

Identificación de asociación de transformadores y clientes de ANDE, mediante la utilización de tecnología Power Line Communication (PLC)

Charles Soder¹, Jorge Arrúa¹, Enrique Flecha¹, Luis Ramirez²

Fundación Parque Tecnológico Itaipu Paraguay - FPTI-PY¹,

Administración Nacional de Energía – ANDE²

Paraguay

1.1. RESUMEN

En vista a la problemática relacionada a contar con información actualizada del sistema de distribución en baja tensión, y que en Paraguay no se cuenta con un dispositivo que posibilite fácilmente identificar los clientes que se encuentran bajo el suministro de un transformador en específico, lo cual dificulta contar con una base de datos actualizada que identifique los transformadores de distribución con los usuarios correspondientes, dificultando además la realización de estudios y acciones para reducir pérdidas en la línea, la ubicación de fallas en la red de distribución, la emisión de listado de trabajos de reparación de emergencia y el análisis de desequilibrio trifásico, entre otros. Ante lo expuesto se hace evidente la necesidad de evaluar una tecnología que posibilite la fácil y ágil identificación in situ de los clientes asociados a sus puestos de distribución, a fin de paliar esta problemática y dotar de un sistema de gestión eficiente de sus recursos, con dispositivos que posibiliten la rápida identificación de lo descripto.

Una solución planteada consiste en el uso de la tecnología Power Line Communication, en la cual se pretende conectar un dispositivo portátil en el lado de baja de los transformadores, y otros nodos en la acometida de los usuarios para identificar el trafo que le suministra, y las secuencias de fases, entre otros datos.

Este trabajo, consiste en la realización de pruebas en laboratorio y en campo ante diversas circunstancias como por ejemplo circuitos con distorsiones armónicas y otras que puedan generar pérdida en la comunicación entre nodos, a fin de evaluar la factibilidad técnica de identificar la asociación de transformadores y sus respectivos clientes conectados a él, utilizando tecnología Power Line Communication (PLC). Además, este servirá como insumo para el desarrollo de una solución que facilite el trabajo de empresas dedicadas a servicios técnicos en baja tensión.

1.2. PALABRAS CLAVES

Power Line Communication (PLC), Identificación de asociación trafo – clientes, baja tensión.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

1. INTRODUCCIÓN

En base al convenio marco de cooperación entre la ANDE y el PTI [1], fue elaborado un listado de proyectos de interés para la concesionaria de energía paraguaya, en vista a sus necesidades se presentó como una de las propuestas la “Identificación de asociación cliente/puesto de distribución con equipo portátil”, debido a la necesidad de evaluar una tecnología que posibilite la fácil y ágil identificación in situ de los clientes asociados a sus puestos de distribución, y dotarlo de un sistema de gestión eficiente de sus recursos, que posibilite la realización de estudios y acciones para reducir pérdidas en la línea, la ubicación de fallas en la red de distribución, la emisión de listado de trabajos de reparación de emergencia, el análisis de desequilibrio trifásico, entre otros.

Este trabajo consistió en la evaluación de una solución mediante pruebas realizadas en laboratorio y en campo, a fin de analizar la factibilidad técnica para la identificación automática de la asociación de puesto de distribución y sus respectivos clientes conectados a él, utilizando tecnología PLC.

Power Line Communication (PLC) es una tecnología de acceso de banda ancha prometedora. En este modo de transmisión, las señales de servicios de datos se transmiten a través de líneas eléctricas en baja tensión. La misma cuenta con ventajas tales como que puede conectarse a cualquier punto de medición y control; las señales pueden transmitirse a través de líneas eléctricas, obviando la necesidad de instalar líneas especiales; y no se necesita permiso de la Comisión Nacional de Comunicaciones. Pero presentando algunas desventajas, como la baja velocidad de transmisión; sensibilidad a perturbaciones, distorsión no lineal y modulación cruzada entre canales [2].

En las últimas dos décadas, los sistemas PLC han atraído mucho interés en el campo de la comunicación y la red inteligente, y en varias áreas de aplicación, como automatización del hogar, comunicación en vehículos, lectura automática de medidores (AMR) y respuesta a la demanda, entre otros [3], siendo ya utilizadas por algunas empresas de servicios públicos para el control de carga y medición remota [4].

La norma **CENELEC UNE-EN 50065-1** de “Transmisión de señales por la red eléctrica de baja tensión en la banda de frecuencias de 3 kHz a 148,5 kHz. Parte 1: Requisitos generales, bandas de frecuencia y perturbaciones electromagnéticas” define 3 bandas disponibles (ver figura 1), para este trabajo fue utilizado la banda C, la cual utiliza como canal primario la frecuencia de 132kHz, y la frecuencia secundaria a 115kHz [5].

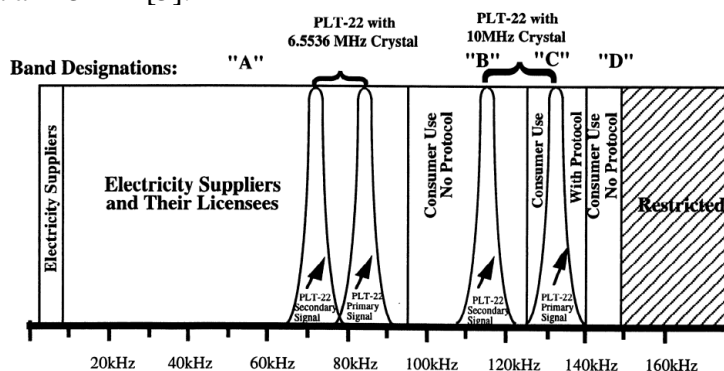


Fig. 1: Asignación de frecuencias CENELEC [5].

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

2. PRUEBAS REALIZADAS

Para este trabajo fue utilizada la metodología de trabajo ágil Scrum, que tiene como finalidad la entrega de valor en períodos cortos de tiempo y para ello se basa en tres pilares: la transparencia, inspección y adaptación.

A continuación, se presentan los escenarios, equipos y variables utilizados.

2.1 Tipos de escenarios de pruebas

Para la evaluación de la tecnología, fueron definidos dos tipos de escenarios para las pruebas de comunicación:

- Entre las cargas/residencias y el mismo puesto de distribución que las suministra (Fig. 2), a fin de evaluar su funcionamiento para la identificación de puestos de distribución ante diversas circunstancias tales como distancias, atenuaciones, armónicos, diversos tipos de potencias activas y reactivas.

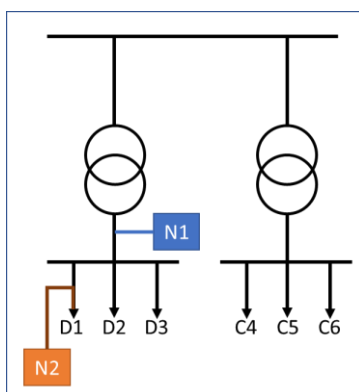


Fig. 2: Esquema de pruebas implementado entre acometidas y puesto de distribución

- Entre puestos de distribución distintos, situación en la que no se debería observar ningún tipo de comunicación por PLC, para verificarlo se realizan pruebas en campo, como se muestra en la Fig. 3.

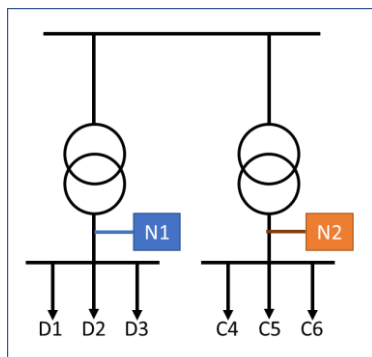


Fig. 3: Esquema de pruebas implementado entre puestos de distribución

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

2.2 *Ambientes de pruebas seleccionados:*

Fueron seleccionados una serie de escenarios, tanto en entornos controlados (laboratorio), como en campo. Los escenarios de campo seleccionados fueron:

- Los bloques del Parque Tecnológico Itaipu ubicado en la Central Hidroeléctrica Itaipu – Hernandarias, para evaluar su funcionamiento ante cargas existentes en oficinas (fuentes de computadores, equipos de comunicación, sistemas de climatización centralizadas y tipo slipts, entre otros), Centro de Cómputos (Data Center), talleres con distintos tipos de cargas reactivas como motores, entre otros. En la Fig. 4 se presenta el diagrama unifilar de los bloques (C1 al C6, y D1 al D3) del PTI en la sede mencionada, con sus respectivos puestos de distribución.

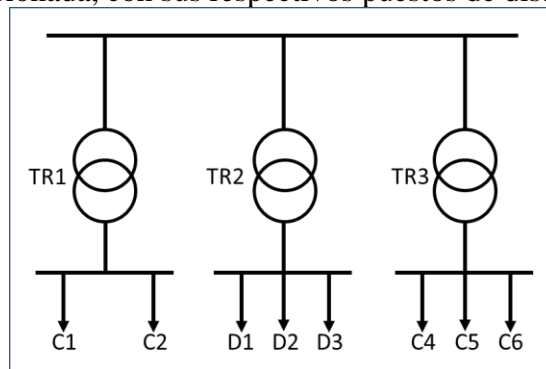


Fig. 4: Diagrama unifilar simplificado de sistemas de alimentación del PTI/CHI-MD

- Villa ANDE, de Ciudad del Este, para evaluar su funcionamiento ante un escenario real de cargas residenciales.

2.3 *Equipos utilizados*

- **Analizadores PLCA**, emulan los nodos "reales" utilizando el mismo hardware como nodo de control basado en un transceptor de línea eléctrica PLT-22. Este dispositivo (el emisor) envía paquetes mientras que la otra unidad (el receptor) recibe paquetes. Este dispositivo proporciona tres modos de prueba de la comunicación, los cuales son presentados en la tabla I:

Tabla I: Modos de pruebas de comunicación PLC

Modo de prueba	Descripción
Modo primario no reconocido (UnackPri)	En donde cada mensaje se envía sin reconocimiento usando solo la frecuencia primaria sin intento de repeticiones. Esto proporciona un mecanismo ideal para probar la idoneidad del circuito de la red eléctrica como un medio.
Modo de servicio reconocido (Ack4try)	Cada mensaje se envía confirmando con tres reintentos. En este modo, los dos primeros los intentos se realizan en la frecuencia portadora primaria del transceptor, mientras que la frecuencia portadora secundaria se utiliza para los dos últimos intentos. Este modo posibilita el análisis para evaluar el rendimiento de la sincronización de paquetes.
Modo secundario no	Proporciona una forma de evaluar por separado el rendimiento de la comunicación del transceptor PLT-22 en su frecuencia operativa secundaria, sin

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

reconocido (UnackSec),	los beneficios de cualquier reintento. Cada una de estas opciones de servicio de comunicación es compatible con los modos operativos de banda C.
Modo Fase	Que detecta y muestra la fase eléctrica de la conexión de la red, basado en el protocolo de acceso CENELEC EN50065-1. Este modo fue utilizado para la rápida identificación de las fases entre los dos puntos (nodos) de pruebas.

En cada caso, los mensajes consisten en valores secuenciados de dos bytes, más datos aleatorios que suman de 12 a 76 bytes por paquete, incluyendo overhead.

- **Medidor de calidad de energía**, utilizado para registrar las variables de estudio presentadas en la tabla II. Éstos a fin de evaluar si existe un grado de correlación relevante entre estas variables y el porcentaje de envío exitoso de paquetes.

Tabla II:– Parámetros eléctricos utilizados para el registro de la calidad de energía.

Parámetros eléctricos	Tensión en cada fase (F-N)
	Corriente en cada fase
	Potencias (activa, reactiva y aparente)
Distorsión armónica	% THD en tensión,
	% THD en corriente

- **Medidor de resistencia de tierra**, utilizado para registrar la tensión de líneas de distribución de la energía eléctrica. Este equipo fue utilizado para las pruebas entre puestos de distribución para medir la resistencia de tierra en las pruebas en campo realizadas en la sede PTI/CHI-MD.

2.4 Variables utilizadas para el estudio

2.4.1 Variable dependiente

A fin de cuantificar la calidad de comunicación PLC, fue definido para este estudio el **porcentaje de paquetes sincronizados exitosamente**, utilizando los tres primeros modos presentados en la tabla I.

Cabe señalar que se definió para todos los casos una cantidad total de 50 paquetes enviados para cada prueba realizada. En base a esto se verifica la cantidad de paquetes recibido, y con ello se calcula el porcentaje correspondiente.

2.4.2 Variables independientes

Para las pruebas fueron seleccionados los parámetros clave para evaluar comunicaciones efectivas y transparentes utilizando las redes de señalización de red de baja tensión [6] tales como:

- **Ángulo de fase** (modo fase, presentado en la tabla I), ya que al tratarse de un sistema trifásico (3 fases), todas las pruebas iniciaron con la identificación de la diferencia angular entre ambos analizadores PLCA instalados.

- **Atenuación**: La atenuación de la señal depende de la frecuencia (“efecto skin”) y se acentúa con las discontinuidades de la línea, con los cambios de calibre, con los elementos ubicados en la red, que producen reflexión de la señal y por lo tanto atenuación. Bull et al. [7] en base a su estudio definió

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

incluir una atenuación de 0 a 24dB en cada ensayo para simular una extensión de 100 m para el rango de frecuencia, rango de atenuación utilizado en este trabajo, suponiendo una caída de tensión de 0,63V con una atenuación de 24dB y una tensión de transmisión (Vpp) de 10V:

$$\text{Atenuación (dB)} = 20 * \text{LOG}_{10} \left(\frac{V_{\text{transmit}}}{V_{\text{received}}} \right)$$

- **Distancia (m)**: de entre los dos 2 analizadores PLCA utilizados en cada extremo de las pruebas.
- **Tensión de transmisión (Vpp)**: indica el nivel de tensión utilizada para la transmisión, la cual es variada entre un valor de 1,5V a 10V (rango de trabajo del analizador PLCA)
- **Armónicos en Tensión y Corriente** ya que son la forma de cuantificar la cantidad de "ruido" que existe en la red eléctrica generada por las cargas residenciales, y en especial las del tipo electrónicas (computadores, TVs, etc.)
- Las **tensiones** (F1-N, F2-N, F3-N), y **corrientes** de las tres fases, con los datos de potencia activa y reactiva total, y la frecuencia (Ver tabla II).
- **Resistividad**, ya que finalmente solamente es relevante para las pruebas entre puesto de distribución distintos (Ver Hoja Pruebas en puestos de distribución distintos, del excel)

3. RESULTADOS ADQUIRIDOS

3.1 Con respecto a los ensayos realizadas entre Cargas/residencias y el mismo puesto de distribución que las suministra.

Para este estudio fueron utilizados un total de 136 registros realizados ante distintos escenarios variando diversos parámetros tales como la tensión de la comunicación a intervalos presentados en la tabla III. Cabe señalar que las pruebas fueron realizadas a distintas distancias (reales) y atenuaciones (0 a 24dB).

A fin de evaluar las variables con mayor correlación entre la variable dependiente definida para este trabajo, fue realizado una verificación de correlación global utilizando la herramienta R Studio. Para ello fue utilizado el sgte. código:

```
> PLC <- read_excel("C:/Users/Jorge/Desktop/BD SESEP.xlsx") #Carga BD
> matriz.cor <- cor(PLC) #coef. correlación
> round(abs(matriz.cor[,4] %>% cbind()*100),2) #Resul en función a Unack
```

Cuyas correlaciones resultantes se presentan a continuación:

Attn (dB)	32.19	V3	27.47	Frec	27.47
Vpp	30.03	A1	27.16	AVG_THDVR1 [%]	27.32
Distancia	54.81	A2	27.19	AVG_THDVR2 [%]	27.37
Unack	100.00	A3	27.33	AVG_THDVR3 [%]	27.26
Ack4try	84.84	Pact	27.23	AVG_THDAR1 [%]	27.46
V1	27.47	Preact	27.34	AVG_THDAR2 [%]	27.40
V2	27.47	Pap	27.25	AVG_THDAR3 [%]	27.34

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

El criterio utilizado comprende en un usar las variables con un porcentaje de correlación igual o mayor a 30%, por ende, además de la variable dependiente (Unack y Ack4try) las variables independientes o predictoras con mayor relevancia por correlación utilizadas para los siguientes pasos: atenuación (Attn), tensión de comunicación (Vpp) y distancia. Este resultado de la correlación es presentado gráficamente en la Fig. 5.

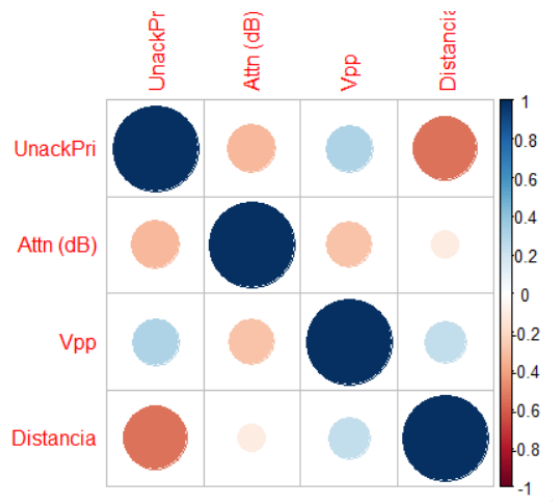


Fig. 5 - Gráfico de correlación

Para el siguiente análisis, fue realizado el cálculo de la distancia simulada, en cada prueba la cual está dada por la distancia real de cada prueba, y la atenuación sometida, con el objetivo de simular distancias mayores, atendiendo la relación 24dB para simular una extensión de 100 m para el rango de frecuencia, la distancia estimada está dada por la siguiente ecuación:

$$Distancia_{simulada}[m] = Distancia_{real}[m] + \frac{Attn[dB] * 100[m]}{24[dB]}$$

En donde Attn es la atenuación inyectada en cada prueba, la misma fue variada entre valores comprendidos entre 0 s 24dB.

Tabla III - Rango de tensiones probadas ante diversas distancias y atenuaciones

Tensión de comunicación (Vpp)	Rango distancias reales (m)	Rango distancia simulada (m)
1,5V	[10 - 60]	[10 - 160]
3,5V	[10 - 60]	[10 - 160]
7V	[10 - 60]	[10 - 160]
10V	[2 - 200]	[2 - 250]

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
 23 y 24 de Junio 2022

En base a esto se obtuvo el promedio general porcentual de paquetes entregados exitosamente, lo cual es verificable en la Fig. 6.

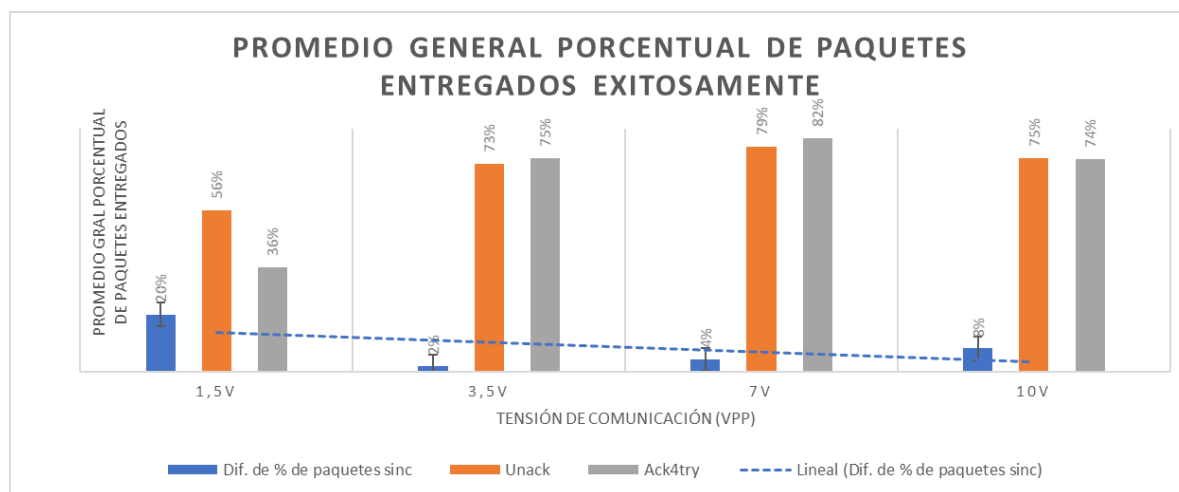


Fig. 6 - Promedio general porcentual de paquetes entregados exitosamente

En la figura se visualiza que existe una mejora del modo ACK (tipo comunicación TCP), frente al UNACK (tipo comunicación UDP) de un máximo de 20% al transmitir a una tensión V_{pp} igual a 1,5V, a distancias simuladas de hasta 160m.

Con éste grafico se puede comprobar que existe una correlación directa entre el porcentaje de datos sincronizados exitosamente en función a la tensión utilizada para la transmisión. Además, se visualiza que a mayor tensión (V_{pp}), la diferencia porcentual entre ambos modos (ACK y UNACK) va decrecentándose.

Cabe señalar que a distancias reales superiores a 200m la conexión se presentaba inestable, inclusive con tensión de comunicación (V_{pp}) igual a 10V, sin atenuación inyectada (0dB).

3.2 Entre puestos de distribución distintos

A fin de verificar la inexistencia de comunicación entre Cargas/residencias y puestos de distribución distinto, fueron realizado el procedimiento presentado en la sección anterior midiendo ante distintas distancias, tensiones de comunicación (V_{pp}) y atenuaciones (Attn) diversas el porcentaje de paquetes enviados exitosamente ante los diversos modos presentados en la tabla I.

Además. en vista a que fueron realizadas mediciones ante diversas condiciones ambientales (días soleados, previa y posterior a precipitaciones, entre otras) fue realizado el registro de la resistencia de tierra, a fin de evaluar si existe alguna posibilidad de que pudiese establecerse alguna comunicación por la puesta a tierra de los puestos de distribución en las instalaciones del PTI/CHI. Las mediciones estuvieron dentro del rango comprendido entre $4,25\Omega$ a 6Ω .

Tanto en las instalaciones del PTI, como en Villa ANDE de Ciudad del Este, a distancias cortas comprendidas entre 2 a 15 m y largas superiores a 200m, el porcentaje de envío exitoso fue nulo, no pudiendo ser entregado ningún paquete en ninguno de los modos, ya sea en pruebas entre acometidas y puestos de distribución distintos, como también directamente entre puestos de distribución con distancias cortas entre ellos.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022**4. CONCLUSIONES**

En base a las pruebas realizadas tanto en laboratorio, como en campo, se verificó la viabilidad técnica del uso de la tecnología Power Line Communication (PLC), para la identificación únicamente de los clientes que se encuentran conectados a su respectivo puesto de distribución.

Además, se identificó que para distancias simuladas de hasta 160 metros es posible establecer una comunicación estable. Si bien, informado por personal del área, existen trechos que pueden alcanzar hasta 600m de distancia entre el puesto de distribución y la acometida más lejana, ésta puede establecer comunicación mediante el uso de nodos intermediarios, los cuales serían los mismos nodos instalados en acometidas más cercanas al puesto de distribución, actuando como repetidores, y por ende extendiendo el alcance de la red PLC.

Se verificó que la tensión de transmisión (V_{pp}) deberá ser de al menos 10V, pudiendo ser evaluada la posibilidad de transmitirla a 22V aprox. Además, se sugiere sea evaluada la transmisión a mediante la banda A y compararla con los resultados adquiridos con la banda C.

Con lo expuesto este trabajo presenta una posible solución a la problemática que las concesionarias de energía encargadas de la distribución se enfrentan relacionadas a la identificación de los clientes asociados a un puesto de distribución de manera automatizada, ágil y confiable.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] “ANDE y PTI suscribieron un convenio marco de cooperación”. MITIC, Fecha de acceso: 03/04/2022, Link: <https://mediosdigitales.mitic.gov.py/ande-y-pti-suscribieron-un-convenio/>
- [2] L. Fusheng, L. Ruisheng y Z. Fengquan, “Microgrid Technology and Engineering Application”, Elsevier, ISBN 978-0-12-803598-6, Año 2016, Link: <https://www.elsevier.com/books/microgrid-technology-and-engineering-application/li/978-0-12-803598-6>.
- [3] E. Kabalci y Y. Kabalci, “From Smart Grid to Internet of Energy”, Elsevier, Año: 2020, Capítulo 2 al 4.
- [4] A. A. I. W. Mohammad S. Obaidat, “Handbook of Green Information and Communication Systems”, Academic Press, 2013, Capítulo 2 y 3, DOI: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-04359-4>.
- [5] “LonWorks PLCA-22 – Power Line Communications Analyzer”, Echelon, Año: 1999. Link: <https://www.echelon.com/assets/bltd6d5932c8b13aac4/078-0176-01A.pdf>. [Último acceso: 13 04 2022].
- [6] D. J. Newbury, “Communication requirements and standards for low voltage mains signalling” IEEE, vol. 13, n° 1, Año:1998, DOI: 10.1109/61.66084, Páginas 46 al 52.
- [7] J. H. Bull, R. L. Coleman y G. A. Jackson, “A survey of mains signalling within the U.K.”, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Volume 20, Nro. 11, Año: 1987.