

# Desagregación no intrusiva de consumos eléctricos en redes eléctricas inteligentes



**Patricio G. Donato, Ignacio Carugati, Marcos Funes**  
Laboratorio de Instrumentación y Control (LIC)  
Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en  
Electrónica (ICYTE)  
Universidad Nacional de Mar del Plata  
[icyte.conicet.gov.ar](http://icyte.conicet.gov.ar)

**Jesús Ureña**  
Grupo de Ingeniería Electrónica Aplicada a Espacios  
Inteligentes y Transporte (GEINTRA)  
Universidad de Alcalá (España)  
[www.geintra-uah.org](http://www.geintra-uah.org)

## Redes eléctricas inteligentes y eficiencia energética

Las redes eléctricas inteligentes (REI) han pasado de ser un paradigma futurista a convertirse en una realidad concreta, al menos en los países más desarrollados. Una REI se puede sintetizar 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 microrredes. En un sentido más amplio, el concepto de REI excede la integración de TIC para el control y gestión de las redes eléctricas, sino que modifica el funcionamiento de estas de muchas maneras diferentes, incluyendo cuestiones como:

- » interoperabilidad de dispositivos de almacenamiento,
- » reducción de las pérdidas de transmisión y distribución,
- » control del flujo de energía bidireccional,
- » aplicación de los sistemas de gestión de la demanda (DSM),
- » control de calidad de la energía,
- » medición del consumo en tiempo real,
- » eficiencia energética/uso racional de la energía,
- » tarifas dinámicas,
- » integración de plantas de potencia virtuales (VPP),
- » trazabilidad del origen de la energía.

La implementación de REI en la práctica implica una serie de funcionalidades que exigen el uso de muchos dispositivos diferentes, desde sensores hasta actuadores, junto con los elementos de procesamiento de información y comunicaciones correspondientes. Entre estos dispositivos hay uno

en particular que se destaca y se asocia inequívocamente con las REI: el medidor inteligente o *smart meter*. Este dispositivo, pieza clave en cualquier esquema que contemple una infraestructura de medición avanzada (AMI, por sus siglas en inglés), permite no solo la lectura remota del consumo por parte de la empresa distribuidora, sino que también proporciona información en tiempo real sobre el consumo propio de cada cliente. Aunque el despliegue de medidores inteligentes es uno de los primeros pasos en la implementación de una REI, ya que permite la comunicación en tiempo real entre el proveedor y los usuarios del servicio eléctrico, no proporciona en sí mismo ningún tipo de inteligencia a la red. La inteligencia se agrega a un nivel superior, en la gestión y el procesamiento de datos, y en acciones concretas sobre el sistema eléctrico. Sin embargo, los medidores inteligentes son dispositivos críticos para lograr una REI en su más completo sentido, donde los datos obtenidos en tiempo real pueden ser utilizados para generar políticas de tarifas y consumo, gestionar el flujo de energía y mejorar la calidad del servicio eléctrico en general. Además, los medidores inteligentes proporcionan información útil para que el mismo cliente haga una gestión de su propia demanda de energía.

Se han realizado despliegues masivos de medidores inteligentes en la mayoría de los países de la Unión Europea, América del Norte, Asia y Oceanía, como primer paso para la materialización de verdaderas REI. Según un informe de una empresa consultora en 2017 [1], se estima que el ritmo de instalación de medidores inteligentes en todo el mundo aumentará a unos 85 millones de unidades por año para 2025, impulsado por China y los países de la región de Asia-Pacífico. La penetración de los medidores inteligentes en el mercado mundial de la electricidad, según algunos otros estudios [2], crecerá casi un 50% para 2023, donde América Latina está alrededor del 25% y la mayoría de los países desarrollados, en promedio, alrededor del 70%.

El despliegue de medidores inteligentes permite progresar en funcionalidades más avanzadas

para las REI. No solo controlan la interacción entre los clientes y la empresa distribuidora, sino que también sirven para supervisar y controlar la red o para reducir las pérdidas de distribución de energía, tanto las técnicas como las no técnicas. También, la instalación de medidores inteligentes ha impulsado nuevos campos de investigación con resultados prometedores. Uno de ellos es el denominado "monitoreo no intrusivo de carga (NILM, por sus siglas en inglés). La idea subyacente detrás de este concepto es la descomposición, o desagregación, de los consumos de cada electrodoméstico o artefacto eléctrico concreto (iluminación, calefacción/refrigeración, etc.) de un cliente a partir de la medición de consumo realizada por el medidor inteligente. El atributo más interesante, o llamativo, es justamente ese: poder monitorear el comportamiento, en cuanto a consumo eléctrico, de diferentes dispositivos en el interior de un hogar o comercio sin necesidad de instalar medidores individuales para cada uno de ellos. Esta información podría ser de utilidad tanto para proveedores como clientes. A los primeros les proveería información útil para la gestión y control de la red eléctrica, mientras que a los clientes les sirve para administrar su propio consumo. De esta forma, los algoritmos NILM pueden contribuir a lograr mejores índices de eficiencia energética, realimentando a los clientes con información acerca del uso de la energía que sirva para hacer un uso más racional del recurso. En el caso de las empresas distribuidoras de energía, la información proporcionada por algoritmos NILM sería útil para implementar programas de gestión avanzada de la demanda (DSM, por sus siglas en inglés). Si a esto se le suman políticas y regulaciones adecuadas, se podrían impulsar hábitos de consumo de energía sustentables a largo plazo. Pero antes de llegar a ese punto, es necesario entender conceptualmente qué significa el concepto de desagregación de energía.

### ¿Qué es la desagregación de energía?

Bajo este título se encuentra un concepto simple pero de gran utilidad: a partir de una única me-

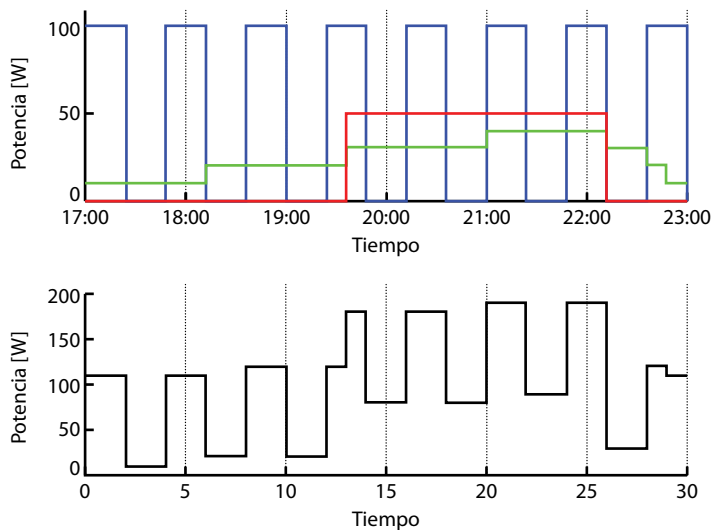


Figura 1. Ejemplo de desagregación de consumo de energía eléctrica. En la parte superior del gráfico se puede apreciar los consumos de tres dispositivos diferentes (heladera, en azul; TV, en rojo, e iluminación, en verde) y debajo, la medición realizada por el medidor instalado en la acometida de la casa. El desafío de la desagregación es descomponer los datos del consumo de manera tal de identificar unívocamente los aparatos conectados a ella.

dición de consumo de una red eléctrica interna, sea edificio, casa o comercio, se pueden discriminar los consumos individuales de todos los dispositivos conectados a esa red (lo que en la jerga eléctrica suele denominarse “aguas abajo”). La primera aproximación a este concepto de desagregación de energía y NILM aparece en una patente de Hart, Kern y Schweppe en 1986 [3] y en la posterior publicación de Hart en 1992 [4]. Durante varios años este tema no atrajo mayor atención, pero en el curso de la última década ha cobrado un notorio interés por parte de empresas y grupos de investigación, precisamente coincidiendo con el despliegue de las REI. Parte de este interés se puede encontrar en la necesidad de nuestra sociedad actual para lograr la sostenibilidad energética y alcanzar mejores estándares de eficiencia. Adicionalmente, también se puede explicar parte del interés en NILM en la im-

plementación de proyectos de REI y la instalación masiva de medidores inteligentes, lo cual ha generado un enorme volumen de datos sobre consumo de energía que sirve de materia prima para numerosos análisis.

La desagregación de energía se puede realizar mediante diversos tipos de técnicas con grados de complejidad y eficiencia diferentes, que incluyen desde métodos basados en *machine learning* hasta aquellos basados en procesamiento de señales. Para ilustrar este concepto, en la figura 1 se puede ver el consumo total de un hogar hipotético (abajo) y los consumos individuales de los artefactos eléctricos emplazados en el lugar (arriba). A priori, una simple inspección visual nos revela algunos comportamientos periódicos que pueden asociarse a equipos con este tipo de comportamiento, como es el caso de una heladera (línea azul). Otros dispositivos, como los artefactos de iluminación (línea verde) o la TV (línea roja) no son tan evidentes en la gráfica de consumo total, o sea, la que releva el medidor inteligente. Aquí es donde entran en juego los algoritmos de desagregación de la energía, que a partir de esta información (y eventualmente otros datos contextuales, presentes y de aprendizaje de historiales pasados), deben ser capaces de asociar consumos con dispositivos. Sin embargo, la desagregación de energía representa un problema complejo, razón por la cual es un campo de investigación muy activo y abierto, con importantes desafíos técnicos y prácticos aún por superar.

La característica distintiva de los algoritmos NILM es, como dice la misma sigla, que no es necesario “invadir” (intrusión) la red interna de la casa o comercio. La desagregación de energía se hace a partir de una única medición que incluye a todos los dispositivos a desagregar. En la figura 2 se puede ver un esquema sencillo sobre esta idea. La fuente de información que a priori se adecua mejor a este concepto es el medidor inteligente de consumo, que sería instalado por la empresa distribuidora de energía eléctrica en el marco de la implementación de una REI. A partir de esta información,

el algoritmo NILM, que podría correr en el mismo medidor o en un dispositivo dedicado, desagregaría los consumos de interés. El uso de dispositivos dedicados permite emplear frecuencias de adquisición mucho más elevadas que las usadas en los medidores inteligentes actuales, lo cual posibilita la implementación de algoritmos más sofisticados y con mayor capacidad de desagregación. Además, en muchos casos, dependiendo de la legislación particular de cada país, puede ser necesario recurrir a estos dispositivos dedicados porque los datos proporcionados por los contadores inteligentes están en posesión exclusiva de las compañías distribuidoras de electricidad.

### Clasificación y tipos de algoritmos NILM

Una clasificación básica de los algoritmos NILM es la que los organiza en algoritmos basados en eventos y sin eventos. Los algoritmos basados en eventos funcionan a partir de la detección y clasificación de estados transitorios (eventos de encendido y apagado o cambios de estado de los dispositivos), mientras que los algoritmos que no se basan en eventos operan mediante la estimación del estado de un conjunto de artefactos en cada instante a partir de las mediciones anteriores. Otra clasificación, más útil al momento de discriminar la capacidad de desagregación y la necesidad de datos para ello, es la que se basa en la frecuencia de muestreo [5]; por ejemplo, si se usan datos de consumo obtenidos a través de un medidor inteligente hay que considerar una tasa de muestreo menor a 1 Hz. Esto limita la capacidad de desagregación de algunos dispositivos, especialmente los de menor consumo, pero simplifica notoriamente la tarea de adquisición de datos. En caso de necesitar una mayor cantidad de muestras, por ejemplo, tasas de muestreo del orden de algunos kilohertzios, no alcanza con un medidor inteligente y es necesario instalar hardware especializado para tal fin, lo cual sin duda eleva los costos, aunque puede ayudar en la identificación de mayor cantidad de dispositivos. Hay un compromiso entre el nivel de intrusión (no

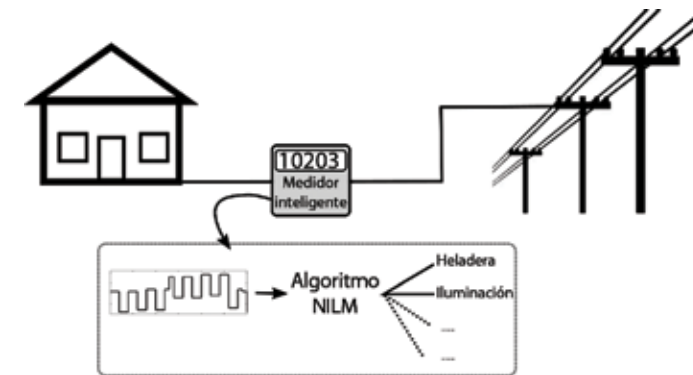


Figura 2. Esquema simplificado de aplicación de NILM mediante el uso de los datos provenientes de un medidor inteligente

es lo mismo un medidor puntual en la acometida de la red eléctrica que varios equipos de monitoreo distribuidos en la casa/comercio) y la capacidad de desagregación, el cual está fuertemente relacionado con la frecuencia de muestreo.

En la figura 3, se muestra un diagrama en bloques donde se discriminan los diferentes métodos de desagregación de energía en función de la frecuencia de muestreo. Hacia la izquierda se hallan los algoritmos con las tasas de adquisición más bajas, del orden de los segundos (o incluso minutos), que es la que se puede obtener normalmente con cualquier tipo de medidor inteligente. Este tipo de algoritmos se basa en el análisis de la potencia activa consumida y/o las variaciones (deltas) de consumo entre dos estados estacionarios diferentes. Solo sirven para hacer una desagregación gruesa, que identifique los dispositivos de mayor consumo. Este tipo de algoritmos suele emplear criterios de optimización combinatoria, de forma tal que, conociendo los consumos individuales de los distintos elementos presentes en la instalación, se estima el valor medido eligiendo la combinación más plausible.

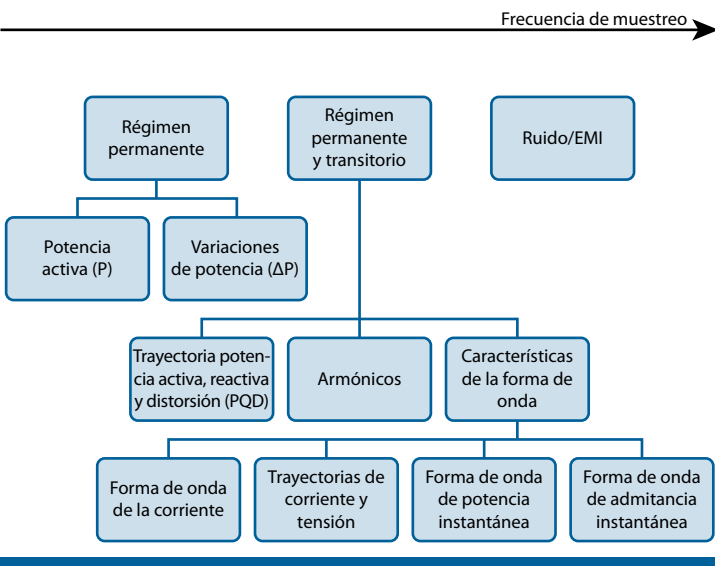


Figura 3. Clasificación básica de algoritmos NILM basada en la frecuencia de muestreo

Una frecuencia de muestreo mayor, del orden de 1 a 20 Hz, permite extraer información no solo del régimen permanente sino también de los transitorios de encendido y apagado de los artefactos conectados a la red. Dentro de este grupo de algoritmos se pueden hallar algunos basados en el análisis de trayectorias de potencia activa, reactiva y de distorsión (PQD), medición de contenido armónico y análisis de forma de onda en general. La medición de contenido armónico es muy útil para identificar y caracterizar dispositivos no lineales. En la actualidad, la gran mayoría de los dispositivos electrónicos que se encuentran en el hogar o un comercio cuenta con fuentes de alimentación de tipo conmutada, es decir, no lineales, por lo que la medición de contenido armónico es una herramienta muy potente para estos casos. Por su parte, el análisis de forma de onda, en líneas generales, más allá del caso de la distorsión armónica pura, provee de información

útil para la identificación de dispositivos individuales.

Si se emplean tasas de muestreo mucho más elevadas, del orden de varias decenas de kilohertzios, la capacidad de desagregación de consumos es mucho mayor, pudiéndose incluir cargas eléctricas de consumos muy bajos, que suelen quedar enmascaradas con frecuencias de muestreo menores. Los algoritmos que operan a esas frecuencias pueden medir la interferencia electromagnética (EMI, por sus siglas en inglés) producida por las fuentes conmutadas de cada dispositivo. A mayor cantidad de información (muestras) disponible, mayor es la capacidad de identificar los dispositivos responsables del consumo. Según reportes de diferentes autores, este tipo de algoritmos puede desagregar más del 99% del consumo, permitiendo incluso discriminar entre artefactos iguales situados en diferentes habitaciones de una casa o comercio.

Entre los diferentes algoritmos NILM que se pueden encontrar en la bibliografía específica [5] [6], se pueden hallar desde los enfoques ya mencionados, basados mayormente en las formas de onda, consumos de potencia y otros parámetros relacionados, hasta el uso de algoritmos con una base más estadística o el uso de herramientas propias de la inteligencia computacional. Estos últimos, en particular, tienen cualidades muy interesantes para discriminar señales, pero su rendimiento depende en gran medida de las bases de datos empleadas para su entrenamiento.

Para lograr una mayor capacidad de discriminación de los consumos, se pueden emplear medidores ad hoc emplazados a la entrada de la instalación, pero con sensores de corriente particulares para cada una de las secciones (con protecciones independientes) de distribución de la energía. Para cada una de las secciones, donde el número de elementos consumiendo energía será menor que el total, se aplican algoritmos similares a los indicados anteriormente. También se pueden usar sensores dedicados en diferentes puntos de la casa o instalación, que permitan identificar la distribución de co-

rrientes internas, o agregar dispositivos RFID para identificar determinados dispositivos. Sin embargo, este tipo de enfoque no tiene características no intrusivas, por lo que no podría considerarse como un auténtico algoritmo NILM.

### Conclusiones

Las redes eléctricas inteligentes plantean nuevos desafíos e impulsan el desarrollo de nuevas herramientas y procesos. El monitoreo no intrusivo de cargas, o desagregación de energía, es un concepto que ha cobrado notorio impulso en la última década de la mano de la implementación de proyectos de REI en todo el mundo. Es de esperar que este tipo de algoritmos pueda contribuir, tanto a la gestión y control de la red eléctrica por parte de la distribuidora, como al propio control y gestión del consumo de cada cliente. Los algoritmos NILM pueden aportar mucho a la eficiencia energética, realimentando a los clientes con información acerca del uso de la energía que pueda ayudar a hacer un uso más racional del recurso. En el caso de las empresas distribuidoras de energía, la información proporcionada por algoritmos NILM sería útil para implementar programas de gestión avanzada de la demanda que sirvan para reducir la curva de carga en los horarios pico, reduciendo pérdidas y costos. Acompañado de políticas y soporte adecuado, el uso de NILM puede contribuir a la eficiencia energética impulsando hábitos de consumo de energía sustentables. La integración de este tipo de algoritmos, aunque más no sea aquellos más básicos, podría ser incorporada en los mismos medidores inteligentes o en sistemas vinculados a ellos, ya sea a través de un hardware dedicado o mediante servicios de desagregación en la nube.

También se pueden encontrar otras aplicaciones de los algoritmos NILM en otros campos, por ejemplo, para monitorear de modo indirecto y poco intrusivo el comportamiento rutinario en el corto, medio o largo plazo de personas que viven solas y que requieran un cierto seguimiento por diversas cuestiones: discapacidad, enfermedad, dependen-

cia, etc. Este tipo de aplicaciones da lugar a nuevos campos de investigación, como el de monitoreo de personas en ambientes inteligentes [6].

Por último, es importante destacar que, al tratarse de un campo de investigación y desarrollo novedoso, aún existen muchos problemas sin resolver y hay un campo importante para trabajar tanto desde el sistema científico como desde las empresas de base tecnológica, lo cual es especialmente atractivo desde el punto de vista de la generación de empleo y nuevos modelos de negocios. ■

### Referencias

- [1] Metering and smart metering international. 2017. "85m smart meters to be installed annually by 2025.", en <http://www.metering.com/regional-news/africa-middle-east/85smart-meters-2025-report/>. Acceso 10 de diciembre de 2018
- [2] Uribe-Pérez, Hernández, De La Vega, Angulo, "State of the Art and Trends Review of Smart Metering in Electricity Grids," en *Applied Sciences*, vol. 6, pp. 1–24, Feb. 2016.
- [3] Hart, Kern, Schweppe, *Non-intrusive appliance monitor*, Patente US4 858 141A, 1986.
- [4] Hart, "Nonintrusive appliance load monitoring," en *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, n°. 12, pp. 1870–1891, Dic. 1992.
- [5] Alcalá Orzáez, *Non-Intrusive Load Monitoring techniques for Activity of Daily Living recognition*, tesis doctoral, Universidad de Alcalá, España, 2016.
- [6] Ruano, Hernández, Ureña, Ruano, García, "NILM Techniques for Intelligent Home Energy Management and Ambient Assisted Living: A Review", en *Energies* 2019, vol. 12(11), 2203; <https://doi.org/10.3390/en12112203>