

Revisión de aplicaciones de técnicas de monitoreo no intrusivo de cargas en redes eléctricas inteligentes (*Review of non-intrusive load monitoring techniques applications in smart grids*)

Patricio G. Donato¹, Álvaro Hernández,² Marcos Funes,³ Ignacio Carugati,⁴ Ruben Nieto⁵ y Jesús Ureña⁶

Material original autorizado para su primera publicación en la revista Ciencia y Tecnología de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Palermo.

Campo temático: Energía

Recepción: 4/11/2021 | Aceptación: 28/10/2022.

Resumen

Las redes eléctricas inteligentes están transformando la relación de los usuarios con la electricidad de diferentes maneras. En este artículo se resumen algunas potenciales aplicaciones que se desarrollarán en los próximos años bajo este marco conceptual, las cuales tienen como denominador común el uso de técnicas de monitoreo no intrusivo de cargas. Estas técnicas permiten desagregar consumos a partir de mediciones puntuales en ciertos lugares de la red eléctrica, sin necesidad de monitorear dispositivos en forma individual. Algunas de estas nuevas funcionalidades tienen especial relevancia en las redes eléctricas de los países en vías de desarrollo, las cuales presentan retos complejos y necesitan una modernización, mientras que otras tienen su motivación en demandas específicas de países desarrollados. En todos los casos, el uso de técnicas de monitoreo no intrusivo de cargas abre nuevos campos de investigación y desarrollo tecnológico

¹ Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica (ICYTE). pgdonato@conicet.gov.ar

² Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá. alvaro.hernandez@uah.es

³ Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica (ICYTE). mfunes@fi.mdp.edu.ar

⁴ Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica (ICYTE). icarugati@fi.mdp.edu.ar

⁵ Universidad Rey Juan Carlos. ruben.nieto@uah.es

⁶ Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá. jesus.urena@uah.es

aplicado que van desde aspectos técnicos de las redes eléctricas hasta cuestiones de índole social.

Palabras Clave: redes eléctricas inteligentes, medidores inteligentes, calidad de la energía, NILM.

Abstract

The Smart Grids concept is transforming the relationship of customers with the electricity in different ways. This paper provides a general overview of some potential applications to be developed under this conceptual framework, which have as a common denominator the use of non-intrusive load monitoring techniques. These techniques make it possible to disaggregate consumption based on specific measurements at certain locations in the electricity grid, without implement measurement points in each device to be monitored. Some of these new functionalities are particularly relevant for electricity grids in developing countries, which present complex challenges and need modernisation, while others are motivated by specific demands in developed countries. In all cases, the use of non-intrusive load monitoring techniques opens up new fields of applied research and technological development ranging from power grids to social issues.

Keywords: smart grids, smart meters, power quality, NILM.

1. Introducción

Las redes eléctricas inteligentes (REI) han pasado de ser un concepto visionario a una realidad concreta, al menos en los países desarrollados. Las REI pueden explicarse como la conjunción de la red eléctrica tradicional con las modernas tecnologías de la información y comunicaciones (TIC), más la integración de sistemas de generación distribuida y dispositivos de almacenamiento. En un sentido amplio, el concepto de REI puede extenderse a cuestiones como:

- Reducción de pérdidas de transmisión y distribución
- Control del flujo de energía
- Gestión de la demanda
- Control de calidad de la energía
- Medición de consumo en tiempo real
- Eficiencia energética

La implementación de las REI impulsará funcionalidades que requieren nuevos dispositivos, desde sensores y actuadores hasta equipos de procesamiento de información y comunicaciones. Uno de estos equipos es el medidor inteligente, el cual adquiere datos en tiempo real y puede utilizarse para generar políticas de tarifas y de consumo, gestionar flujos de energía y mejorar la calidad del servicio eléctrico en general. A su vez, estos medidores proporcionan información útil para que los clientes gestionen su propia demanda de energía. Pero la innovación no termina allí, si no que el despliegue de las REI abre las puertas a nuevas funcionalidades, como por ejemplo la desagregación de consumos de diferentes dispositivos mediante técnicas de monitoreo no intrusivo de cargas (Non-Intrusive Load Monitoring, NILM). La identificación de consumos ha demostrado su utilidad en aplicaciones como el consumo inteligente de energía (Pau *et al.*, 2017), la gestión de la demanda energética (He *et al.*, 2013), o incluso como herramienta de apoyo en el desarrollo de entornos de vida independiente asistida para adultos mayores (Alcalá *et al.*, 2017). Las técnicas NILM incluyen desde algoritmos tradicionales de procesamiento de señales hasta los sistemas de aprendizaje automático (Nalmpantis y Vrakas, 2019). En este artículo se compilan algunas aplicaciones que se podrían desarrollar a través del uso de técnicas NILM en las REI. El objeto de esta compilación, que no es exhaustiva, es evidenciar la potencialidad de las técnicas NILM y su posible impacto en las redes eléctricas del futuro. En la sección 2 se presenta una descripción básica del concepto de NILM. En la sección 3 se describe una serie de aplicaciones relacionadas con la gestión de redes de distribución que podrían beneficiarse con NILM, mientras que en la sección 4 se plantea el uso de NILM como herramienta de asistencia social como parte de una REI. Por último en la sección 5 se resumen las conclusiones del artículo.

2. Monitoreo no intrusivo de cargas (NILM)

El concepto de monitoreo no intrusivo de cargas (NILM) se basa en descomponer, o desagregar, el consumo eléctrico de dispositivos eléctricos específicos (iluminación, climatización, etc.) de un cliente, utilizando la información adquirida por un único dispositivo de medición en la acometida (Fig. 1). Este tema aparece por primera vez en la patente de Hart, Kern y Schweppe (Hart *et al.*, 1989) y en una posterior publicación en 1992 (Hart, 1992). Durante años este tema no atrajo mucha atención, pero en el transcurso de la última década ha despertado interés por parte de empresas y grupos de investigación, precisamente coincidiendo con el auge de las REI. Parte de este interés radica en la necesidad de nuestra sociedad de lograr sustentabilidad energética y mejorar los estándares de eficiencia.

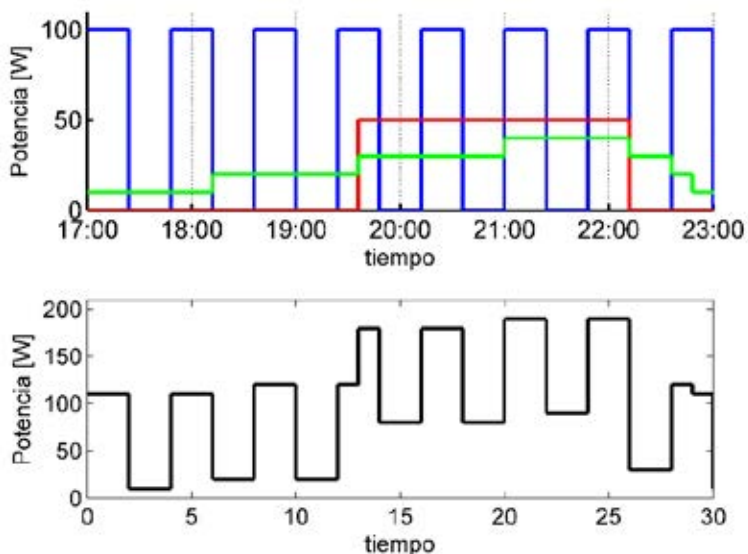


Fig. 1. Los algoritmos NILM permiten descomponer un consumo total (abajo) en diferentes consumos individuales (arriba).

Las técnicas NILM no invaden la red interna del cliente, sino que operan sobre las mediciones realizadas en un único punto que incluye el consumo de todos los dispositivos a desagregar. Los algoritmos NILM se pueden clasificar, según su capacidad de desagregación y el volumen de datos empleado, de acuerdo a la frecuencia de muestreo (Alcalá Orzaez, 2017). Si se utiliza un medidor inteligente la frecuencia de muestreo es inferior a 1 Hz, lo cual limita la capacidad de desagregación, especialmente para los aparatos de menor consumo, pero simplifica la tarea de adquisición de datos. Este tipo de métodos suele implicar criterios de

optimización combinatoria, de forma que, conociendo los consumos individuales de los distintos dispositivos conectados en la instalación, se estima el valor medido eligiendo la combinación más plausible.

Una frecuencia de muestreo en el rango de 1-20 Hz permite extraer información, no solo del estado estacionario, sino también de los transitorios de encendido y apagado de los aparatos conectados a la red. Dentro de este grupo de algoritmos se encuentra el análisis de potencias activas, reactivas y de distorsión; y el análisis de forma de onda en general.

Para utilizar frecuencias de muestreo del orden de unos pocos kHz es necesario agregar un dispositivo específico, lo que aumenta el costo pero mejora la capacidad de desagregación, identificando aparatos eléctricos de muy bajo consumo. Los algoritmos que operan a estas frecuencias pueden estimar las componentes armónicas producidas por las fuentes de tensión conmutadas de cada aparato. Según algunos reportes este tipo de algoritmos puede desagregar más del 99% del consumo, distinguiendo incluso aparatos iguales situados en diferentes lugares de una misma red (Alcalá Orzaez, 2017).

3. Gestión de redes de distribución

Las REI abordan, entre otras cosas, la supervisión y control de redes de distribución, las cuales podrían verse potenciadas con el uso de NILM. En esta sección se presenta un compendio, no exhaustivo, de problemas que podrían tratarse con técnicas NILM.

3.1. Identificación de clientes en transformadores de distribución

Las redes de distribución de baja tensión en los países en desarrollo se caracterizan por un bajo nivel de automatización y una gran cantidad de información procesada manualmente. Por ello, muchas distribuidoras tienen problemas para identificar qué clientes están conectados a qué fase de sus transformadores de distribución. Un desequilibrio en el número de clientes puede conducir a la saturación del núcleo del transformador, lo que provoca un mayor grado de distorsión de la forma de onda. También afecta a la vida útil del transformador, debido al calentamiento desigual de los devanados. Esto puede incrementar el número de interrupciones del servicio para los clientes y/o las variaciones de los niveles de tensión, entre otros.

Uno de los problemas para identificar los clientes conectados a una determinada fase es que suelen tener patrones de consumo similares, debido a que comparten hábitos y costumbres semejantes, especialmente en zonas residenciales. Sin embargo, en ocasiones hay clientes que demandan un perfil de energía muy diferente al resto, como puede ocurrir cuando se activan equipos eléctricos de gran potencia, se celebra

una reunión a horas atípicas, etc. En estos casos el cambio en el patrón de consumo se refleja en el consumo total medido en la fase del transformador donde está conectado el cliente y se puede detectar la diferencia en el comportamiento eléctrico de un determinado cliente respecto al resto (Xu *et al.*, 2016) (Jimenez *et al.*, 2020).

3.2. Identificación de eventos de tensión en redes de distribución

Un evento de tensión se define como una reducción de la tensión entre 10% y 90% del valor nominal, o una sobretensión superior al 10% del valor nominal, con una duración entre 10 ms y 3 minutos (Bollen y Gu, 2006). Su causa son incrementos transitorios de corriente que provocan un cambio de tensión en el punto de conexión común (PCC) de los clientes afectados (Fig. 2).

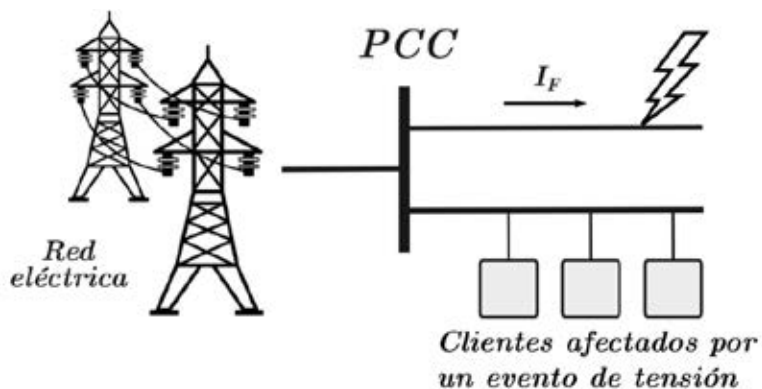


Fig. 2. Los eventos de tensión se producen por los incrementos de corriente que afectan al PCC.

Los incrementos transitorios de corriente pueden ser producto de cortocircuitos entre fases, o entre una fase y tierra o neutro, arranque de motores de inducción, energización de transformadores, descargas atmosféricas, etc. Los eventos de tensión provocan pérdidas económicas para los clientes, ya sea por la pérdida de datos en sistemas informáticos, la desconexión de elementos de protección u otros efectos secundarios. Por ello, es útil registrar y evaluar los mismos para identificar las causas que los producen y actuar sobre la red reduciendo los efectos negativos sobre los clientes. Es posible discriminar y clasificar estos eventos de tensión mediante el uso de modelos predefinidos que contemplen todos los tipos de fallas factibles de ocurrir. A partir de esta clasificación (Fig. 3), se pueden identificar las posibles causas, lo que es útil para realizar acciones de mitigación y para generar estadísticas para el mantenimiento o la realización de proyectos a largo plazo (Donato *et al.*, 2021).

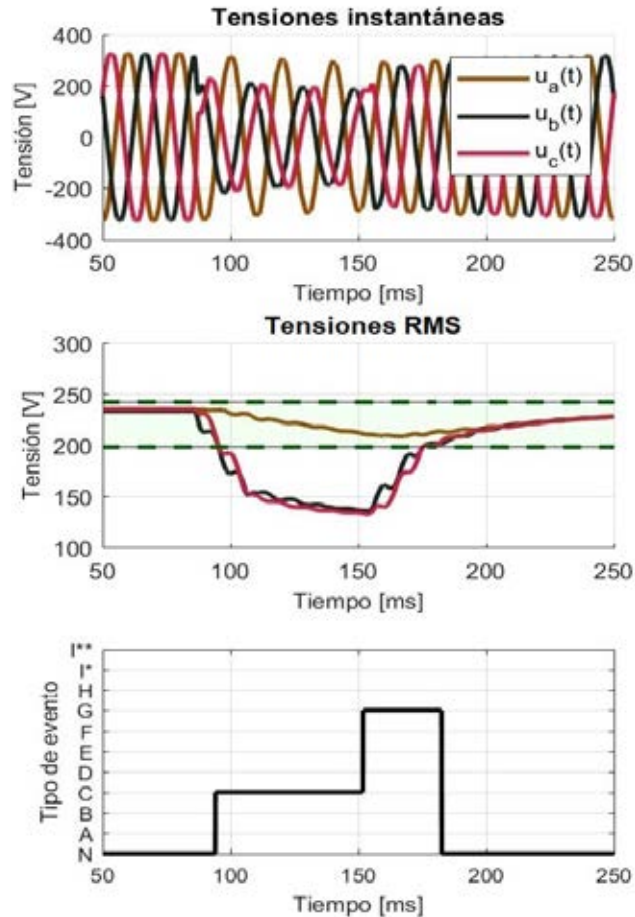


Fig. 3. Evento de tensión en la red de distribución de baja tensión (arriba y centro). La avería es bifásica y su evolución temporal está directamente relacionada con la falla y el comportamiento de los elementos de maniobra y protección. La detección y clasificación automática de eventos (abajo) servirá para identificar la posible causa de la avería.

Algunos autores afirman que la identificación, localización y clasificación de fallas forman parte de los desafíos de los sistemas de monitoreo basados en NILM (Chang y Linh, 2017). Para ello, es necesario un único conjunto de sensores de tensión y corriente para registrar la falla y, desde el punto de vista algorítmico, emplear diferentes herramientas para la detección y clasificación de la misma. Si bien existen enfoques basados en transformadas, como Fourier o Wavelet, que pueden utilizarse para esta tarea, en los últimos años ha crecido el interés en algoritmos de inteligencia computacional, como las máquinas de soporte vectorial, redes neuronales y otras herramientas de reconocimiento de patrones.

3.3. Sistemas de generación distribuida y microrredes

La promoción de sistemas de generación eléctrica distribuida basados en fuentes de energía renovable plantea algunos problemas que deben ser resueltos con un enfoque económicamente sostenible. Uno de ellos es la fluctuación de tensión cuando hay fuertes variaciones de la radiación solar en microrredes con alta penetración de generadores fotovoltaicos (por ejemplo, debido a la presencia de nubes). Esto puede provocar intermitencia en la potencia inyectada por pequeños generadores fotovoltaicos conectados a la red, lo cual, entre otras cosas, se manifiesta como variaciones de niveles de tensión y flicker (Brinkel *et al.*, 2020). Estas fluctuaciones de tensión pueden mitigarse con dispositivos de almacenamiento de energía, siempre y cuando la capacidad de almacenamiento sea suficiente. En caso que ésta no sea suficiente o esté limitada, es necesario identificar los nodos más adecuados para conectar estos dispositivos de almacenamiento. Su instalación en un nodo inadecuado puede tener el efecto contrario, aumentando los niveles de tensión en su proximidad, incluso por encima de los valores aceptables.

Para resolver esta cuestión se pueden emplear soluciones óptimas, o casi óptimas, que utilicen la mínima cantidad de elementos de almacenamiento emplazados en lugares específicos, para garantizar los niveles de tensión proporcionados. Algunos autores han abordado este problema desde el punto de vista de las técnicas de inteligencia computacional, para decidir las capacidades y la ubicación de los bancos de baterías necesarias para minimizar la fluctuación máxima de la tensión en la red (Loyarte *et al.*, 2017). En este caso, el problema se relaciona con el descrito en el punto 3.1, ya que para determinar la ubicación óptima de los elementos de almacenamiento hay que identificar primero las conexiones de los clientes.

3.4. Localización y aislamiento de fallas y restauración del servicio

Uno de los principales retos de las REI es proporcionar buena calidad de energía a los clientes, lo que implica que la red debe tener cierta capacidad de autoreparación. Esto significa contar con mecanismos de detección y localización de fallas, aislamiento de las mismas y restablecimiento automático del suministro eléctrico para los clientes que no están directamente relacionados con la falla. Este concepto se conoce como FLISR, Fault Location, Isolation and Service Restoration (Spalding *et al.*, 2016), y se basa en la información proporcionada por medidores inteligentes para identificar en tiempo real la magnitud de una determinada avería, para proceder a un rápido aislamiento de la misma mediante el uso de dispositivos de conmutación y reconexión inteligentes. De este modo, el mayor número posible de clientes se reconecta a otros transformadores de distribución, dejando sin suministro eléctrico solo a los directamente implicados en la avería. Aunque esta idea parece sencilla, en

la práctica el problema es identificar a los usuarios para determinar la mejor estrategia, para reducir el impacto de la avería en tiempo real. El problema de la identificación de la conexión de los clientes, entre otros, ya se comentó en el punto 3.1. Los métodos de localización y aislamiento van desde las técnicas eléctricas tradicionales (medición de impedancia, ondas viajeras) hasta algoritmos avanzados de inteligencia computacional, como redes neuronales, lógica difusa o sistemas expertos (Le *et al.*, 2018), incluyendo esquemas híbridos como el propuesto en (Fiaschetti *et al.*, 2019).

4. Vida independiente asistida

En muchos países se evidencia un envejecimiento de la población debido a una mayor esperanza de vida y a cambios en la pirámide poblacional. Al mismo tiempo los servicios sociales y de salud se han extendido y difundido para proporcionar una calidad de vida adecuada a la población, con especial énfasis en las personas mayores y/o discapacitadas. En tal sentido, el envejecimiento de la población implica riesgos sobre la viabilidad de estos servicios a largo plazo.

Una respuesta a este desafío es promover la vida independiente de las personas mayores en sus hogares el mayor tiempo posible, a la vez que se les proporcionan los mejores cuidados y servicios de salud. Esta tendencia, conocida como vida independiente asistida (Assisted Independent Living, AIL), apunta a que los adultos mayores residan en su hogar, en lugar de en una residencia o institución de cuidados, asistidos por redes de sensores que monitoreen su estado de salud y actividad diaria (Belley *et al.*, 2014). Este enfoque tiene como inconveniente que la intrusión de estos sensores en la vida cotidiana puede no ser aceptada por las personas.

Las técnicas NILM se han convertido en una posible herramienta de apoyo a la AIL, en la medida que se pueda identificar el comportamiento de determinados dispositivos en un hogar, cuyo uso está relacionado con ciertas actividades de los habitantes de la casa. A partir de la desagregación de consumos e identificación de cargas, es posible inferir patrones de uso de algunos electrodomésticos que, posteriormente, pueden ser utilizados para inferir cómo el inquilino realiza las actividades cotidianas (Fortin-Simard *et al.*, 2014). Estas métricas son útiles para los cuidadores y especialistas en salud con el fin de supervisar, evaluar y proporcionar AIL. La Fig. 4 muestra una visión general de las técnicas NILM aplicadas al campo de la AIL.

En este contexto, existen trabajos que han propuesto soluciones basadas en la generación de alarmas en el corto plazo cuando se reconocen actividades inusuales a partir de la desagregación de consumos (Patrono *et al.*, 2018). Estas alarmas son útiles para familiares y cuidadores que requieren un sistema que les avise si se produce una emergencia. Asimismo, se han realizado investigaciones empleando sistemas expertos que, a partir de los patrones de uso de los electrodomésticos, evalúan el comportamiento de la persona en cuestión a largo plazo, proporcionando alarmas

tempranas para cualquier desviación de lo considerado normal. Estos sistemas pueden convertirse en una herramienta útil para el diagnóstico y seguimiento temprano de algunos trastornos. Un caso ilustrativo puede ser el análisis de los trastornos del sueño a partir del consumo de energía registrado durante las horas nocturnas, el monitoreo de los deterioros cognitivos leves, o incluso la evaluación de la fragilidad en las personas mayores mediante la puntuación de la realización de las actividades de la vida diaria relacionadas con la interacción con los aparatos desagregados en el sistema. Incluso a partir de los datos de un único medidor inteligente, es posible implementar un sistema de monitoreo sanitario básico, fácil de desplegar masivamente a bajo coste, y con un nivel mínimo de intrusión (Alcalá *et al.*, 2017).

No obstante, a pesar de los prometedores resultados obtenidos hasta ahora, subsisten todavía problemas por resolver. Algunos dispositivos relacionados con la AIL tienen consumos bajos, lo que implica que su identificación es compleja y poco fiable con los medidores inteligentes comerciales actuales. Adicionalmente, cualquier sistema basado en técnicas NILM para AIL debería involucrar a un equipo multidisciplinar que incluya activamente a expertos de diferentes dominios, desde la energía y la electrónica, hasta el aprendizaje automático, incluyendo a especialistas en el campo de la salud.

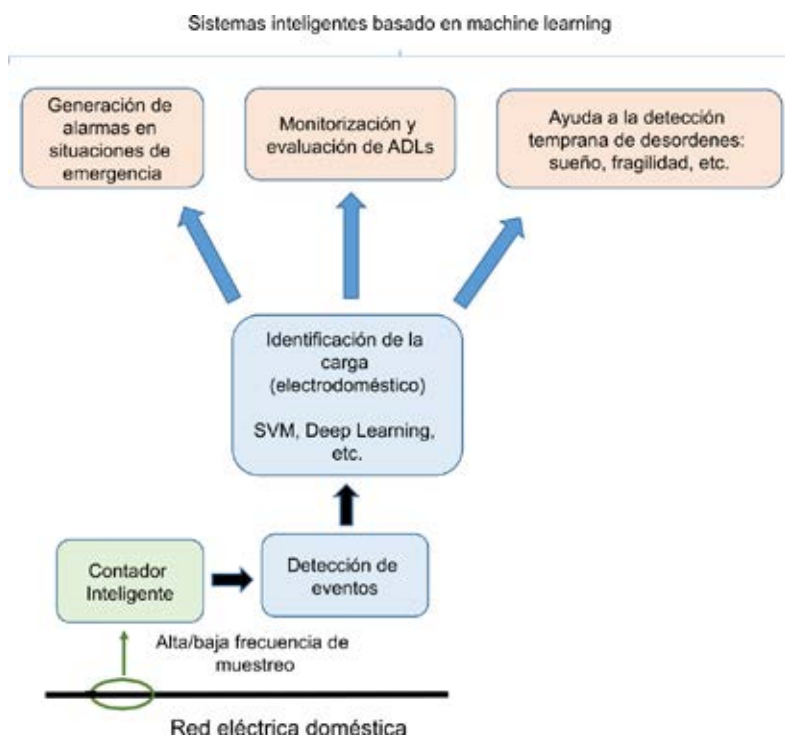


Fig. 4. Técnicas NILM aplicadas al concepto de AIL.

5. Conclusiones

Las REI están cambiando la relación de los clientes con la electricidad, a través de la introducción de herramientas y tecnologías que impulsan nuevas aplicaciones. En este trabajo se han compilado algunas aplicaciones que se desarrollarán en el marco de las REI y que tienen como denominador común el uso de técnicas NILM. Con ellas es posible no solo desagregar consumos sino también, entre otras cosas, inferir la topología de la red de distribución hasta identificar las posibles causas que producen un evento de tensión, lo cual redundará en una mejora de la calidad del servicio eléctrico. En lo relativo a los costos asociados es necesario un estudio más amplio y minucioso, aunque considerando que una de las partes más costosas es el despliegue de los medidores inteligentes, y que muchos de ellos van a ser desplegados de todas formas para automatizar el proceso de lectura de estados y la gestión de altas y bajas de servicio, es factible que la relación costo/beneficio sea muy ventajosa. Además, la investigación sobre estas técnicas ha demostrado que son una alternativa escalable y de bajo coste para el desarrollo de herramientas y sistemas de monitoreo para cuidadores y especialistas sanitarios, apoyando y promoviendo así la vida independiente asistida de las personas mayores en las sociedades actuales. Estos enfoques pueden convertirse en un aspecto clave para lograr la sostenibilidad y viabilidad de los servicios sociales y sanitarios en las próximas décadas.

Referencias

- Alcalá, J.M.; Ureña, J.; Hernández, A. y Gualda, D. (2017). Assessing Human Activity in Elderly People Using Non-Intrusive Load Monitoring. *Sensors*, (17), 351
- Alcalá Orzáez, J.M. (2017). Non-Intrusive Load Monitoring techniques for Activity of Daily Living recognition, *PhD Thesis*, Universidad de Alcalá, España
- Belley, C., Gaboury, S., Bouchard, B. y Bouzouane, A. (2014). An efficient and inexpensive method for activity recognition within a smart home based on load signatures of appliances. *Pervasive and Mobile Computing*, no. 12, pp. 58-78
- Bollen, M.H.J. y Gu, I.Y.H. (2006). Signal processing of power quality disturbances. *Wiley-IEEE Press*, New Jersey
- Brinkel, N.; Gerritsma, M.; AlSkaif, T.; Lampropoulos, I.; van Voorden, A. M.; Fidler, H. y van Sark, W. (2020). Impact of rapid PV fluctuations on power quality in the low-voltage grid and mitigation strategies using electric vehicles. *Int. J. Electrical Power & Energy Systems*, vol 118
- Chang, H.-H. y Linh, N.V. (2017). Statistical Feature Extraction for Fault Locations

- in Nonintrusive Fault Detection of Low Voltage Distribution Systems. *Energies* 10, 611
- Donato, P.G., Carugati, I., Strack, J.L., Orallo, C.O. y Funes, M.A. (2021). Detección y clasificación automática de eventos de tensión para el diagnóstico de fallas en redes de distribución. *XIX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control (XIX RPIC 2021)*. San Juan, Argentina
- Fiaschetti, L., Risso, M. y Boroni, G. (2019). Fault location index for distribution power system restoration using voltage sags. *Int. Trans. Electrical Energy Systems*
- Fortin-Simard, D., Bilodeau, J., Gaboury, S., Bouchard, B. y Bouzouane A. (2014). Human activity recognition in smart homes: Combining passive RFID and load signatures of electrical devices. *2014 IEEE Sym. on Intelligent Agents*, 22-29
- Hart, G.W., Kern Jr., E. y Schweppe, F.C. (1989). Non-intrusive appliance monitor apparatus. U.S.A.
- Hart, G.W. (1992) Nonintrusive appliance load monitoring. *Proc. of the IEEE*, vol. 80, (12), 1870–1891
- He, D.; Lin, W.; Liu, N.; Harley, R. y Habetler, T. (2013). Incorporating Non-Intrusive Load Monitoring Into Building Level Demand Response. *IEEE Trans. Smart Grids*, (4), 1870-1877
- Jimenez, V.A., Will, A. y Rodriguez, S. (2020). Phase identification and substation detection using data analysis on limited electricity consumption measurements. *Electric Power Systems Research*, vol. 187
- Le, D.P., Bui, D.M., Ngo, C.C. y Le, A.M. (2018). FLISR Approach for Smart Distribution Networks Using E-Terra Software—A Case Study. *Energies*, 11, 3333
- Loyarte, A., Sangoi, E., Clementi, L. y Vega, J. (2017). Optimal distribution of battery banks in microgrids with high photovoltaic penetration. *XVII Work. Information Processing and Control (RPIC)*, Mar del Plata
- Nalmpantis, C. y Vrakas, D. (2019). Machine learning approaches for non-intrusive load monitoring: from qualitative to quantitative comparison. *Artificial Intelligence Review*, 52(1), 217-243
- Patrono, L., Rametta, P. y Meis, J. (2018). Unobtrusive Detection of Home Appliance's Usage for Elderly Monitoring. *3rd Int. Conf. Smart and Sustainable Technologies*
- Pau, G.; Collotta, M.; Ruano, A. y Qin, J. (2017). Smart Home Energy Management. *Energies*, (10), 382

- Spalding, R., Rosa, L., Almeida, C., Morais, R. y Gouvea, M. (2016). Fault Location, Isolation and service restoration (FLISR) functionalities tests in a Smart Grids laboratory for evaluation of the quality of service. 17th Int. Conf. Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, 879-884
- Xu, M., Li, R. y Li, F. (2016). Phase Identification With Incomplete Data. *IEEE Trans. Smart Grids*, 9(4), 2777-2785

