**Prototipo para monitoreo en línea de Transformadores de Distribución**

**Alejando Fernández Herrero**[[1]](#footnote-1)**, Diana Yelós**[[2]](#footnote-2)**, Guillermo Sandez**[[3]](#footnote-3)**, Cristian Clavero**[[4]](#footnote-4)

**Con este proyecto de investigación y desarrollo se pretende desarrollar un piloto experimental de un sistema de monitoreo de transformadores de distribución eléctrica así como su red de comunicaciones de bajo costo asociada. El sistema pretende supervisar en línea y a distancia los transformadores MT/BT de las redes de distribución eléctrica, integrados a las aplicaciones SCADA/GIS de las Compañías prestadoras del servicio Eléctrico, a un costo bajo y razonable.**

**Con esta tecnología se pretende aportar a la optimización y eficiencia en la gestión operativa de las redes de distribución eléctrica, manteniendo información en línea y preservando principalmente la vida útil de un elemento crítico de tales redes como los son los Transformadores MT/BT de distribución eléctrica.**

**El efecto directo que se obtendrá del uso de esta tecnología será:**

1. **Reducir el tiempo de detección de fallas en la red eléctrica, a través de un proceso de Tracing Topológico de los transformadores que quedaron fuera de servicio en una falla;**
2. **Incrementar la vida útil y reducir fallas de tales transformadores, mediante el monitoreo en línea de las condiciones de operación a las que es sometido;**
3. **Detectar transformadores energizados ante cortes programados o fallas, en redes con generación distribuida;**
4. **Detectar eventuales problemas de sobrecarga de los transformadores;**
5. **Integrar en una única plataforma tecnológica a este sistema con los sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) y GIS existentes en las Empresas de Distribución (los cuales permiten controlar y supervisar el proceso de distribución eléctrica a distancia);**
6. **Detectar hurtos mediante sensado on line de movimientos de tales equipos.**
7. **Disponer de una completa plataforma de comunicaciones y control que permita realizar análisis posteriores de la información recabada online, mediante aplicación de tecnologías de Big Data o de Inteligencia Artificial.**

**Para el logro de estos objetivos, se encuentra trabajando un equipo interdisciplinario conformado por investigadores del ITU-UNCUYO y especialistas del área de Investigación y desarrollo de ICSA de manera conjunta.**

1. **Introducción**

A la fecha, tanto a nivel nacional como internacional no se dispone de sistemas de monitoreo en línea de transformadores de distribución, principalmente porque las soluciones de electrónica y especialmente de comunicaciones requeridas para ello resultan demasiado onerosas para su implementación.

Sí se ha logrado actualmente desarrollar sistemas de monitoreo en línea de cada uno de los clientes o medidores de un sistema de distribución (Smart Metering), pero estos sistemas implican para las distribuidoras eléctricas un nivel de inversión del orden de 50 a 100 veces mayor que implementar un sistema de monitoreo de transformadores de distribución.

Es por ello que a la fecha en Argentina sólo se han implementado soluciones piloto de monitoreo en línea de clientes o medidores en algunas Distribuidoras, pero sin lograr la aplicación masiva de estos en toda su red.

En función de esta limitación, se considera que al resolver de manera eficiente la problemática del sistema de comunicaciones de bajo costo asociado al sistema de monitoreo propuesto, y desarrollar una solución electrónica y de software adecuada, se tendrá grandes oportunidades de disponer de un producto atractivo en el mercado de las empresas de distribución eléctrica.

El proyecto pretende aportar a la optimización y eficiencia en la gestión operativa de tales transformadores de media/baja tensión existentes en las redes eléctricas de distribución, mediante el desarrollo de una solución electrónica, comunicaciones, instrumentación y software que permita tal monitoreo en línea a los costos que una aplicación de este tipo requiere para que sea viable.

Objetivo general (OG)

Desarrollar un piloto experimental de un sistema de monitoreo y su red de comunicaciones de bajo costo, que permita supervisar en línea y a distancia transformadores MT/BT de redes de distribución eléctrica, integrada con las aplicaciones SCADA/GIS.

Se debe remarcar que el sensado no alcanzará el nivel de exactitud y precisión de la medición de un sistema Smart Metering (utilizado para conocer el consumo de energía, el factor de potencia que implica desequilibrios en la red, entre otras cosas) debido a la complejidad y costo del mismo y principalmente porque no es necesario para cumplir los objetivos de este proyecto (conocer el estado general de los transformadores, anticipar fallas, detectar robos, etc.).

Objetivos específicos (OE)

OEI: Identificar y estudiar las variables de campo que permitan determinar en línea el comportamiento operativo de un transformador de distribución de la red eléctrica y sus eventuales condiciones de falla.

OEII: Desarrollar e implementar un Piloto de un dispositivo electrónico capaz de identificar tales variables que describen el comportamiento operativo de un transformador de distribución MT/BT.

OEIII: Desarrollo e implementación de un piloto de una red de comunicaciones de bajo costo y bajo ancho de banda, que soporte los niveles de servicio exigidos por la presente aplicación para la transmisión de los parámetros medidos.

OEIV: integrar la información transmitida a la central con las aplicaciones SCADA/GIS que dispone habitualmente una empresa de distribución eléctrica.

1. **Materiales y métodos**

El sistema completo consiste en una red de nodos que sensan las variables en cada transformador y que transmiten los resultados a un Gateway mediante una comunicación LoRA. El gateway es el encargado pasar del sistema LoRa a TCP/IP. Finalmente la información alcanza el concentrador encargado de almacenar la información en una base de datos y gestionar los pedidos de nueva información a los nodos.

A continuación se describirán en detalle cada parte.

**Nodos**

Los transformadores de media cumplen la función de convertir la tensión entrante de 13,6KV en una tensión adecuada para el consumo general de la población. En dicho proceso, es importante poder controlar varias magnitudes físicas. Entre ellas:

* Temperatura
* Tensión entrante y saliente en cada una de sus 3 fases.
* Corriente entrante y saliente en cada una de sus 3 fases.

**Para llevar a cabo el monitoreo de los transformadores y de acuerdo con lo planteado en este apartado, el proyecto busca desarrollar los mecanismos adecuados para el sensado de las tres variables planteadas anteriormente y desarrollar la estructura de transmisión de información obtenida en la fase de sensado.**

**Hardware de los Nodos**

**El diseño de los nodos está basado en un ESP32 de Espressif Systems (Espressif Systems, 2020) y un módulo LoRa (EBYTE, 2019). El ESP32 incluye un microprocesador Tensilica Xtensa LX6 operando a 240MHz, un módulo WiFi 802.11, un módulo Bluetooth y un RTC (Real Time Clock). Por otro lado, el módulo LoRa utilizado es el E32-915T30D de EBYTE basado en el chip RF SX1276 de SEMTECH con una potencia máxima de transmisión de 1W.**

**Cada nodo se encuentra asociado a un transformador MT/BT de la red de distribución en el cual se sensan de forma constante la tensión y corriente de cada fase y la temperatura ambiente y la del aceite interno. Además se agrega un sensor de movimiento.**

**El objetivo del sensado es identificar cambios significativos en los valores y que además perduren en el tiempo, por lo que la medición de glitches ocasionales no es primordial en este diseño.**

**Sensado de tensión:**

**Se utiliza un transformador Zmpt101b (Qingxian, 2020) que permite reducir la alta tensión de entrada a una tensión de 0 a 3.3V y una etapa rectificadora por cada fase. Para la adquisición se agregó un ADS1115 (Texas instruments Incorporated, 2018) de 16 bits de forma externa. Al microprocesador llega un valor digital proporcional a la tensión pico de salida del transformador. Este valor es almacenado mediante un buffer circular en la memoria interna del ESP32. El valor final no es el medido en el instante, sino el promedio de los últimos valores.**

**Sensado de corriente:**

**Se utiliza un transformador de corriente ZMCT103C (Qingxian, 2020). Se coloca un transformador por cada fase. La señal es adquirida de la misma forma que la tensión, es rectificada y convertida por el ADC. El procedimiento posterior es igual al de la tensión**

**Sensado de temperatura:**

**Se utilizan sondas PT1000. Consiste en una termorresistencia de platino variable con la temperatura. Posee un rango de temperatura de -30°C a 150°C y precisión de +/-0.5°C.**

**Sensado de movimiento:**

**Se utilizará un sensor KY-002 de vibración. El dispositivo consta de un resorte y un poste conductor central con una resistencia de 10kΩ conectada a VCC. Ante golpes, el resorte vibra y cierra el circuito a tierra. El objetivo de este sesnor es alertar en el caso de un movimiento brusco del transformador, lo cual puede indicar una situación de robo del mismo.**

**Físicamente el nodo estará construido con un formato de sistema modular con placas individuales para cada variable sensada de forma que puedan ser intercambiables fácilmente ante una falla o por una actualización de tecnología.**

**Comunicación de nodos**

El conjunto de valores sensados se tuvo que plasmar en una trama, la cual debe contener información del nodo que las estaba generando. Esto se llevó a cabo por medio de la implementación del protocolo de comunicación de capa de aplicación desarrollado ad hoc.

El envío de las tramas por parte del nodo, se realiza por medio de la solicitud desde el Concentrador, encargado de encuestar a cada uno de los nodos. Se tuvo que implementar algoritmos de cifrado de tramas para evitar que la información de los datos sensados viaja en texto plano. El desarrollo del cifrado fue una tarea ardua que redunda en el beneficio de asegurarnos la integridad de los datos. La trama abandona el nodo por medio de LoRa y es captado por el Gateway.

**Gateway**

**Hardware del Gateway**

**Al igual que para el caso del Nodo, este dispositivo fue desarrollado en un ESP32 y un módulo LoRa E32-915T30D de EBYTE.**

**Es el encargado de compatibilizar las dos tecnologías físicas LoRa en el medio inalámbrico y la tecnología Ethernet en el medio alámbrico. Traduce la información proveniente de los nodos para poder inyectar dicha trama usando el protocolo MQTT. Por lo tanto podríamos decir que adapta las dos tecnologías LoRa <> TCP/IP.**

**Comunicación del Gateway**

**~~D~~ado que la tecnología LoRa tiene un alcance de hasta 10km (como máximo), si el centro de control se encuentra a mayor distancia sería imposible poder acceder a él. El gateway permite convertir la trama de LoRa a Ethernet y ya que éste usa el protocolo TCP/IP puede transferirla a cualquier lugar del mundo usando la red pública y privada. Esto permite que geográficamente el control se encuentre alejado de donde se encuentran los transformadores.**

**Broker MQTT (Message Queue Telemetry Transport)**

**Este dispositivo nos permite concentrar todas las tramas del sistema. Es el que nos permite llegar desde el Gateway al concentrador. El broker es el encargado de gestionar las tramas tanto entrante como saliente, permitiéndonos centralizar en un único punto la llegada y partida de todas las tramas desde y hacia el Gateway.**

**Concentrador**

**El concentrador se implementó en una PC. Su función es por un lado alojar el broker MQTT, la base de datos y por el otro ejecutar el sistema que implementa la lógica para relacionarse con los nodos.**

**Está formado por tres subprocesos que si bien se ejecutan de forma asincrónica, se comunican entre ellos. Técnicamente cada uno de estos procesos se implementa por medio de hilos. Los sub-procesos son:**

**Polling:**

**Es la arquitectura elegida para relacionarse con los nodos también conocida como encuesta. Para ello existe una fase de inicialización, en ésta se lee desde la BD los nodos activos para un determinado cluster y comienza a comunicarse con ellos. A esta etapa se la denomina inicialización de nodos y tiene por objetivo reconocer a cada uno de los nodos y generar la clave con la cual van a realizar el cifrado del canal. Por otro lado, a intervalos regulares, les va solicitando la información a los nodos. Una vez que el polling genera la información a enviar se comunica con el sub-procesos de Envío de Trama para que proceda a enviar o despachar la trama al nodo en cuestión.**

**Lector de trama:**

**Es el encargado de leer la trama proveniente del broker MQTT. La función principal es la de descifrar la trama, comunicarle la trama al sistema de polling y finalmente la de registrar la trama en función al tipo de trama.**

**De esta manera toda la actividad del sistema queda registrada en la base de datos. Recordemos que en el sistema no solamente se comunican tramas de sensado de datos sino tramas de errores, información, estado, sincronismo, etc. todas ellas quedan debidamente registradas. Esto es una función importante para la trazabilidad de cualquier evento.**

**Envío de trama:**

**Luego de elegir el próximo nodo con el cual interactuar, el sistema de polling genera la trama para ser enviada al sensor. Este sub-proceso (envío de trama) tiene las siguientes funcionalidades:**

* **Empaquetar la trama (cifrado y direccionamiento),**
* **Secuenciar el orden en que se envían las tramas. Actúa como control de tráfico porque la comunicación no solamente puede provenir del sistema de polling, sino de eventos que el sistema de control registra en la base de datos y que se necesitan comunicar al nodo (por ejemplo, configuración o actuación).**
* **Enviar la trama físicamente. Finalmente se relaciona con el broker MQTT para enviar la trama a los nodos.**
* **Registrar las tramas. Una vez que se envía la trama al nodo se registra en una tabla bitácora donde figuran todas y cada una de las comunicaciones que tuvieron lugar con los sensores.**

**Estos tres sub-procesos son asincrónicos y cada uno conforma un hilo que corre en forma separada, pero ante determinados eventos se comunican entre ellos. El lenguaje en el cual se han desarrollados es Python.**

**Base de Datos**

**Es el medio para persistir todos los datos provenientes de los sensores como así también la información que se va a enviar a los nodos en forma de actuación, configuración o pedido de alguna información. La base de datos es el medio a través del cual se relacionan los procesos externos, tales como el sistema de control, a la solución propuesta.**

**SCADA**

**Finalmente toda la lógica de control y supervisión se realiza en un sistema SCADA (Superversory Control and Data Adquisition), existe un proceso que va leyendo los datos persistidos en la base de datos y los comunica al sistema SCADA. Existen programas SCADA muy eficientes para realizar esta tarea tales como iFix o cualquier alternativa a esta.**

1. **Resultados y Discusión**

Hasta el momento se ha logrado implementar de forma exitosa una comunicación entre un nodo, pasando por el gateway y hasta el concentrador

Respecto a los nodos se realizaron mediciones de tensión corriente y temperatura en laboratorio. A partir de estas se fue corrigiendo los objetivos de sensado que derivaron en el diseño actual presentado en esta publicación y que se encuentran en estado de desarrollo.

1. **Conclusiones**

**El presenta trabajo corresponde a un proyecto financiado por la Secretaría de Internacionales, Investigación y Posgrado de la Universidad Nacional de Cuyo. El mismo fue presentado conjuntamente entre el Instituto Tecnológico Universitario y la empresa Ingeniería y Computación S.A. (ICSA).**

**Las partes integrantes del proyecto firmaron un convenio de colaboración con el fin de, en términos generales, contribuir con la mejora del servicio de electricidad de las empresas distribuidoras, incorporando tecnología que facilite el seguimiento y mantenimiento de los transformadores de media a baja tensión.**

**Es un proyecto que ha sido complejo tanto en su diseño, el desarrollo de cada uno de sus partes componentes y finalmente el ensamblado de estas.**

**Dado que es un proyecto en ejecución, se ha superado la fase de diseño y puesta en marcha en laboratorio. Esta fase ha consistido en 3 etapas en las cuales ha sido necesario rediseño de las partes para lograr el funcionamiento deseado.**

**En particular, el protocolo de comunicación en capa de aplicación es un ejemplo de esto. Implementar algorítmos de cifrado en dispositivos tan pequeños como el ESP32 también ha sido un desafío.**

**La premisa de costo jugó un papel preponderante en el proceso de diseño, ya que es una variable que atraviesa todo el proyecto. Ésta se suma a la condición de eficiencia en el funcionamiento, por lo que los nodos tenían que ser lo más económicos, esto fue un gran condicionante a la hora de elegir los componentes electrónicos.**

**La siguiente fase consiste en llevar a cabo las pruebas en el territorio. Ésta está planificada para el primer semestre del año 2021, a partir de la cual se espera tener el prototipo definitivo.**

**El prototipo permitirá tener una propuesta sólida y eficiente que permita a las empresas distribuidoras de electricidad sistemas de control del servicio con el cual hacer un salto de calidad en la gestión del servicio.**

1. **Referencias**

**Chengdu Ebyte Electronic Technology Co. Ltd. (2019). E32-915T30D User Manual SX1276 915MHz 1W DIP Wireless Module. http://www.ebyte.com/en/downpdf.aspx?id=131**

**Espressif Systems. (2020). ESP32 Series Datasheet (Version 3.4). https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\_datasheet\_en.pdf**

**Qingxian Zeming Langxi Electronic. (2020). ZMPT101B Current-type Voltage Transformer. http://5nrorwxhmqqijik.leadongcdn.com/attachment/kjilKBmoioSRqlkqjoipSR7ww7fgzb73m/ZMPT101B-specification.pdf**

**Qingxian Zeming Langxi Electronic. (2020a). *ZMCT103C Current Transformer*. https://5nrorwxhmqqijik.leadongcdn.com/ZMCT103C+specification-aidirBqoKomRilSjpimnokp.pdf**

**Texas Instruments Incorporated. (2018, January). ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I 2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf?ts=1606567959205&ref\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FADS1115**

1. Instituto Tecnológico Universitario, UNCUYO. Parque General San Martín, Mendoza. alejandro.fernandez@itu.uncu.edu.ar [↑](#footnote-ref-1)
2. Instituto Tecnológico Universitario, UNCUYO. Parque General San Martín, Mendoza. diana.yelos@itu.uncu.edu.ar [↑](#footnote-ref-2)
3. Ingeniería y Computación S.A. (ICSA). Carril Rodríguez Peña 2451, Godoy Cruz, Mendoza. guillermo.sandez@icsaautomation.com [↑](#footnote-ref-3)
4. Ingeniería y Computación S.A. (ICSA). Carril Rodríguez Peña 2451, Godoy Cruz, Mendoza. cristian.clavero@icsaautomation.com [↑](#footnote-ref-4)