



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

# **EVALUACIÓN DE POLÍTICAS DE PROMOCIÓN DE NODOS TERMINALES A NODOS SWITCHES EN REDES PLC BAJO EL ESTÁNDAR PRIME**

Autor:

M<sup>a</sup> de la Concepción Mora de Amarillas

Directores:

Dr. Javier Matanza Domingo

Dr. Gregorio López López

**Madrid**

Julio 2018



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
EVALUACIÓN DE POLÍTICAS DE PROMOCIÓN DE NODOS TERMINALES A  
NODOS SWITCHES EN REDES PLC BAJO EL ESTÁNDAR PRIME

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2017/18 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: M.ª de la Concepción Mora de Amarillas

Fecha: 10/ 07/ 2018

Autorizada la entrega del proyecto

LOS DIRECTORES DEL PROYECTO



Fdo.: Dr. Javier Matanza Domingo

Fecha: 10/ 07/ 2018



Fdo.: Dr. Gregorio López López

Fecha: 10/ 07/ 2018



## **AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO**

### ***1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.***

El autor D. M.<sup>a</sup> de la Concepción Mora de Amarillas DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: **EVALUACIÓN DE POLÍTICAS DE PROMOCIÓN DE NODOS TERMINALES A NODOS SWITCHES EN REDES PLC BAJO EL ESTÁNDAR PRIME**, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

### ***2º. Objeto y fines de la cesión.***

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

### ***3º. Condiciones de la cesión y acceso***

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

### ***4º. Derechos del autor.***

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

### ***5º. Deberes del autor.***

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

**6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.**

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 10 de julio de 2018

**ACEPTA**



Fdo.: M.ª de la Concepción Mora de Amarillas

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

# **EVALUACIÓN DE POLÍTICAS DE PROMOCIÓN DE NODOS TERMINALES A NODOS SWITCHES EN REDES PLC BAJO EL ESTÁNDAR PRIME**

Autor:

M<sup>a</sup> de la Concepción Mora de Amarillas

Directores:

Dr. Javier Matanza Domingo

Dr. Gregorio López López

**Madrid**

Julio 2018



# Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mis directores de proyecto Javi y Gregorio su paciencia, la confianza que han puesto en mí, y el optimismo mostrado a lo largo del proyecto.

Aquí termina una etapa de mucho esfuerzo sí, pero que, sin duda, ha merecido la pena. Quiero agradecer a mis padres, hermano, abuelas, tía y tíos su paciencia infinita, sus consejos y los muchos rezos a los que están ahí arriba para que esto funcionase. Habéis compartido mis penas y alegrías.

Por último, quiero agradecer la ayuda recibida de los profesores y compis de la Universidad durante el grado y el máster.



# EVALUACIÓN DE POLÍTICAS DE PROMOCIÓN DE NODOS TERMINALES A NODOS SWITCHES EN REDES PLC BAJO EL ESTÁNDAR PRIME

**Autor:** Mora de Amarillas, M.<sup>a</sup> de la Concepción.

Directores: Matanza Domingo, Javier; López López, Gregorio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## RESUMEN DEL PROYECTO

Este Trabajo Fin de Máster tiene como objeto la evaluación de diferentes políticas de promoción de nodos terminales a nodos *switches* en las redes NB-PLC (*Narrow Band Power Line Communication*) regidas por el estándar PRIME (*PowerLine Intelligent Metering Evolution*). La especificación de PRIME define la forma de enviar y recibir información mediante los cables de baja tensión. Este tipo de tecnología se ha popularizado en los últimos años especialmente por su idoneidad para la comunicación de los consumos de energía en los hogares a través de las conocidas como infraestructuras de medición avanzada o AMI (*Advanced Metering Infrastructures*), que requieren de una tasa de transmisión moderada. Una de las principales razones es la omnipresencia de los cables eléctricos y la no necesidad del despliegue de una nueva red de comunicación. Sin embargo, esta tecnología se enfrenta a un canal de comunicaciones selectivo en frecuencia, de impedancia cambiante y especialmente ruidoso. Para mitigar el efecto de estos problemas, PRIME propone que algunos de los nodos existentes en la red denominados nodos terminales realicen funciones de retransmisión (nodos *switches*), incrementándose así la cobertura de la red. El estándar no indica cuáles serían las posiciones óptimas de dichos nodos *switches*, ya que depende en gran medida de la topología física y lógica de la red, ni especifica políticas o criterios para promocionar nodos terminales a *switches*. Además, apenas existen estudios sobre el tema y poco se conoce acerca de los criterios de promoción implementados por los fabricantes, ya que constituyen un elemento que les permite diferenciarse unos de otros. El objetivo de este Trabajo Fin de Máster es precisamente investigar y proponer una serie de criterios para la promoción de nodos terminales a nodos *switches* en redes PRIME y evaluar su rendimiento en un escenario de red real. Para ello, el presente proyecto se ha apoyado en el conocido simulador de redes PRIME *SimPRIME* (<https://www.iit.comillas.edu/jmatanza/SimPRIME/>), desarrollado como parte de la tesis doctoral del Dr. Javier Matanza.

**Palabras clave:** nodos *switches*, AMI, políticas de promoción, PLC, PRIME, *SimPRIME*

## 1. Introducción

El estándar PRIME [1], impulsado por las principales eléctricas españolas (Iberdrola, Naturgy), define el uso de las líneas de baja tensión (PLC), que proporcionan el suministro eléctrico, en la última milla de la infraestructura de medición avanzada o AMI por sus siglas en inglés. Se están realizando despliegues AMI por todo el mundo, y especialmente, a nivel europeo [2][3]. La Comisión Europea estima que sólo en la Unión Europea se invertirán 35 billones de euros en el despliegue de 200 millones de contadores inteligentes para 2020 [4].

Las tecnologías PLC de banda estrecha (NB-PLC) son muy utilizadas en la última milla de las AMI, porque proporcionan ventajas como el ya existente despliegue del medio, la red

eléctrica, sobre el que se realizarán las comunicaciones, que supone una reducción del coste de instalación.

PRIME determina que una subred está constituida por un concentrador, o nodo base, y varios nodos de servicio (*switch* o terminal). La función del nodo base es la de recolectar los datos del consumo eléctrico que se encuentra almacenada en los nodos de servicio. El objetivo final es enviar esta información a la distribuidora eléctrica para su procesamiento permitiendo, por ejemplo, una facturación detallada o una gestión activa de la demanda.

Sin embargo, la red eléctrica constituye un medio hostil para el envío de información debido a los problemas de atenuación y ruido que producen la degradación de la comunicación. La atenuación incrementa con la distancia entre los nodos emisor y receptor. El ruido es debido a la electrónica de potencia de los equipos conectados a la red. Para solventar el problema de la degradación de la señal, el estándar PRIME permite que los nodos de la red puedan realizar operaciones de reenvío o *switching*. Según el estándar, los nodos de la red denominados nodos de servicio, encargados de comunicar el dato del consumo eléctrico al nodo concentrador o nodo base, pueden adoptar distintas funcionalidades. Un nodo en estado terminal es aquel que simplemente comunica su tráfico al nodo base. Un nodo en estado *switch* posee toda la funcionalidad de un nodo terminal y, adicionalmente, adopta la funcionalidad de reenvío de tráfico procedente de o dirigido a otros dispositivos de la subred.

No obstante, el estándar no indica cuáles son las posiciones óptimas para los nodos *switch*, entre otros motivos porque esto puede variar dependiendo del escenario de red en cuestión. Tampoco indica cuál es el criterio seguido por el nodo base para promocionar un nodo en estado terminal al estado de *switch*, dejándolo a discreción del fabricante. Apenas existen estudios sobre el tema y poco se conoce acerca de los criterios de promoción implementados por los fabricantes ya que constituyen un elemento que les permite diferenciarse unos de otros. Por ello en este TFM se ha propuesto un conjunto de posibles políticas de promoción, con el fin de implementarlas en el nodo base de un simulador de redes PRIME para posteriormente evaluar el impacto producido por cada una de ellas en el rendimiento de la red, en términos de latencias de las comunicaciones.

## 2. Definición del Proyecto

El proceso por el que un nodo de servicio en estado terminal es autorizado por el nodo base para reenviar tráfico entre dispositivos se denomina proceso de promoción. Generalmente dicho proceso responde a una petición de promoción enviada por un nodo terminal interesado. Ante la recepción de múltiples solicitudes de promoción, el estándar deja a discreción del nodo base la elección de una de ellas. El estándar no especifica en base a qué el nodo base promociona o no a un nodo terminal que lo solicita, o cuáles son las posiciones óptimas de los nodos *switch* (ya que esto, de hecho, puede depender de las condiciones de la red bajo estudio).

Es por ello que el objetivo de este proyecto es la formulación de una serie de políticas en base a las cuales el nodo base decida a qué nodos es más conveniente promocionar. Cada una de estas políticas ha sido implementadas en un simulador de redes PRIME, con el objetivo de evaluar cuál de todas ellas constituye la estrategia óptima en cuanto al rendimiento adecuado de la red se refiere y si este hecho depende de las condiciones de la red. El simulador en cuestión es *SimPRIME*, desarrollado como parte de la tesis doctoral del Dr. Javier Matanza [5] y que ha dado lugar a varias publicaciones científicas [6][7][8][9][10]. La implementación se ha llevado a cabo con el entorno de simulación de

redes OMNeT++ sobre el que se encuentra desarrollado el simulador, y que utiliza lenguaje C++ para la descripción de la funcionalidad de los nodos de la red. Este simulador de redes hasta el momento disponía de una única política de promoción, por la cual el nodo base promociona al primer nodo del que recibe solicitud de promoción (política FCFS). Para lograr del objetivo principal, se plantearon los siguientes subobjetivos:

- Revisión del estándar PRIME, haciendo énfasis en el proceso de promoción.
- Investigación, formulación y diseño de las políticas de promoción.
- Análisis y diseño de los cambios a implementar en el proceso de promoción implantado hasta el momento en el simulador *SimPRIME*.
- Implementación en el simulador de una selección de las políticas de promoción formuladas, así como los cambios necesarios para su soporte.
- Validación de las políticas implementadas mediante la simulación de un escenario de red real de interés y evaluación del impacto originado por cada una de las políticas en el rendimiento de la red PRIME.

### 3. Descripción del modelo

Los nodos de servicio de la subred se inician en estado desconectado, siendo la recepción de tramas *beacon* la única función que pueden realizar en dicho estado. Las tramas *beacon* son emitidas periódicamente por el nodo base y retransmitidas por cada dispositivo *switch* de forma que sean recibidas por todos los nodos de servicio de la subred, ya que constituyen el mecanismo de sincronización de los nodos de servicio de una subred. Como se mencionó anteriormente, no todos los nodos que componen la red NB-PLC son capaces de establecer una conexión directa con el nodo base para comunicarse, debido a los problemas de atenuación y ruido que presenta la red y producen la degradación de la comunicación. Cada nodo de servicio de la subred posee una tabla con los identificadores SID (*Switch Identifier*) de los *switches* de los cuales recibe tramas *beacon*. Un nodo desconectado puede seleccionar cualquier nodo *switch* de la tabla a través del cual llevará a cabo su proceso de registro en la subred y las posteriores comunicaciones con el nodo base.

Inicialmente un nodo de servicio en estado desconectado escuchará en el canal durante un tiempo definido por el estándar antes de determinar que no se reciben tramas *beacon*. En dicho caso el nodo de servicio enviará tramas *promotion needed* o PNPDU, requiriendo la promoción de cualquiera de los nodos terminales cercanos. Un nodo terminal tras la recepción de una trama PNPDU envía la correspondiente solicitud de promoción PRO\_REQ\_S al nodo base. El nodo base se mantiene a la escucha de peticiones de promoción durante un periodo de tiempo, al cual se ha denominado ventana de escucha. Transcurrido dicho periodo el nodo base examina las solicitudes recibidas y decide a que nodo terminal promocionar al estado de *switch*, al cual le enviará un mensaje PRO\_REQ\_B de respuesta, para el cual el campo del mensaje PRO.NSID contiene el identificador de *switch* que le asigna. El mensaje PRO\_REQ\_B requiere del acuse de recibo con un mensaje PRO\_ACK. El resto de los nodos no recibirán ninguna respuesta a la petición de promoción, para evitar saturar el tráfico en la red.

Sin embargo, el estándar no especifica el criterio mediante el cual el nodo base decide promocionar o no un nodo terminal al estado de *switch*, ni cuales son las posiciones óptimas

para estos nodos. Por ello este TFM aborda la formulación y evaluación de un conjunto de políticas o criterios de promoción en función de las cuales el nodo base decidirá qué nodos son los más adecuados para ser promocionados a *switch*, que se muestran en la Tabla 1.

Métrica utilizada	Política de promoción
Promociona al nodo emisor de la primera/última solicitud recibida durante el tiempo de ventana.	FCFS/ LCFS
Promociona aleatoriamente a un nodo de entre los nodos emisores de las solicitudes recibidas durante el tiempo de ventana.	RR
Promociona al nodo emisor de la solicitud recibida durante el tiempo de ventana con menor valor de coste de subida/bajada/medio.	UPCOST/ DNCOST/ MEANCOST
Promociona al nodo emisor de la solicitud recibida durante el tiempo de ventana con menor valor de <i>jitter</i> .	JITTER
Promociona al nodo emisor de la solicitud recibida durante el tiempo de ventana con menor valor de latencia.	LATENCY

Tabla 1. Políticas de promoción implementadas.

*FCFS (First Come First Served), LCFS (Last Come First Served), RR (Round Robin)*

#### 4. Resultados

Una vez implementadas las políticas de promoción en el nodo base del simulador se ha modelado un escenario de red real ubicada en Colombia [11], compuesta por 7 nodos de servicio, para la que se proporcionan las atenuaciones existentes entre los nodos. Se trata de una red con un número reducido de nodos, típicas en América, mientras que las redes PRIME europeas tienen un número de nodos bastante superior. De esta forma hemos podido validar la implementación realizada y evaluar el impacto de cada política en el rendimiento de la red.

El análisis del rendimiento está enfocado en la medida de las latencias de las comunicaciones que se establecen entre los nodos de la subred PRIME, ya que representan las principales figuras de mérito en redes PRIME para las distribuidoras eléctricas. Concretamente se han escogido: la medida del tiempo requerido por el nodo base para realizar un sondeo a todos los nodos de servicio de la red, denominado *Time To Read All meters (TTRAll)*; y el tiempo que transcurre desde que el nodo base envía un paquete de petición de datos hasta que recibe la correspondiente respuesta de un nodo de servicio, al que se denomina *Round-Trip Time (RTT)*.

El primer experimento que se ha realizado representa la situación real en la que el nodo base establece una comunicación con todos los nodos de la red para realizar un sondeo a los contadores de la subred, para la obtención del dato de consumo procedente de cada hogar y su posterior comunicación a la empresa proveedora del suministro eléctrico, véase la Ilustración 1.

El eje de abscisas representa la política de promoción que está siendo utilizada por el nodo base. El eje de ordenadas representa la mediana del  $TTR_{All}$ . Como se puede apreciar la mediana del  $TTR_{All}$  se mantiene prácticamente constante independientemente de la política que se esté utilizando. Esto puede deberse al número reducido de nodos de la red. Un escenario con mayor número de nodos podría dar lugar a diferencias más significativas entre las políticas. La simulación y análisis de estos escenarios se propone como futura línea de trabajo.

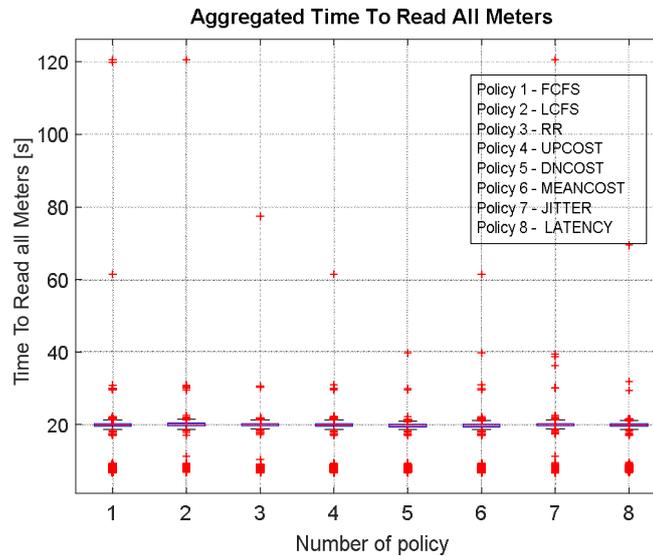


Ilustración 1.  $TTR_{All}$  agregado para cada política en un escenario de 7 nodos descrito en [11]

El segundo experimento realizado compara el tiempo mediano que tarda en contestar un nodo de servicio a la encuesta realizada por el nodo base en función de la política de promoción que se esté utilizando. El eje de abscisas representa la política de promoción empleada por el nodo base. El eje de ordenadas representa la mediana del  $RTT$  para cada nodo de servicio de la red. Como se puede apreciar en la Ilustración 2 el tiempo de respuesta es prácticamente constante para todas las políticas. Si se observa con precisión se aprecia que pese a no ser una diferencia significativa (del orden de milisegundos) las políticas empleadas que favorecen el menor tiempo de respuesta de los nodos de la red son aquellas que tienen en cuenta las variables de latencia y *jitter* para promocionar un nodo a *switch*. Concretamente la política de JITTER es la que mejor resultados proporciona, pues tiene en cuenta la variación del retardo en las comunicaciones entre el nodo base y el nodo que solicita promocionar.

No obstante, al ser mínima la diferencia entre políticas se escogería para su implantación en el nodo base aquella política que requiera el menor coste computacional. Ésta es la política FCFS, por la cual el nodo base escoge para su promoción al nodo del que ha recibido la primera solicitud de promoción.

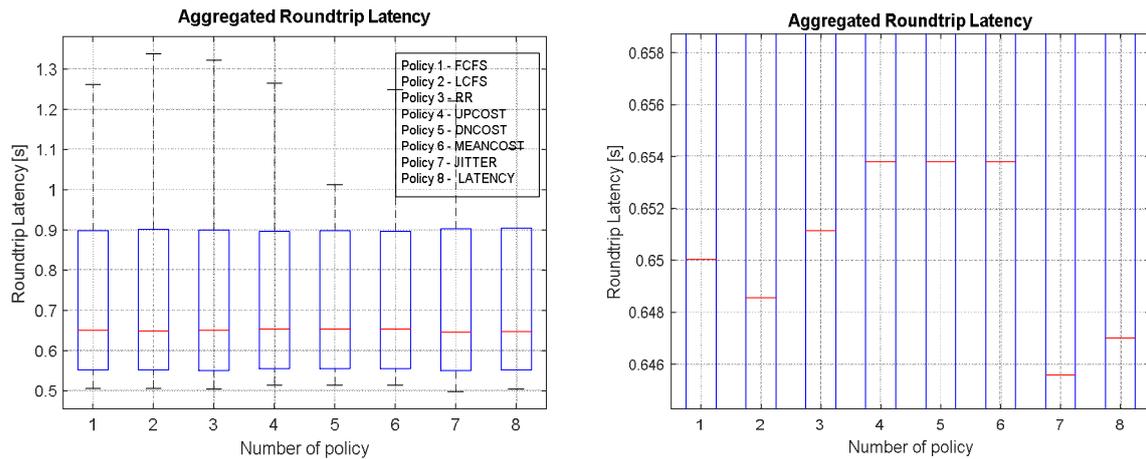


Ilustración 2. RTT agregado para el escenario de 7 nodos descrito en [11]

## 5. Conclusiones

Este proyecto ha abordado la formulación de un conjunto de políticas empleadas por el nodo base para la promoción de nodos terminales a nodos *switches* en las redes PLC regidas por el estándar PRIME. Posteriormente se ha llevado a cabo la implantación de estas políticas en el simulador de redes *SimPRIME*, lo que ha permitido simular un escenario de red real para la evaluación del impacto que produce cada una de estas políticas en el rendimiento global de la red.

Se trata de un escenario de red compuesto de un número reducido de nodos en el que se apreciaba una leve mejoría en el rendimiento de la red al emplear la política de promoción denominada JITTER, que tiene en cuenta la variación del retardo en las comunicaciones entre el nodo base y los nodos que solicitan promocionar. No obstante, se trata de una diferencia muy poco significativa en el rendimiento de la red en comparación con el obtenido con el resto de las políticas implementadas (del orden de milisegundos), por lo que para dicho escenario de red tendría sentido decantarse por la implantación en el nodo base de aquella política que menor coste computacional requiera. La política con menor coste computacional es aquella que elige para promocionar al nodo emisor de la solicitud de promoción que se recibe primera en el nodo base, a la que se ha denominado FCFS (*First Come First Served*).

Como trabajos futuros, se propone evaluar las políticas de promoción definidas en este TFM en otros escenarios con mayor número de nodos y distintas longitudes de cable (considerando redes urbanas semiurbanas y rurales de diferentes países que utilicen el estándar PRIME en la última milla de AMI [12], [9]), así como con presencia de fuentes de ruido significativas (p.ej., ruido impulsivo, ruidos reales procedentes de dispositivos como inversores de paneles solares o cargadores de vehículos eléctricos [13], etc.).

## 6. Referencias

- [1] PRIME Alliance Technical Working Group, “Draft Standard for PowerLine Intelligent Metering Evolution.” pp. 1–256.

- [2] N. Uribe-Pérez, L. Hernández, D. de la Vega, and I. Angulo, "State of the Art and Trends Review of Smart Metering in Electricity Grids," *Appl. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 1–24, 2016.
- [3] N. Andreadou, M. Guardiola, and G. Fulli, "Telecommunication Technologies for Smart Grid Projects with Focus on Smart Metering Applications," *Energies*, vol. 9, no. 5, p. 375, 2016.
- [4] U. of the E. I.- Eurelectric, "Power Distribution in Europe," 2013.
- [5] J. Matanza Domingo, "Improvements in the PLC Systems for Smart Grids Environments," Universidad Pontificia Comillas, 2013.
- [6] J. Matanza, G. López, S. Alexandres, J. I. Moreno, and M. de la C. Mora de Amarillas, "Together or separately? Evaluating the Content Free Period in PRIME using SimPRIME," *2017 IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, pp. 308–313, 2017.
- [7] J. Matanza, S. Kiliccote, S. Alexandres, and C. Rodríguez-Morcillo, "Simulation of low-voltage narrow-band power line communication networks to propagate OpenADR signals," *J. Commun. Networks*, vol. 17, no. 6, pp. 656–664, 2015.
- [8] J. Matanza, S. Alexandres, and C. Rodríguez-Morcillo, "Advanced metering infrastructure performance using European low-voltage power line communication networks," *IET Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 1041–1047, 2014.
- [9] L. Gonzalez-Sotres, C. Mateo, P. Frias, C. Rodriguez-Morcillo, and J. Matanza, "Replicability Analysis of PLC PRIME Networks for Smart Metering Applications," *IEEE Trans. Smart Grid*, pp. 1–1, 2016.
- [10] M. Seijo, G. López, J. Matanza, and J. I. Moreno, "Planning and Performance Challenges in Power Line Communications Networks for Smart Grids," *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 2016, 2016.
- [11] A. Sanz, P. J. Pinero, J. M. Idiago, S. Esteban, and J. I. Garcia, "Narrowband power line communications evaluation in complex distribution networks," *2014 IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, pp. 266–271, 2014.
- [12] A. Sendin, I. Peña, and P. Angueira, "Strategies for power line communications smart metering network deployment," *Energies*, vol. 7, no. 4, pp. 2377–2420, 2014.
- [13] G. López, J. I. Moreno, E. Sánchez, C. Martínez, and F. Martín, "Noise sources, effects and countermeasures in narrowband power-line communications networks: A practical approach," *Energies*, vol. 10, no. 8, 2017. [netpp.org/](http://netpp.org/).



# EVALUATION OF TERMINAL NODES TO SWITCH NODES PROMOTION POLICIES IN PLC NETWORKS ACCORDING TO PRIME STANDARD

**Author: Mora de Amarillas, M.<sup>a</sup> de la Concepción.**

Supervisors: Matanza Domingo, Javier; López López, Gregorio.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## ABSTRACT

This Master's Thesis aims at the evaluation of different policies for the promotion of terminal nodes to switch nodes in *Narrow Band Power Line Communication* (NB-PLC) networks according to PRIME standard (*PowerLine Intelligent Metering Evolution*). PRIME specification defines the way to send and receive information through low voltage cables. This type of technology has become popular in recent years, especially because of its suitability for communicating household energy consumption data through the so-called *Advanced Metering Infrastructures* (AMI), which require a rate of moderate transmission. One of the main reasons is the omnipresence of electrical cables and the non-deployment requirement of a new communication network. However, this technology faces a frequency-selective communication channel with changing impedance and especially noisy. To mitigate these problems, PRIME proposes that some of the existing nodes in the network called terminal nodes carry out relay functions (switch nodes), thus increasing the coverage of the network. The standard does not indicate what would be the optimal positions of these switch nodes, since it depends on the physical and logical topology of the network, nor does it specify policies or criteria to promote terminal nodes to switch nodes. In addition, there are hardly any studies on the subject and we do not know much about the promotion criteria implemented by the manufacturers, since they constitute an element that allows them to differentiate from each other. The objective of this Master's Thesis is to research and propose a series of criteria for the promotion of terminal nodes to switch nodes in PRIME networks and evaluate their performance in a real network scenario. For this, the present project has been supported by the well-known PRIME network simulator SimPRIME (<https://www.iit.comillas.edu/jmatanza/SimPRIME/>), developed as part of Dr. Javier Matanza's dissertation.

**Keywords:** switch nodes, AMI, políticas de promoción, PLC, PRIME, *SimPRIME*

## 1. Introduction

PRIME standard [1], driven by the main Spanish electricity companies (Iberdrola, Naturgy), defines the use of low voltage lines (PLC), which provide electricity supply, in the last mile of the *Advanced Metering Infrastructures* (AMI). AMI are being widely deployed worldwide, and especially in Europe [2][3]. The European Commission estimates the cost of the deployment of 200M of smart meters in 35 billion euros, only in European Union in 2020 [4].

*Narrow Band PLC* (NB-PLC) technologies are being widely deployed in the last mile of AMI, due to the advantages they offer. One of these advantages is the fact that communication infrastructure is already deployed (electric cable), making deployments costs decrease.

PRIME establishes a subnetwork consists of a concentrator, or base node, and several service nodes (switch or terminal). The base node retrieves from the service nodes the data about power consumption. The ultimate aim is to send this information to electric company to be processed, allowing itemizing billing or active demand management.

However, the electrical network is inappropriate for sending information due to the attenuation and noise problems which produce communication degradation. The attenuation increases with the distance between the sender and receiver nodes. The noise is produced by the power electronic of the devices connected to the network. To solve the problem of signal degradation, PRIME standard allows network nodes to perform switching. According to the standard, the service nodes, in charge of communicating the electricity consumption data to the base node, can adopt different functionalities. A node in a terminal state communicates its traffic to the base node. A node in the switch state has all the functionality of a terminal node and, additionally, adopts the functionality of traffic forwarding from or directed to other subnet nodes.

Nevertheless, PRIME standard does not indicate which are the optimal positions for switch nodes, among other reasons because it depends on the on each subnetwork scenario. It does not indicate either what is the criterion followed by base node to promote a terminal node to switch state, such that, it will depend on the manufacturers *know-how*. There are hardly any studies on the subject and the promotion criteria implemented by the manufacturers are unknown since they constitute an element that allows them to differentiate themselves from each other. Therefore, in this project a set of possible promotion policies has been proposed in order to implement them in the base node of a PRIME network simulator to subsequently evaluate the impact produced by each of them on network performance, in terms of communications latencies.

## 2. Project Definition

The process by which a service node in terminal state is authorized by the base node to forward traffic between subnet devices is called promotion process. Generally, this process takes place when a terminal node sends a request asking for promoting. Upon receipt of multiple promotion requests, the standard leaves at the discretion of the base node the choice of one of them. The standard does not specify based on what the base node promotes or not a terminal node that requests it, or what are the optimal positions for switch nodes (since this may depend on the conditions of the network under study).

That is the reason why the aim of this project is the definition of a series of policies the base node will use to decide which nodes is the most convenient to promote. Each of these policies has been implemented in a PRIME network simulator to evaluate which of them is the optimal strategy in terms of adequate network performance and if this depends on the network conditions. The simulator used is called *SimPRIME* developed as part of Dr. Javier Matanza's dissertation [5] which has resulted in several scientific publications [6][7][8][9][10]. The implementation has been carried out with OMNeT ++ network simulation environment on which *SimPRIME* is based on. OMNeT uses C ++ language for to describe the network nodes functionality. This network simulator so far had a single promotion policy, by which the base node promotes the node which sent the first promotion request (FCFS policy). To achieve the project goal, the following sub-objectives were proposed:

- Review of PRIME standard, emphasizing the promotion process.
- Research, definition and design of promotion policies.
- Analysis and design of the required changes in the promotion process implemented so far in *SimPRIME* simulator.
- Implementation of a selection of the proposed promotion policies in the simulator, as well as the required changes for supporting them.
- Validation of implemented policies through the simulation of an interesting real scenario and evaluation of the impact originated in PRIME subnet performance by each policy.

### 3. Model Description

The subnet service nodes are initiated in disconnected state, the reception of beacon frames are the only function they can perform in that state. *Beacon* frames are periodically transmitted by base node and retransmitted by each switch device so that *beacon* frames are received by all service nodes in the subnet. It constitutes the synchronization mechanism of service nodes in a subnet. As mentioned above, not all the nodes in the NB-PLC network are able to establish a direct connection with base node to communicate, due to attenuation and noise problems present in the network, which produce the communication degradation. Each service node of the subnet has a table with the switch identifiers (SID) of the switches from which it receives *beacon* frames. A disconnected node can select any switch node in the table through which it will carry out its registration process in the subnet and the subsequent communications with base node.

Initially, a service node in disconnected state will listen in the channel, for a time established by the standard, before determining that no *beacon* frames are received. In this case, the service node will send *promotion needed* or PNPDU frames, requiring the promotion of any of the nearby terminal nodes. A terminal node upon receipt of a PNPDU frame sends the corresponding promotion request PRO\_REQ\_S message to the base node. The base node listens to requests asking for promotion over a period of time, which has been called “listening window”. After that period, the base node examines the received requests and decides which terminal node to promote to switch state, to which it will send a response PRO\_REQ\_B message, for which the PRO.NSID message field contains the switch identifier that assigns it. The PRO\_REQ\_B message requires a PRO\_ACK acknowledgment message. The rest of the nodes will not receive any response to the promotion request, to avoid saturating the traffic on the network.

However, the standard does not specify the criteria used by base node to decide whether to promote or not a terminal node to switch state, nor which are the optimum positions for these nodes. Therefore, the aim of this project is the formulation and evaluation of a set of promotion policies used by base node to decide which nodes are the most suitable to be promoted to switch. These policies are shown in Table 1.

Associated metric	Promotion policy
Promotion of the node that sends the first / last promotion request received during the window time.	FCFS/ LCFS
Random promotion of a node, among the nodes that sent the promotion requests received during the window time.	RR
Promotion of the node that sends the request received during the window time with the lowest upcost/dncost/meancost value.	UPCOST/ DNCOST/ MEANCOST
Promotion of the node that sends the request received during the window time with the lowest jitter value.	JITTER
Promotion of the node that sends the request received during the window time with the lowest roundtrip value.	LATENCY

Table 1. Implemented promotion policies.

*FCFS (First Come First Served), LCFS (Last Come First served), RR (Round Robin)*

#### 4. Results

Once the promotion policies were implemented in the simulator base node, a real network scenario located in Colombia [11], composed of 7 service nodes was modeled, for which the existing attenuations between the nodes are provided. It is a network with a reduced number of nodes, typical in America, while European PRIME networks have a considerably higher number of nodes. In this way we have been able to validate the implementation carried out and evaluate the impact of each policy on the performance of the network.

The performance analysis is focused on measuring communications latencies among PRIME subnet nodes, since they are a very representative measures for the electric companies. Specifically, the *Time To Read All meters (TTRAll)* and the *Round-Trip Time (RTT)* have been measured.

One of the experiment carried out simulates a real situation in which base node establishes a communication with all the subnet nodes. The objective is to retrieve the data power consumption from each one of them, see Illustration 1.

The abscissa represents the promotion policy that is being used by base node. The ordinate represents the median *TTRAll* values obtained by base node by polling all subnet nodes. As you can see the median *TTRAll* remains practically constant regardless of the policy that is being used. This may be due to the reduced number of nodes in the network. A scenario with a higher number of nodes could lead to more significant differences between policies. The simulation and analysis of these scenarios is proposed as a future line of work.

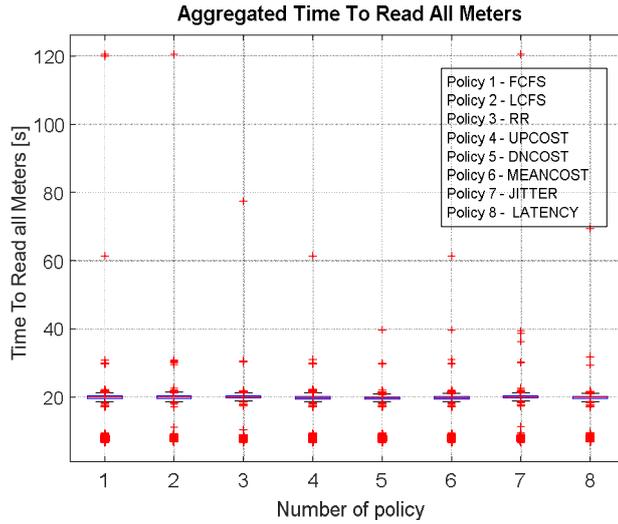


Illustration 1. TTRAll for each policy for a 7-nodes scenario described in [11]

The second experiment compares median time it takes to answer a service node to the survey carried out by the base node, according to the promotion policy that is being used. The abscissa represents the promotion policy used by the base node. The ordinate represents the median *RTT* values obtained for each service node in the network. As can be seen in Illustration 2 the response time is practically constant for all policies. If it is observed with precision it is appreciated that in spite of not being a significant difference (of the order of milliseconds) the policies that results in the smaller answer time are the those that take into account, latency and jitter variables to promote a terminal node to switch. Specifically, JITTER policy provides the best results, since it takes into account the variation of the delay in communications between base node and the node requesting to promote.

However, as difference between policies is minimal, it would be chosen for its implementation in base node the policy that requires the lowest computational cost. This is the FCFS policy, by which base node promotes the node from which it received the first promotion request.

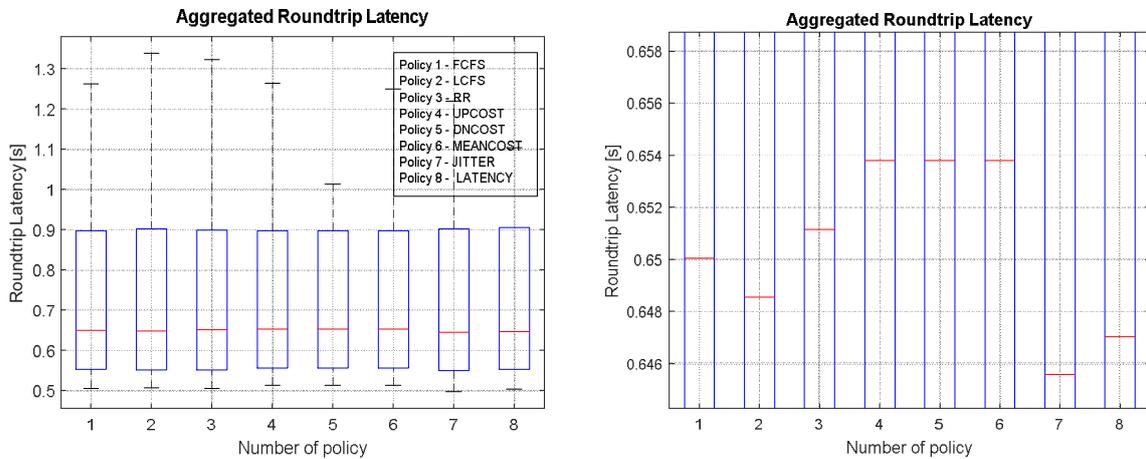


Illustration 2. RTT for a 7-nodes scenario described in [11]

## 5. Conclusions

The aim of this project is the formulation of a set of policies used by base node to promote terminal nodes to switch nodes in PLC networks according to PRIME standard. Subsequently, these policies have been implemented into *SimPRIME* network simulator, which has allowed to simulate a real network scenario for evaluating the impact each policy produces on the overall subnet performance of the subnet.

It is a network scenario composed of a reduced number of nodes in which there was a slight improvement in the performance of the network when using the promotion policy called JITTER, which takes into account the variation in the delay in communications between base node and the nodes requesting to promote. However, it is a very insignificant difference in the network performance obtained with the rest of the implemented policies (in the order of milliseconds), so for this network scenario it would make sense to implement in base node the policy that requires the lowest computational cost. The policy with the lowest computational cost is the one that selects to promote the node that sends the first promotion request received by base node, called FCFS (First Come First Served).

As future work, it is proposed to evaluate the promotion policies defined in this TFM in other scenarios with a greater number of nodes and different cable lengths (considering semi-urban and rural urban networks of different countries that use PRIME standard in the last mile of AMI [ 12], [9]), as well as the presence of significant noise sources (eg, impulsive noise, real noise from devices such as solar panel inverters or electric vehicle chargers [13], etc.).

## 6. References

- [1] PRIME Alliance Technical Working Group, "Draft Standard for PowerLine Intelligent Metering Evolution." pp. 1–256.
- [2] N. Uribe-Pérez, L. Hernández, D. de la Vega, and I. Angulo, "State of the Art and Trends Review of Smart Metering in Electricity Grids," *Appl. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 1–24, 2016.
- [3] N. Andreadou, M. Guardiola, and G. Fulli, "Telecommunication Technologies for Smart Grid Projects with Focus on Smart Metering Applications," *Energies*, vol. 9, no. 5, p. 375, 2016.
- [4] U. of the E. I.- Eurelectric, "Power Distribution in Europe," 2013.
- [5] J. Matanza Domingo, "Improvements in the PLC Systems for Smart Grids Environments," Universidad Pontificia Comillas, 2013.
- [6] J. Matanza, G. López, S. Alexandres, J. I. Moreno, and M. de la C. Mora de Amarillas, "Together or separately? Evaluating the Content Free Period in PRIME using SimPRIME," *2017 IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, pp. 308–313, 2017.
- [7] J. Matanza, S. Kiliccote, S. Alexandres, and C. Rodríguez-Morcillo, "Simulation of low-voltage narrow-band power line communication networks to propagate OpenADR signals," *J. Commun. Networks*, vol. 17, no. 6, pp. 656–664, 2015.
- [8] J. Matanza, S. Alexandres, and C. Rodríguez-Morcillo, "Advanced metering infrastructure performance using European low-voltage power line communication networks," *IET Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 1041–1047, 2014.

- [9] L. Gonzalez-Sotres, C. Mateo, P. Frias, C. Rodriguez-Morcillo, and J. Matanza, "Replicability Analysis of PLC PRIME Networks for Smart Metering Applications," *IEEE Trans. Smart Grid*, pp. 1–1, 2016.
- [10] M. Seijo, G. López, J. Matanza, and J. I. Moreno, "Planning and Performance Challenges in Power Line Communications Networks for Smart Grids," *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 2016, 2016.
- [11] A. Sanz, P. J. Pinero, J. M. Idiago, S. Esteban, and J. I. Garcia, "Narrowband power line communications evaluation in complex distribution networks," *2014 IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, pp. 266–271, 2014.
- [12] A. Sendin, I. Peña, and P. Angueira, "Strategies for power line communications smart metering network deployment," *Energies*, vol. 7, no. 4, pp. 2377–2420, 2014.
- [13] G. López, J. I. Moreno, E. Sánchez, C. Martínez, and F. Martín, "Noise sources, effects and countermeasures in narrowband power-line communications networks: A practical approach," *Energies*, vol. 10, no. 8, 2017.



## Índice de la memoria

<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>8</b>
<b>Capítulo 2. Descripción de la Tecnología</b> .....	<b>12</b>
2.1 Utilidad de la tecnología PRIME .....	12
2.2 Introducción al estándar .....	15
<b>Capítulo 3. Estado de la Cuestión</b> .....	<b>20</b>
3.1 Algoritmos de promoción .....	20
3.2 Herramientas de simulación de redes PRIME.....	23
<b>Capítulo 4. Definición del Trabajo</b> .....	<b>26</b>
4.1 Justificación .....	26
4.2 Objetivos .....	27
4.3 Planificación.....	29
4.4 Estimación Económica .....	31
4.4.1 Recursos materiales .....	31
4.4.2 Recursos humanos .....	31
4.4.3 Presupuesto Total .....	32
<b>Capítulo 5. Entorno de simulación</b> .....	<b>34</b>
5.1 Simulador SimPRIME .....	34
5.2 Herramienta OMNeT++ .....	38
5.2.1 Ficheros “.ned” .....	40
5.2.2 Ficheros “.h” y “.cpp” .....	40
<b>Capítulo 6. Desarrollo</b> .....	<b>42</b>
6.1 Análisis del Proceso de Promoción .....	42
6.2 Políticas de Promoción .....	45
6.2.1 Variables de Red.....	47
6.2.2 Formulación de políticas de promoción .....	48
6.2.3 Selección de políticas a implementar en SimPrime .....	50
6.3 Implementación.....	51
6.3.1 Recepción de un mensaje pro_req_s.....	54

6.3.2 Fin de la ventana de escucha .....	56
6.3.3 Envío del mensaje <i>pro_req_b</i> .....	58
6.3.4 Recepción del mensaje <i>pro_ack</i> .....	59
6.3.5 Aplicación de las políticas de promoción .....	60
6.4 Evaluación del funcionamiento del sistema .....	65
<b>Capítulo 7. Caso de estudio .....</b>	<b>70</b>
<b>Capítulo 8. Análisis de Resultados .....</b>	<b>72</b>
8.1 Tiempo de lectura de todos los nodos de la subred .....	72
8.2 Tiempo de recepción del dato de consumo de un nodo .....	73
<b>Capítulo 9. Conclusiones .....</b>	<b>79</b>
<b>Capítulo 10. Trabajos Futuros.....</b>	<b>80</b>
<b>Capítulo 11. Bibliografía.....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXO A 86</b>	

## Índice de figuras

Figura 1. Estructura de la red de suministro eléctrico [16] .....	12
Figura 2. Estructura de la red de acceso PLC [16] .....	14
Figura 3. Estados de un nodo de servicio .....	16
Figura 4. Estructura lógica de la red PRIME .....	17
Figura 5. Escenario de estudio en [17] de una red PLC donde el nodo terminal TN3 promociona a switch. ....	21
Figura 6. Diagrama del plan del trabajo de este TFM .....	30
Figura 7. Estructura esquemática del simulador SimPRIME .....	35
Figura 8. Curvas BER vs SNR de la red PRIME en presencia de ruido de fondo (izquierda) y de ruido impulsivo (derecha). ....	36
Figura 9. Diagrama del proceso de promoción.....	44
Figura 10. Ejemplo de topología física de la red .....	46
Figura 11. Estructura de la ventana de escucha .....	54
Figura 12. Diagrama de flujo del método de recepción del mensaje PRO_REQ_S.....	56
Figura 13. Diagrama de flujo de método de recepción del mensaje interPromotionMsg....	58
Figura 14. Diagrama de flujo del método de envío del mensaje PRO_REQ_B.....	59
Figura 15. Diagrama de flujo del método de recepción del mensaje PRO_ACK .....	60
Figura 16. Diagrama de flujo del método checkBestSNForPromotion .....	61
Figura 17. Fichero de texto de matriz de atenuaciones.....	66
Figura 18. TTRAll agregado para cada política en el escenario de red de Colombia .....	73
Figura 19. Roundtrip agregado para el escenario de red de Colombia. ....	74
Figura 20. Ampliación del RTT agregado del escenario de red de Colombia. ....	74
Figura 21. Número mediano de los nodos promocionados (izquierda) por cada política y RTT agregado (derecha) en el escenario de red de Colombia.....	75

## *Índice de tablas*

Tabla 1. Políticas de promoción implementadas. ....	14
Tabla 2. Diferencias entre las versiones 1.3.6 y 1.4 de PRIME .....	18
Tabla 3. Velocidades de transmisión, costes especificados en PRIME y costes propuestos en [17] para los diferentes modos de comunicación. ....	22
Tabla 4. Coste por horas trabajadas mensualmente .....	32
Tabla 5. Modo de comunicación el correspondiente coste según PRIME.....	49
Tabla 6. Métrica empleada por cada política de promoción seleccionada.....	51
Tabla 7. Correspondencia entre la política de promoción y el valor del parámetro policy .	66
Tabla 8. Matriz de atenuaciones expresadas en dB .....	67
Tabla 9. Matriz de atenuaciones para la banda de frecuencias entre 260 y 308 kHz de la red propuesta en [11]. ....	70



## *Índice de acrónimos*

AMI	Advanced Metering Infrastructure
BER	Bit Error Rate
BN	Base Node
BPDU	Beacon PDU
BPL	Broadband Power Line
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
CFP	Contention Free Period
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DLMS/COSEM	Device Language Message Specification/COmpanion Specification for Energy Metering
FEC	Forward Error Connection
LLC	Logical Link Control
LNID	Local Node Identifier
MAC	Media Access Layer
NB-PLC	Narrowband Power Line Communications
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PDU	Protocol Data Unit

PHY	Physical Layer
PLC	Power Line Communications
PNPDU	Promotion Nedded PDU
PRIME	PowerLine Intelligent Metering Evolution
PRM	PHY Robustness Management
SCP	Shared Contention Period
SID	<i>Switch</i> Identifier
SN	Service Node
TDMA	Time Division Multiple Access
WAN	Wide Area Network

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La sociedad actual, cada vez más compleja e interconectada, demanda soluciones energéticas que respondan a sus nuevas necesidades. Las redes inteligentes o *Smart Grids* son la respuesta a la demanda de un sistema eléctrico más seguro, eficaz, sostenible, y respetuoso con el medio ambiente.

Esto ha requerido la evolución de la estructura del sistema eléctrico tal y como lo conocíamos hasta hace poco, pues se mantenía prácticamente inalterable desde hacía más de un siglo. Dicha estructura está constituida por grandes centrales generadoras de la electricidad que vierten a las redes de transporte para ser conducida hasta el consumidor final. Se trata de una estructura de red unidireccional y poco automatizada. En España distribuidoras eléctricas como Gas Natural Fenosa (hoy *Naturgy*) o Iberdrola transforman sus redes eléctricas con el fin de convertirlas en redes inteligentes. Estas redes son capaces de incorporar las decisiones adoptadas por todos los usuarios del sistema ya que los flujos de energía son transportados acompañados de flujos de información. En España, de acuerdo con la orden IET/290/2012, a finales del 2018 deberá haber finalizado la sustitución del 100% de los antiguos contadores por contadores inteligentes. Según [14] en España el 81% de los hogares ya posee un dispositivos de este tipo.

El pasado mes de noviembre se celebró en Madrid la cuarta edición del Congreso *Smart Grids* que supone un foro de referencia en el que se expone y debate sobre la actualidad y el futuro de las Redes Eléctricas Inteligentes en España y que constituye un punto de encuentro de todos los profesionales del sector. En dicho foro se destacó la importancia de las tres D (Digitalización, Descentralización y Descarbonización) en la creación del nuevo modelo del sector energético.

Un modelo en el que la descarbonización de los recursos energéticos requiere de la electrificación de la energía, de la apuesta por las energías renovables y del autoconsumo. En dicho modelo es fundamental la intervención coordinada de los diversos actores de la

red: fabricantes de infraestructura, empresas de servicios energéticos, proveedores energéticos, administración pública, consumidores, etc. El consumidor cobra especial relevancia, pues pasa a desempeñar un papel activo con capacidad para tomar decisiones que modulen sus necesidades y sus costes energéticos, denominado gestión activa de la demanda.

Este nuevo modelo de red implica un importante despliegue tecnológico que comprende: la automatización y control de la red eléctrica de transporte y distribución, mediante la instalación de un gran número de sensores y actuadores en las líneas de media y baja tensión, la necesidad de plataformas para la gestión de la gran cantidad de datos recogidos por las compañías eléctricas a través de los equipos en la red, el internet de las cosas (IoT), y la introducción de nuevas tecnologías como *blockchain*. Destaca la búsqueda de una red digital donde los equipos *multivendor* son interoperables y deben estar disponibles durante las 24 horas al día, los siete días de la semana, por ello uno de los principales desafíos que presentan estas redes, para los Gobiernos y los operadores de la red eléctrica, es la aplicación de la ciberseguridad con el fin de evitar las interrupciones del suministro eléctrico y garantizar una red eléctrica inteligente segura. También suponen un desafío la creciente implantación del vehículo eléctrico y del almacenamiento energético.

La denominada gestión activa de la demanda proporciona un modelo de red bidireccional que permite a las distribuidoras mantener un control continuo de la demanda y de las incidencias en la red, prevenir eventuales problemas, reducir pérdidas y minimizar las emisiones CO<sub>2</sub> de las centrales.

La AMI o *Advanced Metering Infrastructure* constituye la infraestructura de dispositivos necesarios a desplegar. El elemento clave en el desarrollo de las nuevas redes es el contador inteligente o *smart meter* y los centros de transformación. La función del contador inteligente es la de recolectar los datos energéticos de la vivienda, su transmisión a los sistemas de información de la compañía e informar al usuario acerca de su consumo para que pueda adecuarlo a sus necesidades; contribuyen a la mejora del servicio gestionando operaciones de altas, bajas o reconexiones a distancia. En los centros de transformación residen los concentradores, equipos que se encargan de la recolección de los datos de los clientes y de

su envío a los centros de procesamientos de datos, que constituyen la pieza fundamental de estas nuevas redes

Se están realizando despliegues AMI por todo el mundo [2][3]. La Comisión Europea estima que sólo en la Unión Europea se invertirán 35 billones de euros en el despliegue de 200 millones de contadores inteligentes para 2020 [4].

Las tecnologías PLC de banda estrecha son muy utilizadas en la última milla de las AMI, porque proporcionan ventajas como el ya existente despliegue del medio, la red eléctrica, sobre el que se realizarán las comunicaciones, que supone una reducción del coste de instalación. PRIME es el estándar impulsado por las principales eléctricas españolas (Iberdrola, Gas Natural Fenosa), para este tipo de tecnología, ampliamente desplegado en España y en proceso de expansión a nivel mundial.

El rendimiento de este tipo de redes, sin embargo, es muy variable, por lo que son especialmente importantes herramientas de simulación como *SimPRIME*, desarrollado como parte de la tesis doctoral de Javier Matanza [5], que permitan a los operadores y tecnólogos evaluar mecanismos del estándar en escenarios de interés, permitiendo extraer conclusiones y tomar decisiones sin incurrir en costes de implementación.

Sin embargo, las líneas de baja tensión sobre las que se asienta la tecnología PRIME constituyen un medio hostil para la transmisión de información debido a los problemas de atenuación, la cual incrementa con la distancia entre los equipos, así como a la presencia de señales ruidosas procedentes de la electrónica de potencia de los equipos conectados a la red, que producen la degradación de la comunicación. Por ello el estándar PRIME propone que algunos de los contadores de la red denominados nodos terminales sean “promocionados” por el nodo concentrador o nodo base a nodos *switches*, los cuales, además de gestionar su propio tráfico reenvían el de otros nodos incrementando así la cobertura de la red.

No obstante, el estándar no indica cuáles son las posiciones óptimas para ubicar los nodos *switches*. Tampoco especifica cuál es el criterio que adopta el nodo base para promocionar

a un determinado nodo terminal, de entre el resto de nodos de la red, al estado de *switch*, dejándolo a discreción de los fabricantes. Poco se conoce de los criterios empleados por los fabricantes, ya que supone un elemento que les permite diferenciarse unos de otros. Por ello el objetivo de este Trabajo Fin de Máster es la formulación de un conjunto de posibles criterios o políticas de promoción, que posteriormente serán implementadas en el simulador *SimPRIME*, el cual poseía hasta el momento un sencillo criterio de promoción que no garantiza la ubicación óptima de los nodos *switch* en la red. Dicha implementación permitirá evaluar los resultados obtenidos tras la simulación de un escenario de red real, pudiendo determinar cuáles son las políticas óptimas en cuanto al rendimiento de la red y si dependen de las condiciones de la red.

## Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

En este capítulo se describe la tecnología NB-PLC de acuerdo con estándar PRIME en la que se basa este TFM. Asimismo, se hace una breve introducción a los aspectos técnicos del estándar. Este capítulo se basa en el Trabajo Fin de Grado de la autora de este TFM, que se centró en la evaluación del período libre de contienda del estándar PRIME [15].

### 2.1 UTILIDAD DE LA TECNOLOGÍA PRIME

Las redes tradicionales destinadas al suministro eléctrico se componen de tres niveles: alta tensión (mayor de 100 kV), media tensión (entre 10 y 100 kV) y baja tensión (entre 230 y 400 V) como puede apreciarse en la Figura 1. Las redes de alta tensión sirven de conexión a las centrales eléctricas con las empresas suministradoras u otros grandes clientes. Las redes de media tensión (MT) proporcionan suministro a grandes áreas como ciudades o clientes industriales de gran tamaño. Las redes de baja tensión (BT) están dedicadas al suministro de energía a los usuarios finales o a los clientes individuales de un cliente más grande, pudiendo alcanzar longitudes de unos pocos cientos de metros.

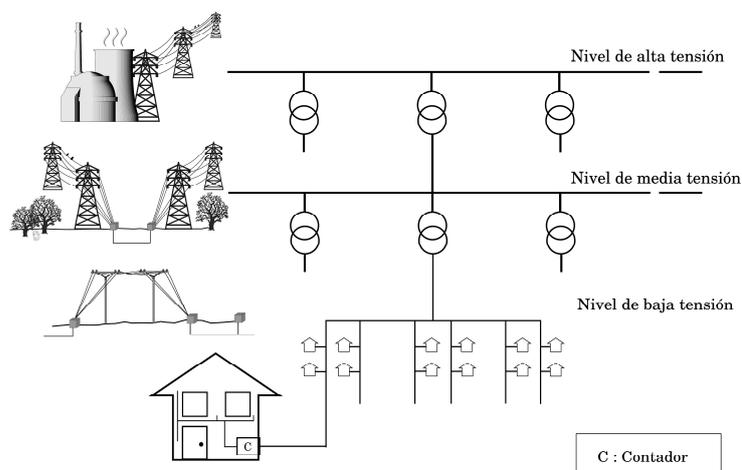


Figura 1. Estructura de la red de suministro eléctrico [16]

Las redes de baja tensión se componen de un transformador de potencia a través del cual se conectan a las redes de media y alta tensión, y de varias líneas de suministro de energía que se conectan a los contadores de energía eléctrica de los usuarios finales. Este tipo de redes son muy comunes en todo el mundo, por lo que se usan como solución, entre proveedor y usuario, para otras aplicaciones a través de las redes de acceso PLC.

PLC (*Power Line Communication*) es una tecnología que aprovecha las líneas de distribución de energía eléctrica de baja tensión para las comunicaciones, pese no haber sido diseñadas con ese objetivo. Las distribuidoras eléctricas han llevado a cabo un importante desarrollo de esta tecnología con el objetivo fundamental de la medición remota de los contadores eléctricos para la gestión del equilibrio entre la demanda eléctrica y el suministro que se proporciona a nivel de media y baja tensión.

Se distinguen dos tipos de tecnología PLC: de Banda Estrecha (NB-PLC o *Narrowband Power Line Communications*), usada en redes de acceso AMI, típicamente en líneas de baja tensión, aunque en países como EE. UU. pueden usarse también las líneas de media tensión; y de Banda Ancha (BPL o *Broadband Power Line*) usada en redes multimedia domésticas en líneas de baja tensión. PLC de banda estrecha, trabaja en banda baja, a frecuencias inferiores a los 500 kHz, y permite tasas de datos que alcanzan como máximo 1 Mbps. PLC de banda ancha amplía el abanico de aplicaciones, debido a las velocidades de datos que admite, varios cientos de Mbps (superior a 2 Mbps), permitiendo servicios como telefonía y acceso a Internet en paralelo. Los sistemas de banda ancha ven incrementada la tasa de datos a cambio de la pérdida de alcance en las comunicaciones, ya que funcionan en bandas de frecuencia más altas. PLC de banda estrecha, en cambio, proporciona una mayor cobertura de las comunicaciones frente a la velocidad de datos que se verá disminuida. Éste es principal motivo por el que las compañías eléctricas se decantan por la banda estrecha para determinadas aplicaciones (p.ej., última milla en AMI), pues les permite alcanzar mayores distancias e incrementar el número de usuarios con los que pueden comunicarse.

Las denominadas redes de acceso PLC, como la representada en la Figura 2, se conectan a una WAN a través de un concentrador, al que se denomina nodo base, colocado normalmente

junto al transformador de la red eléctrica. Las WAN son redes que permiten comunicaciones de larga distancia, pudiendo pertenecer a empresas para su uso privado, o a un proveedor de servicio que presta sus servicios para proveer de conexión a sus clientes. Muchas de las empresas suministradoras de energía eléctrica, disponen de sus propias redes de telecomunicación que conectan con sus transformadores y son usadas como red WAN. Los usuarios se conectan a la red a través de un módem PLC contenido en el contador eléctrico. Tanto el nodo base como el módem realizan las conversiones de la señal para poder distribuir las por las líneas eléctricas.

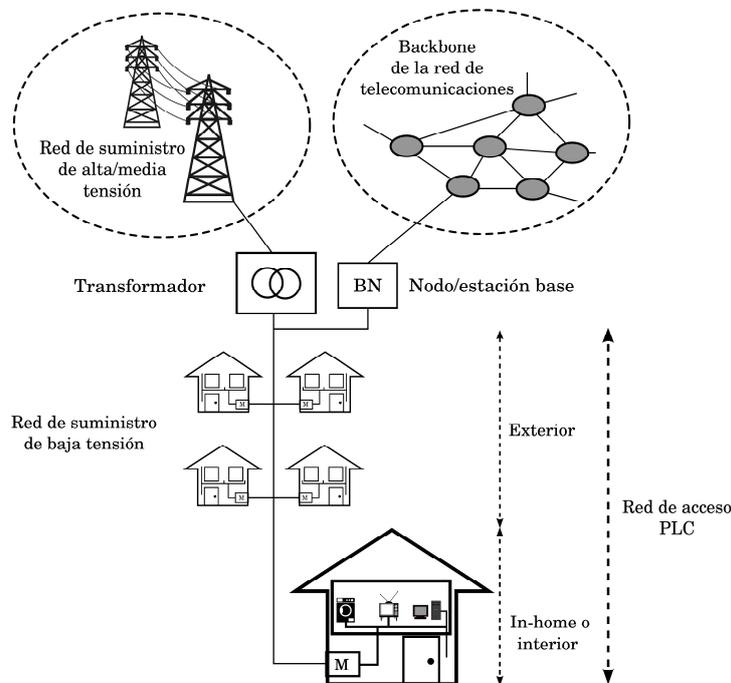


Figura 2. Estructura de la red de acceso PLC [16]

PRIME (*Powerline Intelligent Metering Evolution*) es un estándar de la tecnología PLC de banda estrecha, abierto y público, desarrollado por la *PRIME Alliance* [1], consorcio industrial que incluye distribuidoras eléctricas, fabricantes de dispositivos y otras empresas de servicios para redes inteligentes, con el objetivo de que los equipos de diferentes fabricantes puedan operar entre sí en una misma red de distribución eléctrica, en aras de obtener dispositivos de mayor calidad a menor precio.

## **2.2 INTRODUCCIÓN AL ESTÁNDAR**

El estándar PRIME surgió como soporte a la explotación de la aplicación PLC de telegestión de contadores, centrada en la capacidad de recolección de datos de consumo eléctrico por las compañías eléctricas, y para permitir el avance de la construcción de las redes eléctricas inteligentes o *Smart Grids*. La versión 1.3.6 de PRIME, a la que se hace referencia en este documento, está estandarizada por la ITU-T desde 2012.

PRIME define el funcionamiento de las capas física (PHY), de acceso al medio (MAC) y de control de enlace lógico (LLC). A nivel de capa física la red opera en la banda de CENELEC-A (cuyo rango de frecuencias comprende de 41,992 kHz a 88,867 kHz) empleando multiplexación OFDM con 97 portadoras y 3 tipos diferentes de modulación (DBPSK, DQPSK, D8PSK) pudiendo hacer uso o no del mecanismo de corrección de errores FEC (FEC ON, FEC OFF). A la combinación de la modulación y del modo FEC que se emplea para transmitir se le denomina modo de comunicación. Cada modo de comunicación se corresponde con la velocidad de transmisión y el modo de robustez empleados en la comunicación. Las velocidad o tasa de transmisión de bit se encuentra en el rango entre 21.7 kbps y 128.6 kbps. Cuanto más robusto es el método de comunicación empleado menor es la tasa de transmisión y viceversa. El mecanismo PRM (*PHY Robustness Management*) de la capa MAC de los nodos PRIME selecciona dinámicamente el modo de comunicación que garantice la ausencia de errores y la máxima velocidad en la transmisión.

Con respecto a la capa MAC, una subred PRIME se compone de dos tipos de nodos o dispositivos: nodo base (BN) y nodo de servicio (SN). La red sigue un comportamiento maestro-esclavo. Solamente hay un nodo base por subred, también denominado concentrador, que actúa como maestro, y varios nodos de servicio, los denominados contadores inteligentes, que actúan como esclavos.

Inicialmente, el nodo base, encargado de la gestión de los recursos y conexiones de la subred, constituye en sí mismo la subred, y el resto de los nodos deberán seguir un proceso de registro para unirse a la subred y poder enviar información. Se dice entonces que los nodos

de servicio se encuentran en estado desconectado, y su función principal es la de buscar una red cercana y tratar de unirse a ella. Tras el proceso de registro en una subred los nodos de servicio adoptan el estado terminal, en dicho estado son capaces de comunicar su tráfico tras el previo establecimiento de conexiones, pues la capa MAC está orientada a conexión. Un nodo en estado terminal puede ser promocionado por el nodo base al estado switch, de forma que pueda realizar las funciones de un nodo terminal y adicionalmente la conmutación o reenvío de tráfico entre dispositivos de la subred. En la Figura 3 se muestran los diferentes estados que puede atravesar un nodo de servicio.

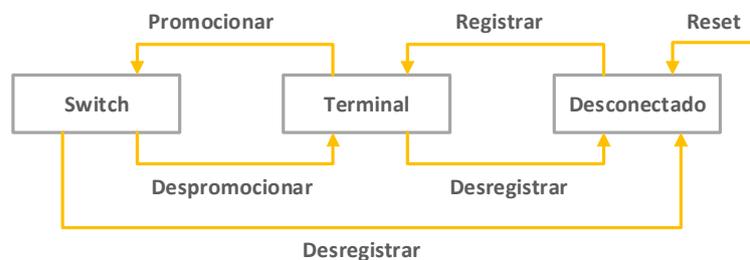


Figura 3. Estados de un nodo de servicio

La topología física de la subred es de tipo bus, es decir, se dispone de un único canal de comunicación (la línea de baja tensión) al cual se conectan todos los nodos de la red. De forma que todos los nodos comparten el mismo canal para comunicarse entre sí. Sin embargo, la subred adopta una topología lógica de tipo árbol, donde el nodo base constituye la raíz del árbol y los nodos de servicio son las hojas (nodos en estado terminal) o puntos de bifurcación (nodos en estado *switch*), como se muestra en la Figura 4.

Cada nodo de servicio posee un nivel en la topología lógica. Los nodos conectados directamente al nodo base poseen el nivel 0. Mientras que el nivel de cualquier nodo de servicio que no se encuentra conectado directamente al nodo base es el nivel del nodo *switch* a través del cual se conectan a la subred más uno.

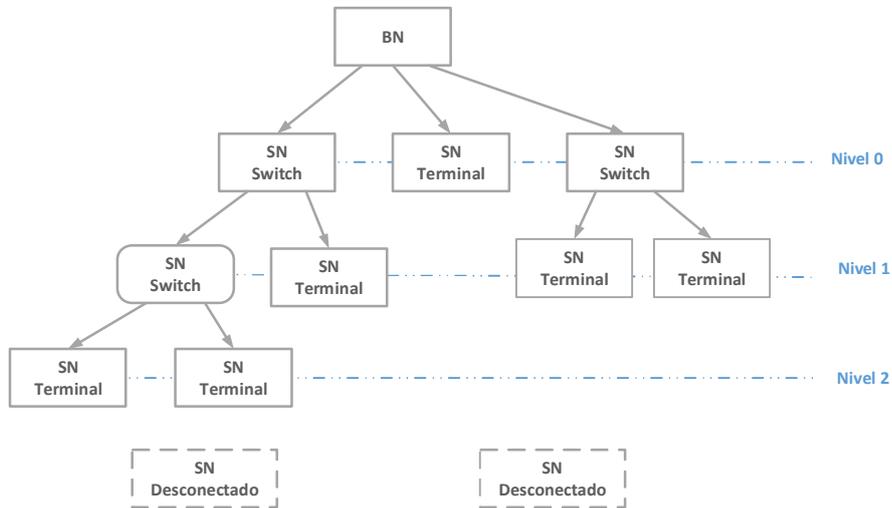


Figura 4. Estructura lógica de la red PRIME

La gestión del acceso al canal para la transmisión de los nodos es una de las funciones principales de la capa MAC. El nodo base y los nodos de servicio pueden acceder al medio para transmitir durante el periodo de contención compartido o *Shared-Contention Period* (SCP) o solicitar un período libre de contienda o *Contention-Free Period* (CFP) dedicado. El nodo base prescribe que mecanismo de uso deberá estar en vigor en cada momento y durante cuánto tiempo. Durante el SCP los nodos compiten por el medio de transmisión y el mecanismo CSMA-CA se encarga de la gestión de las colisiones que se producen cuando varios nodos intentan transmitir simultáneamente. Para la transmisión en CFP el nodo de servicio debe solicitar previamente al nodo base la asignación de un *slot* de tiempo periódico que garantice la transmisión del nodo sin tener que competir por el medio con el resto de nodos de la red. El estándar indica que el SCP es el mecanismo de transmisión de obligatoria implementación, y propone como mecanismo opcional el CFP. Actualmente no se tiene constancia de que el CFP haya sido implantado en el entorno real, aunque sí se han realizado estudios sobre el mismo, como el llevado a cabo en [6], donde se pone de manifiesto que la transmisión con el mecanismo CFP dota de calidad de servicios a las comunicaciones.

La capa de control de enlace lógico actúa de interfaz entre la capa de aplicación y la capa MAC, clasifica el tráfico asociándolo con su correspondiente conexión MAC. Se encarga de gestionar la fragmentación de paquetes, es decir, en caso de que la capa de aplicación trate de enviar un mensaje con una longitud mayor que la MTU, la capa LLC fragmenta el mensaje en paquetes más pequeños. Siendo la MTU la unidad máxima de transmisión, es decir, la mayor longitud de paquete, expresada en *bytes*, que puede ser admitida por la capa MAC.

La tecnología PRIME hace uso del estándar DLMS/COSEM en la capa de aplicación, regulado por la norma IEC 62056, que es utilizado sobre todas las tecnologías NB-PLC disponibles en el mercado como G3-PLC o M&M. Donde COSEM se corresponde con un perfil del protocolo de aplicación DLMS especialmente diseñado para la lectura de contadores.

La versión 1.4 del estándar expande el espectro de frecuencias utilizado, para poder operar en los mercados americano y asiático, así mismo incluye algunas funcionalidades para incrementar la robustez de la comunicación a nivel de capa PHY y de capa MAC, véase la Tabla 2.

Layer	Feature	PRIME V1.3.6	PRIME V1.4
PHY	Modulation	OFDM	OFDM
	Frequeny band	CENELEC Band (3-95kHz)	FCC Band (10-490kHz)
	Data rate	Up to 130kbps	Up to 1028.8kbps
	Forward Error Correction	Convolutional Coding + Interleaving (Optional)	Convolutional Coding + Interleaving (Optional)
	Robust Mode	No	Repetition Coder
MAC	Topology	Tree (using switches)	Tree (using switches)
	Network formation	Beacon discovery, Automatic promotion	Beacon discovery (longer) , Automatic promotion
	Multi-hop routing	Yes	Yes
	Keep-alive monitoring	Yes	Yes (with link quality info)
	Connection management	Yes	Yes
	Medium access	CSMA/CA	CSMA/CA
	ARQ	Selective ARQ E2E	Selective ARQ E2E
	Security	128-AES in CBC	128-AES in CBC
Aggregation	Optional in Switch Node	Optional in Switch Node	

*Tabla 2. Diferencias entre las versiones 1.3.6 y 1.4 de PRIME*



## Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

La principal contribución de este Trabajo Fin de Máster es la formulación de una serie de políticas de promoción tenidas en cuenta por el nodo base para la promoción de nodos terminales a nodos *switches*. Para poder evaluar el impacto producido por cada una de estas políticas en el rendimiento de la red, éstas han sido implementadas previamente en el simulador de redes *SimPRIME* (<https://www.iit.comillas.edu/jmatanza/SimPRIME/>). En este capítulo se hace una revisión de los estudios que se han llevado a cabo hasta ahora en relación a los criterios de promoción empleados por el nodo base, así como algunos de los entornos de simulación de este tipo de redes existentes a día de hoy.

### 3.1 ALGORITMOS DE PROMOCIÓN

Pese a que el estándar PRIME describe el proceso de promoción por el cual el nodo base permite a un nodo realizar funciones de retransmisión del tráfico proveniente de otros nodos de la red, no especifica el criterio mediante el cual el nodo base decide o no promocionar a un nodo terminal a *switch*, ni cuales son las posiciones óptimas para estos nodos. De esta forma cada fabricante dota al concentrador de su propio criterio de promoción, y poco se sabe de los mismos, puesto que es uno de los elementos que permite a los fabricantes diferenciarse de los otros.

Sin embargo, hace unos años ya se hizo un estudio en [17] con ayuda del simulador *SimPRIME*, el mismo que se emplea en para el desarrollo de este TFM, con doble objetivo: En primer lugar, analizar el efecto que produce la posición que ocupa un nodo *switch* en el rendimiento de la red, de acuerdo al estudio presentado en [5]. Adicionalmente, se propone un algoritmo que establece una relación entre la posición del nodo *switch* y el coste de transmisión, con el objetivo de optimizar el rendimiento de la red en términos de latencia.

Los mensajes de datos atraviesan varios *switches* en su camino al nodo base desde el nodo terminal emisor. De acuerdo con esto, el estudio sugiere que un mismo mensaje puede ser

enviado usando diferentes esquemas de modulación, es decir, el modo de comunicación empleado por el mensaje variará en función de las condiciones de cada enlace que atraviese. Por tanto, el tiempo de ida y vuelta del mensaje, denominado *roundtrip*, dependerá de la velocidad en cada enlace, así como de la longitud del paquete que se mantiene fija. El tiempo de propagación del mensaje no es tenido en cuenta ya que depende de la velocidad de la luz y distancias del orden de cientos metros.

En base a esto deducen que la velocidad de transmisión equivalente para el camino completo desde el nodo terminal hasta el nodo base es al menos tan lenta como la menor de las velocidades de enlace. Concretamente estudian un escenario muy básico consistente en una subred compuesta por cinco nodos de servicio como la mostrada en la Figura 5, en el que el nodo más alejado (TN5) transmite a través de un nodo *switch*. Para lo cual, se ha estudiado cual sería la mayor velocidad total de transmisión que se consigue en función del nodo de servicio intermedio que realice funciones de *switch*.

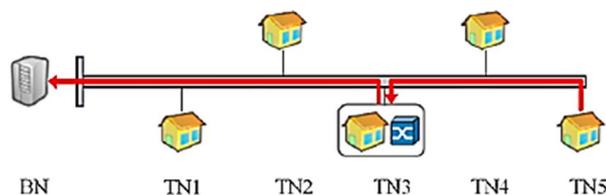


Figura 5. Escenario de estudio en [17] de una red PLC donde el nodo terminal TN3 promociona a switch.

Como es lógico cuanto más cerca esté el *switch* del nodo base, será requerido un modo de comunicación menos robusto y la velocidad en dicho enlace será mayor. Sin embargo, el *switch* se encontrará más alejado del nodo transmisor TN5 y la comunicación en este enlace es peor por lo que será requerido emplear una modulación más robusta y por tanto la velocidad será más lenta. De acuerdo a esto, determinan que se obtendría un resultado óptimo para una posición intermedia del nodo *switch*. De forma que las velocidades de los enlaces se compensen y se produzcan tiempos de latencia menores, resultando en un mejor rendimiento de la comunicación.

Sin embargo, la realidad es que el nodo base desconoce la posición de los nodos, es decir, no tiene conocimiento de la topología física de la subred. Por ello en dicho trabajo se propone un algoritmo basado en el coste recogido en los campos PRO.UPCOST y PRO.DNCOST del mensaje de solicitud de promoción PRO\_REQ\_S, que contienen un coste inversamente proporcional a la velocidad de transmisión. El estándar asigna un coste a cada uno de los modos de comunicación posibles. El algoritmo establecería el escenario óptimo como aquel que proporcione el menor coste para toda la red. Cuanto menor es el coste mayor es la velocidad. El coste total es igual a la suma de los costes de cada enlace. Sin embargo, el estudio considera diversos defectos como que el coste de transmisión propuesto por el estándar no es unívoco, esto es, hay dos modos de comunicación con el mismo valor de coste 1 pese a corresponder a dos velocidades de transmisión diferentes 85.7 y 64.3 kbps respectivamente, véase la Tabla 3. Señala otro defecto como que la velocidad equivalente para un camino en el que los enlaces emplean el mismo modo de comunicación se corresponde con la mitad de la velocidad de uno de los enlaces. Por ello proponen un nuevo conjunto de costes para cada modo de comunicación que mantiene una relación inversa y unívoca con la correspondiente velocidad. De esta forma determinan que el cálculo del coste mínimo de un escenario permitirá obtener la combinación más rápida.

FEC	DBPSK		DQPSK		D8PSK	
	<i>On</i>	<i>Off</i>	<i>On</i>	<i>Off</i>	<i>On</i>	<i>Off</i>
Raw data rate (kbit/s)	21.4	42.9	42.9	85.7	64.3	128.6
Cost as specified in PRIME	4	2	2	1	1	0
Cost proposed	6	3	3	1.5	2	1

*Tabla 3. Velocidades de transmisión, costes especificados en PRIME y costes propuestos en [17] para los diferentes modos de comunicación.*

Se simuló un escenario consistente en una línea de distribución que interconecta 30 medidores PRIME con un transformador MV/LV (*Medium to Low Voltage*) para el cual se supusieron diferentes longitudes de bus (300, 225 y 150 m), con una distribución uniforme de los nodos. De forma que las distancias entre los nodos son lo suficientemente largas como para que sea requerida la promoción de un nodo terminal a *switch* para que todos los nodos de la red puedan registrarse. El objetivo es mostrar la precisión del algoritmo propuesto. Se

confirmó que el escenario con el mínimo coste total se corresponde con aquel que presenta el mínimo valor de la mediana del *roundtrip*. Por tanto, consideran que el algoritmo descrito, y que resultaría fácil de embeber en un nodo base, daría lugar al mejor escenario en términos de latencia, pudiendo ser extendido a escenarios *multi-hop*, es decir, con más de un *switch*.

En el estudio mencionado varían la posición del nodo *switch* calculando el coste total mínimo de la red para cada una de estas posiciones del *switch*, pudiendo comprobar finalmente como la posición correspondiente al mínimo coste total da lugar al escenario con la menor latencia.

El nodo base desconoce la posición de los nodos de servicio de la subred, es por ello que se requiere del uso de algún tipo de métrica o variable de red que estén relacionadas de algún modo con las posiciones que ocupan los nodos en la red y permitan así deducir cuál sería la posición óptima para un nodo *switch* en la red. La posición óptima de un nodo *switch* será aquella que dé lugar al mejor rendimiento de la red en términos de latencias en la comunicación. El análisis de estas variables de red ha dado lugar a las diferentes políticas de promoción que se evalúan en este TFM.

En otro estudio realizado en [18] se evalúa la capacidad de una red PLC de banda ancha (BPL) con respecto a la posición de dos repetidores de la red. La función de estos repetidores es equivalente a la función de un nodo *switch* descrita en la especificación de PRIME. Sin embargo, pese a contemplar la presencia de ruido blanco Gaussiano en el canal, este estudio no tiene en cuenta aspectos como la gestión de los eventos telemáticos y de las conexiones. Lo cual nos conduce al análisis realizado en la sección 3.2 sobre herramientas de simulación, en el que se pone de relevancia la importancia del uso de un modelo de redes que permitan simular los escenarios de red de la manera más real posible.

### **3.2 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN DE REDES PRIME**

Se han llevado a cabo varios trabajos que proporcionan un análisis del despliegue de soluciones PLC en diferentes escenarios. No obstante, a pesar de ser precisos, la mayoría se

centran únicamente en la capa física de la arquitectura de comunicación y proporcionan como resultado curvas que representan la tasa de error de bit.

A continuación, se mencionan algunos de los trabajos desarrollados hasta el día de hoy, que han tratado el análisis del rendimiento de una red PLC. Es el caso del análisis llevado a cabo en [19] sobre las líneas de potencia *multi-hop*. Sin embargo, no tiene en cuenta el ruido del canal en la transmisión, y por tanto no se reflejan errores en la comunicación.

Hay un estudio en [20] que analiza la tasa de datos efectiva que se consigue en una red PLC sobre la red de baja tensión. Pero la tasa de error de bit en las comunicaciones es la misma para todos los nodos de la simulación independientemente de su posición, por lo que no refleja una situación real.

En [21] se propone un método para la abstracción de la capa física de las simulaciones mediante curvas que representan la tasa de error de paquetes (PER) en función del ratio señal-ruido (SNR). No obstante, para el cálculo de las curvas se emplea una longitud de paquete fija que tampoco conduce a una situación realista.

En [16] se presenta un simulador de redes PRIME basado en OMNeT++ similar al utilizado en este Trabajo Fin de Máster. Dicho simulador se utiliza concretamente para simular la telecarga de *firmware* en redes PRIME. Como en [21], este simulador también abstrae la capa PHY de las simulaciones a través de curvas de PER vs SNR. Además, para calcular la PER se toma el máximo tamaño de paquete posible, lo que penaliza al tráfico de control, que se suele caracterizar por el reducido tamaño de sus paquetes.

En [22] se muestra un estudio basado en un modelo también similar al utilizado en este Trabajo Fin de Máster. En dicho estudio se analiza el tiempo necesario para la lectura de un canal de 100 metros y una tasa de envío de datos de 64 kbps. Se tienen en cuenta las probabilidades de pérdida de los paquetes en la simulación, pero no se tienen en cuenta fuentes de ruido o atenuación en el canal.

El entorno de simulación sobre el que se llevará a cabo la implementación y posterior evaluación de los criterios de promoción de nodos terminales a *switches*, denominado

*SimPRIME*, ha dado lugar a un considerable número de publicaciones [7][23][8][10][9], así como la ya mencionada [17]. Entre las que cabe destacar la publicación resultante del Trabajo Fin de Grado de la autora de este TFM [6]. Este entorno de simulación combina Matlab y OMNeT++ para modelar la capa física, de acceso al medio y capas de control de enlace lógico de las redes NB-PLC PRIME. Dicho modelo recoge efectos como la función de transferencia del canal, fuentes de ruido, retrasos de transmisión, fragmentación, establecimiento de conexiones y acceso al medio, creando así un escenario de simulación lo más realista posible.

## Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

En este capítulo se explican los motivos que han propiciado el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster, así como los objetivos alcanzados. También se incluye la planificación temporal de las distintas actividades que han comprendido el proyecto y la estimación del coste de desarrollo del mismo.

### 4.1 JUSTIFICACIÓN

Como ya se mencionó anteriormente, la tecnología PLC de banda estrecha consiste en el uso de las líneas de baja tensión, que proporcionan suministro eléctrico a los clientes de las compañías eléctricas, como medio para el envío de información (actualmente, el dato del consumo a las compañías eléctricas). Sin embargo, el cableado eléctrico no fue diseñado para la transmisión de datos sino para la transmisión de potencia, por lo que en la banda de frecuencias en la que opera (CENELEC-A) presenta, entre otros, problemas de atenuación y de ruido que degradan la comunicación. Los problemas de atenuación se ven agravados por las distancias existentes entre el nodo emisor y el nodo receptor. Los problemas de ruido proceden de la electrónica de potencia de muchos de los equipos conectados a la red.

Para solventar el problema de la degradación de la señal, el estándar PRIME permite que los nodos de la red puedan realizar operaciones de reenvío o *switching*. Según el estándar, los nodos de servicio de la red o contadores inteligentes, encargados de comunicar el dato del consumo eléctrico al nodo concentrador o nodo base, pueden adoptar distintas funcionalidades. Un nodo en estado terminal es aquel que simplemente comunica su tráfico al nodo base. Un nodo en estado *switch* posee toda la funcionalidad de un nodo terminal y, adicionalmente, adopta la funcionalidad de reenvío de tráfico procedente de o dirigido a otros dispositivos de la subred.

El proceso por el que un nodo de servicio en estado terminal es autorizado por el nodo base para reenviar tráfico entre dispositivos se denomina proceso de promoción. Generalmente

dicho proceso responde a una petición de promoción enviada por un nodo terminal interesado. Ante la recepción de múltiples solicitudes de promoción, el estándar deja a discreción del nodo base la elección de una de ellas. El estándar no especifica el criterio en base al cual el nodo base promociona o no a un nodo terminal que lo solicita, o cuáles son las posiciones óptimas de los nodos *switch* (ya que esto de hecho puede depender de las condiciones de la red bajo estudio). De esta forma cada fabricante implementa su propio criterio de promoción en los nodos concentradores, convirtiéndose esto en un elemento diferenciador entre fabricantes, razón por la cual se tiene poco conocimiento acerca de los criterios empleados por cada uno de ellos.

Por ello este proyecto aborda la formulación y posterior evaluación de una serie de políticas o criterios en base a las cuales el nodo base decida a qué nodo terminal es más conveniente promocionar al estado de *switch*, de entre aquellos nodos que lo hayan solicitado.

Para poder evaluar las políticas formuladas éstas han sido previamente implementadas en el simulador *SimPRIME*, desarrollado como parte del trabajo de tesis doctoral de J.Matanza [5], que hasta el momento disponía de una única política de promoción por la cual el nodo base promociona al nodo del que recibe la primera solicitud de promoción. Dicha implementación ha permitido simular un escenario de red real en el que evaluar el impacto causado por cada política en el rendimiento de la red, en términos de tiempos de latencia de las comunicaciones. Permitiendo determinar cuáles son las políticas óptimas y qué variables de red afectan de forma significativa en la selección del nodo a promocionar. Lo cual permitirá la mejora en las comunicaciones de las redes PRIME, concretamente en la aplicación principal de este tipo de redes que es la recogida de datos del consumo eléctrico de los clientes a través de telegestión de contadores por parte de las compañías eléctricas.

## **4.2 OBJETIVOS**

El objetivo fundamental de este Trabajo Fin de Máster es la formulación de diferentes políticas de promoción, empleadas por el nodo base en la promoción de nodos terminales a nodos *switches*, en las redes PLC de banda estrecha regidas por el estándar PRIME. Así

como la evaluación del impacto causado por cada una de estas políticas en el rendimiento de la red, para lo cual se ha requerido el uso de un simulador de este tipo de redes denominado *SimPRIME* desarrollado por J.Matanza como parte de su tesis doctoral.

Para una adecuada consecución del objetivo principal, se ha requerido el cumplimiento satisfactorio de los siguientes subobjetivos:

- Revisión del estándar de comunicaciones PRIME, profundizando en el proceso de promoción.
- Análisis de las variables de red que resulten significativas en la selección de un nodo para ser promocionado a *switch*. Estas variables dan lugar a las diferentes políticas de promoción.
- Formulación y diseño de las políticas de promoción.
- Análisis del sistema de promoción que se encontraba implantado hasta el momento en el simulador.
- Diseño de los cambios requeridos en el proceso de promoción implantado hasta el momento.
- Implementación en el simulador de los cambios requeridos en el proceso de promoción para dar soporte a las políticas de promoción.
- Implementación en el simulador de una selección de las políticas de promoción formuladas.
- Análisis y diseño del escenario de red real.
- Validación de las políticas implementadas mediante la simulación del escenario de red.
- Análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones, para la evaluación del impacto originado por cada una de las políticas propuestas en el rendimiento de la red PRIME, con la posterior extracción de conclusiones.

### **4.3 PLANIFICACIÓN**

En el plan de trabajo mostrado en la

Figura 6 se recogen las distintas actividades que ha sido necesario realizar para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto de manera satisfactoria.

Se han llevado a cabo reuniones de seguimiento periódicas entre los directores de proyecto y el alumno, para la resolución de las dudas que hubiesen surgido durante el desarrollo y en las que se fijaban objetivos a corto plazo. Así mismo se han mantenido reuniones de seguimiento con el coordinador del proyecto, para evaluar la correcta consecución del proyecto, y se le ha hecho entrega de documentación descriptiva del proyecto (es el caso de los anexos A y B).

*DEFINICIÓN DEL TRABAJO*

TFM Evaluación de políticas de promoción de nodos Switch	2017				2018						
	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
<b>Organización y definición de la planificación</b>											
Reunión inicial con los directores de proyecto	✓										
<b>Análisis</b>											
Lectura estándar PRIME. Profundización en el proceso de promoción		✓									
Investigación y formulación de políticas de promoción			✓	✓							
Análisis del sistema de promoción implementado en SimPRIME			✓	✓							
Identificación de necesidades para el soporte de las políticas en SimPRIME			✓	✓							
<b>Diseño</b>											
Diseño de cambios a implementar en SimPRIME para el soporte de las políticas			✓	✓	✓						
Diseño de cada política de promoción a implementar			✓	✓	✓						
Diseño de escenarios de simulación									✓		
Diseño de scripts de Linux para correr las simulaciones									✓		
Diseño de ficheros de Matlab para la representación de resultados										✓	
<b>Desarrollo</b>											
Implementación de cambios necesarios para soporte de las políticas en SimPRIME						✓	✓				
Implementación de cada políticas de promoción en SimPRIME						✓	✓				
Tests unitarios						✓	✓				
Programación de scripts de Linux									✓		
Programación de ficheros de Matlab										✓	
<b>Implantación y Aceptación</b>											
Tests y resolución de errores tras la integración del código nuevo y el existente								✓	✓		
Resolución de errores de simulación para los escenarios de estudio									✓	✓	✓
Simulación de distintos escenarios de red de interés										✓	✓
Extracción y análisis de los resultados obtenidos										✓	✓
Extracción de conclusiones										✓	✓
Defensa del proyecto										✓	✓
<b>Documentación</b>											
Elaboración y entrega del Anexo A	✓	✓									
Elaboración y entrega del Anexo B					✓						
Elaboración de la memoria del proyecto						✓	✓	✓	✓	✓	✓
Entrega de la memoria											✓
Preparación de la presentación del proyecto											✓
<b>Gestión de proyecto</b>											
Gestión de cambios	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Figura 6. Diagrama del plan del trabajo de este TFM

## **4.4 ESTIMACIÓN ECONÓMICA**

A continuación, se presenta la estimación económica del proyecto, que se ha realizado en función de los recursos materiales y humanos que han intervenido en su desarrollo.

### **4.4.1 RECURSOS MATERIALES**

Para el desarrollo de este TFM era requisito el uso de un ordenador portátil, tanto para el desarrollo *software* como para la elaboración de la documentación. No se contabilizan las licencias de *software* utilizadas durante el proyecto puesto que tanto el entorno de desarrollo OMNeT++, como el *software* VirtualBox para la virtualización del sistema operativo Linux necesarios para llevar a cabo el desarrollo disponen de licencia pública. Las licencias de las herramientas Matlab y MSOffice son proporcionadas por la Universidad.

El precio de compra del portátil es de 688,88 € y la vida útil de un ordenador según lo establecido fiscalmente es de 4 años, no obstante, se ha de contabilizar únicamente la fracción de tiempo de dicho periodo en la que se ha llevado a cabo el proyecto, concretamente 11 meses. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que durante este periodo de tiempo el uso del ordenador no se ha destinado exclusivamente para la realización del proyecto, se estima que su uso ha sido de un 75%. De acuerdo con esto en E. 1 se muestra el cálculo del coste del portátil para la realización del proyecto, valorado en 118,4 €, que constituye el único coste material del proyecto.

$$E. 1 \text{ Coste\_ordenador} = ((688,88 \text{ €}/4 \text{ años})/12 \text{ meses}) \times 0,75 \times 11 \text{ meses} = 118,4 \text{ €}$$

### **4.4.2 RECURSOS HUMANOS**

El trabajo realizado se ha contabilizado en número de horas trabajadas. El coste de empresa establecido para un ingeniero junior desarrollador se establece en 40 € por hora trabajada. En la Tabla 4 se muestra un desglose mensual de las horas empleadas en el desarrollo del proyecto y el correspondiente coste. El coste total de los recursos humanos empleados para la realización del proyecto se valora en 34.480 €.

Mes	Año	Coste/hora	Horas	Coste (€)
<b>Septiembre</b>	2017	40 €	2	80
<b>Octubre</b>			4	160
<b>Noviembre</b>			8	320
<b>Diciembre</b>			8	320
<b>Enero</b>	2018		12	480
<b>Febrero</b>			12	480
<b>Marzo</b>			12	480
<b>Abril</b>			4	160
<b>Mayo</b>			280	11.200
<b>Junio</b>			280	11.200
<b>Julio</b>			140	5600
<b>Total</b>	-			<b>762 horas</b>

*Tabla 4. Coste por horas trabajadas mensualmente*

#### 4.4.3 PRESUPUESTO TOTAL

De acuerdo a los valores obtenidos en las secciones 4.4.1 y 4.4.2, se estima que el coste total del desarrollo de este TFM alcanza un valor de 34.480 €, como se indica en E. 2.

$$E. 2 \text{ Coste Total} = 118.4 \text{ €} + 34.480 \text{ €} = 34.598,4 \text{ €}$$



## Capítulo 5. ENTORNO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se realiza una breve introducción al entorno de simulación *SimPRIME* que se ha utilizado para el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster. Así mismo se describe brevemente la herramienta de simulación OMNeT++ cuyo manejo es esencial para poder realizar las implementaciones requeridas en este proyecto.

### 5.1 SIMULADOR SIMPRIME

*SimPRIME* es un simulador de redes PLC de banda estrecha regidas por el estándar PRIME, presentado en [24] y que fue desarrollado como parte de la tesis doctoral de J. Matanza [5], que recibió el premio de mejor tesis doctoral 2013.

Sobre dicho simulador se ha realizado el diseño e implementación del conjunto de políticas de promoción de nodos terminales a nodos *switches* que son el objeto de estudio de este proyecto. Dicha implementación ha permitido evaluar el impacto causado por cada una de las políticas de promoción en el rendimiento de la red, tras simular un escenario de red real que resulta de interés.

Se trata de un modelo de simulación multiplataforma, es decir, emplea dos herramientas para el modelado de las capas descritas en la especificación PRIME: el *software* matemático Matlab y el simulador de redes OMNeT++. Véase el esquema de la estructura del simulador en Figura 7.

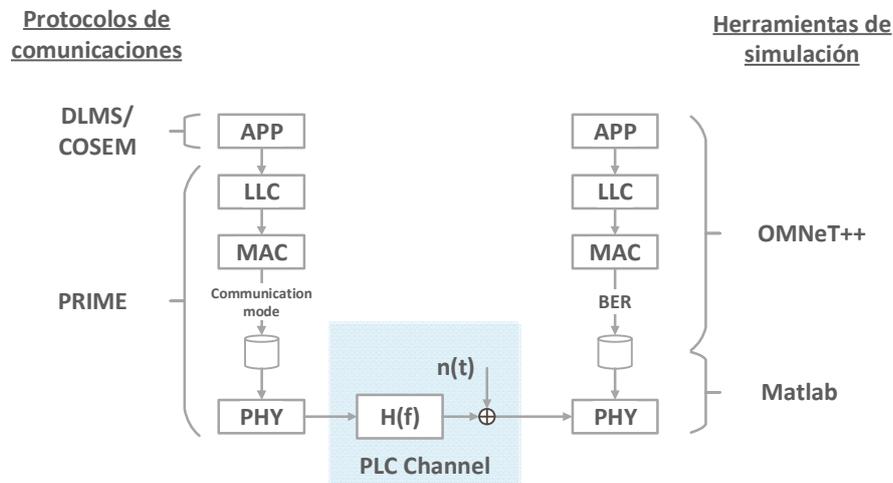


Figura 7. Estructura esquemática del simulador SimPRIME

Esta herramienta fue creada con el objetivo de la reproducción de un sistema de teledistribución desde el punto de vista de las telecomunicaciones capaz de lograr una simulación lo más real posible de dicho sistema. Es por ello que se ha dedicado mucho esfuerzo a la reproducción de los efectos que afectan a la capa física (PHY), esto incluye los efectos de la atenuación y del ruido descritos en [5], que se obtienen como resultado de simulaciones llevadas a cabo con Matlab. Mientras que la funcionalidad de las capas MAC y LLC definidas por PRIME están desarrolladas con el popular simulador de redes OMNeT++, así como la capa de aplicación descrita por el protocolo DLMS/COSEM ampliamente utilizado en el sector comercial para la telegestión de los contadores eléctricos.

La interfaz entre Matlab y OMNeT++ la constituyen: el valor de tasa de error de bit o BER, el SNR y el modo de comunicación para una transmisión. El mensaje generado por un nodo de la red es transmitido con la máxima potencia, establecida por el estándar PRIME en  $-3 \text{ dBW}$ . La potencia con la que fue transmitido el paquete experimenta atenuación en el trayecto de éste hacia todos los nodos de la red. Al tratarse de una topología física de tipo bus todos los nodos conectados a la subred reciben el paquete, no obstante, sólo es procesado por el nodo cuya dirección coincida con la dirección de destino del paquete. Las atenuaciones existentes entre cada par de nodos, emisor y receptor, han de ser previamente calculadas con Matlab usando la función de transferencia  $H(f)$  que caracteriza el canal PLC.

OMNeT++ obtiene dos parámetros del paquete recibido por un nodo: el SNR (calculado usando la potencia de la señal recibida y el nivel de ruido del escenario actual según E. 3) y el modo de comunicación empleado en la transmisión del paquete (DBPSK, DQPSK o D8PSK, con o sin FEC). Posteriormente realiza una búsqueda en las gráficas mostradas en la Figura 8, previamente almacenadas en la memoria del simulador, y recupera la curva BER vs. SNR correspondiente, de la cual extrae el valor de BER que corresponde al valor de SNR calculado previamente. El valor de BER obtenido se usa junto con la longitud del paquete para determinar si el paquete recibido contiene errores y por tanto debe ser descartado, o si el paquete es correcto y puede ser procesado.

$$E. 3 \quad SNR = Pot_{rx} - Pot_{ruido} = Pot_{tx} - Att - Pot_{ruido}$$

Además, la implementación también tiene en cuenta el retardo de propagación entre nodos. Los retardos se calculan dependiendo de las características físicas de los cables (la cual proporciona la velocidad de propagación), la longitud del mensaje y la distancia entre nodos. No obstante, ya que la velocidad de propagación es la de la luz, si se trata de distancias del orden de cientos de metros, los tiempos de propagación serán depreciables.

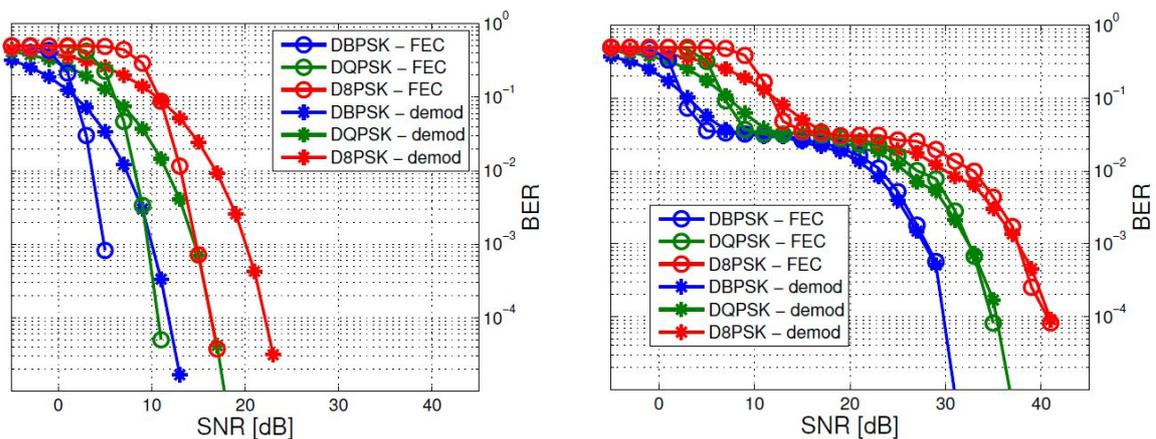


Figura 8. Curvas BER vs SNR de la red PRIME en presencia de ruido de fondo (izquierda) y de ruido impulsivo (derecha).

SimPRIME tiene en cuenta los dos principales problemas que afectan a la transmisión de información a través de las líneas de potencia. Estos son la atenuación y reflexión que modela

la función de transferencia del cable a partir de parámetros físicos del cable y de la topología de la red; y las fuentes de ruido presentes en el canal PLC, el ruido de fondo y el ruido impulsivo.

Matlab se usa para el cálculo de la función de transferencia entre cada par de nodos. La función de transferencia constituye la relación existente entre la potencia de la señal de entrada y la de salida del canal, y se encarga de la atenuación de algunas frecuencias. Los valores de atenuación derivados de la función de transferencia son almacenados en la memoria de OMNeT++ previo a la simulación y son leídos en tiempo de ejecución.

En la Figura 8 se muestran las curvas BER vs. SNR que indican el rendimiento que se consigue en la capa PHY de PRIME cuando el canal se ve afectado por el ruido de fondo y por el ruido impulsivo. El ruido de fondo se debe fundamentalmente a fuentes de ruido de baja potencia, tomado de las mediciones de [25]. El ruido impulsivo es debido a los conmutadores y rectificadores conectados a lo largo de la red eléctrica, tomado de [26] y [27]. Las diferentes curvas representan los diferentes modos de comunicación definidos en el estándar. El rendimiento obtenido usando una constelación con el menor número de símbolos (DBPSK) es más robusto al ruido que el obtenido si comparamos con uno con un mayor número de símbolos (D8PSK). Sin embargo, la velocidad de transmisión de DBPSK es tres veces menor que la obtenida con D8PSK.

Los desarrolladores llevaron a cabo una serie de estudios con el modelo. En [24] se simuló un modelo de red eléctrica europea típica, para la que se analizó el tiempo requerido para realizar la lectura de todos los contadores PRIME de la red, determinándose que el tiempo necesario depende del número de ramas de la red. En el mismo trabajo se desarrolló un experimento consistente en el análisis de la influencia de la posición de un nodo *switch* en el rendimiento global de la red.

En un trabajo posterior [17] se propone un algoritmo nuevo para la promoción de los nodos a estado *switch* de forma que se mejore la latencia de la red, donde de nuevo se contempla una red PLC típica europea. En otro trabajo [23] se ha estudiado el rendimiento para distintas

estrategias de lectura de contadores simultáneamente. Concretamente, el número de conexiones simultaneas que es capaz de mantener el nodo base.

## **5.2 HERRAMIENTA OMNET++**

Como ya se ha mencionado anteriormente, el simulador *SimPRIME* empleado para el desarrollo de este proyecto implementa mediante la herramienta de simulación OMNeT++ las capas MAC y LLC, regidas por el estándar PRIME, así como la capa de aplicación, descrita por el protocolo DLMS/COSEM. Puesto que el proceso de promoción sobre el que versa este TFM es un mecanismo perteneciente a la capa MAC, ha sido necesario el dominio de esta herramienta.

OMNeT++ es un entorno de simulación modular basado en el lenguaje de programación orientado a objetos C++, de uso extendido en la comunidad científica, cuyo principal objetivo es la implementación de simuladores de redes de telecomunicación. Se entiende “redes” en un sentido amplio de la palabra: las redes de medios guiados, inalámbricas, etc. Tiene como especialidad el dominio específico de redes de sensores, protocolos de Internet, modelos de actuación, etc. OMNeT++ ofrece un entorno de desarrollo basado en Eclipse, un entorno de tiempo de ejecución gráfico y otra serie de herramientas, así como extensiones para simulación en tiempo real, emulación de redes, integración de base de datos, o integración de SystemC. Este último es un lenguaje de descripción de sistemas, que abarca *software* y *hardware*, permitiendo su modelado y simulación, supliendo las carencias del C++ para con el modelado del *hardware* como son la ausencia de acontecimientos ordenados en el tiempo, la falta de concurrencia de los sistemas *hardware* o la falta de tipos de datos nativos de C++ adecuados para la descripción del *hardware*.

OMNeT++ está disponible para los sistemas operativos basados en UNIX, Windows y MacOSX y se distribuye bajo licencia pública para su uso en entornos académicos y educativos en [28]. Para uso comercial se requiere la versión OMNEST.

Un proyecto implementado en OMNeT++ consta principalmente de los siguientes ficheros:

- Fichero *makefile*, sirve de ayuda en el compilado y enlazado de los programas para la creación de ejecutables.
- Ficheros de extensión “.ini”, permiten indicarle al programa de simulación las posibles configuraciones de los escenarios de red a simular, puesto que en un mismo proyecto OMNeT puede haber varios modelos de redes definidos. Permite fijar el valor de parámetros para cada modelo, que serán leídos durante la simulación en tiempo de ejecución.
- Ficheros de extensión “.ned”, describen la topología de la red con el lenguaje de alto nivel NED.
- Ficheros con extensión “.h” y “.cpp”, implementan la funcionalidad de los nodos de la red.

OMNeT ofrece dos interfaces para llevar a cabo la ejecución de las simulaciones: el tradicional interfaz gráfico de usuario (*Tkenv*) o el interfaz de usuario de línea de comandos (*Cmdenv*). En el desarrollo del proyecto se ha utilizado *Tkenv* para realizar los tests y para la depuración de errores, mientras que *Cmdenv* ha sido utilizado para realizar las simulaciones de los escenarios de interés y obtener los ficheros de resultados.

Para realizar las simulaciones mediante línea de comandos se ha requerido implementar un fichero en lenguaje Shell de extensión “.sh” utilizado en un entorno Linux para llevar a cabo la ejecución de varias simulaciones de un mismo escenario de red variando el factor de aleatoriedad del programa. En dicho fichero se programan las sentencias para la construcción de los ficheros de resultados que contienen los parámetros de interés, como los tiempos de latencia o los nodos promocionados a *switch*, recogidos durante las simulaciones para cada escenario. Estos ficheros poseen extensión “.csv” para que puedan ser leídos por Matlab en el análisis de resultados.

### 5.2.1 FICHEROS “. NED”

El fichero de extensión “. ned” emplea el lenguaje NED de alto nivel para la definición de los diferentes tipos de nodos, denominados módulos, que constituyen la red, que se componen de:

- Parámetros, para la personalización del comportamiento de los módulos.
- Puertos, de entrada y salida, que permitan el intercambio de mensajes entre módulos.

Así como la definición de la red constituida por instancias de los tipos de módulo definidos previamente (submódulos), y las conexiones existentes entre ellos.

### 5.2.2 FICHEROS “. H” Y “. CPP”

La implementación de la funcionalidad de los nodos de la red y de otro tipo de elementos que intervienen en la actividad de la red se hace mediante ficheros escritos en lenguaje de programación C++. La división del código fuente del simulador PRIME en distintos ficheros supone una ventaja en cuanto al tiempo de compilación, pues en caso de realizar alguna modificación en el código únicamente será necesario compilar el fichero que se ha modificado, esto permite una mejor organización del código en clases y de este modo la reutilización del código en futuros proyectos. Además, facilita el reparto de tareas cuando participan varios programadores.

Se emplea un par de ficheros con el mismo nombre para cada uno de los distintos tipos de objetos o clases: un fichero de cabecera, con extensión “. h” y un fichero fuente, con extensión “. cpp”, ambos son ficheros de texto plano. El compilador no distingue entre uno y otro: la diferencia es únicamente conceptual. En los archivos de cabecera se incluyen la definición de clases, prototipos de funciones, variables globales, etc. Mientras que las implementaciones están contenidas en los ficheros de código fuente.

OMNeT++ dispone de una API de referencia, contenedora de clases y subclases que ayudan en la implementación de la estructura y funciones de los nodos de la red, como: cMessage,

cQueue, etc. Sin embargo, deberán ser definidos por el propio programador aquellos tipos de objetos que sean necesarios para el modelado de la red y que no se incluyan en la API.

## Capítulo 6. DESARROLLO

En este capítulo se describe y analiza el proceso de promoción propuesto por el estándar PRIME. A continuación, se formulan las políticas de promoción objeto de estudio de este TFM y se incluye una breve discusión sobre las políticas que se han seleccionado para ser implementadas en el simulador de redes *SimPRIME*. Posteriormente se describe la implementación realizada de las políticas de promoción y de los cambios necesarios para el soporte de las mismas, lo cual permitirá evaluar posteriormente el impacto causado por cada política en el rendimiento de la red.

### 6.1 ANÁLISIS DEL PROCESO DE PROMOCIÓN

PRIME se caracteriza por la autoconfiguración de la red a través de los mecanismos proporcionados por la capa MAC, como se detalla a continuación. Tal y como se mencionó anteriormente, los nodos de servicio de la subred se inician en estado desconectado, siendo la recepción de tramas *beacon* la única función que pueden realizar en dicho estado. Las tramas *beacon* o BPDU son emitidas periódicamente por el nodo base y retransmitidas por cada dispositivo *switch* de forma que sean recibidas por todos los nodos de servicio de la subred, ya que constituyen el mecanismo de sincronización de los nodos de servicio de una subred.

Las tramas *beacon* también son usadas por un nodo de servicio para detectar si deja de existir la comunicación con el nodo *switch* por medio del cual se conecta a la subred debido a un cambio en las características del medio o debido a un fallo. Si un nodo no recibe un número determinado de *beacons* establecido por el estándar, se declarará el enlace a su *switch* como inutilizable. En cuyo caso el nodo de servicio deberá dejar de mandar *beacons* de sí mismo si está actuando a su vez como *switch*. El nodo de servicio se declarará en estado de no registrado y deberá buscar una subred a la que unirse. Este mecanismo complementa al

mecanismo *keep-alive* usado por el nodo base y sus *switches* para determinar cuándo un nodo de servicio está perdido.

Como se mencionó anteriormente, no todos los nodos que componen la red NB-PLC son capaces de establecer una conexión directa con el nodo base para comunicarse. Esto es debido a que el medio empleado para la comunicación, el cableado de baja tensión, no es un medio propicio para la transmisión de información, pues presenta problemas de atenuación y ruido que degradan la comunicación. Por ello en una red PRIME existen los nodos *switch* encargados de la repetición del tráfico desde y hacia el nodo base, de tal forma que todos los nodos en una subred puedan comunicarse con el nodo base. Un nodo *switch* es un nodo de servicio de la red que ha sido promocionado por el nodo base del estado terminal en el que se encuentra, únicamente realizando funciones de transmisión y recepción de tráfico, al estado de *switch*, permitiéndole así además realizar funciones de retransmisión del tráfico proveniente de otros nodos de la red.

Cada nodo de servicio de la subred posee una tabla con los identificadores SID (*Switch Identifier*) de los *switches* de los cuales recibe tramas *beacon*. Un nodo desconectado puede seleccionar cualquier nodo *switch* de la tabla para continuar con el proceso de registro en la subred transmitiendo un paquete de control de tipo REG al nodo base, indicándose el nodo *switch* a través del cual el nodo de servicio tiene la intención de llevar a cabo su comunicación. A través de la tabla de *switches* un nodo se mantiene actualizado sobre la calidad de la señal de recepción de los nodos *switch* distintos de aquel al que está conectado, lo que posibilita cambiar el punto de conexión con la subred si la calidad del enlace al punto actual de conectividad se degrada por debajo del nivel de aceptación.

A continuación, se describe detalladamente el proceso de promoción, reflejado de forma esquemática en la Figura 9 para más claridad del lector.

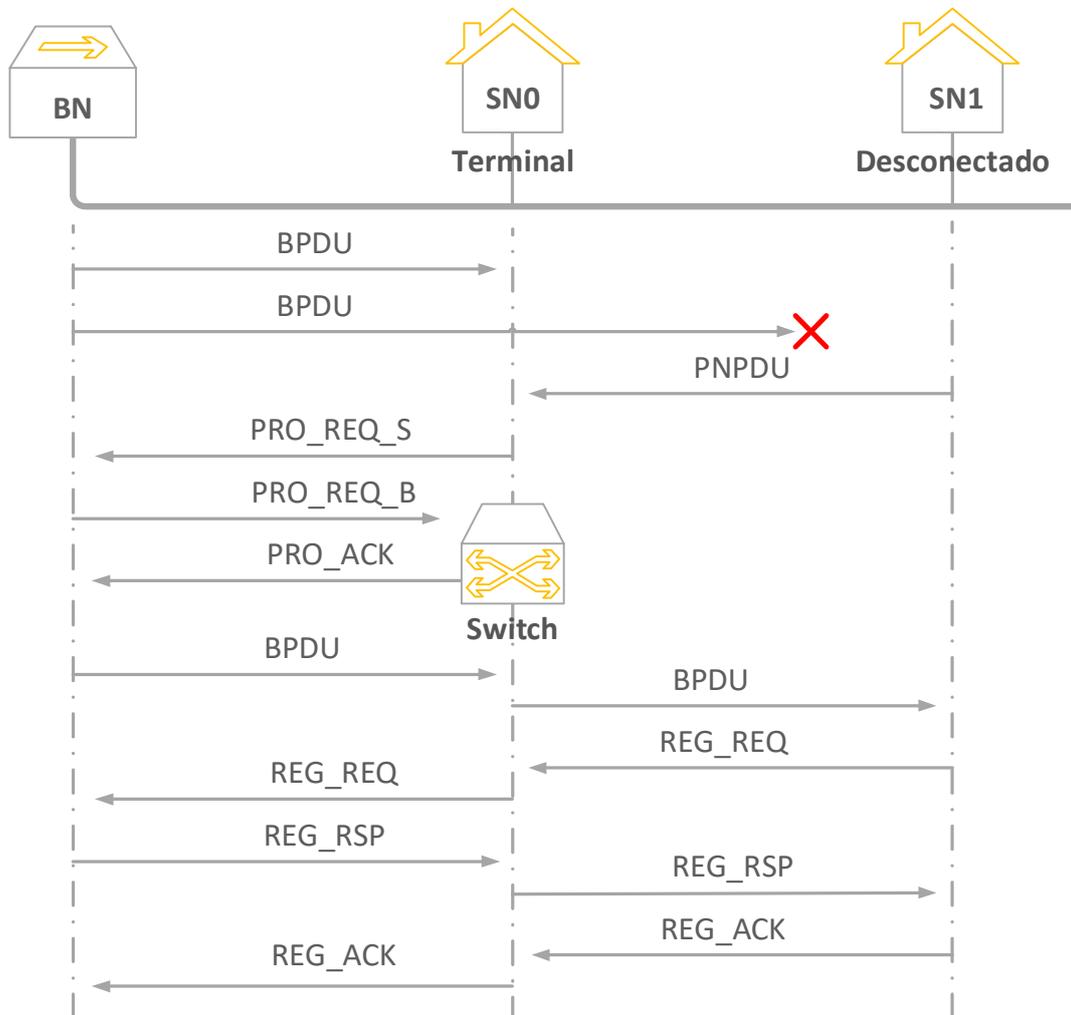


Figura 9. Diagrama del proceso de promoción

Inicialmente un nodo de servicio en estado desconectado escuchará en el canal durante al menos un tiempo definido por el estándar, antes de determinar que no se reciben tramas *beacon*. En cuyo caso el nodo de servicio enviará tramas PNPDU, requiriendo la promoción de cualquiera de los nodos terminales cercanos. Las tramas *promotion needed* o PNPDU son enviadas por los nodos desconectados que no son capaces de comunicarse con ninguno de los nodos *switch* existentes, indicando la necesidad de que promocióne cualquiera de los nodos terminales vecinos para así poder unirse a la subred. Son transmitidos por nodos

desincronizados (puesto que no reciben tramas *beacons*) y por tanto son propensos a crear colisiones.

Un nodo terminal tras la recepción de una trama PNPDU envía la correspondiente solicitud de promoción PRO\_REQ\_S al nodo base, para el cual el campo PRO.PNA del mensaje contiene la dirección MAC (EUI-48) del dispositivo emisor de la PNPDU y el campo PRO.NSID toma el valor 0xFF, que significa aún sin asignar. El nodo base se mantiene a la escucha de peticiones de promoción durante un periodo de tiempo, al cual se ha denominado ventana de escucha. Transcurrido dicho periodo el nodo base examina las solicitudes recibidas y decide a que nodo terminal promocionar al estado de *switch*, al cual le enviará un mensaje PRO\_REQ\_B de respuesta, con el campo del mensaje PRO.NSID conteniendo el identificador de *switch* que le asigna. El mensaje PRO\_REQ\_B requiere del acuse de recibo con un mensaje PRO\_ACK. El resto de los nodos no recibirán ninguna respuesta a la petición de promoción, para evitar saturar el tráfico en la red.

Sin embargo, el estándar no especifica el criterio mediante el cual el nodo base decide o no promocionar un nodo terminal al estado de *switch*, ni cuales son las posiciones óptimas para estos nodos. Por ello este TFM aborda la formulación y evaluación de una serie de políticas o criterios de promoción en función de las cuales el nodo base decidirá que nodos son los más adecuados para ser promocionados a *switch*.

## **6.2 POLÍTICAS DE PROMOCIÓN**

Como se ha mencionado en la sección anterior, el estándar PRIME no indica cual es el criterio seguido por el nodo base para promocionar un nodo en estado terminal al estado de *switch* para que así pueda realizar funciones de retransmisión de tráfico. Tampoco indica cuáles son las posiciones óptimas para estos nodos, ya que depende en gran medida de la topología física y lógica de la red. Por ello este TFM propone un conjunto de posibles políticas de promoción, con el fin de implementarlas en el nodo base de un simulador de redes PRIME para posteriormente evaluar el impacto producido por cada una de ellas en el rendimiento de la red, en términos de latencias de las comunicaciones.

De acuerdo con la topología física de una subred PRIME, véase el ejemplo de escenario de red de la Figura 10, un nodo próximo al nodo base establecerá una comunicación rápida con éste (comunicación *uplink*) y una comunicación lenta con los nodos más alejados que se encuentran por debajo de él (comunicación *downlink*). Mientras que un nodo que se encuentre alejado del nodo base y próximo al fin de la red, mantendrá con el nodo base una comunicación lenta y una comunicación más rápida con los nodos que se encuentran ubicados por debajo de él. Parece lógico pensar que la posición óptima para ubicar un nodo *switch*, conocidas las posiciones de los nodos, sería un punto intermedio entre el nodo base y el nodo destino, tal y como se demostró en el estudio [17] mencionado en el Capítulo 3.

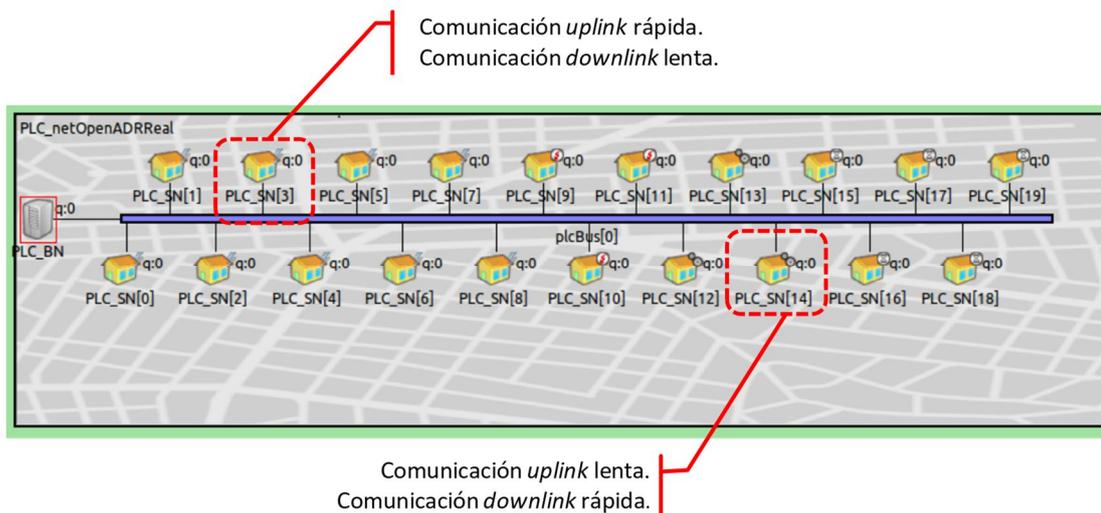


Figura 10. Ejemplo de topología física de la red

Sin embargo, el nodo base desconoce la posición que ocupan los nodos en la red. Por ello se ha formulado una serie de métricas que tienen en cuenta variables de red que se considera que podrían proporcionar información al nodo base sobre cuál sería la posición óptima a ocupar por un nodo *switch* o, dicho de otra manera, cuál sería el nodo elegido para promocionar, de entre aquellos que lo hayan solicitado previamente, que favorecería que las comunicaciones de la red se llevaran a cabo lo más rápido posibles. Así mismo se ha contemplado varias métricas ajenas a los eventos de la red, que tienen en cuenta el factor de la aleatoriedad. De esta forma se podrá evaluar si la elección del nodo óptimo depende de las condiciones de la red y qué variable de red contribuye de forma más significativa a esta

decisión, o si por el contrario se trata de una decisión ajena a las condiciones de la red y es una cuestión de aleatoriedad.

### **6.2.1 VARIABLES DE RED**

A continuación, se resume el conjunto de variables de red tenidas en cuenta en la formulación de algunas de las políticas de promoción enunciadas en el apartado 6.2.2, de las cuales se desconoce cuan significativas son a la hora de seleccionar un nodo para promocionar a *switch* y el impacto que tendrá posteriormente en la red.

- Latencia: es el retardo debido a la demora en la propagación y transmisión del paquete en la red.
- Jitter: constituye una medida de calidad de servicios en telecomunicaciones. Es la variabilidad que experimenta la latencia, refleja el tráfico de la red. Si el *jitter* es elevado significa que hay un nivel elevado de tráfico en la red.
- SNR: la relación señal/ruido expresado en *dB* se define como la proporción existente entre la potencia de la señal transmitida y la potencia de ruido que corrompe la señal.
- Modo de comunicación: lo constituye el esquema de modulación y el modo FEC empleado en la transmisión. Está relacionado con el SNR, puesto que para un valor de SNR se busca cual es el modo de comunicación que proporciona la menor tasa de error de bit (BER).
- Topología lógica de la red: determina el número de saltos de la red entre cada par de nodos.

## 6.2.2 FORMULACIÓN DE POLÍTICAS DE PROMOCIÓN

A continuación, se formulan las políticas de promoción que se ha considerado que podrían guardar relación con la elección óptima de un nodo terminal para su promoción a nodo *switch*:

- First Come First Served (FCFS): el nodo base promocionará al nodo terminal emisor de la primera petición de promoción recibida durante el tiempo de ventana de escucha.
- Last Come First Served (LCFS): el nodo base promociona al nodo terminal emisor de la última petición de promoción recibida durante el tiempo de ventana de escucha.
- Round Robin (RR): el nodo base elegirá de forma aleatoria al nodo terminal a promocionar de entre aquellos nodos que lo hayan solicitado durante el tiempo de ventana de escucha.
- Round Robin con memoria: el nodo base selecciona a qué nodo terminal promocionar en base al número de veces que lo haya solicitado previamente en anteriores ventanas de escucha. Inicialmente y en casos de empate se elegiría al nodo de forma aleatoria.
- SNR: el nodo base aborda la promoción de un nodo terminal, de entre aquellos que lo han solicitado durante el tiempo de ventana, en base a la figura de la relación señal-ruido de la comunicación en la red. De acuerdo con esto se distinguen dos casos:
  - El nodo base promocionará al nodo terminal del que percibe una mayor relación señal-ruido en la comunicación.
  - El nodo base promocionará al nodo terminal que percibe la mayor relación señal-ruido en la comunicación con el nodo desconectado que le pide promocionar.

- **COST**: el nodo base promocionará a un nodo terminal, de entre aquellos que lo han solicitado durante el tiempo de ventana, en base a la figura del coste de la comunicación de subida (UPCOST), de la comunicación de bajada (DNCOST) o del coste medio de ambas direcciones de la comunicación (MEANCOST). El coste representa el modo de comunicación empleado que, como se mencionó anteriormente, lo constituye la modulación y el modo FEC empleados, véase la Tabla 5. Será el menor coste el que determine a cuál de los nodos promocionar, pues un coste bajo se corresponde con un medio de comunicación rápido. Lo ideal es que la transmisión de un nodo ocupe el canal el menor tiempo posible, esto dependerá del número de saltos (nodos *switch* o retransmisiones) y del modo de comunicación empleado. Pues como se indica en el estándar el coste total de una comunicación es la suma de los costes de los enlaces que se atraviesa durante dicha comunicación. Otro aspecto a tener en cuenta es que el coste de subida y el de bajada no han de ser el mismo, debido a que los valores de SNR en la subida y en la bajada pueden ser diferentes y por tanto el modo de comunicación empleado variará.

<b>Modo de comunicación</b>	<b>Coste</b>
8PSK/FEC OFF	0
QPSK/FEC OFF	1
BPSK/FEC OFF	2
8PSK/FEC ON	1
QPSK/FEC ON	2
BPSK/FECON	4

*Tabla 5. Modo de comunicación el correspondiente coste según PRIME*

- **JITTER**: El nodo base promociona, de entre los nodos que lo han solicitado durante el tiempo de ventana, al nodo terminal con el que mantiene una comunicación con la menor variación del retardo o *jitter*. Dicho parámetro resulta de gran importancia en las comunicaciones en tiempo real.

- LATENCY: El nodo base promociona, de entre los nodos que lo han solicitado durante el tiempo de ventana, al nodo terminal con el que mantiene una comunicación para la cual registra los menores valores de las recientes latencias.

Para el cálculo del *jitter* y de la latencia, se hace uso de los datos registrados durante el proceso *keep-alive* entre el nodo base y el nodo terminal. Dicho proceso consiste en el intercambio periódico de mensajes de control ALV en ambas direcciones, que permiten detectar cuando un nodo abandona la subred por cambios en el cableado de la red o por errores fatales de los que no puede recuperarse.

### **6.2.3 SELECCIÓN DE POLÍTICAS A IMPLEMENTAR EN *SIMPRIME***

Ha sido necesario realizar una selección de las políticas formuladas en el apartado anterior para su implementación en el simulador *SimPrime*, pues debido al marco temporal del proyecto no resultaba viable la implementación de todas ellas.

Así pues, se ha decidido implementar las políticas FCFS, LCFS y RR que emplean distintas métricas que dependen del factor de la aleatoriedad.

La política RR con memoria tiene en cuenta el factor de aleatoriedad y requiere del uso de *buffer* de memoria para registrar el número de veces que los nodos han solicitado promocionar sin éxito; esta política es la que mayor coste computacional requería debido a su complejidad, por lo que se ha optado por no implementarla.

Se ha decidido implementar las tres políticas que tienen en cuenta el coste en la comunicación (UPCOST, DNCOST, MEANCOST), en lugar de implementar las políticas que tienen en cuenta el SNR. Puesto que el coste es un parámetro que ya contempla el SNR, además de la topología lógica de la red, pues, como se ha mencionado antes el SNR es tenido en cuenta en la elección del modo de comunicación.

Por último, se ha optado por la implementación de las políticas JITTER y LATENCY que tienen en cuenta las variables de red: retardo y variación de retardo, respectivamente.

La Tabla 6 relaciona las políticas de promoción, seleccionadas para su implementación en el simulador *SimPRIME*, con la métrica empleada por cada una de ellas.

<b>Métrica utilizada</b>	<b>Política de promoción</b>
Promociona al nodo emisor de la primera/última solicitud recibida durante el tiempo de ventana.	FCFS/ LCFS
Promociona aleatoriamente a un nodo de entre los nodos emisores de las solicitudes recibidas durante el tiempo de ventana.	RR
Promociona al nodo emisor de la solicitud recibida durante el tiempo de ventana con menor valor de coste de subida/bajada/medio.	UPCOST/ DNCOST/ MEANCOST
Promociona al nodo emisor de la solicitud recibida durante el tiempo de ventana con menor valor de <i>jitter</i> .	JITTER
Promociona al nodo emisor de la solicitud recibida durante el tiempo de ventana con menor valor de latencia.	LATENCY

*Tabla 6. Métrica empleada por cada política de promoción seleccionada.*

*FCFS (First Come First Served), LCFS (Last Come First served), RR (Round Robin)*

### **6.3 IMPLEMENTACIÓN**

Como se ha mencionado anteriormente la implementación de las políticas de promoción seleccionadas se ha llevado a cabo en el simulador *SimPRIME* descrito en el Capítulo 5. El simulador cuenta hasta el momento con un conjunto de trece ficheros con extensión “.ned” que describen la topología de la red. Las clases *DLMSCOSEM.ned*, *PLCLLC.ned* y *PLCMAC.ned* reúnen para cada una de las capas de la arquitectura de comunicación de un nodo PRIME la definición de los parámetros de entrada a la simulación y los puertos de entrada y salida con las capas colindantes. La conexión de las diferentes capas y su unificación en un solo nodo tiene lugar en el fichero *PLCBaseNodeDLMSCOSEM.ned* para el nodo base y en el fichero *PLCServiceNodeDLMSCOSEM.ned* para un nodo de servicio. En lenguaje de programación C++ se encuentran implementadas treinta y cinco clases.

Como se mencionó anteriormente cada clase la componen dos ficheros, uno de tipo “.h” que contiene la definición de la clase y de los atributos, constructores y métodos correspondientes, para cada tipo de objeto que participa en la descripción de la red. El otro fichero es de tipo “.cpp” y contiene la implementación de los diferentes métodos y constructores de cada clase. La funcionalidad de cada una de las capas común a todos los nodos de la red se encuentra descrita en las clases *PLCMAC.cpp*, *PLCLLC.cpp* y *DLMSCOSEMApp.cpp*. De cada una de estas clases se derivan dos clases herederas que redefinen aquellos métodos cuya implementación es diferente según se trate del nodo base o de un nodo de servicio. La clase denominada *global\_variable.h* contiene los valores que toman una serie de variables estáticas que comparten varias clases del simulador. Además, el simulador contiene cinco ficheros con extensión “.msg” que modelan los mensajes intercambiados entre las distintas capas de comunicación.

En dicho simulador ya se encontraba implementado el proceso de promoción descrito en la sección 6.1 definido por el estándar PRIME. Sin embargo, el estándar deja a discreción de los fabricantes el criterio empleado por el nodo base para promocionar un nodo terminal a nodo *switch*. En el simulador en cuestión se encontraba implementado el criterio de promoción al que en este TFM se ha denominado FCFS (*First Come First Served*), y que se ha decidido mantener para su posterior evaluación y comparación con el resto de políticas seleccionadas.

La implementación realizada ha requerido modificar el código existente hasta el momento, concretamente, la estructura de la ventana de escucha para que soporte todas las políticas. Con el concepto de ventana de escucha se hace referencia al espacio de tiempo durante el cual el nodo base “escuchará” los mensajes del tipo PRO\_REQ\_S de aquellos nodos terminales que solicitan promocionar al estado de *switch*. Una vez concluido dicho espacio de tiempo el nodo base dejará de escuchar peticiones de promoción y ejecutará la política de promoción sobre los nodos que solicitaron promocionar durante la ventana de escucha. Solamente se promociona a un nodo terminal al estado de *switch* por cada ventana de escucha. Una vez que el nodo base determine a cuál de los nodos promocionar se pondrá de

nuevo a la escucha de nuevas peticiones de promoción iniciándose así una nueva ventana de escucha.

La ventana de escucha se encuentra implementada en la clase *PLCMACBN.cpp*, donde se encuentra programada la funcionalidad del nodo base a través de diferentes métodos o funciones.

La ventana de escucha una vez modificada presenta la estructura mostrada en la Figura 11, donde las variables *interPromotion\_f* y *firstPRO* son atributos de la clase *PLCMACBN.cpp*. Concretamente *interPromotion\_f* es una variable booleana que indica si el nodo base se encuentra a la escucha de peticiones de promoción. Mientras que *firstPRO* es una variable booleana usada para indicar si la solicitud de promoción recibida por el nodo base es la primera de la ventana de la escucha.

Cuando el nodo base se inicia, asigna el valor *true* a ambas variables, *interPromotion\_f* y *firstPRO*, indicando que se encuentra a la espera de recibir la primera solicitud de promoción. Cuando se produce la recepción de la primera solicitud *PRO\_REQ\_S* el nodo base asigna el valor *false* a la variable *firstPRO*, y programa un *timer* que indique el fin de la ventana de escucha, quedando a la espera de recibir más solicitudes de promoción. Cuando expira el *timer* de la ventana de escucha el nodo base cambia el valor de la variable *interPromotion\_f* a *false*, de forma que a partir de este momento no escuchará más solicitudes de promoción, pues es el momento de ejecutar la correspondiente política de promoción. Tras promocionar el nodo a *switch* se vuelve a activar la escucha de solicitudes de promoción, y se repite de nuevo el proceso.

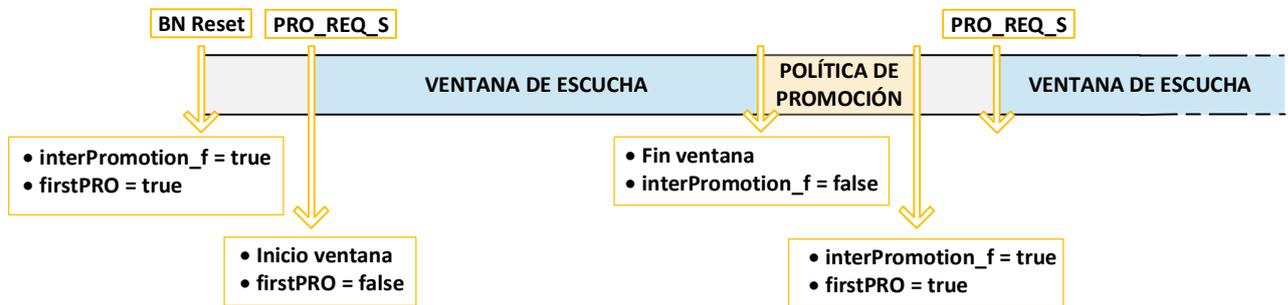


Figura 11. Estructura de la ventana de escucha

La variable *firstPRO* sirve para que se lleve a cabo la programación del *timer* del fin de la ventana de escucha únicamente cuando se reciba el primer mensaje de tipo `PRO_REQ_S` de la ventana.

Durante el proceso de promoción el nodo base requiere del uso de tres listas enlazadas del tipo *SwitchList* que reciben los nombres de: *promotingSwitches*, *promotedSwitches* y *promotionRequestedSwitches*. La lista *promotingSwitches* contiene los nodos terminales que se encuentran en espera de completar su proceso de promoción a nodos *switch*. En la lista *promotedSwitches* se almacenan los nodos que han sido promocionados a *switch*. La lista *promotionRequestedSwitches* es una nueva incorporación requerida por el nodo base para registrar los nodos terminales que han solicitado promocionar durante la ventana de escucha actual, así como la información requerida por las políticas para decidir el nodo al que promocionar.

### 6.3.1 RECEPCIÓN DE UN MENSAJE `PRO_REQ_S`

Cuando el nodo base recibe una solicitud de promoción `PRO_REQ_S` de un nodo terminal, su recepción será tratada por el método *processReceivedPRO\_REQ\_S*. Como se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 12, tras la recepción del mensaje se evalúa el valor del atributo *interPromotion\_f*, si es *false* el nodo base ignorará el mensaje y finaliza la función. Si, por el contrario, el valor de *interPromotion\_f* es *true* quiere decir que el nodo base se encuentra a la escucha de solicitudes de promoción, y procede a recopilar la información contenida en los campos del mensaje de control PRO. Los campos más

significativos son: el identificador *origLNID* del nodo terminal transmisor del mensaje, el coste total de subida *upCost* y el coste total de bajada *dnCost* que ha supuesto la comunicación entre el nodo base y el nodo terminal, y la dirección MAC *prnEUI48* del nodo desconectado que requiere la promoción del nodo *origLNID* para así poder unirse a la subred.

A continuación, el nodo base comprueba si el nodo *origLNID* que solicita promocionar se encuentra ya en la lista *promotingSwitches* esperando a que su proceso de promoción concluya, en cuyo caso no se continúa con el proceso y finaliza la función. En caso contrario, se inserta el nodo *origLNID* en la lista *promotionRequestedSwitches* a la espera del fin de la ventana.

Por último, se evalúa el valor que toma la variable *firstPRO*, en caso de que sea *false* finaliza la función. Si *firstPRO* es *true* significa que el mensaje *PRO\_REQ\_S* recibido es el primero de la ventana, por tanto, se trata del inicio de la ventana de escucha y se ha de programar un *timer* que indique el fin de la ventana transcurridos los 200 segundos de duración de la ventana. Además, será necesario asignarle el valor *false* a la variable *firstPRO*, para que en las próximas recepciones de mensajes que tengan lugar durante la ventana de escucha no se programe el *timer* de fin de ventana.

La programación de un *timer* en OMNeT++ se realiza a través de la función *scheduleAt*, que recibe como argumentos el instante de tiempo de la simulación en el que expirará el *timer* y un *self-message*. Los *self-messages* son mensajes que el módulo se envía a sí mismo. La recepción del *self-message* denominado *interPromotionMsg* le indica al nodo base que ha expirado el *timer* de fin de ventana.

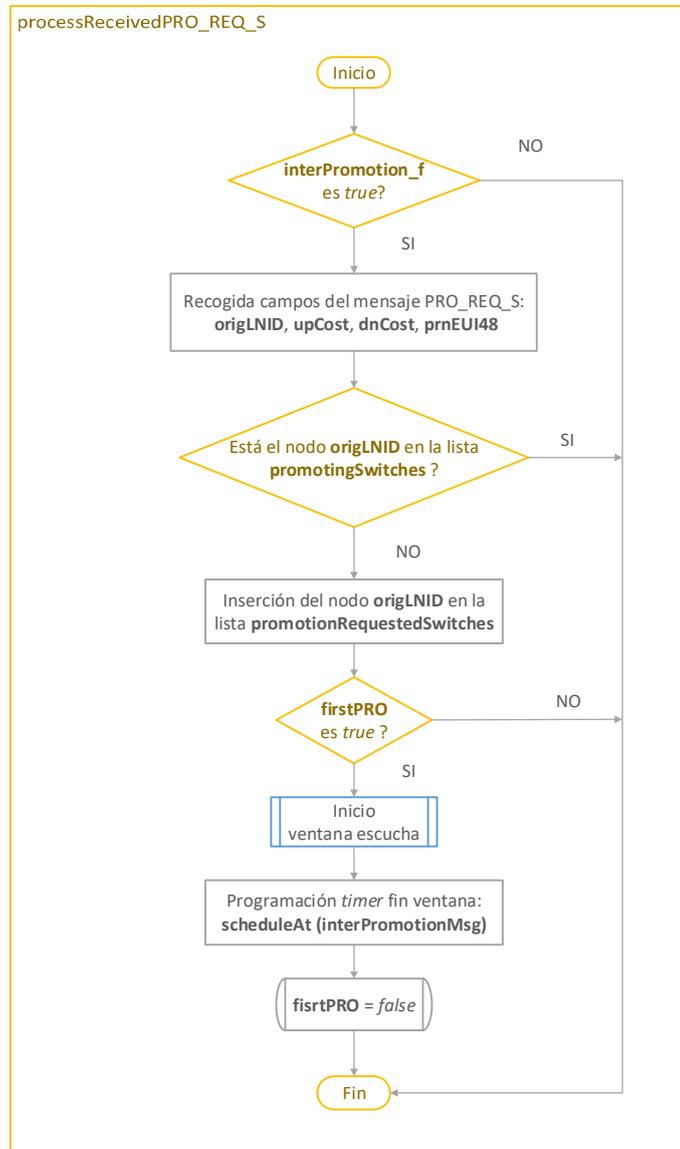


Figura 12. Diagrama de flujo del método de recepción del mensaje PRO\_REQ\_S

### 6.3.2 FIN DE LA VENTANA DE ESCUCHA

El método *handleInterPromotion\_Msg* es usado por el nodo base para tratar la recepción del mensaje *interPromotionMsg* que indica el fin de la ventana de escucha. Como se puede ver en el diagrama de flujo de la

Figura 13, cuando expira el *timer* de fin de ventana el nodo base asigna a la variable *interPromotion\_f* el valor *false*, indicando que ha concluido la escucha de mensajes

PRO\_REQ\_S. De esta forma el nodo base ignorará las solicitudes de promoción que reciba hasta el inicio de una nueva ventana.

A continuación, el nodo base deberá ejecutar la política de promoción. Sin embargo, previamente invoca al método *updateLatencyAndJitter*, que registra los valores más recientes de latencia y *jitter* para la comunicación entre cada uno de los nodos que se encuentran representados en la lista *promotionRequestedSwitches* y el nodo base. Estos valores de *jitter* y latencia serán requeridos por las políticas de promoción JITTER y LATENCY, tal y como se indica más adelante.

A través del método *checkBestSNForPromotion* el nodo base aplica la política de promoción que corresponda. Decide así a que nodo terminal promocionará a *switch* de entre aquellos que lo solicitaron durante la ventana de escucha. Una vez decidido el nodo terminal *destLNID* al que va a promocionar borra el contenido de la lista *promotionRequesteSwitched*, pues cada ventana de escucha es independiente de lo ocurrido en las ventanas anteriores.

El nodo base asignará al nodo *destLNID* un identificador de nodo *switch* o SID, y lo insertará en la lista *promotingSwitches* a la espera de que se complete el proceso de promoción. A continuación, llama al método *sendPRO\_REQ\_B* para la construcción de un mensaje de respuesta PRO\_REQ\_B para el nodo *destLNID*. Por último, restaura la escucha de solicitudes de promoción asignando a las variables *interPromotion\_f* y *firstPRO* el valor *true*.

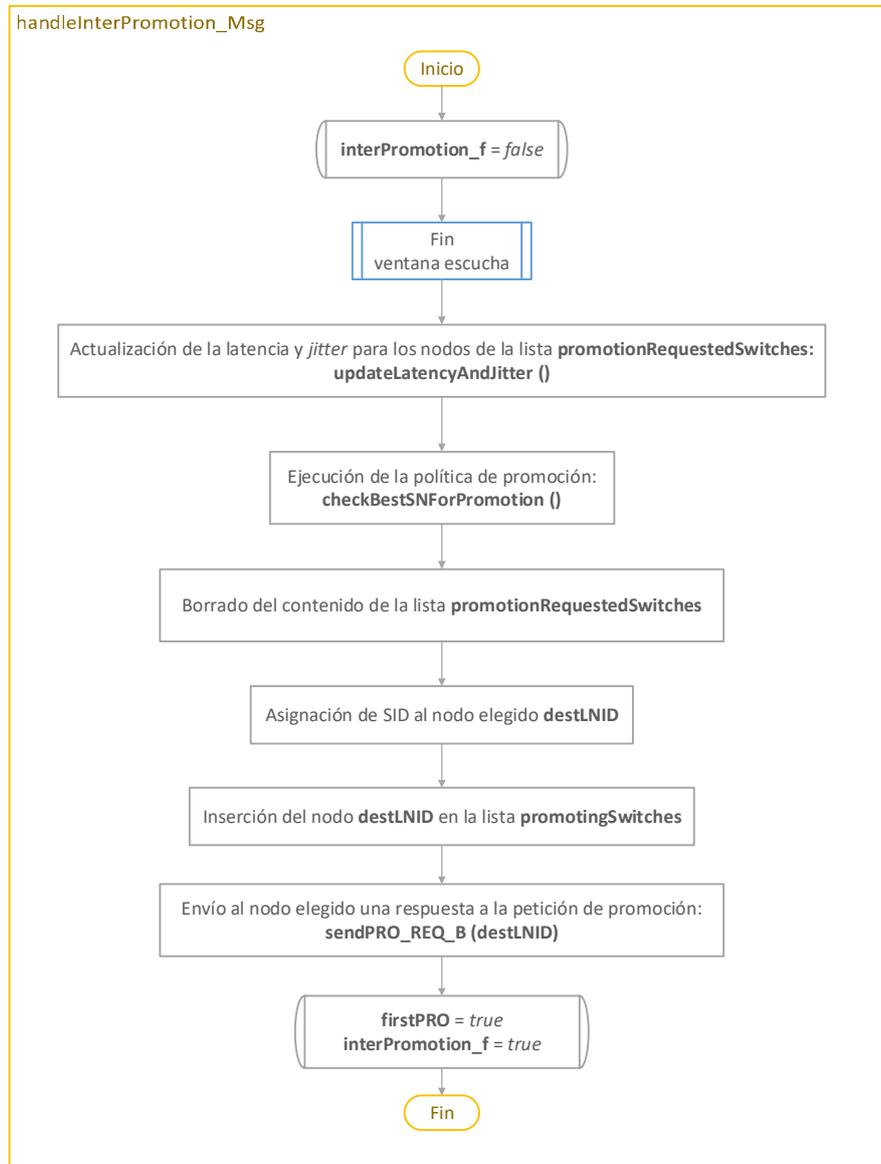


Figura 13. Diagrama de flujo de método de recepción del mensaje interPromotionMsg

### 6.3.3 ENVÍO DEL MENSAJE PRO\_REQ\_B

El nodo base debe enviar un mensaje de respuesta PRO\_REQ\_B al futuro nodo *switch*, para ello invoca al método *sendPRO\_REQ\_B*. Como se puede ver en el diagrama de flujo de la Figura 14, el nodo base construye el mensaje completando, entre otros, el campo en el que se indica el identificador de *switch* o SID que asigna al nodo.

Una vez construido el mensaje se programa el *timer* para el control de las retransmisiones del mensaje, cuyo *self-message* se denomina *ctrlReTxMsg*. Si el *timer* expira sin que el nodo base haya recibido el correspondiente acuse de recibo, se envía de nuevo el mensaje. Para llevar a cabo la retransmisión de los mensajes el nodo base guarda una copia del mensaje en una cola de mensajes pendientes de respuesta denominada *ackPending*. Finalmente, se envía el mensaje al nodo destino *destLNID*.

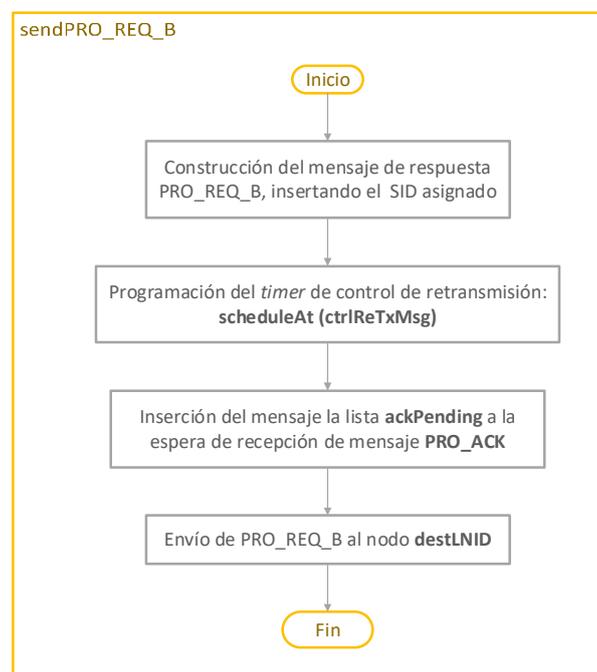


Figura 14. Diagrama de flujo del método de envío del mensaje PRO\_REQ\_B

### 6.3.4 RECEPCIÓN DEL MENSAJE PRO\_ACK

Como se ha mencionado en el apartado anterior, el nodo base requiere que el mensaje PRO\_REQ\_B sea acusado de recibo por su destinatario, el futuro nodo *switch*, para poder completar el proceso de promoción. La recepción del mensaje PRO\_ACK es tratada por el nodo base con el método *processReceivedPRO\_ACK*. Como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 15, cuando el nodo base recibe el mensaje, recopila el identificador del nodo de servicio que envió el mensaje (*origLNID*), lo elimina de la lista *promotingSwitches* y lo introduce en la lista *promotedSwitches* donde se encuentran registrados los nodos

*switches* de la subred. A partir de este momento el nodo *orignLNID* puede comportarse como un *switch*.

Por último, se elimina el mensaje *PRO\_REQ\_B* de la lista *ackPending* y se cancela su *timer* de retransmisión, puesto que ya se ha recibido el *ACK*.

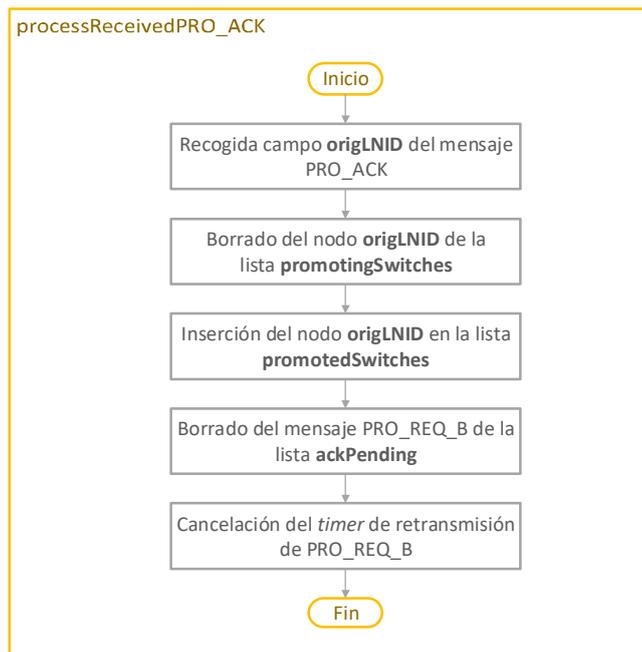


Figura 15. Diagrama de flujo del método de recepción del mensaje *PRO\_ACK*

### 6.3.5 APLICACIÓN DE LAS POLÍTICAS DE PROMOCIÓN

El nodo base decide a que nodo terminal promocionar a *switch*, para que éste pueda realizar conmutación del tráfico proveniente de otros nodos, invocando al método *checkBestSNForPromotion*. El objetivo de este TFM es la propuesta de diferentes criterios de selección del nodo a promocionar de entre aquellos nodos que lo hayan solicitado durante el tiempo de ventana escucha y cuyas características se encuentran registradas en la lista *promotionRequestedSwitches*.

Como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 16, el nodo base evalúa el valor de la variable *promotionPolicy* que determina la política que está en vigor durante la simulación. Se trata de un parámetro de entrada a la simulación a través del fichero *simPRIME.ini*

utilizado para este fin. Cada política se corresponde con una subrutina que devolverá el nodo a promocionar a la salida del método.

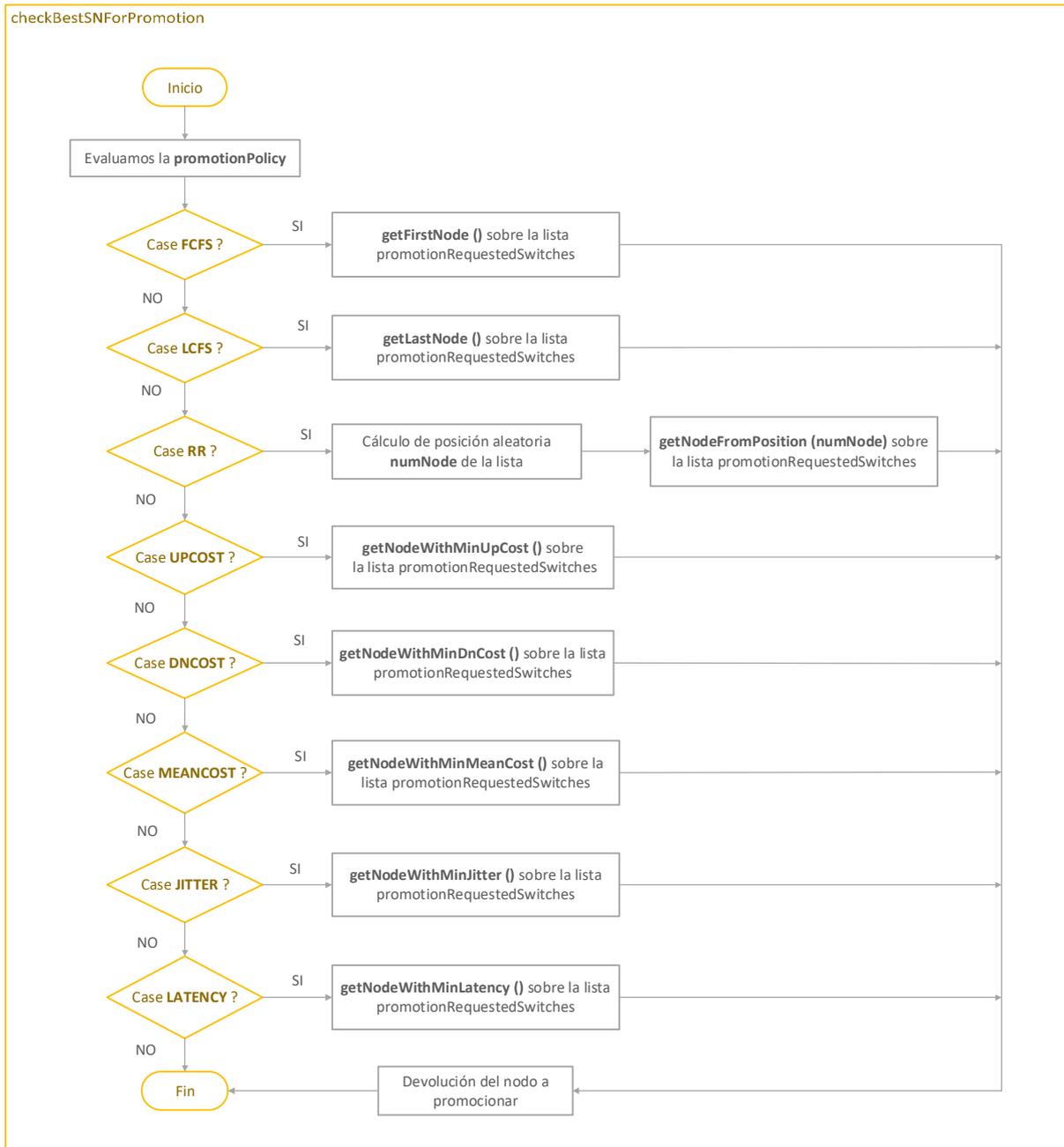


Figura 16. Diagrama de flujo del método checkBestSNForPromotion

A continuación, se describen los atributos y métodos adicionales que son necesarios implementar en la clase existente *SwitchList*, para poder implementar cada una de las políticas.

#### **6.3.5.1 FCFS y LCFS.**

Las políticas FCFS y LCFS son las más sencillas. En el caso de la política FCFS el nodo base promocionará al primer nodo de la lista *promotionRequestedSwitches*, es decir, el nodo origen de la primera solicitud de promoción que se recibió en la ventana de escucha. Sería lógico pensar que dicho nodo sea el que más cerca se encuentre del nodo base, sin embargo, cuando un nodo desea transmitir, de acuerdo con lo establecido por el algoritmo CSMA-CA, deberá esperarse un tiempo aleatorio antes de hacerlo, para evitar colisiones. Por tanto, el orden de llegada de las peticiones de promoción dependerá de la aleatoriedad del algoritmo CSMA-CA. La clase lista enlazada *SwitchList.cpp* ya tiene implementado el método *getFirstNode* que devuelve el primer elemento de la lista enlazada.

Puesto que el primer mensaje PRO\_REQ\_S recibido en la ventana de escucha es el único que resulta de utilidad para este criterio de promoción, se podrían ignorar las solicitudes posteriores. De hecho, éste era el comportamiento que se encontraba implementado en el simulador *SimPRIME* al inicio del desarrollo de este TFM, antes de que se generalizase dicho comportamiento para soportar todas las políticas de promoción.

En el caso de la política LCFS el nodo base promocionará al último nodo de la lista *promotionRequestedSwitches*, es decir, el nodo origen de la última solicitud de promoción recibida antes del fin de la ventana de escucha. Para ello se ha implementado el método *getLastNode* en clase lista enlazada *SwitchList.cpp*, que devuelve el último elemento de la lista.

#### **6.3.5.2 RR**

En el caso de la política *Round Robin*, el nodo base elegirá de forma aleatoria el nodo que va a promocionar de entre aquellos que lo han solicitado durante el tiempo de ventana de escucha. Para implementar la selección de una posición aleatoria de la lista

*promotionRequestedSwitches* se ha usado la función *uniform* que genera un valor aleatorio siguiendo una distribución uniforme, en el rango comprendido entre 0 y 1. Dicho valor se multiplicará por el número de elementos de la lista, devuelto por el método *numNodes*, y el número resultante se redondea a la baja con la función *floor* para obtener un número entero que indique cual es la posición de la lista enlazada donde se encuentra el nodo que se va a promocionar. Ha sido necesario implementar el método *getNodeFromPosition* de la clase *SwitchList.cpp* que recibe como argumento una posición de la lista enlazada y devuelva el elemento de la lista enlazada que ocupa dicha posición.

#### 6.3.5.3 COST

Este apartado comprende las políticas UPCOST, DNCOST y MEANCOST en base a las cuales el nodo base promocionará al nodo de la lista *promotionRequestedSwitched* que posee el menor coste total de subida, el menor coste total de bajada y el menor coste total medio, respectivamente. Dichos costes hacen referencia a los valores de los campos PRO.UPCOST y PRO.DNCOST recogidos por el nodo base tras la recepción del mensaje PRO\_REQ\_S y almacenados en los atributos de tipo entero, *upCost* y *dnCost* de la clase *SwitchList.cpp*.

Se han implementado los siguientes elementos para la clase lista enlazada *SwitchList.cpp*: el atributo *meanCost* de tipo *double* que almacena la media de los valores de *upCost* y *dnCost*. Así como los métodos: *getNodeWithMinUpCost*, *getNodeWithMinDnCost* y *getNodeWithMinMeanCost* cada uno de los cuales devuelven el elemento de la lista *promotionRequestedSwitched* que posee el menor coste de subida, de bajada y coste medio, respectivamente.

#### 6.3.5.4 LATENCY y JITTER

En el caso de las políticas LATENCY y JITTER, el nodo base promocionará al nodo de la lista enlazada *promotionRequestedSwitched* que posee el menor valor de latencia y *jitter* según corresponda. Para lo cual ha sido necesario implementar en la clase lista enlazada *SwitchList.cpp* los siguientes elementos: los atributos *jitter* y *latency* de tipo *double*, que almacenan los valores más recientes de latencia y *jitter* en la comunicación de mensajes ALIVE entre el nodo base y el nodo terminal. Así como los métodos

*getNodeWithMinLatency* y *getNodeWithMinJitter* que devuelven el elemento de la lista con el menor valor asociado de *latency* y *jitter* respectivamente.

El proceso *keep-alive* consiste en el intercambio bidireccional periódico de mensajes de tipo ALV entre el nodo base y un nodo de servicio, es por ello que esta comunicación es la que nos proporciona información más reciente sobre el estado del canal.

El nodo base posee una lista enlazada denominada *registredNodes*, donde almacena la información de aquellos nodos de servicio que se encuentran registrados en la subred. La funcionalidad de esta lista está descrita en la clase lista enlazada *ListRegDevices.cpp*. Cuando el nodo base recibe un mensaje ALV de un nodo de servicio registra en dicha lista la latencia o tiempo transcurrido desde que el nodo base envió el último ALV. Cada nodo de servicio o elemento de la lista enlazada *registredNodes* posee un vector de tipo *double* denominado *roundtrip\_vector* en el que se registran los ocho últimos valores de *roundtrips* registrados. Así como dos atributos de tipo *double* denominados *roundtrip* y *jitter*, los cuales el nodo base actualiza cada vez que recibe un nuevo mensaje ALV. El valor de *roundtrip* se calcula como la media de los valores del vector *roundtrip\_vector* con el método *median*. Para el cálculo del *jitter* se ha implementado el método *typical\_deviation* que calcula la desviación típica de los valores del vector *roundtrip\_vector*.

Cuando el nodo base invoca al método *updateLatencyAndJitter*, véase diagrama de flujo de la

Figura 13, busca para cada nodo de la lista *promotionRequestedSwitched* los valores correspondientes de los atributos *jitter* y *roundtrip* en la lista *registredNodes* y los registra en los atributos *jitter* y *latency* de la lista *promotionRequestedSwitched*.

Por último, se han implementado en la clase *SwitchList.cpp* los métodos *getNodeWithMinJitter* y *getNodeWithMinLatency* cada uno de los cuales devuelve el elemento de la lista *promotionRequestedSwitched* que posee el menor valor de *jitter* y *latency* respectivamente.

En el ANEXO A se muestra el diagrama de las clase que se han visto involucradas en la implementación en el nodo base de las políticas de promoción.

## 6.4 EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Para evaluar las políticas de promoción implementadas en el simulador *SimPRIME*, se han practicado diversos *tests* y se ha evaluado un escenario de red real. Para lo cual se deben de tener en cuenta cuales son los principales parámetros de entrada a configurar en el fichero *simPRIME.ini*:

- *busLength*: Permite indicar la longitud de la línea en metros.
- *nBranches*: Permite indicar el número de ramas de la red.
- *nHostsPerBranch*: Permite indicar el número de nodos de cada rama de la red.
- *uniform\_d*: Se le asigna valor *true* para que las distancias entre los nodos de la subred sean equidistantes.
- *impulsive*: Se le asigna valor *true* si se quiere tener en cuenta en la simulación el ruido impulsivo en la línea.
- *nullAttenuation*: Se le asigna valor *true* si no se quiere tener en cuenta el efecto de la atenuación en la subred, es decir, atenuación nula. Si por el contrario se le asigna el valor *false*, el programa leerá las atenuaciones existentes entre los nodos del fichero indicado por el parámetro *attFileAddress*.
- *attFileAddress*: Permite indicar la ruta del fichero de texto plano que contiene la matriz de atenuaciones entre los nodos de la red.
- *policy*: Permite indicar con un número entero qué política de promoción será empleada por el nodo base durante la simulación. Véase la correspondencia en la Tabla 7.

Estos constituyen los parámetros más importantes para la configuración de un escenario de red en el simulador.

Política	<i>policy</i>
FCFS	1
LCFS	2
RR	3
UPCOST	4
DNCOST	5
MEANCOST	6
JITTER	7
LATENCY	8

Tabla 7. Correspondencia entre la política de promoción y el valor del parámetro *policy*

Las matrices de atenuación se encuentran recogidas en ficheros de texto como el mostrado en la Figura 17. El fichero del ejemplo es muy sencillo, se representa una matriz cuadrada de dimensión el número de nodos de servicio de la subred más uno, pues se debe incluir el nodo base presente en toda subred. Los valores de la matriz, separados por barras verticales o plecas, expresan las atenuaciones en decibelios (*dB*) existentes entre los pares de nodos de la subred. El cálculo de estas matrices se realiza con la función de transferencia implementada en el modelo de capa PHY del simulador que se encuentra desarrollado en Matlab.

```

concha_simple_5.txt ✕
-1000.000000 | 0.000000 | -100.000000 |
0.000000 | -1000.000000 | 0.000000 |
0.000000 | 0.000000 | -1000.000000 ||

```

Figura 17. Fichero de texto de matriz de atenuaciones

La Tabla 8 ayuda a comprender mejor el significado de la matriz de atenuación mostrada en la Figura 17. La primera fila de la matriz se corresponde con las atenuaciones de la comunicación *downlink* entre el nodo base y cada uno de los nodos de servicio de la subred. Mientras que la primera columna corresponde a las atenuaciones de la comunicación *uplink* entre el nodo base y cada uno de los nodos de servicio. El resto de los elementos de la matriz corresponden a las atenuaciones *uplink* y *downlink* existentes entre los pares de nodos de servicio de la subred.

	BN	SN [0]	SN [1]
BN	-1000	0	-1000
SN [0]	0	-1000	0
SN [1]	0	0	-1000

*Tabla 8. Matriz de atenuaciones expresadas en dB*

En resumen, los elementos de la matriz de atenuación que se encuentran por encima de la diagonal principal se corresponden con los valores de atenuación en las comunicaciones *downlink* entre nodos, es decir, las comunicaciones entre un nodo y los que se encuentran ubicados por debajo de él. Mientras que los elementos que se encuentran por debajo de la diagonal principal corresponden a las atenuaciones de las comunicaciones *uplink* entre nodos, es decir, las comunicaciones entre un nodo y los que se encuentran ubicados por encima de él.

Manipulando los valores de las atenuaciones se puede crear cualquier escenario posible, es decir, se puede determinar aquellos nodos que no van a ser capaces de registrarse en el nodo base y que requerirán de la promoción a *switch* de alguno de los nodos cercanos.

Como ya se comentó en el Capítulo 5. , el estándar PRIME fija la potencia máxima de transmisión en  $-3 \text{ dBW}$ . Además, la potencia del ruido de fondo presente en el canal según los cálculos realizados en [5] es de  $-54.3 \text{ dBW}$ . De acuerdo a estos valores se puede calcular cuál es la máxima atenuación  $Att_{max}$  que puede tener lugar entre dos nodos para que éstos

puedan comunicarse sin errores. En el caso de máxima atenuación se transmitirá con el modo de comunicación más robusto que es el DBPSK-FEC ON. Dicho modo de comunicación requiere un valor mínimo de SNR de  $3,3 \text{ dB}$  de acuerdo a las gráficas de la Figura 8, para conseguir que el valor de BER sea cero, es decir que no haya errores, ante la ausencia de ruido impulsivo en la red. Tal y como se calcula en E. 4 la atenuación máxima es  $30 \text{ dB}$ .

$$E. 4 \quad Att_{max} = Pot_{tx} - Pot_{ruido} - SNR_{min} = -3 - (-54,3) - 3,3 = 48 \text{ dB}$$

De acuerdo con estos cálculos los valores extremos de atenuación:  $0 \text{ dB}$  y  $1000 \text{ dB}$ , se corresponden con una atenuación favorable y desfavorable, respectivamente. De este modo la situación descrita en el ejemplo anterior es la siguiente: el nodo de servicio SN0 al tener una atenuación de  $0 \text{ dB}$  con el nodo base puede recibir tramas *beacon* al inicio y proceder a registrarse en la red. Sin embargo, la atenuación de  $1000 \text{ dB}$  existente entre el nodo base y el nodo SN1, impide que este último reciba tramas *beacon* y por tanto no pueda unirse a la subred. Por ello SN1 procederá a enviar tramas PNPDU al SN0 con el que tiene una buena comunicación ( $0 \text{ dB}$  en las comunicaciones de subida y de bajada). La recepción de las tramas PNPDU procedentes de SN1 obligan al nodo SN0 a solicitar al nodo base ser promocionado a nodo *switch*, para así poder facilitar la comunicación entre el nodo base y el SN0.



## Capítulo 7. CASO DE ESTUDIO

A continuación, se describe el escenario de red seleccionado para su modelado en *SimPRIME*, que ha permitido validar la implementación de las políticas de promoción realizada en el simulador, así como evaluar el impacto producido por cada una de las políticas de promoción objeto de estudio de este TFM en el rendimiento global de la red.

Se trata un escenario real de red PRIME ubicada en Barranquilla (Colombia) descrita en [11]. Dicho escenario lo constituyen el nodo base y siete nodos de servicio o contadores inteligentes. En dicho trabajo se recogen los valores de las atenuaciones existentes entre cada par de nodos de la red mostrados en la Tabla 9. Como se puede observar los valores de esta matriz de atenuación superan la atenuación máxima establecida en el simulador *SimPRIME* en 48 dB y por tanto no sería posible el establecimiento de las comunicaciones entre el nodo base y el resto de los nodos de la red. Esto se debe a que el nivel de ruido de fondo presente en este escenario es de  $-86$  dBW, por lo que ha sido necesario fijar el nivel de ruido del simulador en dicho valor, para el cual la atenuación máxima permitida está en torno a 80 dB.

	BN	SN [0]	SN [1]	SN [2]	SN [3]	SN [4]	SN [5]	SN [6]
BN	-	- 8	- 48	- 1000	- 58	- 72	- 77	- 75
SN [0]	- 20	-	- 39	- 1000	- 69	- 69	- 70	- 67
SN [1]	- 60	- 39	-	- 1000	- 1000	- 50	- 65	- 78
SN [2]	- 78	- 63	- 69	-	-72	- 1000	- 36	- 52
SN [3]	- 60	- 59	- 69	- 77	-	- 1000	- 77	- 69
SN [4]	- 76	- 60	- 38	- 1000	- 1000	-	- 1000	- 1000
SN [5]	- 1000	- 55	- 54	- 43	- 1000	- 1000	-	- 63
SN [6]	- 76	- 62	- 71	- 59	- 69	- 1000	- 70	-

*Tabla 9. Matriz de atenuaciones para la banda de frecuencias entre 260 y 308 kHz de la red propuesta en [11].*

Se trata de una red con un número reducido de nodos, este tipo de redes son comunes en América (las redes NB-PLC europeas están dotadas de un mayor número de nodos.). Sin embargo, gracias a esto es posible analizar detenidamente y comprender mejor el comportamiento de los nodos de la red. Los enlaces entre ciertos nodos de dicho escenario presentan unos valores de atenuación superiores a la atenuación máxima que permite la comunicación. Como se puede apreciar no es posible la comunicación directa entre el nodo base y los nodos SN2 y SN5, ya que presentan un valor de atenuación superior a  $80dB$ , por tanto, tendrán que solicitar a algunos de los nodos terminales cercanos con los que puedan establecer comunicación que promocionen al estado de *switch* mediante el envío de una trama PNPDU. Las tramas PNPDU enviadas por el nodo SN2 serán recibidas por los nodos SN3, SN5 y SN6 ya que los enlaces con estos nodos poseen un nivel de atenuación aceptable, sin embargo, el SN5 aún no se encuentra registrado por lo que descartará el paquete. A su vez el nodo SN5 solicitará que promocionen los nodos SN0, SN1, SN2 y SN6. De nuevo la trama recibida por el SN2 será descartada ya que se encuentra en estado desconectado. A partir de este momento los nodos receptores de PNPDU que se encuentran conectados a la red y que adoptan el estado terminal (estos son SN0, SN1, SN3 y SN6) transmitirán mensajes del tipo PRO\_REQ\_S solicitando ser promocionados al estado *switch* para poder realizar retransmisiones de tráfico y permitir que los nodos que se encuentran en estado desconectado puedan registrarse en la red, y comunicarse a través de ellos con el nodo base. Pueden solicitarlo varias veces durante el tiempo de escucha de promociones denominado ventana de escucha. A partir de este momento surge una amplia combinación de posibilidades, que dependerá de la política de promoción que se emplee, puede darse el caso de que el nodo base elija promocionar a un nodo que solo tenga conectividad con uno de los nodos desconectados, por lo que tendrá que realizar una segunda promoción en el próximo periodo de ventana de escucha, para que así pueda conectarse el otro nodo. O puede que promocione a un único nodo que permita la conectividad a la red de ambos nodos desconectados. Puede darse el caso de que una vez establecida la red se produzcan desconexiones debido a que los mensajes ALIVE no son recibidos debido al elevado nivel de tráfico en la red, lo cual obliga a los nodos que se desconectan a solicitar nuevas promociones. Los resultados obtenidos para dicho escenario se muestran en el Capítulo 8.

## Capítulo 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos en las simulaciones del escenario de red descrito en el Capítulo 7. realizadas con el simulador *SimPRIME*, tras la implementación en el mismo de las políticas de promoción de nodos terminales a nodos *switches*, con el objetivo de evaluar el impacto que produce cada política en el rendimiento de la red.

Como se mencionó en el capítulo anterior se ha escogido para su estudio un escenario de red real constituido por un número reducido de siete nodos. A continuación, se muestran una serie de análisis que permiten evaluar el impacto causado por cada una de las políticas implementadas en el nodo base en el rendimiento del escenario de red modelado.

El análisis del rendimiento de la red se enfoca en la medida de las latencias de las comunicaciones que se establecen entre los nodos de la subred PRIME. Las latencias constituyen para las compañías eléctricas las principales figuras de mérito en este tipo de redes. Concretamente se ha analizado el tiempo requerido por el nodo base para realizar un sondeo a todos los nodos de servicio de la red acerca del dato de consumo, al que se denomina *Time To Read All meters (TTRAll)*. Así mismo se ha analizado el tiempo transcurrido desde que el nodo base envía una petición de datos hasta que recibe la correspondiente respuesta de un nodo de servicio, al que se hace referencia como *Round-Trip Time (RTT)*.

### **8.1 TIEMPO DE LECTURA DE TODOS LOS NODOS DE LA SUBRED**

A continuación, se muestra la situación real en la que el nodo establece comunicación con todos los nodos de la red. Esto se produce cuando el nodo base realiza un sondeo a los contadores de la subred para la obtención del dato de consumo procedente de los usuarios finales y su posterior comunicación a la empresa proveedora de suministro eléctrico. El objetivo es determinar qué políticas de promoción implementadas producen el mejor

rendimiento global de la red, y qué variable de red tiene en cuenta la métrica empleada, en caso de que tenga en cuenta alguna, véase la Figura 18. El eje de abscisas representa la política de promoción empleada por el nodo base. Mientras que el eje de ordenadas muestra la mediana del *TTRAll* obtenido por el nodo base al encuestar a todos los nodos de la red. Como se puede apreciar la mediana del *TTRAll* se mantiene prácticamente constante, en torno a los 20 segundos, independientemente de la política que se esté utilizando.

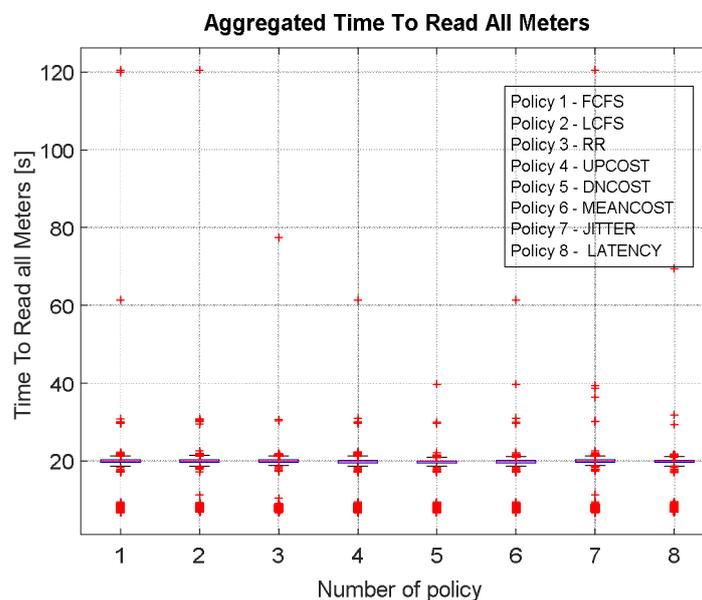


Figura 18. *TTRAll* agregado para cada política en el escenario de red de Colombia

## 8.2 TIEMPO DE RECEPCIÓN DEL DATO DE CONSUMO DE UN NODO

Resulta de interés comparar el tiempo mediano que tarda en contestar un nodo de servicio a la encuesta realizada por el nodo base en función de la política que esté siendo utilizada, véase la Figura 19. El eje de abscisas representa la política de promoción aplicada por el nodo base. El eje de ordenadas representa la mediana del *RTT* de los nodos de servicio de la red. Como se puede apreciar el tiempo de respuesta es prácticamente constante para todas las políticas. Si se observa con precisión la ampliación de la imagen anterior mostrada en la Figura 20 se aprecia que, pese a no ser una diferencia significativa (del orden de milisegundos), las políticas empleadas que favorecen el menor tiempo de respuesta de los

Los nodos de la red son aquellas que tienen en cuenta las variables de latencia y *jitter* para la promoción de un nodo terminal a nodo *switch*. Concretamente la política JITTER es la que mejor resultados proporciona, pues tiene en cuenta la variación del retardo en las comunicaciones entre el nodo base y el nodo que solicita promocionar.

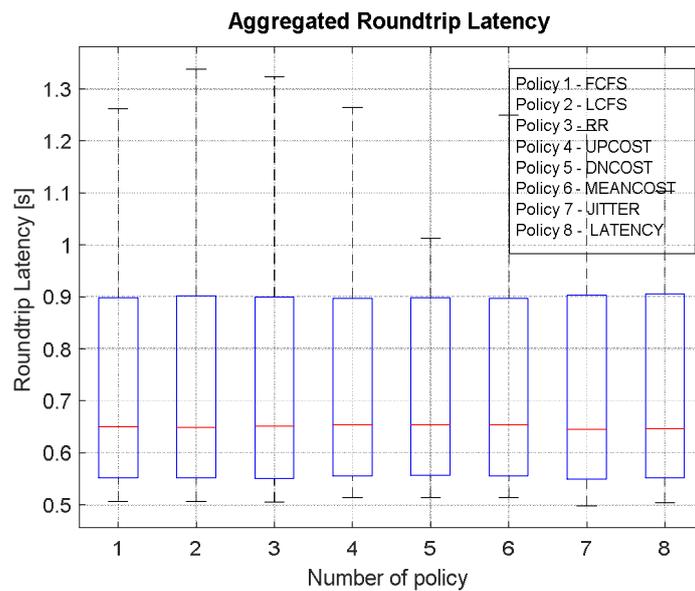


Figura 19. Roundtrip agregado para el escenario de red de Colombia.

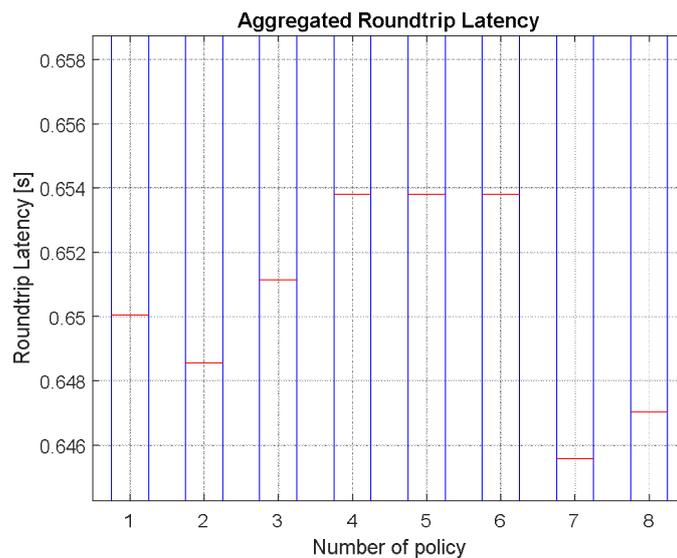


Figura 20. Ampliación del RTT agregado del escenario de red de Colombia.

En la Figura 21 (izquierda) se muestra la distribución del número de nodos promocionados por cada política en el escenario de red de Colombia. El eje de abscisas representa la política de promoción utilizada por el nodo base. El eje de ordenadas representa el número de nodos terminales promocionados a *switch*. En la Figura 21 (derecha) se muestra, de nuevo, la gráfica del *RTT* mediano de los nodos de servicio de la red. Como se puede apreciar el número mediano de nodos promocionados por cada política mantiene un valor constante de 2 nodos, sin embargo, hay políticas que pueden promocionar entre 2 y 3 nodos como es el caso de las políticas UPCOST, DNCOST y MEANCOST, que registran el mayor tiempo de *RTT*. Mientras que las políticas que promocionan a un menor número de nodos como es el caso de las políticas RR, LATENCY y JITTER se corresponden con tiempos de *RTT* inferiores.

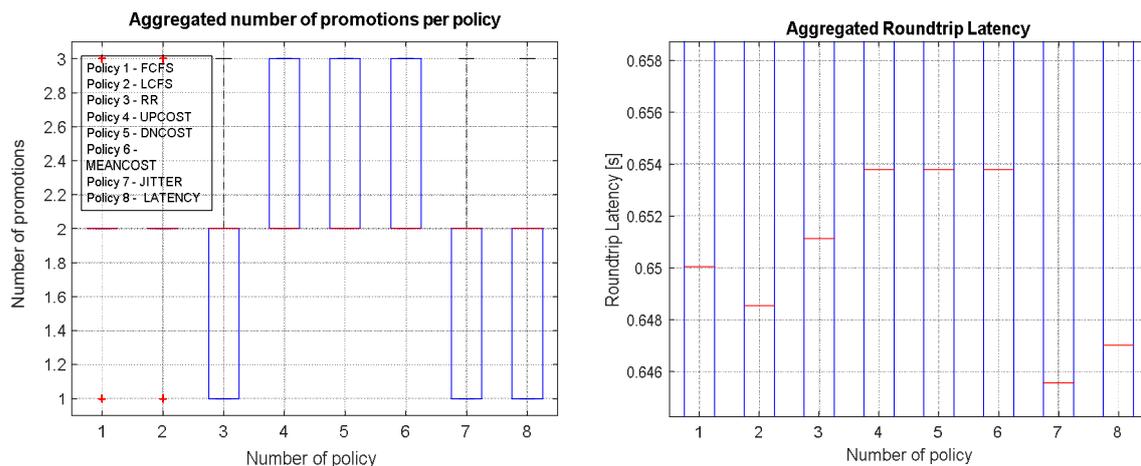


Figura 21. Número mediano de los nodos promocionados (izquierda) por cada política y *RTT* agregado (derecha) en el escenario de red de Colombia

Estos resultados son coherentes, pues cuanto menor es el número de nodos *switches* en la red, menor es el número de retransmisiones llevadas a cabo. Esto implica la disminución del tráfico de la red, lo que da lugar al decremento de los tiempos de respuesta de los nodos de servicio y por tanto una mejora en el rendimiento de la red. No obstante, el número de nodos promocionados por una política no es determinante a la hora de concluir cuál es la mejor estrategia de promoción, pues también influye la métrica empleada por la política.

Sin embargo, para dicho escenario, al ser mínima la diferencia de tiempos entre políticas, se escogería para su implantación en el nodo base aquella que requiera el menor coste computacional. Ésta es la política FCFS, por la cual el nodo base escoge para su promoción al nodo emisor de la primera solicitud de promoción recibida durante el tiempo de ventana de escucha.



## Capítulo 9. CONCLUSIONES

Este Trabajo Fin de Máster aborda la formulación y evaluación de un conjunto de políticas de promoción de nodos terminales a nodos *switches* en el ámbito de las redes PLC de banda estrecha que se rigen por el estándar PRIME. Este tipo de redes emplean las líneas de baja potencia para el suministro eléctrico como medio de transmisión de los datos del consumo eléctrico de los usuarios finales a las compañías eléctricas.

El cableado de baja tensión constituye un medio poco propicio para la transmisión de información, ya que no fue diseñado con este fin y presenta problemas de atenuación entre los nodos de la red y señales de ruido, que provocan la degradación de las comunicaciones. La atenuación entre el nodo emisor y receptor incrementa con la distancia entre ambos nodos. El ruido procede de la electrónica de potencia de los equipos conectados a la red.

Por ello el estándar PRIME permite que el nodo base o concentrador encargado del control de la red promocioe a determinados nodos de la misma, denominados nodos terminales, a nodos repetidores o *switches* que permiten la retransmisión del tráfico procedente de otros nodos. Sin embargo, el estándar no especifica cuáles son las posiciones óptimas para los nodos *switches* puesto que depende en gran medida de la topología física y lógica de la red. Tampoco indica los criterios utilizados por el nodo base en el proceso de selección de un nodo, de entre los demás nodos de la red, para su promoción a *switch*, dejándolo a discreción del fabricante.

Apenas hay estudios relacionados con el tema en cuestión, y se desconocen cuáles son los criterios de promoción que los fabricantes de nodos concentradores implementan, ya que se trata de un elemento que les permite diferenciarse a unos de otros. En este proyecto se ha evaluado el impacto causado en el rendimiento global de la red por una selección de las políticas de promoción formuladas en el Capítulo 6. . Ello ha requerido la implementación de cada una de estas políticas (FCFS, LCFS, RR, UPCOST, DNCOST, MEANCOST, JITTER, LATENCY) en el simulador de redes *SimPRIME*, lo que ha permitido simular un

escenario de red real, para así evaluar el impacto producido por cada una de estas políticas en el rendimiento global de la red.

El escenario de red simulado reproduce una estructura de red ubicada en Colombia. Se trata de un escenario constituido por un número reducido de nodos, lo cual permite apreciar fácilmente el comportamiento de los nodos en la red, sin embargo, no se aprecia diferencias significativas al comparar el efecto de las distintas políticas implementadas en el rendimiento de la red. Esto puede deberse al número reducido de nodos de la red. Un escenario con mayor número de nodos podría dar lugar a diferencias más significativas entre las políticas. La simulación y análisis de estos escenarios se propone como futura línea de trabajo. Pese a que las diferencias en el rendimiento son mínimas se aprecia una leve mejoría del mismo al emplear la política de promoción denominada JITTER, que tiene en cuenta la variación del retardo en las comunicaciones entre el nodo base y los nodos que solicitan promocionar.

Para dicho escenario de red tendría sentido decantarse por la implantación en el nodo base de la política de promoción que menor coste computacional requiera. Ésta es la política FCFS, por la cual el nodo base escoge para su promoción al nodo emisor de la primera solicitud de promoción recibida durante el tiempo de ventana de escucha.

## Capítulo 10. TRABAJOS FUTUROS

Tal y como se discute en el Capítulo 6. , en este proyecto se ha llevado a cabo la implementación en el simulador *SimPRIME* de una selección de las políticas de promoción formuladas, éstas son: FCFS, LCFS, RR, UPCOST, DNCOST, MEANCOST, JITTER y LATENCY. Una posible línea de trabajo futura sería la implementación y posterior evaluación de la política *Round Robin* con memoria y las políticas de SNR, que, debido al marco temporal del proyecto, se optó por no implementar.

Otra línea de trabajo futura consiste en evaluar las políticas de promoción definidas en este TFM en otros escenarios con mayor número de nodos y distintas longitudes de cable (considerando redes urbanas semiurbanas y rurales de diferentes países que utilicen el estándar PRIME en la última milla de AMI [12], [9]), así como con presencia de fuentes de ruido significativas (p.ej., ruido impulsivo, ruidos reales procedentes de dispositivos como inversores de paneles solares o cargadores de vehículos eléctricos [13], etc.).

Finalmente resultaría de gran interés la validación de los resultados que se han obtenido en este proyecto y en los proyectos derivados de las líneas de trabajo futuras en un entorno de pruebas o un entorno real controlado.



## Capítulo 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] PRIME Alliance Technical Working Group, “Draft Standard for PowerLine Intelligent Metering Evolution.” pp. 1–256.
- [2] N. Uribe-Pérez, L. Hernández, D. de la Vega, and I. Angulo, “State of the Art and Trends Review of Smart Metering in Electricity Grids,” *Appl. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 1–24, 2016.
- [3] N. Andreadou, M. Guardiola, and G. Fulli, “Telecommunication Technologies for Smart Grid Projects with Focus on Smart Metering Applications,” *Energies*, vol. 9, no. 5, p. 375, 2016.
- [4] U. of the E. I.- Eurelectric, “Power Distribution in Europe,” 2013.
- [5] J. Matanza Domingo, “Improvements in the PLC Systems for Smart Grids Environments,” Universidad Pontificia Comillas, 2013.
- [6] J. Matanza, G. López, S. Alexandres, J. I. Moreno, and M. de la C. Mora de Amarillas, “Together or separately? Evaluating the Content Free Period in PRIME using SimPRIME,” *2017 IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, pp. 308–313, 2017.
- [7] J. Matanza, S. Kiliccote, S. Alexandres, and C. Rodríguez-Morcillo, “Simulation of low-voltage narrow-band power line communication networks to propagate OpenADR signals,” *J. Commun. Networks*, vol. 17, no. 6, pp. 656–664, 2015.
- [8] J. Matanza, S. Alexandres, and C. Rodríguez-Morcillo, “Advanced metering infrastructure performance using European low-voltage power line communication networks,” *IET Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 1041–1047, 2014.

- [9] L. Gonzalez-Sotres, C. Mateo, P. Frias, C. Rodriguez-Morcillo, and J. Matanza, “Replicability Analysis of PLC PRIME Networks for Smart Metering Applications,” *IEEE Trans. Smart Grid*, pp. 1–1, 2016.
- [10] M. Seijo, G. López, J. Matanza, and J. I. Moreno, “Planning and Performance Challenges in Power Line Communications Networks for Smart Grids,” *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 2016, 2016.
- [11] A. Sanz, P. J. Pinero, J. M. Idiago, S. Esteban, and J. I. Garcia, “Narrowband power line communications evaluation in complex distribution networks,” *2014 IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, pp. 266–271, 2014.
- [12] A. Sendin, I. Peña, and P. Angueira, “Strategies for power line communications smart metering network deployment,” *Energies*, vol. 7, no. 4. pp. 2377–2420, 2014.
- [13] G. López, J. I. Moreno, E. Sánchez, C. Martínez, and F. Martín, “Noise sources, effects and countermeasures in narrowband power-line communications networks: A practical approach,” *Energies*, vol. 10, no. 8, 2017.
- [14] U. of the E. I.- Eurelectric, “Eurelectric Annual Report 2017,” 2018.
- [15] C. Mora de Amarillas, “IMPLEMENTACIÓN EN OMNeT++ DEL PERÍODO LIBRE DE CONTIENDA (CFP) DEFINIDO EN EL ESTÁNDAR PRIME,” 2016.
- [16] J. Larrañaga Arriola, “Mejora de la disponibilidad de subredes prime durante el proceso de actualización firmware,” Universidad de Deusto, 2015.
- [17] E. Alonso, J. Matanza, C. Rodriguez-Morcillo, and S. Alexandres, “A switch promotion algorithm for improving PRIME PLC network latency,” in *IEEE ISPLC 2014 - 18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 2014, pp. 278–283.

- [18] A. G. Lazaropoulos, “Review and Progress towards the Capacity Boost of Overhead and Underground Medium-Voltage and Low-Voltage Broadband over Power Lines Networks: Cooperative Communications through Two- and Three-Hop Repeater Systems,” *ISRN Electron. Vol. , Artic. ID 472190*, vol. 2013, p. 19, 2013.
- [19] M. S. Kim, D. M. Son, Y. B. Ko, and Y. H. Kim, “A simulation study of the PLC-MAC performance using network simulator-2,” *IEEE ISPLC 2008 - 2008 IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Its Appl.*, vol. 2, pp. 99–104, 2008.
- [20] M. Korki, H. L. Vu, C. H. Foh, X. Lu, and N. Hosseinzadeh, “MAC Performance Evaluation in Low Voltage PLC Networks,” *ENERGY 2011 First Int. Conf. Smart Grids, Green Commun. IT Energy-aware Technol.*, no. c, pp. 135–140, 2011.
- [21] K. H. Kim, H. B. Lee, Y. H. Lee, and S. C. Kim, “PHY abstraction methodology for the performance evaluation of PLC channels,” in *IEEE ISPLC 2010 - International Symposium on Power Line Communications and its Applications*, 2010, pp. 28–32.
- [22] A. Zaballos, A. Vallejo, M. Majoral, and J. M. Selga, “Survey and performance comparison of AMR over PLC standards,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 2, pp. 604–613, 2009.
- [23] E. Alonso, J. Matanza, C. Rodriguez-Morcillo, and S. Alexandres, “Performance evaluation of AMR simultaneous polling strategies in a PRIME PLC network,” in *2015 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, ISPLC 2015*, 2015, pp. 101–106.
- [24] J. Matanza, S. Alexandres, and C. Rodriguez-Morcillo, “Automatic Meter-Reading Simulation through Power Line Communication,” *2013 IEEE 21st Int. Symp. Model. Anal. Simul. Comput. Telecommun. Syst.*, pp. 283–287, 2013.
- [25] N. Gogic, A. ; Mahmutbegovic, A. ; Borovina, D. ;HakkiCavdar, I.; and Suljanovic, “Simulation of the narrow-band PLC system implementing PRIME standard,” in *Energy Conference (ENERGYCON)*, 2014, pp. 1520–1525.

- [26] A. Mengi and A. J. H. Vinck, “Successive impulsive noise suppression in OFDM,” in *IEEE ISPLC 2010 - International Symposium on Power Line Communications and its Applications*, 2010, pp. 33–37.
- [27] M. Korke, N. Hosseinzadeh, and T. Moazzeni, “Performance evaluation of a narrowband power line communication for smart grid with noise reduction technique,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 57, no. 4, pp. 1598–1606, 2011.
- [28] “OMNeT++ Discrete Event Simulator.” [Online]. Available: <https://omnetpp.org/>.

## ANEXO A

