

PROYECTO FIN DE CARRERA

Presentado a

**LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

Para obtener el título de

INGENIERO ELECTRÓNICO

por

Juan Camilo Baquero Bustos

***Análisis técnico y regulatorio de la tecnología PLC a incorporar
en el sistema AMI de Codensa (operado en Bogotá D.C. y
Cundinamarca***

Sustentado el 30 de enero de 2018 frente al jurado:

- *Asesor:* Roberto Bustamante Miller, Universidad de los Andes
- *Co-asesor:* Angela Inés Cadena Monroy, Profesor Asociado, Universidad de los Andes

- *Jurados:* Jose Fernando Jimenez Vargas

Análisis técnico de la tecnología PLC a incorporar en el sistema AMI de Codensa (operado en Bogotá D.C. y Cundinamarca) 3

Tabla de contenido

I.	INTRODUCCIÓN	4
II.	MARCO TEÓRICO	6
1.	Contexto internacional.....	6
2.	Contexto nacional.....	8
III.	OBJETIVOS.....	9
1.	Objetivos generales:	9
2.	Objetivos específicos:.....	10
IV.	METODOLOGÍA.....	10
2.	Escenarios.....	13
2.1.	Escenario urbano con alta densidad de usuarios.....	14
2.2.	Escenario urbano con alta densidad de usuarios.....	15
3.	Entorno de simulación NS3.....	17
4.	Teoría de transmisión de líneas	18
5.	Banda de frecuencia.....	21
6.	Indicadores.....	22
V.	RESULTADOS	¡Error! Marcador no definido.
a.	Escenario rural	24
b.	Escenario urbano	26
c.	Escenario urbano densificado.....	27
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN.....	30
1.	Recomendación:	¡Error! Marcador no definido.
2.	Conclusiones generales:	31
VII.	REFERENCIAS	323

Análisis técnico de la tecnología PLC a incorporar en el sistema AMI de Codensa (operado en Bogotá D.C. y Cundinamarca) 4

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente la infraestructura de medición avanzada (AMI) es un elemento esencial de desarrollo a nivel mundial en términos de sostenibilidad energética. Estos sistemas son capaces de responder de manera flexible a cambios en la oferta y demanda de manera eficiente con niveles económicos óptimos. Esto es posible gracias a un alto grado de integración entre los sistemas y componentes de la red por medio de enlaces de comunicación.

Un sistema AMI permite el flujo bidireccional de la información y la energía eléctrica, además permite monitorear y controlar las actividades de la red de distribución. La tecnología AMI es conformada por dispositivos de medición inteligente, redes de comunicación y un sistema de información (administrado por el operador de la red). La figura 1 es un ejemplo de un sistema AMI.

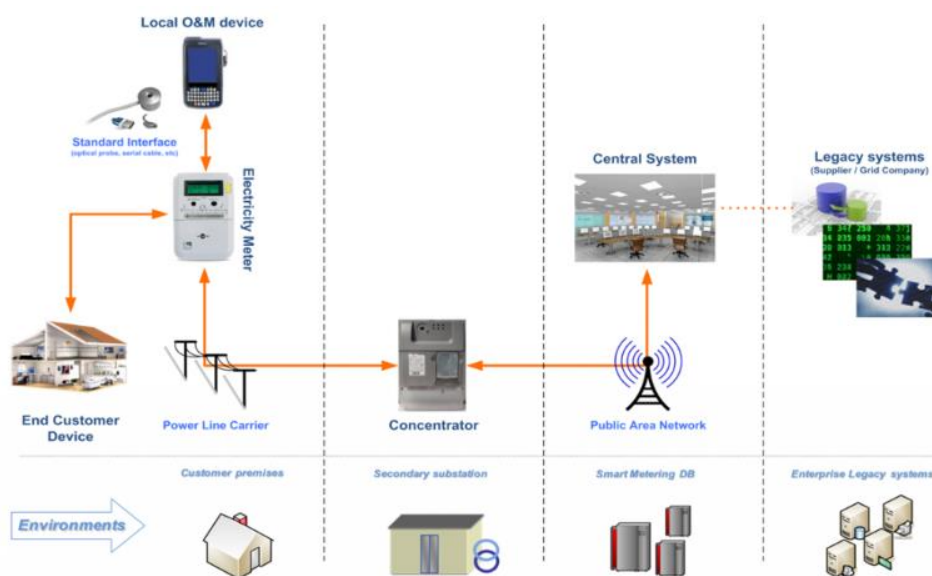


Figura 1. Sistema AMI implementado por Enel en Italia [1]

La red de comunicación en un sistema AMI es crucial, debido a que el sistema debe permitir el acceso a la información de la red eléctrica en tiempo real, garantizando la seguridad de los

Análisis técnico de la tecnología PLC a incorporar en el sistema AMI de Codensa (operado en Bogotá D.C. y Cundinamarca) 5

datos y su confiabilidad. Hoy en día, las tecnologías más usadas en estos sistemas son las redes de radiofrecuencia (RF), redes celulares y la comunicación por medio de las líneas de transmisión de potencia – Powerline communication (PLC).

El sistema de comunicación PLC es una tecnología poco comercial respecto a otras técnicas de comunicación más recientes, no obstante, en los últimos años ha cobrado un papel destacado a partir del auge de los sistemas de medición avanzada. Esto se debe principalmente a la reducción de costos que esta tecnología permite, al disminuir la inversión en infraestructura de comunicación.

En contraste, la red eléctrica no está diseñada para transmitir datos, por lo cual el desempeño de la red de comunicación PLC variará en función de las condiciones de la red eléctrica sobre la cual opere. Esto dificulta el lograr predecir el rendimiento del canal de comunicación.

Un sistema PLC transmite la información recolectada por el medidor, por medio de los cables de energía de baja tensión (BT) hasta un concentrador de datos, que generalmente es ubicado en una subestación secundaria de energía o en un transformador. Algunos de los beneficios de un sistema PLC son estos [2]:

- Reducción de costos de infraestructura, dado que utiliza medios de transmisión de energía eléctrica existentes.
- Es una de las soluciones AMI más usadas mundialmente, lo cual representa un mercado maduro de proveedores.
- Tiene alto grado de penetración tanto en zonas rurales como urbanas.

Algunas de las desventajas de este sistema son [2]:

- Niveles de seguridad bajos para la información
- Atenuación y ruido debido a la presencia de varios elementos en la red eléctrica
- El mal estado de cables y conexiones eléctricas reduce la calidad de la comunicación.

Análisis técnico de la tecnología PLC a incorporar en el sistema AMI de Codensa (operado en Bogotá D.C. y Cundinamarca) 6

II. MARCO TEÓRICO

1. Contexto internacional

Un sistema de medición avanzada trae consigo beneficios para todos los actores implicados en la red eléctrica, por ejemplo, reduce las pérdidas no técnicas y se elimina el costo referido a lectura del medidor por parte del personal de la empresa. Países europeos como Italia, Alemania, Dinamarca, entre otros han sido pioneros en la implementación de soluciones y tecnologías relacionadas a este campo. El éxito de los medidores inteligentes en estos países se debe a ejercicios de regulación a nivel nacional y de tipo obligatorio que garantice la modernización de los dispositivos de medición [1].

Una de las principales limitaciones al momento de implementar un sistema AMI son los altos costos de infraestructura de comunicaciones asociados a la solución. Situación que ha generado valor al hecho de usar la red eléctrica como medio de transmisión de datos, algunos casos de éxito son Italia, España, Reino Unido , Estados Unidos y Suecia [4] .

Actualmente existen varios protocolos de comunicación para PLC, estos han sido creados por utilities, fabricantes de equipos de medición y entes reguladores pertenecientes al sector eléctrico. Estos protocolos permiten la interoperabilidad entre equipos de diferentes fabricantes. Los protocolos más relevantes son G3, Meters&more, PRIME y Open Smart Grid Protocol (OSGP), entre otros [4].

En general, se pueden diferenciar dos generaciones de protocolos: la primera, hace uso de esquemas de modulación de un solo canal (FSK, S-FSK, BPSK), la segunda implementa multiplexación por frecuencia OFDM, usando varias ondas subportadoras. Las tecnologías que implementan OFDM logran un mejor rendimiento en la comunicación. La tabla 1 reúne las principales características de los protocolos en consideración.

Análisis técnico de la tecnología PLC a incorporar en el sistema AMI de Codensa (operado en Bogotá D.C. y Cundinamarca) 7

Variables	Protocolo	Meters&More	G3 PLC	PRIME	OSGP
Aspectos generales	Tipo de estándar	Privado	Abierto	Abierto	Abierto
	Medio de transmisión	PLC	PLC Ethernet Serial	PLC Ethernet	PLC
	Compatibilidad	DLMS/COSEM	DLMS/COSEM	DLMS/COSEM	DLMS/COSEM
	Cifrado	AES128	AES128	AES128	RC4
	Tipo de modulación	BPSK	PSK/S-FSK/OFDM	PSK/OFDM	BPSK
	Región de uso*	Italia (>35'000.000)	Francia (>38'000.000)	España (10'500.000)	Norte de Europa (4'000.000)
		España (>13'000.000)	Holanda (2.000)		
		Montenegro (175.000)			
Máx. velocidad de transmisión	4.8 kbps	33.4kbps (DQPSK)	128kbps		
Layers OSI	1	X	X	X	X
	2	X	X	X	X
	3	X	X		X
	4	X	X		X
	5		X		X
	6		X		X
	7	X	X		X

Tabla 1. Protocolos PLC usados comúnmente

Existen dos tipos de sistemas PLC, de banda estrecha (narrowband-NB) y ancha (broadband-BB). La primera trabaja en frecuencias de 0kHz hasta 500kHz, y la segunda entre 2MHz y 30MHz [7]. Generalmente, en aplicaciones AMI se utiliza NB en la red de BT, mientras que BB en MT. Las frecuencias están definidas en función de la regulación del lugar donde se implementará el sistema PLC. Por ejemplo, en Europa se opera bajo la normativa técnica CENELEC EN 50065-1, la cual fija una banda de frecuencia A desde 3kHz hasta 95kHz para que las “utilities” controlen y monitoreen las redes de BT, las bandas B, C y D para el usuario final, definidas a raíz del uso histórico de las mismas [8].

La figura 2 muestra las principales bandas de frecuencia usadas a nivel internacional.

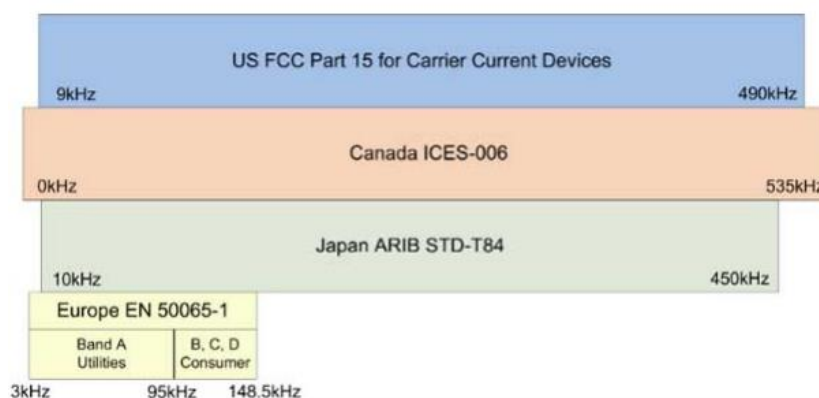


Fig. 2 Asignación de bandas de frecuencia de sistemas PLC de banda estrecha [7]

Análisis técnico de la tecnología PLC a incorporar en el sistema AMI de Codensa (operado en Bogotá D.C. y Cundinamarca) 8

La figura 2 muestra que el único estándar que no fija una banda de frecuencias hasta aproximadamente 500kHz es el dado por CENELEC EN 50065-1. Evidenciando un desaprovechamiento de ancho de banda y un aumento de interferencias, respecto a los demás estándares que han trabajado estas frecuencias históricamente [8].

2. Contexto nacional

Actualmente, Colombia se encuentra en el proceso de planeación y diseño de un sistema AMI [9], [10]. En este trabajo se han propuesto tres escenarios de desarrollo de esta tecnología a partir de antecedentes internacionales y las condiciones mismas del sector eléctrico colombiano. El primer y segundo escenario implican la creación de un estándar que permita la interoperabilidad entre medidores de manera gradual y acelerada, respectivamente. Por último, el tercer escenario plantea que cada empresa escoja de manera independiente una opción AMI, para lograr una expansión más rápida que en los otros dos escenarios.

Y bajo las condiciones del tercer escenario, se presenta el caso de la empresa Codensa S.A, distribuidora de energía eléctrica en la región de Cundinamarca y Bogotá D.C, que implementará un sistema AMI basado en tecnología de comunicación PLC. Codensa actualmente cuenta con [6]:

- 2.9 millones de usuarios, ubicados en Bogotá y Cundinamarca
- Más de 120 subestaciones de energía
- 45 kms de redes de media y baja tensión (MT y BT, respectivamente)
- Una participación en el mercado eléctrico colombiano mayor al 22%

Actualmente, Codensa hace parte del grupo italiano Enel, por lo cual la experiencia adquirida por la empresa italiana en el despliegue de sistemas AMI en Italia y España, se verá reflejada en los lugares de operación de Codensa. Es decir, en Bogotá y Cundinamarca se instalarán medidores inteligentes que se comunicarán por medio de PLC y otra tecnología de comunicación inalámbrica si es imposible el uso de PLC.

Análisis técnico de la tecnología PLC a incorporar en el sistema AMI de Codensa (operado en Bogotá D.C. y Cundinamarca) 9

En Colombia el sector eléctrico no ha sido del todo ajeno a la modernización de la red eléctrica, empresas comercializadoras como CODENSA, EPM, EMCALI y ELECTRICARIBE han desarrollado proyectos piloto con medidores inteligentes [2]. Los resultados de estos proyectos se han visto reflejados en la promoción de la medición inteligente por parte de las empresas EPM y EMCALI, impulsando la funcionalidad de energía prepagada y la reducción de pérdidas principalmente [23,24]. En el caso de EMCALI más del 80% de las subestaciones de Cali ya cuenta con los medidores inteligentes con un total de 31.000 equipos instalados [23].

El 29 de enero del presente año el Ministerio de Minas y Energía expidió la resolución 40072 por la cual se establecen los mecanismos para implementar la Infraestructura de Medición Avanzada en el servicio público de energía eléctrica. En dicha resolución se definen las funcionalidades que debe soportar el medidor inteligente, los objetivos que se deben cumplir con la implementación de este proyecto y establece una meta para el año 2030, el 95% de los usuarios urbanos y el 50% de los usuarios rurales del país, conectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN) deben tener acceso a un sistema AMI. Además, define roles para la UPME y la Comisión de Regulación de Gas y Energía (CREG) [25].

Mediante la resolución 40072 se define la hoja de ruta para la implementación de medición inteligente en Colombia, avance significativo debido a que la falta de regulación y estandarización ha desacelerado el proceso de modernización de la red eléctrica. Pues por la experiencia internacional se puede afirmar que los más beneficiados e interesados en la tecnología son los operadores de red.

III. OBJETIVOS

1. Objetivos generales:

Análisis técnico de la tecnología PLC a incorporar en el sistema AMI de Codensa (operado en Bogotá D.C. y Cundinamarca)

Análisis técnico de la tecnología PLC a incorporar en el sistema AMI de Codensa (operado en Bogotá D.C. y Cundinamarca) 10

2. Objetivos específicos:

- Diseñar la infraestructura de comunicaciones en los medidores instalados por Codensa utilizando PLC, considerando el entorno en el cual sería desplegada la tecnología (urbano o rural).
- Definición de banda de frecuencia y protocolo de comunicación para un sistema PLC.
- Realizar una propuesta de medición para redes PLC

IV. METODOLOGÍA

El proyecto consiste en la evaluación técnica de un sistema AMI-PLC en la última milla (comunicación entre concentrador de datos y medidor), a implementar en la red eléctrica operada por Codensa. El análisis se inicia identificando las características de la red eléctrica en cuestión; topologías de red, número de usuarios, tipos de cables usados. Para lograr una mejor fidelización de las condiciones reales en el estudio se usaron datos del Departamento Nacional de Estadística [15], Codensa [6, 14], empresas productoras de cableado eléctrico [12 y 13].

Del estudio realizado se distingue un entorno rural y otro urbano, en este último, se encuentran diferencias significativas en la densidad de usuarios, por esta razón, se definen dos escenarios urbanos y uno rural que representen las condiciones actuales de la red eléctrica.

Una vez se identificaron las características de la red, se definieron los detalles de cada uno de los escenarios. Luego, se implementaron las topologías diseñadas en el simulador Network Simulator (ns-3), además de esto, se tuvieron en cuenta parámetros del canal de comunicaciones como el ancho de banda y el número de subportadoras en función de los protocolos PRIME y G3.

Los escenarios escogidos son replicables y comprenden la mayoría de los usuarios de la red eléctrica, lo que permite tener resultados generales desde el estudio de una muestra. En los numerales siguientes se explica el detalle de los procesos y conceptos involucrados en el proyecto.

1. Topología de red y cableado

Para lograr un mejor modelamiento de la red eléctrica en los escenarios creados se realizaron acercamientos con ingenieros de venta de las empresas Procables y Condumex (actuales proveedores de Codensa) [12]. Se conoció que hay varios tipos de cables desplegados en la red de BT y MT, las variables más relevantes son el calibre y material del conductor, número de conductores, material y espesor del aislamiento, voltaje de operación y por último, especificaciones técnicas definidas por las empresas de distribución, en este caso Codensa.

Principalmente se usan dos tipos de cables en BT:

- **Cable para uso en redes de distribución secundaria:** Es el conductor que inicia en el transformador o subestación secundaria y termina en postes y cajas de distribución.

Ejemplo práctico:

Cable Cuádruplex: cable formado por tres conductores en Aluminio 1350 H19 (fases) y un conductor en ACSR (neutro-mensajero), aislado con polietileno reticulado (XLPE), este cable cumple se rige bajo la especificación dada por RETIE y ET115 para cables multiplex [13].



Fig. 3 Cable cuádruplex

- **Cable de acometida (caja de distribución-medidor):** Es el conductor encargado de transportar la energía desde el poste o caja de distribución hasta el dispositivo de medición.

Ejemplo práctico:

Cable de acometida tipo Trébol: cable formado por cuatro conductores en cobre y aislamiento en polietileno (PE), que cumple con la especificación técnica de Codensa ET113 y con el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) [13].



Fig. 4 Cable de acometida tipo Trébol

A partir de la información del cableado usado, se obtuvo información precisa de la topología de la red, por ejemplo, ubicación de transformadores, distancias máximas y mínimas entre transformador y medidor, entre otras características y configuraciones.

Aunque los cables son muy importantes en el diseño de la red de comunicación, debido a la inherente relación que tiene la tecnología con la red eléctrica, se deben tener en cuenta otro tipo de variables físicas como lo son:

- Número de medidores por transformador
- Número de medidores por concentrador de datos
- Distancia de los cables de baja tensión (BT)
- Ancho de banda sobre el cual se transmitirá la información

Estos cables fueron implementados en los escenarios diseñados, donde se permite introducir los parámetros para un cable concéntrico de tres núcleos, los valores son mostrados en la tabla 2.

Parámetro	Unidad de medida	Acometida Trébol	Cable Cuadraplex
Constante dieléctrica	N/A	2.3	0.9
Conductividad específica	S/m	5.96×10^7	3.78×10^7
Radio del cable	mm	3.47	4.79
Radio del conductor	mm	2.33	3.27
Factor de disipación	N/A	0.0001	0.004

Tabla 2. Parámetros de cables implementados

Los valores de permitividad relativa, conductividad específica y el factor de dispersión fueron hallados en [16]. Mientras que el radio del conductor y el cable fueron calculados de la siguiente forma:

Para el cable cuadraplex según la ET115, en este tipo de cables cada conductor debe tener 7 hilos de aluminio y cada hilo debe tener un diámetro de 2.474mm. Luego

$$A_{hilo} = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi = 4.8 \text{ mm}^2$$

$$A_{conductor} = A_{hilo} * 7 \text{ hilos} = 33.65 \text{ mm}^2$$

$$r_{cond} = \sqrt{\frac{A_{cond}}{\pi}} = 3.27 \text{ mm}$$

Teniendo en cuenta el espesor del aislamiento en este caso XLPE, 1.52mm

$$r_{cable} = r_{cond} + 1.52 = 4.79 \text{ mm}$$

Por otra parte, se determinaron los siguientes parámetros referentes a la topología de la red [3], [14].

2. Escenarios

En los escenarios planteados no se tiene en cuenta la implementación de un display en el medidor o en casa que permita a los usuarios conocer los diferentes cambios en la demanda. Se propone como solución una plataforma web operada por el operador en este caso Codensa, en la cual cada individuo por medio de una cuenta pueda conocer esta información y ejercer mecanismos de respuesta a la demanda y mejorar su eficiencia energética.

2.1. Escenario urbano con alta densidad de usuarios

Este escenario se presenta con mayor frecuencia en los estratos 4, 5 y 6, aproximadamente el 50% de las viviendas en Bogotá son apartamentos [15]. Son lugares donde se concentra una gran cantidad de usuarios en áreas relativamente pequeñas, por ejemplo, conjuntos residenciales, edificios de apartamentos y zonas comerciales. Por consiguiente, los dispositivos de medición son ubicados en cuartos dedicados y los concentradores de datos se presentan con mayor frecuencia en este tipo de zonas, debido a la capacidad máxima de estos.

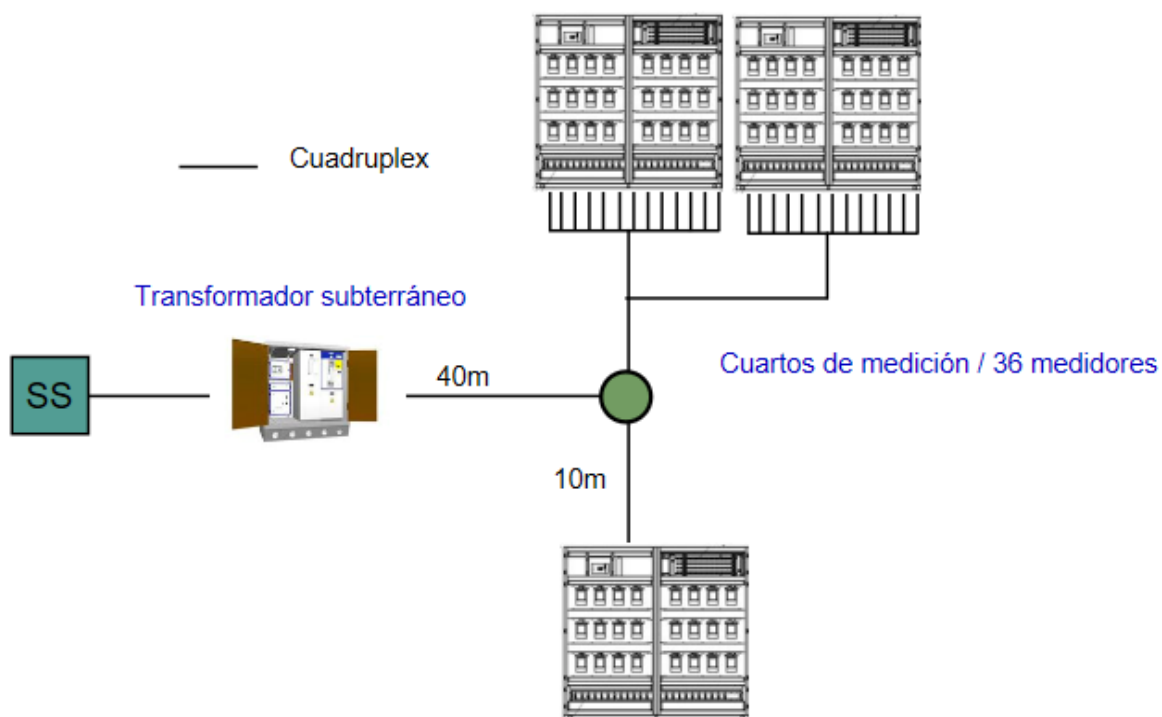


Fig. 5 Escenario urbano densificado

Este escenario está conformado por un transformador de tipo subterráneo ubicado en un sótano de un edificio de 9 pisos, cada uno de estos cuenta con 4 apartamentos. Luego hay un total de 36 medidores.

2.2. Escenario urbano con alta densidad de usuarios

[illegible]

Fig. 6 Escenario urbano

Este escenario tiene en cuenta un pequeño grupo de casas, ubicado a lo largo de dos cuerdas. Se hace uso de líneas aéreas de transmisión desde el transformador hasta los postes más cercanos con el cable AL3x95XLPE y posterior a esto, se cambia a la acometida de tipo trébol.

2.3. Escenario rural

Dada la fusión de Codensa con la empresa de energía de energía de Cundinamarca (EEC), se define un escenario contemple entornos rurales. Se plantea un escenario donde las distancias entre el transformador y los usuarios son más largas respecto a los escenarios urbanos, adicionalmente, las cargas están distribuidas de una forma más dispersa y las cargas son menores. Sin embargo, las normas técnicas usadas por Codensa en estas zonas son las mismas que moderan las conexiones eléctricas en Bogotá D.C. El escenario que se escogió es netamente rural, por lo cual no se tuvo en cuenta el sector urbano de cada municipio.

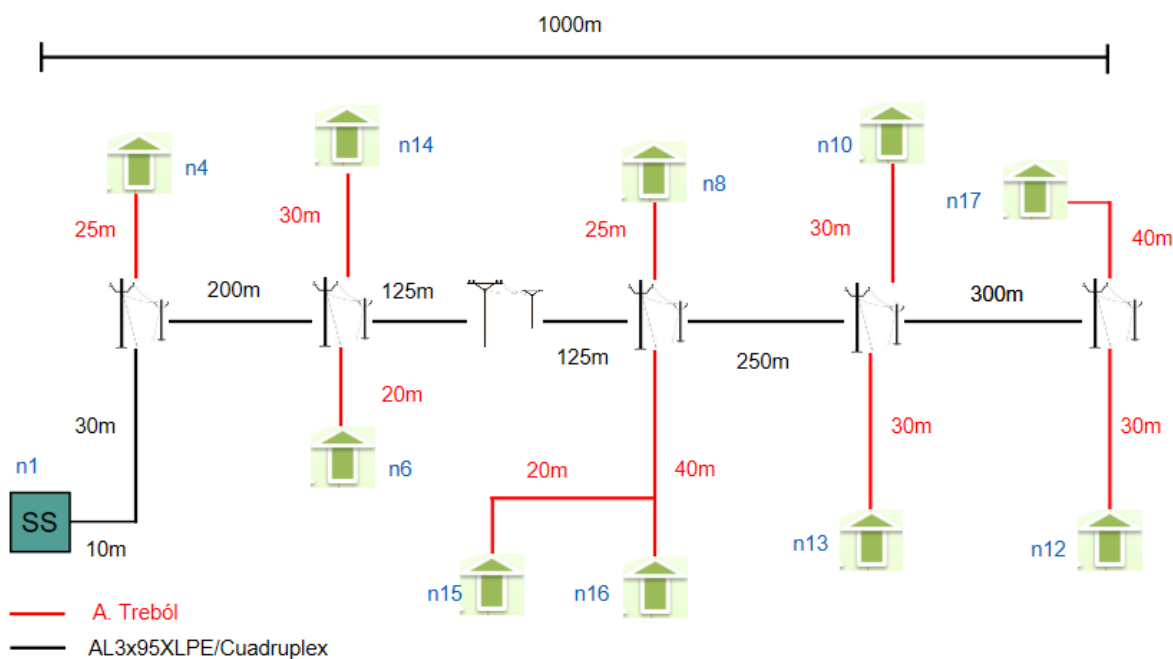


Fig. 7 Escenario rural

La figura 7 es una representación aproximada de la red eléctrica ubicada en un tramo de la vía entre los municipios de Ubaté y Cucunubá. Se hizo uso de la herramienta Google Maps para determinar la distancia y el número de postes en una distancia de 1.1 km, en el espacio comprendido hay un total de 10 usuarios.

3. Entorno de simulación NS3

Una vez definidos los parámetros en los escenarios propuestos, se realizó la simulación de los mismos haciendo uso del software de código abierto Network Simulator 3 (NS-3).

NS3 es un simulador de red, basado en eventos discretos y se desarrolla en los lenguajes C++ y Python. Por medio de NS3, investigadores de la Universidad de British Columbia (Fariba Aalamifar, Alexander Schlogl, Don Harris y Lutz Lampe), crearon una extensión para modelar el canal de comunicación de una red PLC [17]. El código generado por los investigadores es también de tipo abierto y permite controlar los siguientes parámetros:

- Ancho de banda en frecuencia (límite inferior-superior, número de subportadoras)
- Modulación (BPSK, QPSK, QAM16, QAM64)
- Cantidad de información a transmitir
- Implementa acceso múltiple por detección de portadora y prevención de colisiones (CSMA/CA) como protocolo de acceso al medio
- Valores de impedancia de los nodos (invariante y variante en los dominios del tiempo y frecuencia)
- Tipo de cable: Es posible modelar cables sectoriales y cables concentricos de tres fases.
- Número de nodos en la red
- Implementación de dirección IPv4 y MAC
- Fuentes de ruido blanco y de color

Los resultados que el simulador genera son la función de transferencia entre dos nodos, la potencia espectral de potencia recibida (PSD) y relación señal a ruido (SNR) medida en el receptor.

El software NS3 fue escogido como herramienta de evaluación del proyecto debido a que no hay muchos simuladores para redes PLC, seguido de esto, algunos simuladores sólo permiten realizar la simulación de un canal o en su defecto sólo tienen en cuenta las impedancias de tipo constante en el tiempo y frecuencia [17].

El trasfondo teórico sobre el cual se soporta el simulador está dado por la teoría de transmisión de líneas (TLT), la cual será explicada brevemente más adelante.

4. Teoría de transmisión de líneas

La figura 8 muestra la representación de un cable de transmisión de potencia en términos de variables físicas como su resistencia, capacitancia, inductancia y conductancia.

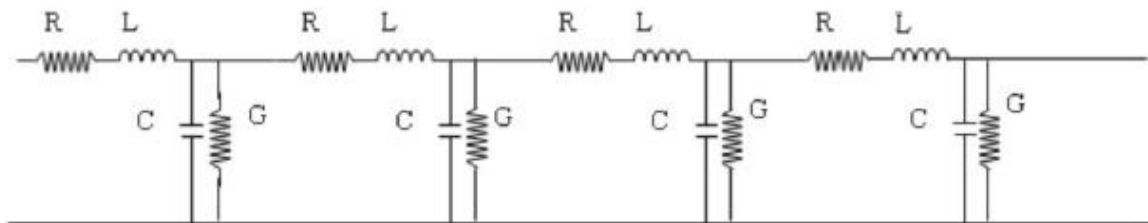


Fig. 8 Modelo de representación TLT de un conductor [18]

Este modelo asume que estos parámetros se distribuyen de manera uniforme en la línea y pueden ser calculados como se muestra a continuación:

$$R = \sqrt{\frac{\rho\pi\mu_0}{r^2}}, \quad G = 2\pi f C \tan(\delta_c)$$

$$L = \frac{\mu_0 \vartheta}{2r}, \quad C = \frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r r}{\vartheta}$$

Donde:

ρ , la resistencia específica

μ_0 , permeabilidad en el vacío

$\tan(\delta)$, factor de disipación

ϵ_0 , permitividad en el vacío

ϵ_r , permitividad relativa

r , radio del conductor

ϑ , espesor del aislamiento

De manera más específica, el simulador permite representar los cables de potencia y elementos pasivos (transformadores, cargas, etc) como redes de dos puertos, descritos en función de los parámetros ABCD. En general, la red PLC es modelada como una red de dos puertos

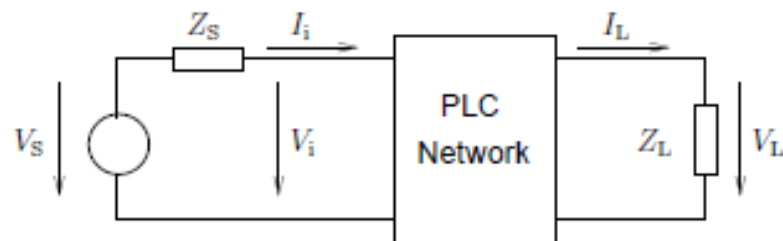


Fig. 9 Ilustración de red PLC como red de dos puertos [19]

Al encontrar la matriz de parámetros ABCD de cada elemento ubicado entre un transmisor (Tx) y un receptor (Rx), se puede calcular una matriz ABCD que representa todo el canal implicado en la transmisión [17].

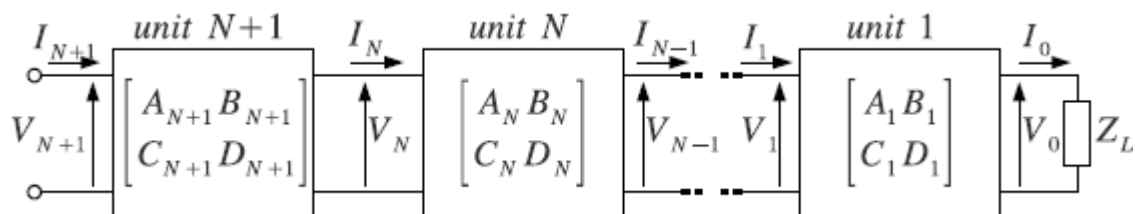


Fig. 10 Representación matricial de red en función de los parámetros ABCD [20]

La figura 10, representa el canal de comunicación modelado entre el transmisor $N + 1$ y el receptor con impedancia de carga Z_L , luego la red tiene $N + 1$ elementos. A fin de calcular la matriz ABCD del canal, se deben multiplicar todas las matrices de parámetros ABCD:

$$\begin{bmatrix} V_{N+1} \\ I_{N+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{N+1} & B_{N+1} \\ C_{N+1} & D_{N+1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_N & B_N \\ C_N & D_N \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ I_0 \end{bmatrix}$$

Asimismo, es posible computar la función de transferencia de un elemento particular o de todo el canal implicado en la transmisión, a partir de los parámetros ABCD como lo muestra la figura 12.

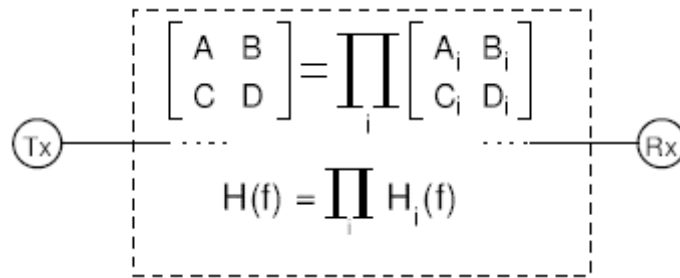


Fig. 11 Ilustración de uso de TLT para hallar la función de transferencia [17].

La estimación de la función de transferencia del canal está dada por la relación:

$$H(f) = \frac{Z_L}{AZ_L + B}$$

O en caso de que se tengan en cuenta las pérdidas por acoplamiento de impedancias

$$H(f) = \frac{Z_L}{AZ_L + B + Z_S(CZ_L + D)}$$

Finalmente, para obtener los parámetros ABCD de una línea de transmisión de longitud l , se tiene que

$$A = \cosh(\gamma l), \quad B = Z_0 \sinh(\gamma l)$$

$$C = \frac{1}{Z_0} \sinh(\gamma l), \quad D = \cosh(\gamma l)$$

Análisis técnico de la tecnología PLC a incorporar en el sistema AMI de Codensa (operado en Bogotá D.C. y Cundinamarca) 21

Luego, la constante de propagación y la impedancia característica son dependientes de resistencia, inductancia y demás

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j2\pi fL}{G + j2\pi fC}}, \quad \gamma = \sqrt{(R + j2\pi fL)(G + j2\pi fC)}$$

5. Banda de frecuencia

El ancho de banda sobre el cual operara el sistema PLC es un factor determinante en el funcionamiento del mismo. En el proyecto se evaluaron varios rangos de frecuencia de banda estrecha (NB), fueron seleccionados los protocolos G3 PLC y PRIME, utilizados en Francia y España, respectivamente [21],[22].

Las razones por las que fueron escogidos son las siguientes: son de tipo abierto y las especificaciones técnicas son de fácil acceso, además, estos protocolos han evolucionado para operar bajo las regulaciones de la FCC (Federal Communications Comissions) en Estados Unidos, y en Japón por medio de ARIB (Association of Radio Industries and Businesses) (figura 2) [EMC]. Es decir, han aumentado el ancho de banda sobre el cual operan las redes de comunicación PLC, lo cual mejora la tasa de transmisión de datos y la robustez del sistema [22].

La figura 12 muestra la asignación de frecuencias realizada en la versión 1.4 del protocolo PRIME

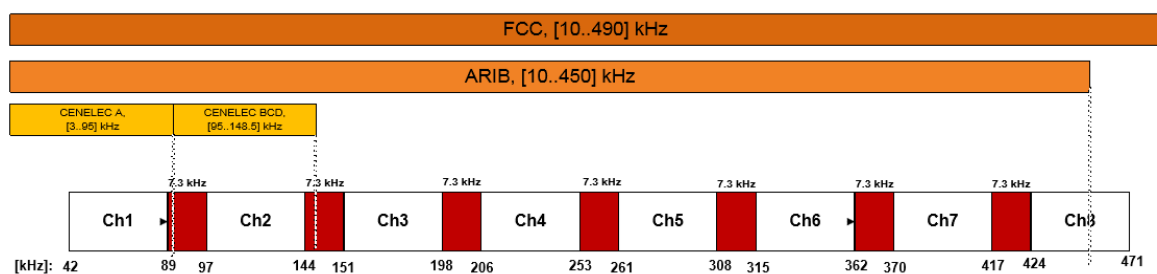


Fig. 12 Extensión de PRIME sobre bandas FCC y ARIB [22]

Esta versión implementa varios canales independientes, con características similares a los que se trabajan en CENELEC (canales 1 y 2). Se utilizan 97 sub-portadoras en cada canal, lo cual

implica que todas las subportadoras tienen un ancho de banda de 488Hz. Entre los canales se implementan intervalos de guarda de 7.3kHz para evitar interferencias. Haciendo uso de estos parámetros se realizaron las simulaciones de los escenarios planteados.

En contraste, el protocolo G3 implemento la asignación de frecuencias de la siguiente forma; soporta transmisiones entre 145.3kHz y 478 kHz, con 72 subportadoras, espaciadas equitativamente en pasos de 4.687 kHz. Estas características son válidas para las dos bandas en cuestión, FCC y ARIB.

6. Indicadores

6.1. Relación señal a ruido SNR

Es el radio que existe entre el nivel de la señal recibida y el ruido que presenta un canal de comunicación. Esto significa que a mayor SNR mejor es la calidad del enlace, el SNR se calcula de la siguiente forma:

$$SNR (dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{Señal Recibida}{Ruido} \right)$$

El simulador entrega este parámetro en función del número de subportadoras que tenga el canal de comunicación, por ejemplo, en G3 se utilizan 36 subportadoras en la banda CENELEC. Asumiendo que en el canal de comunicación estudiado existe un SNR mínimo que garantice la correcta comunicación entre un medidor inteligente y un concentrador de datos y viceversa. Se plantea el uso de este parámetro como indicador de resultados del proyecto, haciendo uso de valores de SNR tomados en pruebas piloto de medición inteligente en Bogotá y, mediciones del protocolo PRIME en la banda de 150 a 500 kHz en España [3], [8].

EL estudio realizado en Bogotá define rangos de evaluación que determinan el estado de la comunicación como sigue:

Rango	Estado
SNR>15 dB	Comunicación exitosa
5 dB < SNR <15 dB	No es posible determinar
SNR< 5 dB	Comunicación no exitosa

Tabla 2. Rango de evaluación utilizado en [3]

En el caso de las mediciones realizadas en España se realizó la tabla 3, para determinar valores que permitan evaluar la comunicación entre dos medidores. Una de las ventajas de utilizar estos datos es que se pueden comparar directamente con los resultados de SNR por canal PRIME.

Canal	SNR (dB)
3	14.88
4	13.95
5	13.29
6	24.43
7	17.12
8	19.47

Tabla 3. Rango de evaluación calculado a partir de mediciones entre 150-500kHz [8]

La elaboración de esta tabla se hizo calculando el promedio de las mediciones exitosas (donde se recibían el 100% de los paquetes enviados) o tomando el valor mínimo en una de estas transmisiones a partir de la poca cantidad de datos. Los canales 1 y 2, no fueron medidos en el estudio debido a que el objetivo de este es evaluar los canales de la versión 1.4 de PRIME.

6.2. Capacidad del canal (Teorema de Shannon)

Según el teorema de Shannon existe una cantidad máxima de transmisión de información sobre un canal de comunicación, se conoce como capacidad de canal. Dado un canal de comunicación operando en la presencia de una fuente de ruido, se establece que la capacidad del canal está dada por:

$$C = B \log_2(1 + SNR)$$

Donde B es el ancho de banda del canal en Hertz y el SNR es la relación señal a ruido. Este parámetro es un límite teórico, se podría decir que imposible de alcanzar y su resultado se da en bits/segundo.

Dado que la simulación entrega los datos de SNR por cada subportadora, la ecuación de capacidad de canal cambia a:

$$C = F * \sum \log_2(1 + SNR)$$

Donde F es el ancho de banda de cada subportadora.

6.3. Tasa de error bit (BER)

Este parámetro de desempeño se define como el número de bits erróneos por unidad de tiempo sobre un canal de comunicación. Partiendo del resultado SNR se puede calcular el BER, usando la siguiente relación:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{SNR * B}{C}$$

Calculando la eficiencia de energía por bit, se tiene que:

$$Ber = \frac{1}{2} * erfc\left(\frac{E_b}{N_0}\right)$$

Donde $erfc$ es el complemento de la función error.

V.Simulación

En todos los escenarios se realizó una simulación en la cual se transmitió en diferentes anchos de banda, el nodo transmisor representa el transformador y el receptor un contador inteligente. En todos los escenarios se seleccionó el medidor más lejano.

1) Relación señal a ruido (SNR)

a) Escenario rural

Se realizaron varias transmisiones desde el nodo 1 (transformador) hacia varios nodos a diferentes distancias con el fin de evaluar la incidencia en la comunicación de esta variable. La figura 13 permite evidenciar la atenuación debida a la distancia, por ejemplo, el nodo 4 que está a 65 metros tiene una atenuación casi imperceptible, a medida que es alejado el receptor, las pérdidas aumentan.

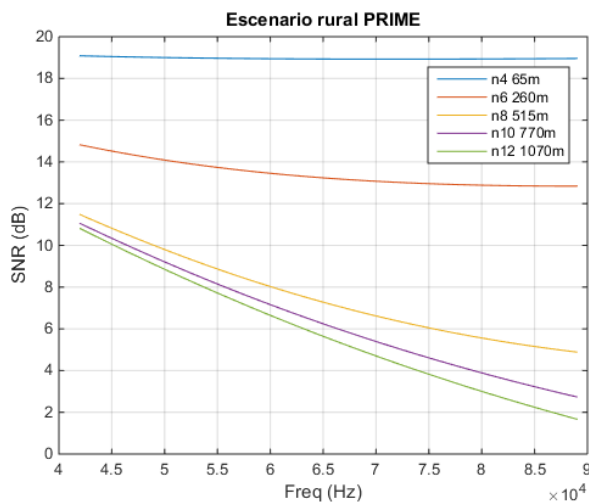


Fig. 13. SNR de transmisión desde el nodo 1 a varias distancias.

La figura 14 es la gráfica de la transmisión entre el nodo 1 y el nodo 12 ubicado a 1070 metros de distancia, se puede observar que el SNR decae a medida que la frecuencia aumenta.

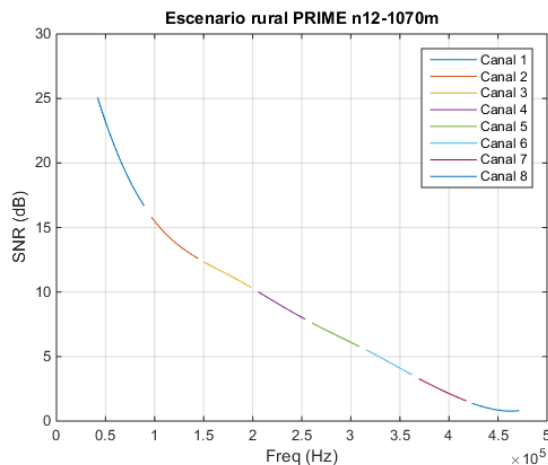


Fig. 14. SNR de transmisión desde el nodo 1 a nodo 12 en canales PRIME

La figura 15 muestra el SNR de la transmisión del nodo 1 al nodo 12 sobre la banda de frecuencia de G3 especificada para la FCC. Esta muestra un comportamiento similar a la figura 14, sin embargo, sobre la banda CENELEC, el protocolo G3 parece tener mejor desempeño al lograr un SNR mayor a 25.

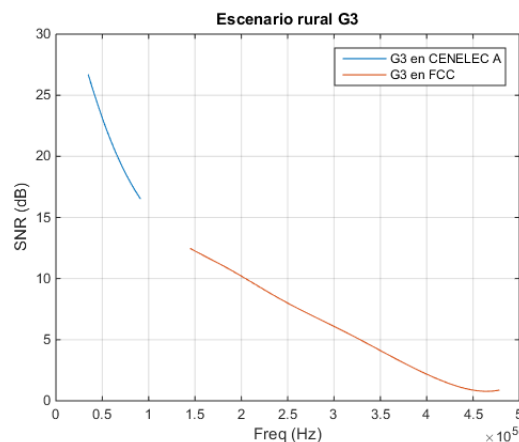


Fig. 15. SNR de transmisión desde el nodo 1 a nodo 12 en canales G3

Teniendo en cuenta las tablas 2 y 3, se podría determinar que la comunicación entre el transformador y el medidor inteligente ubicado a 1070 metros no es factible en ninguno de los escenarios del protocolo.

b) Escenario urbano

En este escenario se simuló la comunicación entre el nodo 1 y el nodo 20, con una distancia de 140 metros. Al igual que en el caso del escenario rural, se presentan pérdidas por la distancia y bifurcaciones.

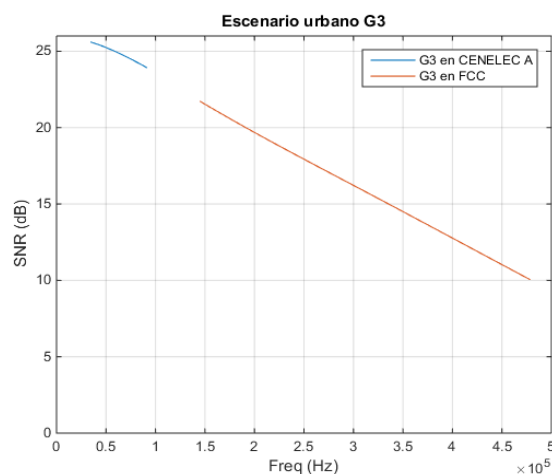
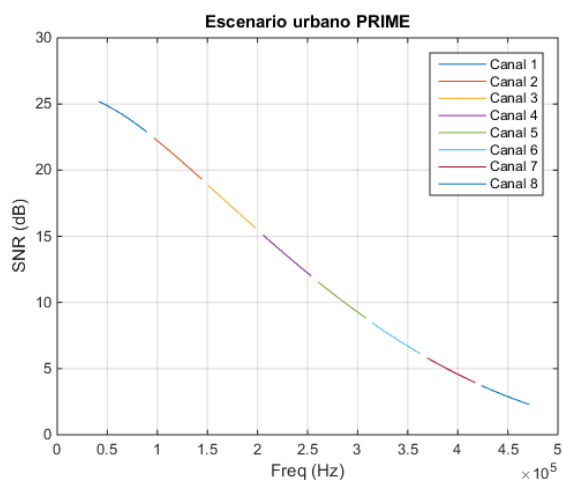


Fig. 16. SNR de transmisión desde el nodo 1 a nodo 12 en canales PRIME y G3

Al comparar el desempeño de la red de comunicación, se observa un mejor desempeño del canal sobre el protocolo G3. El valor mínimo de SNR es de aproximadamente 10 dB comparado con el presentado por el protocolo PRIME en su último canal.

Respecto a los umbrales propuestos para la evaluación de SNR, el protocolo PRIME sólo alcanza transmisiones óptimas hasta el canal 3 (aproximadamente 200 kHz), mientras que G3 supera los 300 kHz con un SNR mayor a 15dB.

c) Escenario urbano densificado

Este escenario las pérdidas presentadas se generan a partir de la alta densidad de medidores y las bifurcaciones generadas a partir de la topología. Sumado a esto, la impedancia en cada medidor genera atenuaciones en la comunicación. Por lo cual, este escenario fue necesario aumentar la potencia de transmisión de -50 dBm/Hz a -42.97 dBm/Hz siendo este valor el máximo permitido por CENELEC en la banda A. La distancia entre los nodos implicados en la transmisión es de aproximadamente 50 metros.

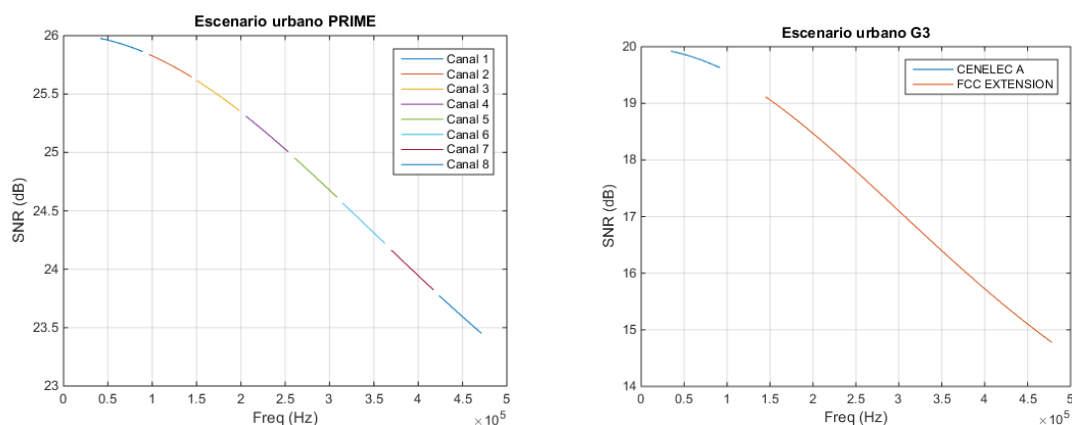


Fig. 17 SNR de transmisión entre nodo 1 y nodo 27 en canales PRIME y G3

Los resultados obtenidos en este escenario demuestran, mejor desempeño para el protocolo PRIME. Debido a que logra alcanzar comunicaciones exitosas en todos los canales de manera

óptima cumpliendo con los requerimientos de los umbrales fijados en las tablas 1 y 2. Sin embargo, este escenario no tiene un rendimiento negativo al hacer uso de las especificaciones de G3. Sólo a partir de 450 kHz y por aproximadamente 0.3 dB, el estado de comunicación que entáblese es dudable.

2) Capacidad de canal

A continuación, se muestran los resultados de capacidad del canal de cada escenario. Se presentan conjuntamente para así lograr realizar un análisis más general. Los escenarios rural y urbano de baja densidad tienen un máximo en 25 dB, lo cual implica que tengan la misma capacidad de canal en ese punto, por tener el mismo ancho de banda en esa subportadora.

De las figuras 18,19 y 20 se puede concluir que acorde a los resultados de SNR, los canales que mejor capacidad en bit/s son aquellos que trabajan a frecuencias más bajas. Es decir, los canales 1 y 2 en PRIME. En general, la capacidad del canal aumenta en función del SNR y tiende a un límite que es el valor teórico calculado, esto se evidencia claramente en las figuras 18 y 19, donde pareciese que el canal tiende a una asíntota en 24000 bit/s.

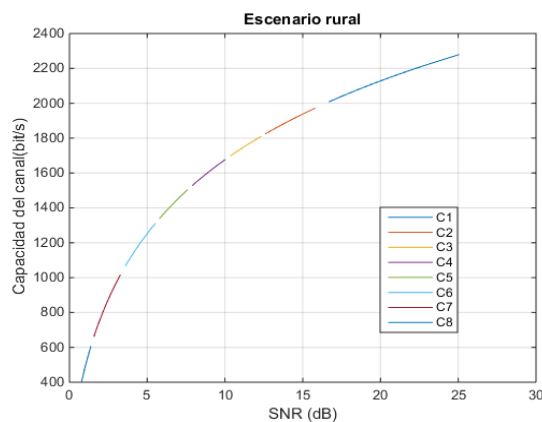


Fig. 18 Capacidad de canal rural

Aunque los canales más altos presenten niveles de SNR más bajos y, por ende, su capacidad del canal es menor, el implementar estos canales aumentan el rendimiento general del sistema de comunicación gracias a que se aumenta el ancho de banda.

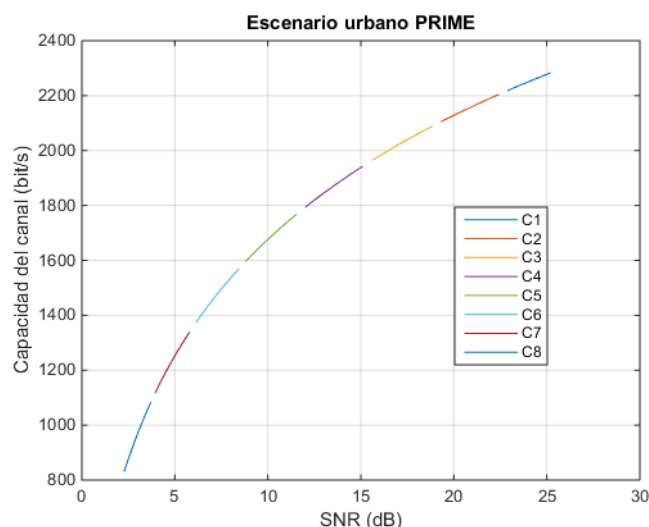


Fig. 19 Capacidad del canal urbano

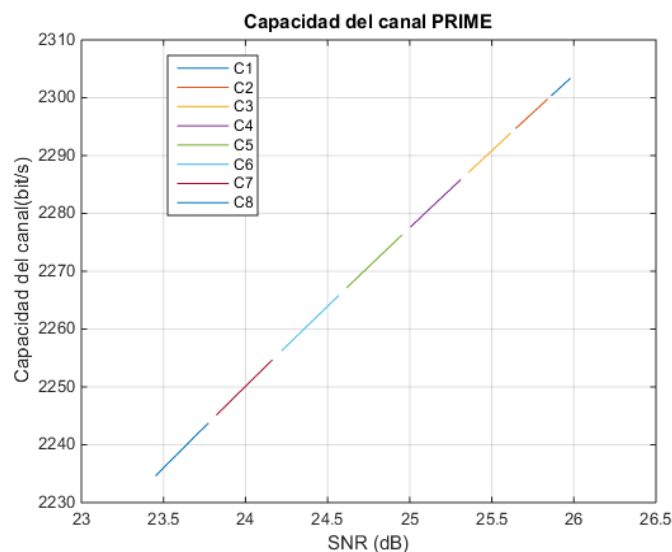


Fig. 20 Capacidad del canal urbano

Las capacidades de canal teóricas encontradas en los tres escenarios a partir del teorema de Shannon, logran cubrir los requerimientos de un sistema AMI.

3) Esquema de medición

Se presenta configuración de medición de sistema PLC en base a los resultados obtenidos en [3], [8]. Se propone un montaje simple de medición de relación señal a ruido en una red de BT, en la cual se coloca el concentrador de datos en una subestación secundaria o transformador y es conectado a un medidor inteligente. El montaje está constituido por:

Análisis técnico de la tecnología PLC a incorporar en el sistema AMI de Codensa (operado en Bogotá D.C. y Cundinamarca) 30

- Dos módulos PLC de marca Microchip de referencia SAM4CP16BMB
- Dos tarjetas de acoplamiento ATPLCOUP00 marca Microchip
- Concentrador de datos
- Analizador de espectro N9912A FieldFox RF de Keysight Technologies
- Computador con software ATMEL PLC PHY TESTER TOOL v2.5.2

En primera instancia se conecta el concentrador de datos a una de las fases del transformador sobre la cual se realizará la comunicación, en esta misma fase se debe conectar uno de los módulos PLC que será configurado por medio del software como transmisor. El receptor será conectado a la misma fase que está conectado el concentrador de datos y el transmisor, pero deberá hacerlo desde un medidor. El computador es conectado al módulo receptor y por medio de este se configura el envío de paquetes y toma de mediciones como SNR. La figura 21 muestra un ejemplo de la conexión del receptor al computador y a la línea de transmisión.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN

Se recomienda a la empresa Codensa, implementar la tecnología PLC en entornos urbanos y rurales haciendo uso de la banda de frecuencia de 0 a 500kHz (hay que fijar dicho canal). Dado que Codensa implementará el protocolo Meters&more se podrían realizar estudios y montajes para evaluar el desempeño de este protocolo en bandas de frecuencia diferente a la fijada por CENELEC.

En todos los casos se sugiere la implementación de simulaciones y evaluaciones que permitan prever posibles dificultades en el sistema de comunicación. Además

En escenarios rurales donde las señales PLC no tengan buena cobertura se pueden implementar repetidores con el fin de garantizar la comunicación con el usuario. En cuanto a la capa física se

La implementación de un servicio web para que los usuarios puedan acceder a la información de consumo y variaciones en la oferta y demanda del precio de la energía eléctrica como alternativa a la implementación de un display, que además de incrementar los costos, en escenarios como el urbano densificado no es una solución conveniente pues la pantalla estaría ubicada en un sótano o cuarto de máquinas.

1. Conclusiones generales:

- La red eléctrica no está diseñada para transmisión de datos, por lo cual su desempeño no es el mejor
- En los resultados encontrados se evidencia una fuerte atenuación debido a la distancia entre los nodos implicados en la transmisión
- Los cables modelados en el proyecto son los más comunes en la red eléctrica operada por Codensa, sin embargo, hay gran variedad de cables y conductores en el mercado, y siendo este el medio físico por el cual se transmite la información es necesario tener en cuenta este parámetro al momento de implementar dicha tecnología.
- Los cables de tipo Cuadriplex y la acometida tipo trébol, lograron un buen desempeño en términos de SNR en los escenarios usados.
- El escenario que mejor funcionamiento presentó fue el urbano densificado pues alcanzo niveles de SNR superiores al umbral escogido (15 dB), tanto con el protocolo PRIME como con el protocolo G3.
- Se demostró que el aumento de ancho de banda permite un mejor funcionamiento de la red PLC, esto se esperaba pues teóricamente le expresión del Teorema de Shannon así lo advierte.

VII. REFERENCIAS

- [1] Meters & more <http://www.metersandmore.com/oursolution/?#deployment>
- [2] Abdul Mannan, D.K.Saxena, Mahroosh Banday. "A Study on Power Line Communication" Published at International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP), Volume 4, Issue 7, July 2014 Edition.
- [3] Cañon, Y. "Estudio de la factibilidad técnica de la implementación de PLC (Power Line Communication) en la red de distribución eléctrica de Bogotá". Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, 2016.
- [4] Accenture's Digitally Enabled Grid program. "The role of communication technology in Europe's advanced metering infrastructure" Mayo, 2015.
- [5] 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.
- [6] Codensa, medición inteligente. <https://www.codensa.com.co/medidor-de-energia-inteligente>
- [7] Baraboi B., "Narrowband Powerline Communication Applications and Challenge" DevCon Enabling the Smart Society, October, 2012.

- [8] I. Arechalde, M. Castro, I. García-Borreguero, A. Sendín, I. Urrutia and A. Fernandez, "Performance of PLC communications in frequency bands from 150 kHz to 500 kHz," 2017 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC), Madrid, 2017, pp. 1-5.
- [9] Estudio: Smart Grids Colombia Visión 2030 - Mapa de ruta para la implementación de redes inteligentes en Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética UPME.
- [10] Lee Y, Paredes J, Lee S., "Las redes inteligentes de energía y su implementación en ciudades sostenibles RG-T2058" Departamento de Infraestructura y Medio Ambiente División de Energía, Banco Interamericano de Desarrollo. IDB-TN-446, Agosto, 2012.
- [11] India Smart Grid Forum (ISGF) White Paper on 'Need for Allocating a Frequency Band for Power Line Carrier Communications' publicado en Diciembre 18, 2014
- [12] Gerente de ventas Condumex. Edgar Ariza. Entrevista presencial realizada 3 de Enero, 2018
- [13] Catálogo de productos Procables 2017. Disponible en <http://www.procables.com.co/>
- [14] Carga máxima para el sector residencial. Disponible en http://files.distribucion.webnode.com.co/200000012-8441c86373/cargas_maximas.pdf
- [15] DANE "Boletín Censo general 2005 Perfil Bogotá" Septiembre, 2010.
- [16] ECCOSTOCK. DIELECTRIC MATERIALS CHART. Disponible en www.eccosorb.eu/sites/default/files/files/dielectric-chart.pdf
- [17] F. Aalamifar, A. Schloegl, D. Harris, L. Lampe, "Modelling Power Line Communication Using Network Simulator-3", IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Atlanta, GA, USA, December 2013. [Online] Available: "http://www.ece.ubc.ca/~faribaa/ns3_plc_software.htm".
- [18] A. Dabak, I. Kim, and T. Pande, "Channel modeling of medium to low voltage links for AMI applications of PLC," Texas Instruments, Tech. Rep., Jun. 2012.

-
- [19] Lutz Lampe, A.J.Han Vinck, "On cooperative coding for narrow band PLC networkS", in AEU - International Journal of Electronics and Communications, Volume 65, Issue 8, 2011
- [20] A. M. Tonello and F. Versolatto, "Bottom-Up Statistical PLC Channel Modeling— Part I: Random Topology Model and Efficient Transfer Function Computation," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 2, pp. 891-898, April 2011.
- [21] Supplement of "G3-PLC specifications 1 – low layers" Operations in the ARIB and FCC frequency bands
- [22] PRIME Alliance, "PRIME Specification revision v 1.4", <http://www.prime-alliance.org>
- [23] Tomado de <https://www.emcali.com.co/web/energia/sala-de-prensa/-/noticias/5249173>
- [24] Tomado de https://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/clientes-y-usuarios/hogares-y-personas/epm-estamos-ahí/energía-prepago
- [25] Resolución 40072, Por la cual se establecen los mecanismos para implementar la Infraestructura de Medición Avanzada en el servicio público de energía eléctrica Enero 29 de 2018