$$\Gamma = -\frac{1}{1,6} \ln \left[ \frac{BER_{obj}}{0,2} \right] \quad (2)$$

Donde el  $BER_{obj}$ , corresponde al BER promedio que se desea establecer durante todo el proceso de transmisión. Es importante resaltar que el valor de  $\Gamma$  también depende de la probabilidad del error  $P_e$  y del esquema de codificación. Entre mayor sea la  $P_e$  mayor será el valor de  $\Gamma$ . Los valores más utilizados en procesos de simulación de canales PLC son  $10^{-3}$  y  $10^{-5}$  para los parámetros BER y  $P_e$  respectivamente.

Para calcular el total de bits/seg es necesario considerar el número total de subportadoras ( $N_{sp}$ ) y el tiempo de un símbolo OFDM ( $T_s$ ). La ecuación (3) representa la expresión que permite calcular el número total de bits/s:

$$BW_{TOTAL} = \frac{1}{T_s} \sum_{k=1}^{N_{sp}} \log_2 \left[ 1 + \frac{SNR_k}{\Gamma} \right] \quad (3)$$

#### B. Estimación del número de canales

En el proceso de optimización es necesario establecer el número  $m$  de canales sobre los cuales se distribuirán las 917 subportadoras, con el fin de realizar posteriormente el proceso de asignación de recursos, en tiempo y frecuencia, para cada una de las clases de tráfico generadas desde cada nodo  $i$  que forman parte de la red PLC. Para ello, se hace uso de la fórmula de Engset, llamada así por el matemático e ingeniero Noruego Thorir Olaus Engset, la cual permite estimar el número de canales necesario de acuerdo con una intensidad de tráfico  $\rho$  en Erlangs, generada por una población finita de estaciones. Adicionalmente, mediante el uso de esta expresión es posible estimar la probabilidad de bloqueo y la probabilidad de pérdidas en cada nodo  $i$  [11]. La fórmula de Engset esta dada por la Ecuación (4) :

$$P_{bl}(m, \rho, N) = \frac{\rho^m \binom{N}{m}}{\sum_{i=1}^m \rho^i \binom{N}{i}} \quad (4)$$

donde,

$P_{bl}$ : Probabilidad de bloqueo

$\rho$ : Intensidad de tráfico en Erlangs generado por cada nodo

$m$ : Número de canales estimado

$N$ : Número de nodos que conforman la red PLC

En procesos de simulación se ha observado que el número de canales estimado es aproximadamente igual al número de nodos que conforman la red PLC, siempre y cuando el número de nodos sea bajo. Al aumentar considerablemente la cantidad de nodos, el número de canales  $m$  tiende a ser menor que el número total de nodos.

### C. Uso de la teoría de juegos como estrategia de optimización al interior de una red PLC

Aunque existen diversos métodos para solucionar un problema de optimización, en la mayoría de los casos, estos métodos hacen uso de algoritmos que presentan una complejidad computacional bastante elevada, generando como consecuencia tiempos de ejecución no viables para su implementación en sistemas embebidos o de bajo costo. En vista de lo anterior, se propone el uso de la teoría de juegos como estrategia para optimizar el rendimiento de una red PLC.

La teoría de juegos es un área de la matemática propuesta por John Von Neumann en 1928, la cual está orientada a evaluar las decisiones que puede tomar un individuo al interior de un contexto competitivo de ganancia o pérdida, frente a las decisiones que adopten los demás competidores. A este escenario competitivo se le denomina "Juego" y a los individuos que forman parte de este escenario se les denomina "Jugadores" [12]. En el contexto de juegos con  $n$ -jugadores, cada jugador puede establecer alianzas con otros jugadores con el fin de aumentar la utilidad de cada uno. A éste tipo de alianzas se les denomina "Coaliciones" y pueden ser de dos o más jugadores, hasta conformar la llamada "Gran Coalición" conformada por todos los jugadores.

Definición [13]: Un juego cooperativo UT (con utilidad transferible) es un par  $(N, v)$  donde  $N = \{1, 2, 3 \dots n\}$  es el conjunto de jugadores y  $v: 2^N \rightarrow \mathbb{R}$  es una función que verifica que  $v(\emptyset) = 0$ . La función  $v$  se denomina "función característica" del juego. Dada una coalición  $S \subseteq N$ ,  $v(S)$  representa el pago que se puede asegurar a los jugadores de  $S$ , siendo  $v(N)$  el pago total a los jugadores que forman parte de la gran coalición. El valor de una coalición se puede considerar como la cantidad mínima que puede obtener una coalición si todos los jugadores que forman parte de ella se asocian y juegan en equipo. Para el caso particular, el valor  $v(N)$  corresponde al ancho de banda total disponible sobre el canal PLC ( $BW_{Total}$ ), el cual se debe distribuir de forma equitativa entre todos los jugadores, acorde con la demanda de tráfico  $\rho_{ir}$  para cada clase  $r$  en el nodo  $i$ .

El interés del juego se encuentra en la estimación del vector de pagos resultante de la operación entre jugadores. En vista de lo anterior, una solución para el juego  $(N, v)$  es la función  $\varphi: G \rightarrow \mathbb{R}^n$ , en donde  $\varphi(v) \in \mathbb{R}^n$  obedece al vector de pagos para el juego  $(N, v)$ . Por otro lado, la solución requiere que los vectores de pago eficientes cumplan con el llamado principio de individualidad racional, el cual exige que el pago a cada jugador  $i$  por el vector de pago  $\varphi$  sea al menos la cantidad que el jugador puede obtener por sí mismo en el juego, es decir:  $\varphi_i \geq v(\{i\}) \forall i \in N$ . A las preimputaciones que cumplen con

este principio se les llama "Imputaciones para el juego  $(N, v)$ ".

Definición: Una imputación para un juego  $(N, v)$  corresponde a un vector de pagos  $\varphi(v) \in \mathbb{R}^n$  tales que [13]:

$$\varphi_i(v) \geq v(\{i\}) \forall i \in N \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} \varphi_i(v) = v(N) \quad (6)$$

Un vector de pago  $\varphi(v) \in \mathbb{R}^n$  se dice que es "racional de grupo" si:

$$\sum_{i \in S} \varphi_i(v) \geq v(S) \quad \forall S \subseteq N \quad (7)$$

En el momento en el cual se exige a las imputaciones cumplir con el principio de racionalidad para todas las coaliciones, se llega al concepto de solución denominada *Núcleo*. El *Núcleo*  $C(v)$  de un juego  $(N, v)$ , se define como el conjunto de imputaciones que poseen la propiedad racional de grupo. La expresión que define el núcleo de un juego obedece a la siguiente expresión [14]:

$$C(v) = \left\{ \varphi(v) \in \mathbb{R}^n \mid \sum_{i \in S} \varphi_i(v) \geq v(S) \quad \forall S \subseteq N, \sum_{i \in N} \varphi_i(v) = v(N) \right\} \quad (8)$$

Shapley analizó durante mucho tiempo los juegos cooperativos, intentando responder la siguiente pregunta: ¿cuál es el pago para un jugador individual?. El intentar predecir esto es bastante complejo debido a que existen otros factores en el entorno que pueden llegar a afectar el resultado final. Sin embargo, Shapley en 1953 propuso el concepto de valor de un juego  $(N, v)$  dado para cada jugador  $i \in N$  a través de la ecuación (9) [15]:

$$\varphi_i(v) = \sum_{S \subseteq N: i \in S} \frac{(s-1)!(n-s)!}{n!} [v(S) - v(S/\{i\})] \quad (9)$$

$$\text{donde } n = |N| \text{ y } s = |S|$$

Este valor es conocido como el valor de Shapley para el jugador  $i$ , el cual es determinado de forma exclusiva y apriori, por la función característica del juego.

El cálculo directo del valor del Shapley tiene una complejidad temporal  $O(n2^n)$ , por lo cual es importante buscar la posibilidad de implementar algoritmos que presenten una complejidad temporal mas baja. Entre los algoritmos mas utilizados se encuentran el de Hart y Max-Colell y el algoritmo denominado "dividendo" Harsanyi; los cuales presentan una complejidad temporal de  $O(n2^n)$  y  $O(3^n)$  respectivamente [16].

### III. RESULTADOS

#### A. Escenario práctico

En la Figura 2 se presenta el esquema general de la topología de red propuesta, la cual está constituida por  $N$  nodos. Cada nodo está conformado por un adaptador PLC y una fuente de tráfico. Cada fuente de tráfico puede generar más de una clase simultáneamente (Voz, Datos, Video o Control). El nodo  $N$  será considerado como nodo principal o Coordinador (CCo), el cual estará encargado de establecer la reserva frecuencia-tiempo (Schedule) para cada uno de los nodos que forman parte de la red PLC. Adicionalmente, será el nodo por el cual circulará la mayor cantidad de tráfico, debido a su conexión directa con el router para acceder a Internet.

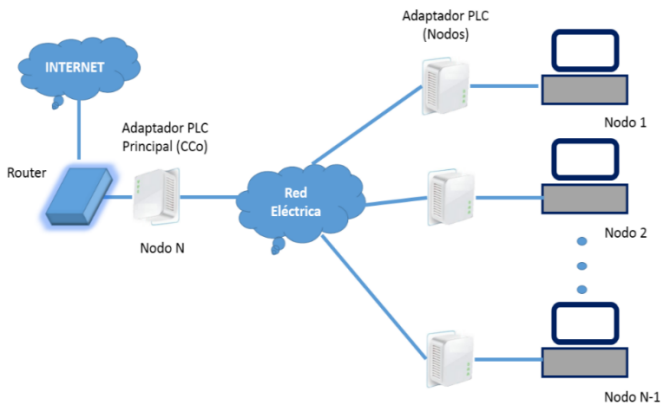


Figura 2. Escenario práctico de una HAN sobre PLC. Fuente: Los Autores

#### B. Estimación del Canal PLC

Con el fin de evaluar el comportamiento del modelo bajo un escenario real se hizo uso de la herramienta “Generador de Canal PLC (GC\_PLC)” [17], la cual fue desarrollada por el PhD Francisco Javier Cañete, perteneciente al Grupo PLC de la Universidad de Málaga-España. Esta herramienta permite estimar el comportamiento de un Canal PLC, acorde con los parámetros asociados a la topología de una red PLC, en un ambiente residencial típico. Adicionalmente, la evaluación del canal se realiza por debajo de la banda de los 30MHz, considerando el hecho de que los adaptadores de red PLC bajo el estándar HPAV operan en esta banda de frecuencia.

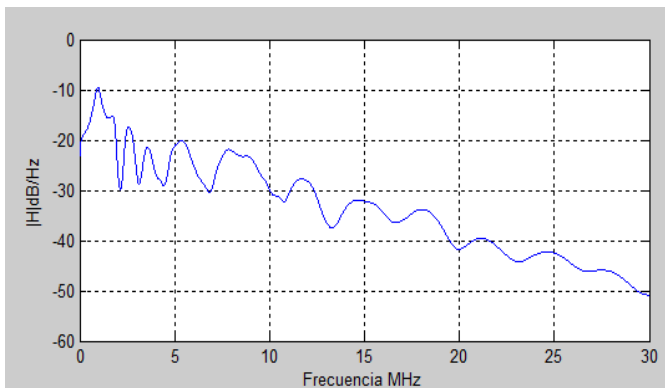


Figura 3. Respuesta del Canal PLC en un ambiente residencial típico. Fuente: Los Autores

En la figura 3 se presenta la magnitud correspondiente a la respuesta de un canal PLC ( $|H|$ ) en unidades de  $dB/Hz$ , bajo el uso de la herramienta (GC\_PLC), en un rango de frecuencia por debajo de los 30MHz, acorde con una topología de red establecida en un ámbito residencial. Por otro lado, se observa un desvanecimiento correspondiente a la respuesta del canal PLC a medida que aumenta el nivel de frecuencia. Esta respuesta del canal obedece a una situación de un canal regular para la transmisión de información, lo cual puede ser considerado como un escenario real acorde con las condiciones actuales de la red eléctrica Colombiana, debido a que en este contexto, la red eléctrica aún no ha sido acondicionada para ofrecer un escenario óptimo para el uso de la tecnología PLC en el ámbito residencial.

En la figura 4 se presenta la relación Señal a Ruido generada por la herramienta GC\_PLC de acuerdo con la topología establecida para un contexto residencial. Esta gráfica refleja el efecto que la respuesta del canal y el ruido, presentes en el canal PLC, ejercen sobre la señal transmitida, en donde se observa claramente que no existe un comportamiento uniforme a lo largo del espectro en frecuencia y que dependiendo el valor frecuencia sobre el cual se encuentre, la señal transmitida puede presentar una mayor o menor atenuación, que como consecuencia permitirá una mayor o menor transmisión de bits sobre una subportadora en particular.

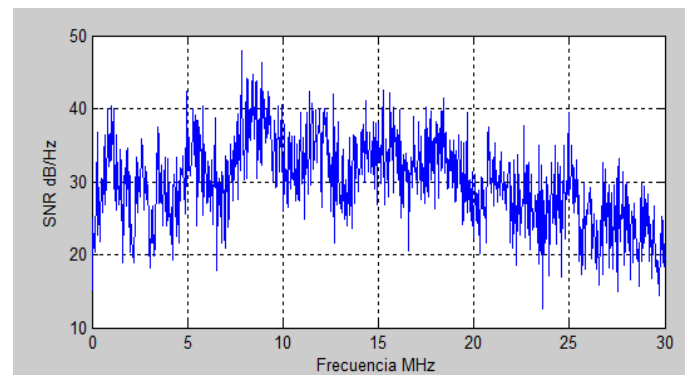


Figura 4. Relación Señal a Ruido presente en el Canal PLC. Fuente: Los Autores

Para el caso de dispositivos PLC, la potencia de la señal transmitida no debe ser superior a los 20dBm (100mW) en el rango de 1 a 30MHz y presentar un límite de emisiones electromagnéticas correspondiente a la densidad de potencia espectral PSD de  $-50$  dBm/Hz definido en la norma IEC CISPR 22 [18]. Para efectos de simulación se consideró una potencia de la señal de 10dBm, la cual corresponde al valor de señal más común en adaptadores PLC comerciales.

#### C. Entorno de Simulación

A continuación se plantea un escenario donde el tráfico generado es inferior a la capacidad del canal PLC, lo cual permitirá evaluar el uso del algoritmo ante un estado de no saturación o de condición normal. En la Tabla 1 se presentan las clases de tráfico (datos, voz, video y control) y el codec

establecido (aplicable solo a Voz o Video) para un escenario conformado por cuatro nodos. El nodo 4 estará configurado como el CCo o nodo principal y los demás serán nodos terminales.

TABLA 1. CLASES DE TRÁFICO  $r$  EN CADA NODO  $i$

Nodo $i$	Clases de Tráfico			
	Datos (r=1)	Voz (r=2)	Video (r=3)	Control (r=4)
1	X			X
2	X	G.723		
3			MPEG-2	X
4 (CCo)	X	X	X	X

En la Tabla 2 se presentan las tasas de llegada de paquetes/s en cada nodo  $i$  y clase  $r$ , las cuales obedecen a una distribución de Pareto, con parámetros de forma y de posición particulares para cada caso, acordes con mediciones realizadas en escenarios reales.

TABLA 2. TASAS DE LLEGADA ( $\lambda_{ir}$ ) EN CADA NODO  $i$  Y CLASE  $r$  [PAQUETES/S]

Nodo $i$	Clases de Tráfico			
	Datos (r=1)	Voz (r=2)	Video (r=3)	Control (r=4)
1	596			3
2	975	33		
3			1271	3
4 (CCo)	1571	33	1271	6

En el escenario propuesto, se desea optimizar de forma equitativa el ancho de banda disponible en el canal PLC ( $BW_{Total} = v(N)$ ) entre todos los jugadores  $j = 1, 2, \dots, n$ ;

donde cada jugador  $j$  obedece a cada fuente de tráfico asociada al duo (nodo,clase) que requiere acceso al canal, mediante el uso del valor de Shapley. Para establecer cada una de las imputaciones del juego, se considerará el caso de un juego de bancarrota. Un juego de bancarrota está definido como una terna  $(N, d, C)$  donde  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  es el conjunto de jugadores,  $d = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$  con  $d_i \geq 0, \forall i \in N$  es el vector de demandas de los acreedores y  $C$  corresponde al valor neto que se debe repartir entre los elementos de  $N$ . El juego asociado a este problema se define como:  $v(S) = \max\{0, C - \sum_{i \in N \setminus S} d_i\}$ , con  $C = 170,38 Mbps$ , el cual corresponde al  $BW_{Total}$  disponible en el canal PLC. En la tabla 3, se presenta la estimación de los valores de coalición  $v\{i\}$  para cada jugador  $i$  como resultado de hacer uso de un juego de bancarrota acorde con el escenario propuesto.

TABLA 3. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE COALICIÓN  $v\{i\}$  PARA CADA JUGADOR  $i$

Jugador $i$	BW Solicitado [Mbps] $d_i$	Coalición	Valor $v\{i\}$ Mbps	
1: Nodo 1 - Datos	4,128	{1}	12,0852	
2: Nodo 2 - Datos	6,754	{2}	12,3478	
3: Nodo 4 - Datos	10,882	{3}	12,7606	
4: Nodo 2 - Voz	0,024	{4}	11,6748	
5: Nodo 4 - Voz	0,024	{5}	11,6748	
6: Nodo 3 - Video	15,921	{6}	13,2645	
7: Nodo 4 - Video	15,921	{7}	13,2645	
8: Nodo 1 - Control	0,002	{8}	11,6726	
9: Nodo 3 - Control	0,002	{9}	11,6726	
10: Nodo 4 - Control	0,004	{10}	11,6728	
Gran Coalición			{N}	170,38

TABLA 4. MATRÍZ DE SHAPLEY PARA EL JUEGO PROPUESTO

Jugador $i$ en cada coalición	Contribución a la coalición que contiene $j$ jugadores [*1E+7]										$\varphi_i(v) [* 1E + 6]$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	12,0852	3,7152	14,8608	34,6752	52,0128	52,0128	34,6752	14,8608	3,7152	0,4128	15,80
2	12,3478	6,0786	24,3144	56,7336	85,1004	85,1004	56,7336	24,3144	6,0786	0,6754	18,43
3	12,7606	9,7938	39,1752	91,4088	137,1132	137,1132	91,4088	39,1752	9,7938	1,0882	22,55
4	11,6748	0,0213	0,0850	0,1984	0,2976	0,2976	0,1984	0,0850	0,0213	0,0024	11,70
5	11,6748	0,0213	0,0850	0,1984	0,2976	0,2976	0,1984	0,0850	0,0213	0,0024	11,70
6	13,2645	14,3289	57,3156	133,7364	200,6046	200,6046	133,7364	57,3156	14,3289	1,5921	27,59
7	13,2645	14,3289	57,3156	133,7364	200,6046	200,6046	133,7364	57,3156	14,3289	1,5921	27,59
8	11,6726	0,0017	0,0069	0,0162	0,0242	0,0242	0,0162	0,0069	0,0017	0,0002	11,67
9	11,6726	0,0017	0,0067	0,0157	0,0235	0,0235	0,0157	0,0067	0,0017	0,0002	11,67
10	11,6728	0,0034	0,0136	0,0318	0,0477	0,0477	0,0318	0,0136	0,0034	0,0004	11,68
$P(j)$	0,1000	0,0111	0,0028	0,0012	0,0008	0,0008	0,0012	0,0028	0,0111	0,1000	170,38

Las ecuaciones que describen cada una de las imputaciones del juego  $(N, v)$ , deben satisfacer que  $\varphi_i(v) \geq (v\{i\}) \forall i \in N$  y la ecuación de eficiencia del juego  $\sum_{i \in N} \varphi_i(v) = v(N)$ . Los valores para  $(v\{i\})$  están registrados en la tabla 3.

En la tabla 4 se presenta la matriz de Shapley para el juego propuesto. En ella se observa el valor  $\varphi_i(v)$  para cada jugador  $i$  y que la  $\sum_{i \in N} \varphi_i(v) = 170,38$ , equivalente al ancho de banda disponible para el canal PLC.

En la tabla 5 se presenta el resultado de la asignación del ancho de banda en cada nodo  $i$  y clase  $r$  acorde a la disponibilidad del ancho de banda del canal PLC, la intensidad de tráfico y los parámetros mínimos de asignación de recursos para cada clase; los cuales obedecen al resultado de hacer uso del valor de Shapley.

TABLA 5. ANCHO DE BANDA ASIGNADO [MBPS] PARA CADA NODO  $i$  Y CLASE  $r$

Nodo $i$	Clases de Tráfico				BW Total/Nodo [Mbps]
	Datos (r=1)	Voz (r=2)	Video (r=3)	Control (r=4)	
1	15,8			11,67	27,47
2	18,43	11,7			30,13
3			27,59	11,67	39,26
4 (CCo)	22,55	11,7	27,59	11,68	73,52
<b>BW Total Canal</b>					<b>170,38</b>

En este primer escenario, el proceso de simulación estableció que el canal PLC debía subdividirse en cuatro subcanales ( $m = 4$ ), lo cual está sujeto a la fórmula del Engset, con una probabilidad de bloqueo del 0,01% y una probabilidad de pérdida de paquetes de 0,33%. La capacidad de ancho de banda por canal  $c = \{1, 2, \dots, m\}$  está dada por  $BW_c = \{41,553, 49,536, 45,386, 33,911\}$  en Mbps respectivamente, donde  $(\sum_{c=1}^m BW_c = 170,385 \text{ Mbps})$ .

Para calcular el Throughput total  $Th$  se hace uso de la Ecuación (10), donde  $\lambda_{0,ir}$  corresponde a la tasa de salida de paquetes/s para cada nodo  $i$  y clase  $r$ , acorde con la asignación de recursos mediante el valor de Shapley y las tasas de llegada de paquetes/s en cada nodo [19]:

$$Th = \sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^R \lambda_{0,ir} \quad (10)$$

En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos para el Throughput durante el proceso de simulación. Es importante mencionar que una trama basada en HPAV adiciona 66 bytes de control a cada paquete que transmite, aspecto que fue considerado para estimar el Throughput al interior de los procesos de simulación.

TABLA 6. THROUGHPUT EN CADA NODO  $i$  Y CLASE  $r$

Nodo $i$	Clases de Tráfico				Thr Total/Nodo [Mbps]
	Datos (r=1) Mbps	Voz (r=2) kbps	Video (r=3) Mbps	Control (r=4) kbps	
1	3,813			0,447	4,260
2	6,239	6,103			12,342
3			15,250	0,434	15,684
4 (CCo)	10,053	6,103	15,250	0,881	32,288
<b>Throughput Total</b>					<b>64,574</b>

En la tabla 7, se presenta un cuadro comparativo entre la demanda de ancho de banda, frente al ancho de banda asignado a cada nodo como resultado del valor del Shapley, al igual que los valores de Throughput y Throughput máximo permitido acorde con el total del recurso asignado a cada nodo. En ella se observa que el valor de Shapley asigna de manera justa y equitativa el ancho de banda disponible para cada jugador, con el fin de maximizar el throughput de salida, garantizando niveles adecuados de QoS para cada clase de tráfico.

TABLA 7. COMPARATIVO ENTRE DEMANDA DE ANCHO DE BANDA vs ANCHO DE BANDA ASIGNADO

Jugador $i$ /Nodo-clase	BW Solicitado [Mbps]	BW Asignado [Mbps]	Thr. [Mbps]	Thr. Máx [Mbps]
1: Nodo 1 - Datos	4,128	15,80	3,8134	14,596
2: Nodo 2 - Datos	6,754	18,43	6,2393	17,022
3: Nodo 4 - Datos	10,882	22,55	10,0527	20,835
4: Nodo 2 - Voz	0,024	11,70	0,0061	3,023
5: Nodo 4 - Voz	0,024	11,70	0,0061	3,023
6: Nodo 3 - Video	15,921	27,59	15,2500	26,430
7: Nodo 4 - Video	15,921	27,59	15,2500	26,430
8: Nodo 1 - Control	0,002	11,67	0,0004	2,715
9: Nodo 3 - Control	0,002	11,67	0,0004	2,715
10: Nod 4 - Control	0,004	11,68	0,0009	2,715
<b>Total</b>	<b>53,66</b>	<b>170,38</b>	<b>50,62</b>	<b>119,50</b>

#### IV. CONCLUSIONES

La selección del protocolo HPAV para la transmisión de información por línea de potencia se basó principalmente en su amplio uso y aceptación a nivel mundial, y; en las pruebas desarrolladas se evidenció que es factible la optimización de la asignación del canal para eventos en los cuales el tráfico generado es superior a la capacidad del mismo.

El uso del valor de Shapley aplicado a procesos de optimización de una red HAN sobre PLC, generó excelentes resultados a la hora de maximizar el *Throughput* en cada uno de los nodos que forman parte de una red PLC, estableciendo niveles adecuados de QoS para cada una de las clases de tráfico que sobre ella transitan, como se pudo evidenciar en el escenario propuesto. Un aspecto a destacar, es que el valor de Shapley sobre OFDMA es una estrategia que puede ser implementada en sistemas embebidos de bajo costo, debido a que la complejidad computacional de sus algoritmos no es tan elevada como la requerida en métodos de optimización propuestos en otros papers.

#### REFERENCIAS

- [1] J. Ekanayake and K. Liyanage, *Smart Grid Technology and Applications*. Wiley, 2012, p. 320.
- [2] S. Katar, B. Mashburn, R. Newman, and H. Latchman, "Allocation Requirements for Supporting Latency Bound Traffic in HomePlug AV Networks," *IEEE Globecom 2006*, pp. 1–6, Nov. 2006.
- [3] H. H. Chen, "Video Streaming Over In-Home Power Line Networks," *IEEE Trans. Multimed.*, vol. 11, no. 3, pp. 523–534, Apr. 2009.
- [4] L. T. Berger, A. Schwager, and J. J. Escudero-Garzás, "Power Line Communications for Smart Grid

Applications,” *J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 2013, pp. 1–16, 2013.

- [5] H. Latchman, K. Srinivas, L. Yonge, and S. Gavette, *Homeplug AV and IEEE 1901: A Handbook for PLC Designers and Users*, 1a ed. New Jersey, USA: Wiley-IEEE Press, 2013, p. 384.
- [6] N. Anatory, J. & Theethayi, *Broadband Power-Line Communication Systems: Theory and Applications.*, 1a ed. Southampton, England: WIT Press, 2010, p. 193.
- [7] S. Bannister and P. Beckett, “Enhancing powerline communications in the ‘Smart Grid’ using OFDMA,” in *Power Engineering Conference, 2009. AUPEC 2009. Australasian Universities*, 2009, pp. 1–5.
- [8] 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.
- [9] J. J. Sanchez-Martinez, A. B. Vallejo-Mora, J. A. Cortes, F. J. Canete, and L. Diez, “Performance analysis of OFDM modulation on in-vehicle channels in the frequency band up to 100 MHz,” in *2010 Fifth International Conference on Broadband and Biomedical Communications*, 2010, pp. 1–6.
- [10] J. A. Cortés, “Modulation and Multiple Access Techniques for Indoor Broadband Power-Line Communications,” Universidad de Málaga, 2007.
- [11] V. Iversen and B. Sanders, “Engset formulæ with continuous parameters—theory and applications,” *AEU-International J. Electron. Commun.*, vol. 55, no. 1, pp. 3–9, 2001.
- [12] J. Pérez, J. Jimeno, and E. Tena, *Teoría de juegos*, 1 ed. Madrid, España: Pearson-Prentice Hall, 2003.
- [13] B. Peleg and P. Sudhölter, *Introduction to the theory of cooperative games*. Springer, 2007, p. 348.
- [14] D. Gillies, “Some theorems on n-person games,” Princeton University, 1953.
- [15] L. S. Shapley, “‘A value for n-persons games ’ in Contributions to the Theory of Games II,” *Ann. Math. Stud.*, no. 28, pp. 307–317, 1953.
- [16] J. R. Fernández G., “complejidad y algoritmos en Juegos Cooperativos,” Universidad de Sevilla, 2000.
- [17] S. Sancha, F. J. Canete, L. Diez, and J. T. Entrambasaguas, “A Channel Simulator for Indoor Power-line Communications,” in *2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 2007, pp. 104–109.
- [18] P. A. C. Lopes, J. M. M. Pinto, and J. B. Gerald, “Modeling and optimization of the access impedance of power line channels,” in *ISPLC2010*, 2010, pp. 142–147.
- [19] P. C.-H. Ng and P. S. Boon-Hee, *Queueing Modelling Fundamentals: With Applications in Communication Networks*. John Wiley & Sons, 2008, p. 292.



**Juan Carlos Vesga** recibió el título de Ingeniero Electrónico de la Universidad Industrial de Santander en 2003, Ingeniero de Sistemas de la Universidad Manuela Beltrán en 2007, Especialista en Docencia Universitaria de la Universidad Cooperativa de Colombia en 2007, Especialista en Telecomunicaciones en 2008 y Magíster en Ingeniería – Área Telecomunicaciones en 2011 de la Universidad Pontificia Bolivariana. Actualmente es candidato a Doctor en Ingeniería en la Universidad Pontificia Bolivariana y se desempeña como Docente Asistente e Instructor CISCO Excellence Advanced en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) en Bucaramanga, Colombia.



**Gerardo Granados Acuña** recibió el título de Ingeniero de Sistemas de la Universidad Industrial de Santander en 1994, Especialista en Telecomunicaciones en 2005 y Magíster en Telemática en 2014 de la Universidad Autónoma de Bucaramanga. Actualmente se desempeña como Docente Asistente e Instructor CISCO Excellence Advanced en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) en Bucaramanga, Colombia.



**Javier Emilio Sierra Carrillo** recibió el título de Ingeniero Electrónico de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales en 2003, Especialista en Telecomunicaciones en 2006 y Magíster en Ingeniería – Área Telecomunicaciones en 2008 de la Universidad Pontificia Bolivariana, Doctor en Ingeniería – Área Telecomunicaciones en la Universidad Pontificia Bolivariana en 2009. Actualmente desempeña como Docente y Director de Posgrados en la Universidad Pontificia Bolivariana en Medellín, Colombia.