

# Las redes eléctricas inteligentes

Instituto  
de Investigación  
Tecnológica

Escuela Técnica Superior  
de Ingeniería (ICAI)

Universidad Pontificia  
Comillas

Energía y medio  
ambiente

22



## Guías técnicas de energía y medio ambiente

---

22. Las redes eléctricas inteligentes.

### **Autores**

---

Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), perteneciente a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas.

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquier otro, sin la autorización por escrito de la Fundación Gas Natural Fenosa.

### **Edita**

---

**Fundación Gas Natural Fenosa**

Plaça del Gas, 8

08201 Sabadell (Barcelona)

Teléfono: 93 402 59 00 Fax: 93 745 03 20

[www.fundaciongasnaturalfenosa.org](http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org)

1ª edición, 2011

ISBN: 978-84-614-6173-8

Impreso en España

# Índice

<b>Prólogo</b> de Pedro-A. Fábregas .....	7
<b>1. El sistema eléctrico español y sus limitaciones.</b> .....	11
1.1. El ciclo de la electricidad .....	11
1.1.1. Capa física y gestión técnica del sistema eléctrico. ....	14
1.1.2. Gestión económica del sistema eléctrico .....	17
1.1.3. Entorno regulatorio. ....	21
1.2. Breve descripción de las actividades del negocio eléctrico .....	22
1.2.1. La generación de energía eléctrica .....	22
1.2.2. La demanda de energía eléctrica .....	26
1.2.3. La red de transporte de energía eléctrica y su operación .....	28
1.2.4. Las redes de distribución de energía eléctrica .....	30
1.3. Las limitaciones del sistema y las razones del cambio: ¿por qué redes inteligentes? .....	32
Referencias. ....	35
<b>2. Las redes inteligentes.</b> .....	37
2.1. Conceptos y definiciones. ....	37
2.2. Factores del cambio .....	42
2.3. Tecnologías y componentes .....	46
2.4. Agentes involucrados .....	51
2.5. Beneficios esperados .....	53
2.6. Necesidades de regulación .....	57
Referencias. ....	59
Enlaces de interés .....	60
<b>3. La generación distribuida y la gestión activa de la demanda en las redes inteligentes</b> .....	61
3.1. La generación distribuida .....	62
3.1.1. Motivos de la aparición de generación distribuida .....	64

3.1.2. Tecnologías de generación distribuida . . . . .	65
3.1.3. La generación distribuida en España. . . . .	68
3.1.4. Impacto de la generación distribuida sobre la red de distribución. . . . .	69
3.1.5. El papel de la generación distribuida en las redes de distribución inteligentes . . . . .	73
3.2. La participación activa de la demanda . . . . .	75
3.2.1. Elementos necesarios para la participación activa de la demanda . . .	76
3.2.2. Beneficios de la gestión de la demanda . . . . .	80
3.2.3. Barreras al desarrollo de la gestión de la demanda. . . . .	81
3.2.4. La gestión de la demanda en España . . . . .	82
3.2.5. La gestión activa de la demanda y las redes inteligentes . . . . .	86
Referencias. . . . .	88

<b>4. La electrificación del transporte y su impacto en las redes. . . . .</b>	<b>91</b>
4.1. Los coches eléctricos . . . . .	92
4.2. Prospectiva . . . . .	98
4.3. Impacto en las redes . . . . .	99
4.4. Carga de las baterías y modos de control . . . . .	102
4.5. Agentes involucrados . . . . .	105
4.6. Fases de integración del vehículo eléctrico y modelos de negocio. . . . .	109
Referencias. . . . .	112

<b>5. La operación del sistema y la integración de las renovables. . . . .</b>	<b>115</b>
5.1. Hacia un modelo energético más sostenible. . . . .	116
5.2. Impacto de generación eléctrica con fuentes renovables. . . . .	119
5.3. Hacia una operación más flexible con redes inteligentes. . . . .	125
5.3.1. Nuevos equipos para las redes inteligentes . . . . .	125
5.3.2. Nuevos requisitos técnicos. . . . .	127
5.3.3. Herramientas de predicción . . . . .	128
5.3.4. Visibilidad y capacidad de control. . . . .	129
5.3.5. Flexibilidad en la operación . . . . .	132
Referencias. . . . .	134

<b>6. Las redes de distribución inteligentes y la calidad del servicio</b> .....	137
6.1. Arquitectura de las redes de distribución .....	138
6.2. La operación de las redes de distribución .....	140
6.3. La calidad del servicio y su medición .....	144
6.4. Las redes de distribución inteligentes .....	148
6.4.1. Nuevos agentes, arquitecturas y elementos de red .....	148
6.4.2. Operación de las redes de distribución inteligentes .....	152
6.5. La calidad del servicio y las redes de distribución inteligentes .....	155
Referencias .....	159
<b>7. Aspectos económicos y regulatorios</b> .....	161
7.1. Implicaciones económicas de las redes inteligentes .....	162
7.2. Estudios de costes y beneficios .....	165
7.3. Aspectos regulatorios .....	169
7.3.1. Regulación de los distribuidores .....	171
7.3.2. Regulación del acceso y conexión de los generadores distribuidos ..	173
7.3.3. Regulación de la conexión y gestión de carga de los vehículos eléctricos .....	174
7.3.4. Implantación progresiva de los medidores inteligentes .....	175
7.3.5. Promoción de la respuesta de la demanda a señales de precio .....	177
7.3.6. Regulación para la integración de renovables en la operación del sistema .....	178
7.3.7. Estándares y normativas para comunicaciones e integración de arquitecturas .....	179
Referencias .....	180
<b>8. El camino hacia las redes inteligentes</b> .....	183
8.1. Pasos hacia la implantación de las redes inteligentes .....	184
8.2. La necesidad de proyectos de demostración a gran escala .....	191
8.3. Proyectos de demostración en marcha .....	196
8.3.1. Experiencias en EE.UU. ....	196
8.3.2. Experiencias en Europa .....	199
8.3.3. Experiencias en España .....	203
Referencias .....	207
<b>Glosario</b> .....	209



# Prólogo

Cuando la electricidad empezó a aparecer en las ciudades, a finales del siglo XIX, su producción se realizaba con pequeñas centrales, aún denominadas fábricas, donde se producía la electricidad para un barrio o una fábrica individual, a partir de carbón o de motores de gas. Con el tiempo, el aumento de requerimientos y el avance de la tecnología permitieron resolver primero el problema del transporte de la energía, es decir, conseguir transportar la electricidad a larga distancia sin unas pérdidas muy relevantes, con líneas de hasta 135.000 voltios en la década de 1910, y posteriormente iniciar el desarrollo de centrales hidráulicas que con la visión de aquellos momentos permitían una capacidad de producción prácticamente ilimitada, a un coste reducido, acercando la energía desde las montañas a las ciudades, aprovechando las grandes economías de escala que se conseguían por la magnitud de las instalaciones.

Con el tiempo los saltos de agua alcanzaron sus límites y las grandes necesidades de energía eléctrica que se fueron generando se fueron cubriendo con centrales térmicas: convencionales o nucleares, y más modernamente con centrales de ciclo combinado. En cualquier caso grandes instalaciones donde se conseguía optimizar la inversión, el coste del combustible, o los gastos de operación y mantenimiento, tanto por las sinergias conseguidas con grandes instalaciones, y la facilidad de su ubicación, como por las mejoras tecnológicas en los sistemas de transporte.

Las redes de distribución acercaban la electricidad al cliente que tenía a su disposición permanentemente la posibilidad de consumir energía de acuerdo con sus necesidades o requerimientos.

Pero este modelo estable durante bastantes años, ha ido evolucionando primero con la aparición de la cogeneración, es decir, la generación de electricidad y calor por el cliente final o cerca del cliente final de una forma distribuida. Posteriormente con la aparición y la difusión de energías renovables del tipo de la eólica o la solar, que generan electricidad sobre el territorio en muchos casos alejadas del consumidor final, y a la vez con funcionamiento intermitente por su propia configuración.

En definitiva, han empezado a aparecer puntos de generación distribuida que no es que tan solo reduzcan la demanda a la red, sino que deben ser administrados desde la red, y además, puntos en la red que puede ser que demanden o aporten energía ciertamente de forma intermitente, en un vector energético, la electricidad, que es muy difícil de almacenar, pero que necesita un equilibrio instantáneo y permanente de oferta y demanda, sobre un sistema de una dimensión tal que configura una de las máquinas de mayor dimensión jamás construidas.

Por otra parte, la progresiva tendencia a la introducción del vehículo eléctrico abre un nuevo horizonte de complejidad al sistema, puesto que en el momento que exista gran cantidad de vehículos eléctricos, si todos ellos deciden conectarse simultáneamente a la red buscando la recarga de sus baterías, pueden producir un grave problema difícil de administrar. Sin embargo, si se consigue una recarga programada puede ser un interesante elemento de compensar puntas y valles en la curva de demanda. Y si adicionalmente, el sistema pudiese decidir en qué momento se realiza la carga de las baterías, y además, también puede decidir y es factible tecnológicamente, aprovechar puntualmente la energía acumulada en las baterías, evidentemente la flexibilidad del sistema puede aumentar de forma claramente interesante.

La complejidad del sistema evidentemente también aumenta si pensamos en transferir el modelo de cliente de las telecomunicaciones al cliente de electricidad, es decir, que cada cliente pueda decidir si produce o consume energía, o si limita su consumo en según qué momentos en función de estímulos regulatorios o de tarifa, o los aparatos domésticos como lavadoras, frigoríficos, calefacciones o vehículos eléctricos, progresivamente inteligentes puedan adaptarse ellos solos a la optimización económica del uso de la electricidad.

Por tanto, debe avanzarse en la concepción y diseño de una evolución del sistema eléctrico que permita administrar una generación descentralizada, con aportaciones de demanda u oferta al sistema desde el consumidor final, mejorando a la vez la curva de carga diaria y estacional del sistema, mejorando la eficiencia energética global y, por ende, el impacto en el medio ambiente, y a la vez avanzando claramente en la calidad del servicio eléctrico ofrecida al consumidor final.

Para todo esto han de servir las redes eléctricas inteligentes, pero ¿cómo podemos avanzar en esta dirección? La respuesta conceptualmente es sencilla, aplicando en profundidad y de



forma masiva, elementos de la tecnología de la información y las comunicaciones, las conocidas como TIC's, a las redes eléctricas, existentes y nuevas.

Sin embargo, no es tan sencillo; hacen falta avances en ámbitos estrictamente tecnológicos, pero también en los contextos regulatorios, definiendo cómo deben relacionarse todos los agentes del sistema y, evidentemente, deben resolverse las problemáticas necesarias desde la perspectiva económica o financiera, cómo subvenir a las importantes inversiones necesarias, con qué equilibrios y con qué reparto de riesgos. Y como último, pero no menos importante, debe verse cómo se consigue involucrar al ciudadano en este nuevo horizonte de calidad y posibilidades de nuevos servicios y dinámicas.

Para el futuro quedan, supuestos ya resueltos todos los elementos enunciados, la configuración de las ciudades inteligentes que deberían aprovecharse de muchas de las creaciones desarrolladas para las redes inteligentes en un próximo futuro.

En un sector energético en transición los elementos enunciados son de gran importancia, son los caminos del futuro, pero no debe olvidarse que en estos momentos (2010) España, dispone de 105 GW de potencia instalada, mientras la demanda anual de energía es de 276.000 GWh, es decir, tiene una utilización media anual del 30%, y en hora punta la demanda asciende a 44 GWh con una utilización del 42%. En definitiva, tiene un exceso de potencia instalada y por otra parte en los últimos años ha generado un déficit de tarifa que supera los 25.000 millones de euros.

Por tanto, debe arbitrarse una dinámica equilibrada que permita integrar las nuevas posibilidades tecnológicas de gestión eficaz de elementos descentralizados con funcionamientos bidireccionales, pero atendiendo a los costes y a la utilización de las instalaciones para que el nuevo proceso de deseconomías de escala económicas no alteren los equilibrios necesarios de futuro.

Para el desarrollo de este trabajo hemos tenido la suerte de disponer de reconocidos expertos en la materia del Instituto de Investigación Tecnológica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas, como son Tomás Gómez San Román, Pablo Frías Marín y Rafael Cossent Arín. Realmente ha sido un placer trabajar con ellos, tanto por sus evidentes conocimientos científicos como por sus indudables calidades humanas, consiguiendo un resultado de un gran nivel, y una evolución del trabajo de investigación claramente armónico con los programas establecidos.

Esperamos que la publicación de este libro estimule el conocimiento y la observación de qué son y qué pueden aportar las redes eléctricas inteligentes a los requerimientos de futuro del mundo en los inicios del siglo XXI, permitiendo avanzar en el nivel de desarrollo y competitividad en un contexto cada vez más global.

**Pedro-A. Fábregas**  
Director General  
Fundación Gas Natural Fenosa