

# APLICACIÓN WEB PARA SIMULACIÓN DE REDES PLC PRIME

**Miguel Seijo**, Investigador, Universidad Carlos III de Madrid (UC3M)

**Gregorio López**, Profesor Ayudante Doctor, Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

**Javier Matanza**, Profesor Colaborador Asistente, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)

**José Ignacio Moreno**, Profesor Titular, Universidad Carlos III de Madrid (UC3M)

**Resumen:** Las comunicaciones sobre el cable eléctrico (Power Line Communications) presentan una serie de ventajas para ser utilizadas en aplicaciones para redes eléctricas inteligentes (Smart Grids), como que no es necesario desplegar infraestructura adicional. Sin embargo, también presentan problemas, como que se trata de un canal selectivo en frecuencia, que la impedancia del medio varía con el tiempo dependiendo de las cargas conectadas o que la comunicación puede verse deteriorada por el ruido introducido por otros dispositivos. Por tanto, es interesante disponer de herramientas de simulación que permitan planificar, evaluar y tomar decisiones relativas a este tipo de redes de manera ágil y económica. Sin embargo, la complejidad y curva de aprendizaje de los simuladores de redes de comunicaciones dificulta su manejo en entornos operativos. Este artículo presenta una aplicación web que permite simular de manera amigable tanto redes PLC reales como escenarios sintéticos. Concretamente, la aplicación se centra en la tecnología PLC de banda estrecha PRIME, ampliamente utilizada en infraestructuras de medición avanzada, y se basa en el conocido simulador de redes PRIME SimPRIME

**Palabras clave:** Aplicación web, PLC, PRIME, SimPRIME, Simulación

## INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones sobre el cable eléctrico (Power Line Communications) presentan una serie de ventajas para ser utilizadas en aplicaciones para redes eléctricas inteligentes (Smart Grids), como que no es necesario desplegar infraestructura adicional [1]. Sin embargo, también presentan problemas, como que se trata de un canal selectivo en frecuencia, que la impedancia del medio varía con el tiempo dependiendo de las cargas conectadas o que la comunicación puede verse deteriorada por el ruido introducido por otros dispositivos. Por tanto, es interesante disponer de herramientas de simulación que permitan planificar, evaluar y tomar decisiones relativas a este tipo de redes de manera ágil y económica. Sin embargo, la complejidad y curva de aprendizaje de los simuladores de redes de comunicaciones dificulta su manejo en entornos operativos.

Este artículo presenta una aplicación web que permite simular de manera amigable tanto redes PLC reales como escenarios sintéticos. La aplicación se centra en la tecnología PLC de banda estrecha PRIME [2], ampliamente utilizada en infraestructuras de medición avanzada, y se basa en el conocido simulador de redes PRIME SimPRIME [3].

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 describe el funcionamiento del simulador junto a la arquitectura y las tecnologías utilizadas para el desarrollo de la aplicación web. La sección 3 presenta la validación y evaluación de prestaciones del simulador. Finalmente, la sección 4 resume las principales conclusiones del artículo y las futuras líneas de trabajo.

## DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

La Figura 1 nos muestra la pantalla de la aplicación web que permite configurar una nueva simulación y solicitar su ejecución.

Figura 1 – Pantalla para configurar y ejecutar una simulación

Como puede verse en la Figura 1, la aplicación permite configurar los siguientes parámetros:

- *Nombre/ID*: Se recomienda introducir nombres que permitan identificar la simulación fácilmente, así como distinguirla de otras similares. En cualquier caso, la aplicación asigna un identificador unívoco a cada simulación (ID).
- *Duración*: Este campo se refiere al tiempo real que va a ser simulado (en segundos). El tiempo que tardará la simulación en ejecutar en principio siempre será mayor. Se recomienda establecer una duración superior a 5000 s, para garantizar que se simula tiempo suficiente como para que la red se establezca y se puedan tomar medidas del tiempo que se tarda en obtener informes de consumo de todos los contadores de la red (el denominado TTRAll). También se recomienda evitar introducir valores demasiado altos para que las simulaciones no duren demasiado tiempo.
- *Repeticiones*: El número de repeticiones debe fijarse teniendo en cuenta el valor introducido en el campo “Duración”. Para obtener resultados estadísticamente significativos es necesario disponer de un número mínimo de muestras (p.ej., más de 100). Por lo tanto, teniendo en cuenta que el tiempo que tarda la red en establecerse es aproximadamente 1000 s, si teóricamente calculásemos que el tiempo que tarda el concentrador en obtener un determinado informe de consumo de todos los contadores de la red es 1000 s y fijásemos una “Duración” igual a 5000 s, sabríamos que en una ejecución obtendríamos 4 valores de TTRAll. Por lo tanto, si quisiésemos obtener más de 100 valores, en “Repeticiones” deberíamos introducir un valor superior a 25.
- *Constelación*: Desplegable que permite seleccionar la constelación que utilizan los contadores para transmitir información. Puede seleccionarse cualquiera de las constelaciones que soporta el estándar PRIME (i.e., DBPSK, DQPSK, D8PSK, con FEC OFF u ON). Si se selecciona la opción “Dinámico”, la constelación se negocia dinámicamente entre cada par de nodos en base a las condiciones del canal, tal y como se define en el estándar. Por defecto se utiliza la constelación más robusta (DBPSK con FEC ON).

- *Archivo de topología*: Puede ser un fichero estándar de topología lógica en formato XML (S11) o un .ZIP que contenga planos en formato Shapefile junto a un Excel que indique los contadores con y sin capacidad de comunicación en el escenario considerado.
- *BER*: Tasa de error de bit. Este parámetro sólo tiene efecto cuando se proporciona un informe S11 como archivo de topología. BER1 se refiere a la tasa de error de bit entre todos los nodos que se encuentran en un mismo nivel lógico y BER2 a la tasa de error de bits entre nodos que se encuentran en niveles lógicos contiguos, por lo que BER1 siempre debe ser menor que BER2. En principio, la versión actual del simulador asume que dos nodos que se encuentran a más de un nivel lógico de distancia no pueden “verse” (i.e., BER infinita). Estos valores hay que fijarlos cuidadosamente. Si se fijan valores demasiado altos el resultado puede ser que no exista comunicación entre los nodos de la red y, por tanto, no se obtenga ningún resultado de la ejecución. Las BER están relacionadas con las constelaciones (modulaciones más lentas presentan BER más bajas mientras que modulaciones más rápidas presentan BER más altas para un mismo valor de SNR). Se consideran razonables valores de BER en el rango de  $10^{-4}$  –  $10^{-5}$ , siendo BER1 siempre más bajo que BER2, tal y como se ha comentado anteriormente.
- *Informe*: Se puede simular la solicitud y envío de informes S02 (curva horaria incremental) o S05 (facturación diaria). En base a medidas realizadas en el laboratorio del que se dispone en la UC3M, se ha fijado un tamaño a nivel de aplicación de las solicitudes de ambos informes de 70 Bytes. En cambio, el tamaño de un informe S02 a nivel de aplicación se ha fijado a 1568 Bytes y el de un S05, a 646 Bytes.
- *MTU*: Este campo se refiere al tamaño máximo del payload de la capa MAC en Bytes. Por ejemplo, si vamos a enviar un informe S02 e introducimos en este campo 100, se enviarán 15 paquetes a nivel MAC con un payload de 100 Bytes y un último paquete con un payload de 68 Bytes. El valor máximo que puede tomar este campo es 256 Bytes, según se indica en el estándar.
- *WS*: Este campo se refiere al tamaño de la ventana de transmisión de nivel de enlace (i.e., número de paquetes que pueden enviarse a nivel MAC sin necesidad de ser asentidos). P.ej., si “WS” vale 1, cada paquete debe ser asentido individualmente (i.e., “parada y espera”).
- *Estrategia*: Este desplegable permite establecer la estrategia de sondeo de los contadores, pudiendo seleccionarse “Secuencial” (el concentrador va solicitando los informes contador a contador) o “Simultáneo” (el concentrador solicita todos los informes de una vez mediante un mensaje de broadcast). La estrategia por defecto es “Secuencial”.
- *Tiempo de vida*: Este campo representa el período con el que los nodos de la red intercambian mensajes de keepalive (en segundos). Valores bajos permiten tener una visión del estado y de la topología de la red muy ajustada, pero sobrecargan la red intercambiando tráfico de control. Valores altos reducen la posibilidad de que dicho tráfico afecte negativamente al rendimiento de la red, pero también provocan que la información del estado y de la topología de la red pueda estar desactualizada. El valor por defecto de este campo es 120 s.

Por tanto, la aplicación permite simular: (1) escenarios reales (desplegados en campo), si se proporcionan los mapas en formato Shapefile que los describen, o (2) escenarios sintéticos, si se proporcionan ficheros de topología S11 y se especifica la BER entre nodos en un mismo nivel lógico (BER1) y entre nodos en niveles lógicos contiguos (BER2). La primera opción puede permitir evaluar cuál es la configuración de la red PRIME que mejor se ajusta a un caso real concreto. La segunda puede permitir evaluar qué parámetros del protocolo (p.ej., MTU, WS) son más adecuados dependiendo de las condiciones de la red.

Una de las entradas principales del núcleo del simulador (SimPRIME) es la matriz de atenuaciones entre cada par de nodos de la red. Dicha matriz permite, conocida la potencia de transmisión en el nodo emisor, calcular la potencia recibida en todos los nodos de la red y, por tanto, dado un nivel de ruido de referencia, obtener la relación señal a ruido para dicho paquete en todos los nodos de la red. En la primera opción descrita en el párrafo anterior, dicha matriz de atenuaciones se obtiene aplicando Teoría de Líneas de Transmisión al grafo que se genera a partir del mapa Shapefile (módulo procesarSHAPEFILE de la Figura 2). En la segunda opción dicha matriz se obtiene a partir de las probabilidades de error de bit BER1 y BER2. La Figura 2 muestra el detalle de cómo se procesan los parámetros de entrada para configurar el núcleo del simulador (SimPRIME) y cómo se procesan los parámetros de salida del simulador.

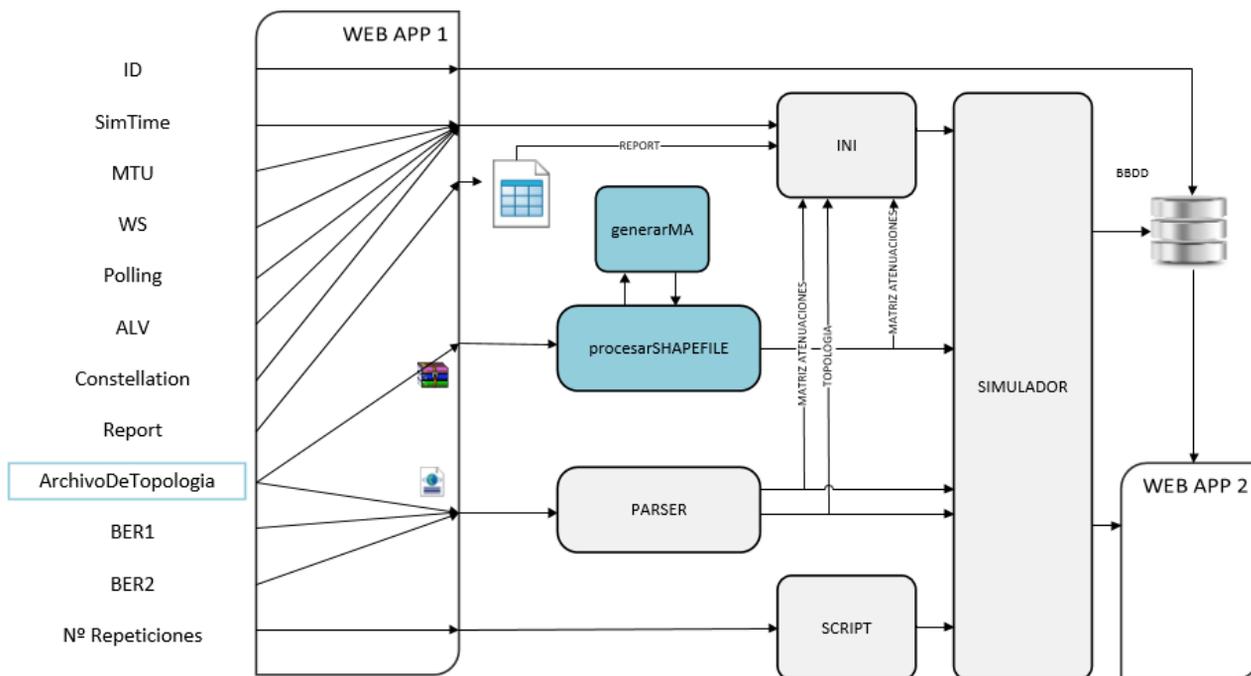


Figura 2 – Diseño de bajo nivel de la aplicación web desarrollada

Para terminar esta sección, la Figura 3 muestra una visión global de la arquitectura de la aplicación web desarrollada así como de las tecnologías utilizadas. Como puede verse, la aplicación se basa principalmente en el web framework Django, basado en Python. También se utiliza Celery, como gestor de tareas, y RabbitMQ, como gestor de colas, para permitir ejecutar las simulaciones en segundo plano, favoreciendo así la escalabilidad de la aplicación desarrollada.

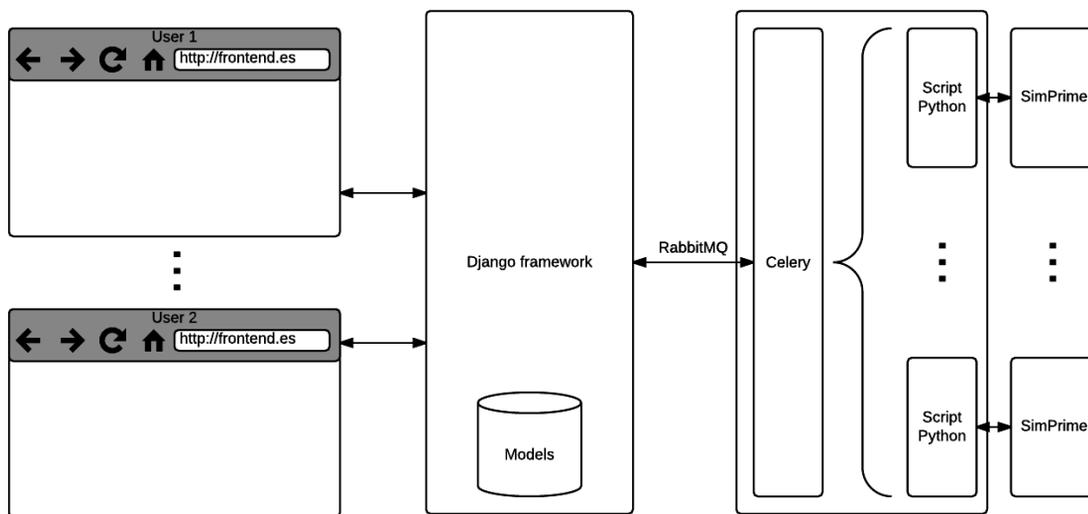


Figura 3 – Arquitectura y tecnologías de la aplicación web desarrollada para el simulador de redes PRIME SimPRIME

## VALIDACIÓN Y EVALUACIÓN

El objetivo de el estudio presentado en esta sección es validar si los resultados que arroja el simulador se ajustan a los resultados medidos en campo. Para conseguir este objetivo se siguió la siguiente metodología. En primer lugar, se definió la métrica en base a la que se realizará la comparación de los resultados del simulador con los resultados medidos en campo. La métrica elegida en este caso es el TTRi, definido como el tiempo que tarda el concentrador en recibir un informe de consumo de un contador después de haber realizado una solicitud a tal efecto. Se eligió el TTRi en lugar del TTRAll (tiempo que tarda el concentrador en recibir informes de consumo de todos los contadores de la red que comanda después de haberlos sondeado adecuadamente), porque el TTRAll es un valor global que abstrae el funcionamiento individual de los nodos, mientras que el TTRi es una medida más fina, precisa y que presentará mayor variabilidad. Además, el TTRi se puede utilizar incluso en el caso de que haya contadores que en un ciclo de medida no consigan comunicarse con el concentrador, mientras que el TTRAll en ese caso sería infinito. Una vez decidida la métrica, fue necesario desarrollar un módulo software que permitiera procesar trazas de tráfico reales para calcular los TTRi, así como los parámetros que utiliza el protocolo PRIME para configurar adecuadamente el simulador (p.ej., MTU, WS).

El simulador fue validado con trazas de una red de distribución eléctrica residencial compuesta por 65 contadores inteligentes. Como muestra la Figura 4, al procesar las trazas de tráfico se obtuvo que WS = 4 y MTU = 71 bytes. Dichos valores, junto al mapa Shapefile de la red bajo estudio, se tomaron como entradas del simulador. Las salidas del simulador (TTRi) fueron procesadas para calcular intervalos de confianza al 95% con (1).

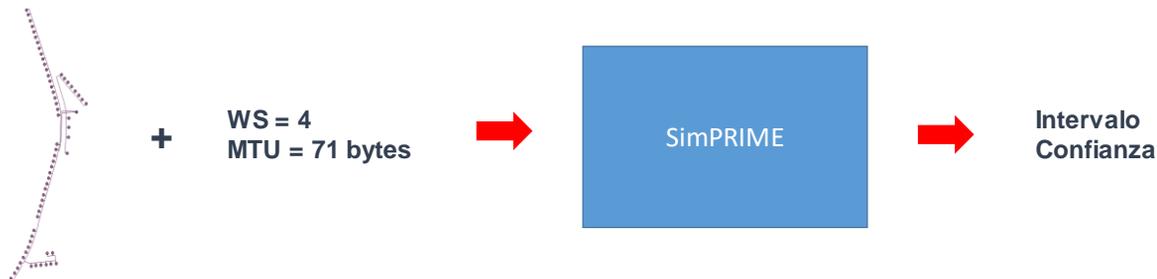


Figura 4 – Esquema de las simulaciones realizadas para la validación del simulador

$$IC = \mu \pm \left(1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}}\right) \quad (1)$$

La Tabla 1 muestra los intervalos de confianza calculados para cada una de las muestras (TTRi reales y simulados) usando la fórmula (1).

	<b>Análisis de trazas</b>	<b>Simulaciones</b>
<b>N</b>	62	4374
<b>Media</b>	13,5668709677	13,39230382
<b>Mediana</b>	13,062	12,71
<b>Desviación Típica</b>	4,208939684	1,479523905
<b>IC</b>	(13,0068429098,14,1268990257)	(13,34845694,13,4361507)

Tabla 1 - Intervalos de confianza del 95 % para TTRi medidos en campo y simulados

El intervalo de confianza del 95% obtenido a partir de la muestra de TTRi reales indica que en el 95% de los casos un TTRi medido en ese escenario estará dentro del rango (13, 14,12). El intervalo de confianza del 95% obtenido a partir de la muestra de TTRi simulados indica que en el 95% de los casos las simulaciones de ese escenario darán un TTRi dentro del rango (13,35,13,43). Por lo tanto, el que el intervalo de confianza de los TTRi simulados esté contenido dentro del intervalo de confianza de los TTRi reales indica que en más del 95 % de los casos los resultados del simulador encajan con los medidos en campo para el escenario considerado.

Además, estos valores también encajan con otros estudios disponibles en la literatura. La referencia [4], por ejemplo, indica que, en base a medidas realizadas en redes operativas, el tiempo medio que tarda el concentrador en obtener un informe diario de consumo varía entre 10 y 12 segundos, para una red PRIME estándar, y entre 12 y 15 segundos, para una red PRIME compleja.

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este artículo presenta una aplicación web que facilita enormemente la simulación de redes PLC PRIME, asbtrayendo la complejidad subyacente (simulador SimPRIME basado en OMNeT++ y MATLAB). Como se ha presentado a lo largo del artículo, dicha aplicación permite simular tanto redes de distribución reales en operación (en base a mapas en formato Shapefile) como escenarios sintéticos (en base a fichero de topología S11 y tasas de error de bit entre nodos en un mismo nivel lógico y en niveles lógicos contiguos).

Como también se ha presentado en el artículo, los resultados del simulador han sido validados frente a trazas obtenidas en campo, algo que, hasta dónde los autores saben no se había realizado anteriormente. El que el intervalo de confianza de los TTRi simulados esté contenido dentro del de los TTRi medidos es una muy buena noticia, ya que indica que los resultados del simulador encajan con la realidad para el escenario utilizado en la validación, lo que aporta relevancia a los resultados que pueda arrojar el simulador en otros casos.

Sin embargo, para extraer conclusiones sólidas y estadísticamente significativas respecto a la capacidad de generalización del simulador y a la verosimilitud de sus resultados, es necesario realizar pruebas como las descritas en este estudio para un número de escenarios grande, incluyendo redes de todas las tipologías posibles (urbanas, semiurbanas, rurales) y considerando capturas de tráfico realizadas durante períodos de tiempo más prolongados.

## REFERENCIAS

- [1] C. Cano, A. Pittolo, D. Malone, L. Lampe, A. M. Tonello and A. G. Dabak, "State of the Art in Power Line Communications: From the Applications to the Medium," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 7, pp. 1935-1952, July 2016.  
doi: 10.1109/JSAC.2016.2566018
- [2] ITU-T, "G.9904: Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for PRIME networks," October 2012. On-line: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9904-201210-I/en> (último acceso 09-10-2018)
- [3] SimPRIME: <https://www.iit.comillas.edu/jmatanza/SimPRIME/> (último acceso 09-10-2018)
- [4] A. Sendin *et al.*, "NB-PLC for LV Smart Grid services, beyond Smart Metering", IEEE ISPLC 2014, Glasgow, Escocia