

María José Santofimia Romero¹, Xavier del Toro García²,
Juan Carlos López López¹

¹Escuela Superior de Informática, ²ETSI Industriales, Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real

<mariajose.santofimia@uclm.es>
<xavier.deltoro@uclm.es>
<juancarlos.lopez@uclm.es>

Técnicas de Inteligencia Artificial aplicadas a la Red Eléctrica Inteligente (Smart Grid)

1. Introducción

La estructura de la red eléctrica tradicional comprende diferentes etapas en el proceso de suministro energético. La primera etapa consiste en la generación de la energía que tiene lugar en grandes plantas de producción. En la segunda etapa, la energía se transporta a las distintas áreas donde es consumida. Finalmente, y después de ser adecuadamente transformada, la energía se entrega al usuario final en la etapa de distribución. Esta última etapa en particular ha experimentado numerosos cambios en los últimos años con la progresiva introducción de nuevos actores tales como las unidades de generación distribuidas (fundamentalmente las granjas solares y eólicas y las plantas de cogeneración), los sistemas de almacenamiento (previsiblemente en aumento) y la futura aparición de la infraestructura necesaria para la recarga de los vehículos eléctricos (ver **figura 1**). Estos nuevos actores aportan nuevas posibilidades y más flexibilidad en relación a la forma en que la energía se ha gestionado tradicionalmente. Sin embargo, el nuevo sistema que resulte deberá utilizar nuevas y avanzadas tecnologías para enfrentarse a una complejidad cada vez más mayor.

En las últimas décadas, el mundo ha experimentado un significativo incremento de la energía consumida que ha provocado una preocupación generalizada sobre los problemas futuros de la energía en cuanto a sostenibilidad. Esta situación ha llevado a gobiernos y comunidad científica a buscar soluciones que permitan un uso eficiente, fiable y responsable de la energía a través de una concepción más flexible y optimizada de la red eléctrica. Este nuevo paradigma se conoce como *red eléctrica inteligente*. A pesar del amplio espectro de tecnologías involucradas, que hace imposible proporcionar una definición simple y única, está ampliamente aceptado que la red eléctrica inteligente es la plataforma que integra todas las más avanzadas tecnologías de control y de tratamiento de la información que permiten monitorizar y gestionar la generación y distribución de la energía. Hay muchos aspectos en común entre esta nueva concepción de la red eléctrica y aquellos principios que dieron lugar a Internet [1]. Así pues, es bastante usual considerar a

Resumen: El interés creciente por la red eléctrica inteligente y la naturaleza multidisciplinar de la misma están motivando que surjan soluciones a los problemas inherentes que conlleva desde distintos campos del conocimiento. La complejidad y heterogeneidad de estas redes y el gran volumen de información que se debe procesar hacen que las técnicas basadas en inteligencia artificial e inteligencia computacional puedan considerarse como habilitadoras para su adecuado desarrollo e implantación futuros. El objetivo de este artículo es revisar el estado del arte actual en las técnicas de inteligencia artificial propuestas para abordar los diferentes aspectos relacionados con el desarrollo del nuevo modelo de red eléctrica. Por tanto, este trabajo está orientado a repasar los retos más importantes en el diseño de esta "nueva" red eléctrica y cómo los sistemas inteligentes pueden contribuir a enfrentarlos con éxito.

Palabras clave: Gestión dinámica de la red, inteligencia artificial, inteligencia computacional, red eléctrica inteligente.

Autores

María José Santofimia Romero recibió los títulos de Ingeniería Técnica en Informática por la Universidad de Córdoba en 2001, *Master on Computer Security* por la University of Glamorgan (País de Gales, Reino Unido) en 2003 e Ingeniería Superior en Informática por la Universidad de Castilla-La Mancha en 2006. Actualmente está finalizando su doctorado como miembro del Grupo de Arquitectura y Redes de Computadores en la Escuela de Ingeniería Informática de Ciudad Real, perteneciente a la Universidad de Castilla-La Mancha.

Xavier del Toro García recibió los títulos de Ingeniería Técnica en Electrónica Industrial e Ingeniería Superior en Automática y Electrónica Industrial en 1999 y 2002, respectivamente, por la Universidad Politécnica de Cataluña. En 2008 recibió el título de Doctor en Ingeniería Eléctrica y Electrónica por la University of Glamorgan, País de Gales, Reino Unido. Entre septiembre de 2005 y octubre de 2006 fue investigador "Marie Curie" en el *Politecnico di Bari*, Italia. Desde 2008 trabaja como profesor e investigador en la Universidad de Castilla-La Mancha, dedicándose a la investigación en electrónica de potencia, energías renovables, sistemas de almacenamiento y calidad de la energía.

Juan Carlos López López obtuvo los títulos de Ingeniero y Dr. Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid en 1985 y 1989, respectivamente. Desde 1990 hasta 1992 fue Investigador Visitante en el *Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie-Mellon University*, Pittsburgh, Pennsylvania (EE.UU.). Sus áreas de investigación se centran en el diseño sistemas empotrados, sistemas distribuidos y servicios avanzados de comunicaciones. Desde 1989 hasta 1999, fue Profesor Titular de Universidad del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Madrid. Actualmente, es Catedrático de Universidad de Arquitectura y Tecnología de Computadores y Director de la Cátedra Indra en la Universidad de Castilla-La Mancha, donde además fue Director de la Escuela Superior de Informática entre 2000 y 2008. Ha sido miembro de diferentes comisiones de evaluación y consultivas de los Ministerios de Educación y de Ciencia e Innovación en relación con programas de investigación y formación en el área de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

la red eléctrica inteligente como una red tradicional mejorada con las tecnologías de la información y las comunicaciones con el fin de proporcionar un uso de la electricidad eficiente, seguro y fiable.

Para tener una visión más en profundidad de lo que significa la red eléctrica inteligente,

consideremos algunos de los objetivos concretos que este nuevo modelo debe satisfacer:

- Proporcionar una respuesta rápida a las condiciones cambiantes de la red eléctrica.
- Predecir el comportamiento de la red eléctrica (picos de demanda, averías, etc.).
- Mejorar la calidad de la potencia suministrada a los clientes finales.

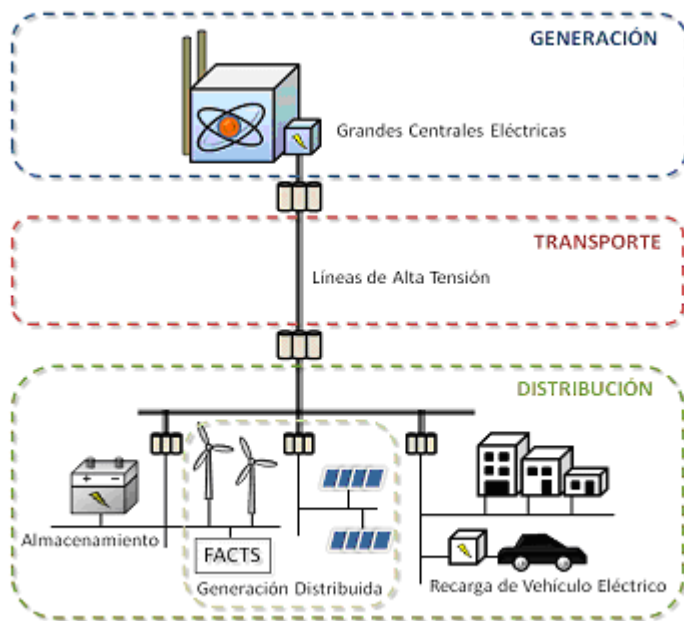


Figura 1. Estructura de la red eléctrica y su evolución.

- Proporcionar garantías de seguridad (privacidad, prevención de ataques o cortes deliberados, etc.).
- Proporcionar tolerancia a fallos y capacidades de auto reparación (*self-healing*).
- Integrar diferentes fuentes de energías renovables distribuidas.

Algunos de estos retos son fruto principalmente de la necesidad de mitigar el impacto de los fallos de la red y las alteraciones en la calidad de la potencia sobre los clientes tanto domésticos como industriales. Además, aparte de las preocupaciones económicas, la reducción de las emisiones de carbón, como un paso más hacia un desarrollo sostenible, aparece como el principal objetivo ligado al desarrollo de la red eléctrica inteligente. En este sentido, y al tiempo que se producen mejoras tecnológicas, el uso de energías renovables está siendo cada vez más relevante. Sin embargo, hay todavía inconvenientes importantes que impiden un despliegue masivo de las mismas. Las energías renovables, tales como la solar o la eólica, debido a su naturaleza intermitente, no permiten un suministro a la medida de las necesidades, es decir, ante una demanda inesperada del operador de red, no pueden responder de manera rápida.

Por otra parte, la cantidad de energía generada no puede ni predecirse ni planificarse, aún cuando se han realizado importantes avances en la predicción a corto plazo. Estos inconvenientes se pueden soslayar sólo si las diferentes alternativas de generación se integran adecuadamente, interconectando grandes redes, mejorando la planificación de los tiempos de generación y consumo, e introduciendo sistemas de almacenamiento de energía.

Otro hecho importante que debemos considerar es que las redes inteligentes del futuro deberán ser capaces de integrar actores como los vehículos eléctricos, los cuales permitirán sostenibilidad en términos de movilidad. La infraestructura eléctrica que se requiere para un gran despliegue de vehículos eléctricos tendrá un gran impacto en la infraestructura global y en los perfiles de consumo. Sin embargo, proporcionará asimismo nuevas oportunidades ligadas, por ejemplo, a la posibilidad de que el flujo de energía con la batería del vehículo sea bidireccional: el flujo Vehículo-a-Red (V2G, *Vehicle-to-Grid*) permitirá ver a los vehículos eléctricos como una infraestructura de almacenamiento distribuida que puede contribuir a la estabilidad de la red.

Así pues, considerando el complejo escenario que se ha descrito, los retos de la red eléctrica inteligente pueden dividirse en tres grupos principales [2]:

- Retos tecnológicos.
- Retos económicos.
- Retos regulatorios.

Los retos tecnológicos abordan básicamente la consecución de estrategias de comunicación distribuidas, optimizando latencia y ancho de banda, el desarrollo de sistemas avanzados de control, gestión de la tolerancia a fallos, el tratamiento masivo de datos y el diseño de nuevos dispositivos de almacenamiento energético. En cuanto a los retos económicos, se debe considerar la aparición de nuevos modelos de negocios ligados a una nueva forma de concebir el futuro mercado de la energía. Por ejemplo, las estrategias para la respuesta activa a la demanda ayudarán a

reducir picos de consumo en el sistema energético, adaptándose a los patrones de consumo de los usuarios. Finalmente, los retos regulatorios están relacionados con el establecimiento de estándares que, a diferentes niveles, especifiquen las bases para la interoperabilidad, la cual es necesaria para que la red eléctrica inteligente sea viable.

A pesar de la naturaleza extremadamente diversa de los mencionados retos, todos comparten un conjunto de características que se deben considerar como punto de partida a la hora de proponer soluciones basadas en sistemas computacionales. Estas características comunes conforman un tipo de escenario que es precisamente el que los sistemas computacionales son capaces de abordar: escenarios complejos, dinámicos, imprecisos y en continua evolución. Así pues, estos sistemas necesitarán comprender las situaciones que se están produciendo, tomar decisiones y reevaluar las situaciones para determinar si se deben llevar a cabo nuevas acciones. Este artículo presenta un estudio de los numerosos sistemas de inteligencia computacional que están contribuyendo a abordar los retos de las futuras redes eléctricas inteligentes. La **sección 2** repasa las distintas tecnologías presentes en la red eléctrica inteligente, diferenciando las que son suficientemente maduras para su uso inmediato de las que están en estado de desarrollo temprano. Las **secciones 3 y 4** analizan el papel de las diferentes estrategias computacionales existentes bajo el paraguas de la Inteligencia Artificial y que están ya aportando soluciones al desarrollo de la red del futuro en distintos ámbitos. Finalmente, la **sección 5** resume las ideas más relevantes presentadas en este artículo.

2. Tecnologías de las redes eléctricas inteligentes

Con el objetivo de evolucionar hacia una red más inteligente, el esfuerzo de los trabajos de investigación y desarrollo se ha concentrado en las siguientes áreas tecnológicas clave [4]:

- **Monitorización y control de área extensa.** Los sistemas de monitorización y control de área extensa (WAMCS, *Wide-Area Monitoring and Control Systems*) tienen la responsabilidad de prevenir y mitigar las posibles alteraciones que pueda haber en la red. Para ello, los WAMCS realizan operaciones avanzadas dirigidas a identificar la presencia de inestabilidades, ayudar en la integración de fuentes de energía renovables o mejorar e incrementar las capacidades de transmisión. Estos sistemas procesan de manera centralizada todos los datos recogidos de las diferentes fuentes distribuidas y, a partir de ellos, evalúan el estado de la red. Por lo tanto, las principales funciones que realizan los WAMCS se asocian a tres etapas diferentes: adquisición, envío y procesamiento de los datos [5].

■ **Integración de las tecnologías de la información y las comunicaciones.** Un aspecto esencial de la red eléctrica inteligente es la necesidad de un intercambio de información en tiempo real, el cual debe basarse en una infraestructura de comunicaciones que soporte la integración de los numerosos dispositivos distribuidos y heterogéneos.

■ **Integración de los sistemas distribuidos de generación de energías renovables.** La generación distribuida tiene como reto la integración a nivel de distribución de numerosas fuentes de energía de pequeño tamaño. Cuando estos sistemas de generación utilizan fuentes renovables aparecen nuevos retos ligados a la dificultad de predecir y gestionar la disponibilidad de esos recursos. Actualmente, la generación distribuida basada en energías renovables está incrementando en algunos países su presencia de forma notable, lo que hace que aumenten los problemas de estabilidad y planificación de la red. A largo plazo, se plantea la necesidad de avanzar en nuevos sistemas de almacenamiento de energía, los cuales pueden aliviar de alguna manera los inconvenientes ligados al desacople entre generación y consumo provocado por los problemas mencionados más arriba.

■ **Aplicaciones para la mejora de la transmisión.** La etapa de transmisión de la electricidad es la responsable de trasladar la potencia generada en las plantas de generación hasta las subestaciones de distribución. Actualmente se está estudiando cómo incrementar la capacidad de transmisión utilizando distintos métodos, tales como los sistemas de transmisión flexibles de corriente alterna (FACTS, *Flexible AC Transmission Systems*), alto voltaje en continua (HVDC), superconductores de alta temperatura (HTS) o mediante evaluación dinámica de la línea (DLR, *Dynamic Line Rating*).

■ **Gestión de la red de distribución.** La idea detrás de este concepto es conseguir una mejora sustancial de las comunicaciones entre todos los elementos del sistema de distribución. Las principales aplicaciones de la tecnología a la gestión de la red de distribución se dirigen a la realización de tareas tales como balanceo de carga, optimización, detección de fallos, recuperación, etc.

■ **Infraestructura de medida avanzada.** Las tecnologías que se agrupan bajo el paraguas de los sistemas avanzados de medida tienen como objetivo proporcionar un valor añadido sobre la funcionalidad básica de medir o contar. La aplicación más conocida es la que consiste en permitir una facturación dinámica en función de los periodos de uso de la energía, esto es, el cliente puede reducir su factura ajustando su consumo fuera de los picos de demanda. Para ello, el sistema de medida avanzado se compone de tres elementos: un medidor inteligente, el módulo de comunicación y una aplicación para la gestión de los datos medidos [6].

Como puede observarse, la naturaleza distribuida de los componentes que comprenden la infraestructura de medida pone sobre la mesa una nueva preocupación, que es la necesidad de estándares que permitan soslayar los problemas de interoperabilidad.

■ **Infraestructura de recarga del vehículo eléctrico.** Uno de los argumentos fundamentales sobre los que se apoya la red eléctrica inteligente es el de que implica una visión más sostenible de la generación de energía y del proceso de consumo. Así, la mayor prioridad es minimizar la emisión de gases de efecto invernadero, y, en este sentido, los vehículos eléctricos aparecen como una solución a esta preocupación. Además el papel que juegan este tipo de vehículos dentro de la red eléctrica inteligente es incluso más relevante si tenemos en cuenta su capacidad para trabajar como unidades de almacenamiento de energía distribuidas.

■ **Sistemas en el lado del cliente.** Estos sistemas están destinados a realizar todas aquellas funciones que permitan un uso más eficiente de la electricidad, así como una reducción en el coste de la misma. Así, en este apartado se incluyen no sólo los sistemas de gestión energética, sino elementos de almacenamiento, electrodomésticos inteligentes y pequeños sistemas de generación (por ej. placas solares).

Esta sección ha repasado los aspectos más relevantes ligados a las diferentes tecnologías que se engloban bajo el paraguas de la red eléctrica inteligente. Cada una de ellas se articula por medio de un amplio conjunto de aplicaciones, algunas de las cuales se han mencionado de forma sucinta. Los próximos apartados se dedican a estas aplicaciones específicas, resaltando el papel que juegan las técnicas basadas en inteligencia artificial y

computacional (ver **figura 2** como síntesis esquemática) en el proceso de conseguir la deseada red eléctrica inteligente.

3. La inteligencia artificial y la red eléctrica inteligente

A la luz de las tareas más comunes que llevan a cabo los sistemas ligados a la red eléctrica inteligente, se puede decir que existe una relación inherente entre la idea de una red más inteligente y el paradigma de la Inteligencia Artificial. Si vamos un poco más lejos, podemos decir que, en concreto, el foco de estudio puede restringirse a los conceptos ligados a la llamada inteligencia distribuida [7].

El principal reto que se debe abordar en la red eléctrica inteligente lo plantea la enorme cantidad de información involucrada. En contraste con la red tradicional, en la cual la medición del consumo se obtiene mensualmente, la red inteligente introduce un nuevo escenario en el que todos los nodos están interconectados y fluye información en tiempo real sobre diferentes asuntos (no sólo consumo), tales como precios/costes en tiempo real, picos de carga, estado de la red, calidad de la energía... [8]. En este sentido, uno de los principales objetivos de las técnicas de inteligencia artificial será la gestión inteligente de esa cantidad de información de manera que puedan obtenerse conclusiones que soporten la toma de decisiones. Este reto se aborda fundamentalmente desde la perspectiva de las técnicas de procesamiento complejo de eventos (CEP, *Complex Event Processing*). Las técnicas CEP permiten realizar filtrado de eventos en busca de patrones relevantes. Sin embargo, los eventos seleccionados necesitan estar semánticamente enriquecidos de alguna forma, de manera que puedan conducir a una comprensión de la situación actual.

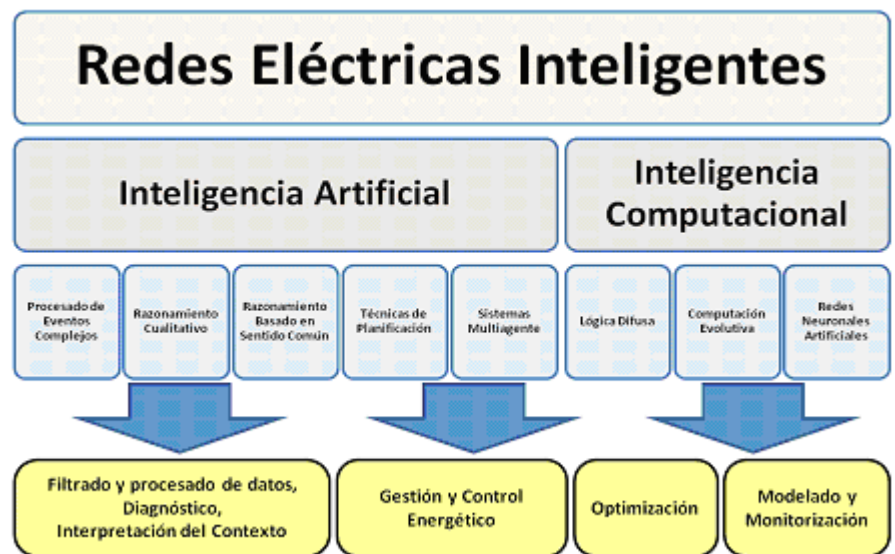


Figura 2. Inteligencia Artificial e Inteligencia Computacional y sus contribuciones a la Red Eléctrica Inteligente.

Los sistemas CEP necesitan complementar-se con otras técnicas más sofisticadas que soporten el proceso de comprensión. En este sentido, una de las posibles aproximaciones se basa en el uso de Razonamiento Cualitativo. En [9] se muestra un ejemplo de este mecanismo que usa un modelo de comportamiento cualitativo de la red eléctrica en el cual se modelan algunos aspectos relacionados con la calidad de la energía, tales como caídas de tensión, potencia reactiva, etc., con el fin de anticipar su posible evolución y sus efectos negativos. Los problemas relacionados con la calidad de la energía proporcionan un interesante campo de aplicación para las tareas de monitorización y diagnóstico. El trabajo citado [9] intenta salvar la distancia que nos separa de sistemas autosuficientes, capaces de anticipar y reaccionar ante fallos usando simplemente los datos recogidos. Para hacer esto, la propuesta mencionada proporciona una caracterización del problema de la calidad de la energía, a la vez que presenta un modelo cualitativo del comportamiento de la red en régimen dinámico. Este modelo utiliza un sistema multiagente que se encarga de anticipar y reaccionar a fallos y alteraciones.

En esta misma línea, existen otras técnicas de razonamiento más complejas que pueden mejorar también las funcionalidades de las tecnologías de la red eléctrica inteligente. Estas técnicas, basadas en una base de conocimiento a gran escala construida sobre lo que se denomina *sentido común*, pueden proporcionar capacidades avanzadas para asistir y enriquecer el funcionamiento de los sistemas de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA, por sus siglas en inglés). Algunos ejemplos de esos sistemas basados en sentido común son Cyc [10], Scone [11], o ConceptNet [12].

Los logros en el campo de los sistemas sensibles al contexto pueden también extrapolarse para conseguir funcionalidades muy interesantes en la red eléctrica inteligente. Por ejemplo, la ya mencionada tecnología DLR es la encargada de maximizar el funcionamiento de las líneas de distribución reconfigurando la capacidad de las mismas de forma dinámica y en función de condiciones externas (por ej. el tiempo atmosférico). Adicionalmente, la tecnología de Gestión Activa de la Demanda aborda el problema de proporcionar la cantidad correcta de energía eléctrica en el lugar y momento adecuados. Esta tarea lleva consigo realizar un cierto balanceo de carga, tarea a la que la planificación basada en Inteligencia Artificial puede contribuir de forma patente [13].

Sin embargo, la gestión de la información no es el único aspecto de las redes eléctricas inteligentes que puede beneficiarse del potencial de las técnicas de inteligencia artificial.

Varias tecnologías relacionadas se basan también en una amplia variedad de soluciones inteligentes para abordar la incertidumbre e imprevisibilidad. Por ejemplo, la tecnología de Gestión Activa de la Red se apoya en agentes inteligentes para abordar la automatización de aspectos tales como el control de voltaje y frecuencia, el control de la potencia reactiva, la detección de fallos, el funcionamiento durante el fallo y la recuperación de los mismos, o autocorrección (*self-healing*). Asumiendo que esta tecnología requiere una infraestructura de comunicaciones que soporte los sistemas SCADA, la investigación en inteligencia distribuida puede ser de gran ayuda. En este sentido, la teoría de sistemas distribuidos puede contribuir con algoritmos, mecanismos de comunicación, o técnicas de consistencia y replicación, entre otras. En particular, los sistemas multiagente (MAS, *Multi-Agent Systems*) se pueden considerar una especie de inteligencia distribuida con una gran aplicabilidad a la red eléctrica inteligente debido a la naturaleza distribuida y heterogénea de ésta [14]. Como se ilustra en [15] y [16], los MAS se han empleado con éxito en una gran variedad de aplicaciones de ingeniería eléctrica.

4. La inteligencia computacional y la red eléctrica inteligente

En la sección anterior hemos repasado las técnicas más relevantes del campo de la Inteligencia Artificial que han sido aplicadas a la red eléctrica para afrontar algunos de sus retos actuales. Esta sección continúa esta revisión pero deteniéndonos ahora en aquellas técnicas que han sido ideadas específicamente para abordar problemas de índole dinámica y estocástica.

Cuando nos enfrentamos con escenarios imprevisibles e inciertos, tanto la inteligencia artificial como la inteligencia computacional aportan técnicas para tratarlos de forma adecuada. Si bien a primera vista pueden parecer equivalentes, difieren en la forma en la que ambas abordan problemas complejos. La inteligencia artificial adopta una aproximación orientada al objetivo. En este sentido, la solución se basa en un conocimiento completo del ámbito del problema, en las relaciones entre dicho problema y las acciones que se pueden llevar a cabo para lograr esa solución. Sin embargo, esta aproximación no resulta adecuada para situaciones en las que procesos de naturaleza estocástica interfieren. Estos escenarios tan abiertos se tratan mejor por medio de técnicas de inteligencia computacional, entre las que se encuentran la computación evolutiva, la lógica difusa o las redes neuronales artificiales. Estas aproximaciones tienen en común que las soluciones, en vez de obtenerse a partir de un conocimiento previo en el que se representan acciones y sus objetivos, se alcanzan mediante procesos estocásticos basados en ciclos

iterativos de generación-evaluación. Las técnicas tradicionales de inteligencia artificial experimentan dificultades cuando varios objetivos entran en conflicto, mientras que la inteligencia computacional obtiene buenos resultados en estas circunstancias.

El papel que juega la inteligencia computacional en el campo de la red eléctrica inteligente se basa por tanto en su capacidad para posibilitar comportamientos inteligentes en condiciones de incertidumbre [17]. Esta sección está pues dedicada a revisar las técnicas de más éxito así como aquellos retos en nuestro campo de aplicación a los que potencialmente son capaces de enfrentarse.

Las principales contribuciones de la inteligencia computacional a la red eléctrica inteligente están identificadas en [18], basadas todas ellas en la característica más interesante de estas técnicas que es su capacidad para anticipar información relevante que permita ayudar en el proceso de toma de decisiones. Así, estos métodos proporcionan los medios adecuados para controlar la red rápidamente y de una manera fiable.

Las redes neuronales artificiales (ANN, *Artificial Neural Networks*) se basan en replicar las operaciones que realizan los sistemas neuronales biológicos [19]. En este sentido, una red neuronal está compuesta de un conjunto de nodos interconectados que no son sino unidades de procesamiento a las que se asocian dos valores, una entrada y un peso [20]. Su principal característica es que en vez de ser programadas para realizar ciertas tareas, pueden ser entrenadas para identificar ciertos patrones de datos. Sin embargo, su mayor ventaja, el entrenamiento, se transforma en inconveniente al necesitar una gran cantidad de datos de entrada para poder tener una muestra representativa del patrón de comportamiento generales [21].

En [20] se revisan algunas de las aplicaciones más relevantes de las ANN en el campo de los sistemas energéticos, las cuales cubren un amplio espectro desde el modelado de las respuestas de calentamiento de sistemas en energía solar [22], pasando por la predicción de la radiación solar [23] o el diseño de sistemas adaptativos críticos [24], hasta temas relacionados con la seguridad [25]. La idea tras estas aplicaciones se basa en aprender cómo las prestaciones del sistema están relacionadas con ciertos valores de entrada, como por ejemplo, cómo las condiciones meteorológicas (sol o viento) determinan en un sistema de generación la energía que puede esperarse [26].

La monitorización de la estabilidad de la tensión [27] es otra de las aplicaciones más útiles (y exitosas) de las ANN al campo de la red eléctrica inteligente. Así, en [28] se presen-

ta un innovador método para estimar el índice de estabilidad del voltaje en la carga usando medidas de voltaje (magnitud y ángulo) realizadas mediante sincrofasores.

Las aplicaciones de monitorización de área extensa también se benefician del potencial de las ANN. El trabajo en [29] describe la implementación de un sistema destinado a identificar la dinámica de un sistema de potencia no-lineal. Las ANN han demostrado su capacidad para detectar en tiempo real los cambios dinámicos de los sistemas de potencia. Cuando se identifican dichos cambios, se puede emplear una ANN adicional para general las señales de control apropiadas que permitan minimizar los posibles efectos negativos [30].

Los algoritmos evolutivos (EA, *Evolutionary Algorithms*) [31], y de forma más específica los algoritmos genéticos, han ganado una gran relevancia debido a su capacidad para abordar problemas de optimización con un uso relativamente bajo de recursos de computación. Inspirados en el principio de evolución por selección natural [32], se basan en codificar un conjunto de soluciones plausibles (población inicial) de las cuales el miembro más adecuado es favorecido para dar lugar a la siguiente generación de soluciones. Esta metodología está enfocada a eliminar, en iteraciones recursivas, aquellas soluciones consideradas como pobres.

En [32] se ofrece una lista de las principales aplicaciones de los EA al campo de la energía. Entre ellas, el trabajo en [33] utiliza algoritmos genéticos con dos objetivos: en una primera etapa, se utiliza un algoritmo genético para generar una solución factible, dentro de las restricciones impuestas por la deseada convergencia en la carga; después, otro algoritmo genético se encarga de optimizar la solución inicial. Por otra parte, en [34] se emplean este tipo de algoritmos para la mejora de la eficiencia, demostrando que controladores borrosos implementados utilizando dichos algoritmos pueden obtener resultados óptimos (tanto de forma global como en intervalos de tiempo discretos).

La última aproximación que consideraremos en esta sección es la lógica borrosa (FL, *Fuzzy Logic*) [37]. Existen numerosos procesos en la red eléctrica inteligente que involucran tareas de toma de decisiones, como por ejemplo, cómo asignar la producción de energía renovable o en qué momento consumir de acuerdo con la evolución del precio en el mercado energético. Estos métodos están orientados a ofrecer soluciones a problemas basadas en aproximaciones, apoyándose en una representación del sistema que, en vez de utilizar cálculos convencionales numéricos y analíticos, emplea simples etiquetas para cuantificar entradas y reglas sencillas (sen-

tencias IF-THEN) para valorarlas y proponer soluciones. La FL ha demostrado unas estupendas prestaciones en procesos de decisión que utilizan valores imprecisos bajo condiciones inciertas [20]. Por ello, las técnicas basadas en FL son una parte esencial de una larga lista de aplicaciones de los sistemas de potencia, tales como la supervisión y planificación de la utilización de fuentes de energía renovable [36][37].

5. Conclusiones

La creciente preocupación por el impacto medioambiental del consumo energético en el planeta está llevando a una nueva concepción en el funcionamiento del sistema de energía eléctrica, en el cual las energías renovables se integran cada vez más en el ciclo de producción mientras que la eficiencia y la seguridad tienden a maximizarse.

Este trabajo ha prestado especial atención a cómo las técnicas de inteligencia artificial y computacional pueden contribuir en la consecución de redes eléctricas más inteligentes. Así, se han revisado tanto las principales tecnologías involucradas en la red eléctrica inteligente como el impacto actual y futuro que el uso de dichas técnicas puede tener sobre ellas.

Como conclusión podemos asegurar que las propuestas basadas en ingeniería del conocimiento pueden abordar con éxito el problema de gestionar la enorme cantidad de información que habrá de generarse en las futuras redes eléctricas inteligentes. Además, las técnicas de inteligencia artificial distribuida pueden proporcionar los medios adecuados para monitorizar y gestionar las diferentes etapas involucradas en el proceso completo. Los sistemas multiagente han demostrado su capacidad para cooperar y articular respuestas acordes a los datos distribuidos en la red y que son proporcionados por diferentes fuentes de información. Finalmente, el papel que puede jugar la inteligencia computacional (las llamadas técnicas de *soft-computing*) es esencial en los procesos de optimización y control de la red eléctrica inteligente.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) – Ministerio de Ciencia e Innovación, a través del proyecto CENIT "Energos: Tecnologías para la gestión automatizada e inteligente de las redes de distribución energética del futuro" (CEN-20091048).

Referencias

- [1] U.S. Department of Energy. "The smart grid: An introduction". [Online], 2008. <<http://www.oe.energy.gov/SmartGridIntroduction.htm>>.
- [2] M. Hashmi. "Survey of smart grid concepts worldwide". VTT, Espoo. VTT Working Papers, 2011.
- [3] G.K. Venayagamoorthy. "Dynamic, Stochastic, Computational, and Scalable Technologies for Smart Grids". Computational Intelligence Magazine, IEEE, vol.6, no. 3, pp. 22-35, August. 2011.
- [4] OCDE. "Technology Roadmap: Smart Grids". IEA Technology Roadmaps, OECD Publishing, 2011.
- [5] M. Zima, M. Larsson, P. Korba, C. Rehtanz, G. Andersson. "Design Aspects for Wide-Area Monitoring and Control Systems". Proceedings of the IEEE In Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 5. (mayo 2005), pp. 980-996.
- [6] R. Hornby, C. Salamone, S. Perry, D. White, K. Takahashi. "Advanced Metering Infrastructure – Implications for Residential Customers in New Jersey". Ex. UWUA-4, julio 8, 2008.
- [7] Steven Collier. "Ten Steps to a Smarter Grid". IEEE Industry Applications Magazine 16.2 (2010), pp. 62-68.
- [8] Y. Simmhan, S. Aman, B. Cao, M. Giakkoupis, A. Kumbhare, Q. Zhou, D. Paul, C. Fern, A. Sharma, V. Prasanna. "An informatics approach to demand response optimization in smart grids". Technical report, Computer Science Dept., USC, 2011.
- [9] M.J. Santofimia, X. del Toro, P. Roncero-Sánchez, F. Moya, M.A. Martínez, J.C. López. "A qualitative agent-based approach to power quality monitoring and diagnosis". Integrated Computer-Aided Engineering, 17, pp. 305-319, diciembre 2010.
- [10] D. Lenat, M. Prakash, M. Shepherd. "CYC: Using common sense knowledge to overcome brittleness and knowledge acquisition bottlenecks". Artificial Intelligence Magazine, 6:65-85, enero 1986.
- [11] S. E. Fahlman. *The Scone knowledge-base project*, 2010. [Online]: <<http://www.cs.cmu.edu/sef/scone/>>. [Último acceso: 28 febrero 2010].
- [12] H. Liu, P. Singh. "Conceptnet: A practical commonsense reasoning toolkit". BT Technology Journal, 22:211-226, 2004.
- [13] Y. Oualmakran, J. Meléndez, S. Herraiz, M. López-Perea, E. González. "Survey on knowledge based methods to assist fault restoration in power distribution networks". International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11). Las Palmas, 2011.
- [14] G. Weiss. "Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence". MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1999.
- [15] S.D.J. McArthur, E.M. Davidson, V.M. Catterson, A.L. Dimeas, N.D. Hatziaargyriou, F. Ponci, T. Funabashi. "Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications - Part I: Concepts, Approaches and Technical Challenges". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, no. 4, pp. 1743-1752, noviembre 2007.
- [16] S.D.J. McArthur, E. M. Davidson, V.M. Catterson, A.L. Dimeas, N.D. Hatziaargyriou, F. Ponci, T. Funabashi. "Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications - Part II: Technologies, Standards, and Tools for Building Multi-agent Systems". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, no. 4, pp. 1753-1759, noviembre 2007.

[17] **G.K. Venayagamoorthy.** "Potentials and Promises of Computational Intelligence for Smart Grids", IEEE Power General Society General Meeting, Calgary, CA, 26-30 de julio, 2009.

[18] **R. Harley, J. Liang.** "Computational Intelligence in Smart Grids" IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI) 2011 - CIASG, 11-15 de abril, 2011.

[19] **S. Haykin.** "Neural Networks: A Comprehensive Foundation". Macmillan, New York, 1994.

[20] **S. Kalogirou, K. Metaxiotis, A. Mellit.** "Artificial Intelligence Techniques for Modern Energy Applications". Intelligent Information Systems and Knowledge Management for Energy: Applications for Decision Support, Usage, and Environmental Protection. IGI Global, 2010, pp. 1-39.

[21] **G. Zini, S. Pedrazzi, P. Tartarini, K. Gopalakrishnan, S. Khaitan, S. Kalogirou.** "Use of Soft Computing Techniques in Renewable Energy Hydrogen Hybrid Systems". Soft Computing in Green and Renewable Energy Systems, Studies in Fuzziness and Soft Computing, Springer Berlin, pp. 37-64, vol. 269, 2011.

[22] **S. Kalogirou, C. Neocleous, C. Schizas.** "Artificial neural networks for modelling the starting up of a solar steam generator". Applied Energy, 60, pp. 89-100, 1998.

[23] **P.L. Zervas, H. Sarimvies, J.A. Palyvos, N.G.C. Markatos.** "Model-based optimal control of a hybrid power generation system consisting of photovoltaic arrays and fuel cells", Journal of Power Source 181, pp. 327-338, 2008.

[24] **P.J. Werbos.** "Approximate Dynamic Programming for Real Time Control and Neural Modelling". En White DA and Sofge DA (Eds.), Handbook of Intelligent Control, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992, ISBN 0-442-30857-4, pp. 493-525.

[25] **Y. Mansour, E. Vaahedi, M.A. El-Sharkawi.** "Dynamic security contingency screening and ranking using neural networks". IEEE Trans. Power Syst., vol. 8, no. 4, pp. 942-950, julio 1997.

[26] **D. Riley, G.K. Venayagamoorthy.** "Characterization and modeling of a grid connected photovoltaic system using a recurrent neural network". En Proc. IEEE Int. Joint Conf. Neural Networks, San Jose, CA, 31 julio-5 agosto 2011.

[27] **G.K. Venayagamoorthy.** "Dynamic, Stochastic, Computational, and Scalable Technologies for Smart Grids". Computational Intelligence Magazine, IEEE, vol. 6, no. 3, pp. 22-35, agosto 2011.

[28] **K.J. Makasa, G.K. Venayagamoorthy.** "On-line voltage stability load index estimation based on PMU measurements". En Proc. IEEE Power and Energy Society, Detroit, MI, julio 2011, pp. 24-28.

[29] **W. Qiao, G.K. Venayagamoorthy, R.G. Harley.** "Optimal Wide-Area Monitoring and Non-Linear Adaptive Coordinating Control of a Power System with Wind Farm Integration and Multiple FACTS Devices". Neural Networks, Vol. 21, Issues 2-3, marzo/abril 2008, pp. 466-475.

[30] **Z. Vale, G.K. Venayagamoorthy, J. Ferreira, H. Morais.** "Computational Intelligence Applications for Future Power Systems". Intelligent Systems,

Control And Automation: Science and Engineering, Springer Netherlands, pp. 176-193, vol. 46, 2011.

[31] **T. Bäck.** "Evolutionary algorithms in theory and practice". Oxford University Press, Oxford, 1996.

[32] **A. Pacheco-Vega.** "Soft Computing Applications in Thermal Energy Systems". Soft Computing in Green and Renewable Energy Systems (Studies in Fuzziness and Soft Computing), pp. 1-35, Vol. 269, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2011.

[33] **M.S. Osman, M.A. Abo-Sinna, A.A. Mousa.** "A solution to the optimal power flow using genetic algorithm". Applied Mathematics and Computation 155(2), pp. 391-405, 2004.

[34] **G. Jahedi, M.M. Ardehali.** "Genetic algorithm-based fuzzy-pid control methodologies for enhancement of energy efficiency of a dynamic energy system". Energy Convers. and Manage. 52(1), pp. 725-732, 2011.

[35] **L.A. Zadeh.** "Fuzzy logic, neural networks and soft computing". Communications of the ACM 37 (1994) pp. 77-84.

[36] **V. Courtecuisse, J. Sprooten, B. Robyns, M. Petit, B. Francois, J. Deuse.** "A methodology to design a fuzzy logic based supervision of hybrid renewable energy systems". Mathematics and Computers in Simulation, 81(2), pp. 208-224 (2008).

[37] **Y.F. Li, Y.P. Li, G.H. Huang, X. Chen.** "Energy and environmental systems planning under uncertainty-An inexact fuzzy-stochastic programming approach". Applied Energy, 87(10), 3189-3211 (2010).

Boletín electrónico de ATI

Si no eres socio, pero quieres recibirlo, rellena el breve formulario cuyo enlace te facilitamos a continuación y pasarás a formar parte de nuestra lista **Amigos de ATI.**

<http://bit.ly/eboletinATI>

Código QR del enlace al boletín



* La esencia actual de ATI sigue siendo la misma que la originó, crear una red de profesionales que permita una mejora constante de la profesión informática, individual y colectivamente.