

RESPUESTA DE LA DEMANDA

Experiencias internacionales y
perspectivas para su integración
en el **mercado eléctrico colombiano**

Russby Liliana Castañeda Hernández | Geovanny Alberto Marulanda García
Guillermo Andrés Díaz Flórez | Diego Fernando Echeverry | John Alexander Zapata Gaitán



Programa  Editorial

Los beneficios técnicos y económicos de la implementación de programas de respuesta de la demanda (RD) en los mercados eléctricos han sido ampliamente documentados y estudiados en la literatura. A pesar de esto, son pocos los trabajos que realizan un análisis comparativo de estos programas desde una perspectiva holística de la RD, esto es, considerando el marco político y estructural de los mercados en los que se han implementado. En este libro se analizan distintas alternativas de inclusión de programas de RD en el sistema eléctrico colombiano partiendo de las experiencias de dos mercados distintos: el mercado de Gran Bretaña y el PJM.

Para esto, los autores presentan inicialmente una descripción general de los principales programas de RD y tecnologías que habilitan su implementación en los sistemas eléctricos. Posteriormente, elaboran una caracterización detallada de los tres mercados, reconociendo similitudes y diferencias asociadas a la política, las instituciones, los agentes, la estructura de mercado, el marco regulatorio y el proceso de formación de tarifas. El análisis propuesto por los autores indica que la similitud del mecanismo para la asignación de los compromisos de largo plazo en los tres mercados permitiría replicar en Colombia algunas de las estrategias de RD adoptadas en los mercados de Gran Bretaña y PJM. Finalmente, los autores exploran las dificultades que podría tener actualmente el mercado eléctrico colombiano para incorporar la RD en los mecanismos de corto plazo.



Universidad
del Valle

Programa  Editorial

RESPUESTA DE LA DEMANDA

**Experiencias internacionales y
perspectivas para su integración
en el mercado eléctrico colombiano**



Colección Ingeniería

Castañeda Hernández, Russby Liliana

Respuesta de la demanda: Experiencias internacionales y perspectivas para su integración en el mercado eléctrico colombiano / Russby Liliana Castañeda Hernández, Geovanny Alberto Marulanda García [y otros tres]
Cali : Universidad del Valle - Programa Editorial, 2023.
208 páginas ; 17 x 24 cm. -- (Colección: Ciencias de la Administración)

1. Demanda de energía eléctrica -- 2. Respuesta a la demanda -- 3. Mercado de energía eléctrica -- 4. Sector eléctrico colombiano

333.79 CDD. 22 ed.

C346

Universidad del Valle - Biblioteca Mario Carvajal

Universidad del Valle

Programa Editorial

Título: Respuesta de la demanda: Experiencias internacionales y perspectivas para su integración en el mercado eléctrico colombiano

Autores: Russby Liliana Castañeda Hernández, Geovanny Alberto Marulanda García, Guillermo Andrés Díaz Flórez, Diego Fernando Echeverry, John Alexander Zapata Gaitán

ISBN: 978-628-7683-29-7

ISBN-PDF: 978-628-7683-28-0

ISBN-EPUB: 978-628-7683-36-5

DOI: 10.25100/peu.7683297

Colección: Ingeniería

Primera edición

© Universidad del Valle

© Autores

Diseño y diagramación: Hugo H. Ordóñez Nievas

Corrección de estilo: Luz Stella Grisales Herrera

Esta publicación fue sometida al proceso de evaluación de pares externos para garantizar altos estándares académicos.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad del Valle, ni genera responsabilidad frente a terceros. Los autores son los responsables del respeto a los derechos de autor y del material contenido en la publicación, razón por la cual la universidad no puede asumir ninguna responsabilidad en caso de omisiones o errores.

Prohibida la reproducción total o parcial en cualquier forma, o por cualquier medio, sin autorización escrita de la Universidad del Valle.

Cali, Colombia, noviembre de 2023

RESPUESTA DE LA DEMANDA

Experiencias internacionales y perspectivas para su integración en el mercado eléctrico colombiano

Rusby Liliana Castañeda Hernández | Geovanny Alberto Marulanda García
Guillermo Andrés Díaz Flórez | Diego Fernando Echeverry | John Alexander Zapata Gaitán



Colección Ingeniería

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

9

CAPÍTULO 1

RESPUESTA DE LA DEMANDA

15

Estado del arte	18
Clasificación de los DRP	30
Estado de la técnica	36
Tecnologías habilitadoras de la DR.	40
Aspectos relevantes para el diseño de DRP.	45

CAPÍTULO 2

MERCADO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

EN COLOMBIA

53

Sinopsis	53
Marco institucional y regulatorio	54
Estructura del mercado.	58
Agentes del Mercado.	60
Generadores	61
Transportadores y distribuidores	63
Comercializadores	65
Consumidores	65
Mecanismos de mercado	66
Mercado organizado de largo plazo	67
Mercado de corto plazo-contratos bilaterales	69
Mercado Organizado Regulado (MOR)	71
Mercado Organizado de Corto Plazo-Bolsa de Energía	71

Formación de tarifas	80
Respuesta de la demanda.	91
Resumen	92

CAPÍTULO 3

MERCADO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN GRAN BRETAÑA

99

Sinopsis	99
Marco institucional y regulatorio	100
Estructura del mercado.	105
Mecanismos del mercado	113
Mecanismo de equilibrio y liquidación para control de frecuencia	123
Mecanismo de equilibrio y liquidación para seguridad del sistema	133
Resumen	143

CAPÍTULO 4

MERCADO DE ENERGÍA ELÉCTRICA PJM

147

Sinopsis	147
Marco institucional	148
Marco regulatorio	152
Estructura del mercado mayorista PJM	159
Mecanismos de mercado de PJM.	164
Formación del precio en el mercado PJM	174
Respuesta de la demanda.	181
Resumen	190

CAPÍTULO 5

SÍNTESIS Y RECOMENDACIONES PARA LA INTEGRACIÓN DE LA DR EN EL MERCADO ELÉCTRICO COLOMBIANO

193

Síntesis y discusión	193
--------------------------------	-----

INTRODUCCIÓN

La respuesta de la demanda (DR por sus iniciales en inglés) es una reducción o desplazamiento temporal del consumo de energía eléctrica basada en las instrucciones del operador del sistema de acuerdo con la señal de precios en tiempo real o con incentivos otorgados al usuario final. El sistema eléctrico está incorporando novedosos sistemas de información y comunicación, infraestructura de medición inteligente y recursos a partir de la generación distribuida (DER por sus iniciales en inglés). Estos factores posibilitan la participación activa del consumidor y en su orden la DR es considerada una solución más que viable para mejorar la confiabilidad de la red. La evolución de los mercados de energía eléctrica en procura de una mayor transparencia también incentiva y fortalece el accionar de los agentes y de los usuarios haciendo de la DR una herramienta clave para mejorar la eficiencia de los mercados.

El sistema de energía eléctrica se caracteriza por su alto grado de complejidad. El requerimiento esencial de la operación es mantener el equilibrio entre la generación y la carga en todo momento para que la frecuencia pueda regularse dentro de un rango aceptable. La variación significativa de la demanda de energía eléctrica (diaria, estacional, etc.) es una de las principales preocupaciones del operador del sistema. El modelo clásico de operación ha considerado la demanda relativamente inelástica, por lo tanto, la generación siempre debe adaptarse a los requerimientos del sistema. En este contexto, cuando la demanda está sobrepasando la generación base —por ejemplo, generación hidráulica— se conectan los recursos de la reserva —por ejemplo, generación térmica— para evitar desprendimientos de carga involuntarios. Usualmente la activación de los recursos de la reserva vincula un aumento vertiginoso del precio de la energía. En lugar de depender de los recursos de generación, una reducción

de la carga puede emular un aumento en la generación de tal manera que el efecto en la restauración del equilibrio es el mismo. La reducción intencional de la carga es consecuencia de una amplia gama de acciones que pueden realizar los consumidores, denominadas colectivamente DR.

En el ámbito económico, la participación pasiva de los usuarios finales reduce la injerencia en la fijación del precio. El desconocimiento del precio o la existencia de precios que no reflejan el costo del servicio de la electricidad dan como resultado una curva de demanda inelástica. Un principio que aplica a los mercados en general, incluido el de electricidad, es que la respuesta del consumidor al precio es esencial para obtener resultados de mercado eficientes y competitivos (reducción del pico de demanda y en consecuencia menor volatilidad del precio, entre otros) (Ventosa *et al.*, 2014). La comunicación bidireccional entre el operador del sistema (o la compañía de distribución-comercialización) y el usuario final permite conocer el nivel de consumo de energía eléctrica y su precio en tiempo real. Esta información con un esquema adecuado de incentivos induce cambios en el patrón de consumo de los usuarios finales, creando en definitiva la respuesta coherente del consumidor ante la variación de los precios.

La DR también es considerada la plataforma óptima para desplegar todo el potencial de la DER y de la microgeneración para proporcionar una completa gama de servicios a la red. La virtud esencial de la red inteligente (SG por sus iniciales en inglés) es su capacidad de transmitir electricidad en ambos sentidos. En el futuro se espera que el sistema eléctrico incorpore masivamente la DER, los dispositivos de almacenamiento y la energía producida por los consumidores a partir de aerogeneradores o placas solares fotovoltaicas instaladas en los tejados. La intermitencia, las incertidumbres operativas y los cambios en los patrones de consumo son algunos de los desafíos que enfrentarían las redes eléctricas modernas. Sumado a esto, los recursos de generación tradicionales, bien sea por costos económicos o costos ambientales, serán desplazados o retirados, luego es evidente que también existirían límites a lo que se pueda lograr por el lado de la oferta. Continuar con la tendencia tradicional de solo realizar inversiones costosas en ampliaciones de capacidad de generación para lograr un funcionamiento confiable y seguro de la red ya no será técnicamente factible ni económicamente alcanzable. En los últimos años,

organizaciones gubernamentales, académicas y los diversos sectores de la industria han enfocado sus esfuerzos en el desarrollo tecnológico y en el diseño de los mecanismos para hacer de la DR un amplio portafolio de servicios capaz de emular los recursos tradicionales de generación.

En Estados Unidos (EUA por sus iniciales en inglés) y Europa, muchos países tras implementar sistemas de información y comunicaciones en las redes de energía eléctrica, sistemas de administración de energía (EMS por sus iniciales en inglés) en las instalaciones del usuario final y la infraestructura de medición avanzada (AMI por sus siglas en inglés), desplegaron los programas de la respuesta de la demanda (DRP por sus iniciales en inglés) en los diferentes mecanismos de mercado (Paterakis *et al.*, 2017).

Los Estados miembros de la Unión Europea (UE) bajo el marco de la Directiva de Eficiencia Energética (*Energy Efficiency Directive 2012/27/ EU*, art. 15) garantizan a través de los operadores del sistema, eficiencia en el diseño y operación de la infraestructura, incluyendo la implementación de los DPR. La política energética de la UE considera los recursos de la DR como activo clave en el proceso de descarbonización del sistema y como herramienta fundamental para aprovechar la generación con bajo contenido de emisiones de CO₂. De manera similar, los mercados mayoristas de energía eléctrica de EUA atienden la Propuesta de Implementación del Plan de Acción Nacional sobre la DR proferida por el regulador federal y el Departamento de Energía. En particular, la organización de transmisión regional PJM considera los recursos de la DR como generación; posteriormente, son despachados en los diferentes mecanismos de mercado mayorista con la participación directa de los agregadores de DR. Esta herramienta ha sido efectiva para impulsar DRP.

En Colombia, la incorporación de una política o mecanismos que mitiguen los riesgos por insuficiencia de la capacidad instalada, vía gestión de la demanda, aún no es clara. La Resolución 063 de 2010 reguló el *anillo de seguridad del cargo por confiabilidad* denominado *demanda desconectable voluntariamente* que, aunque no define mecanismos explícitos para gestionar la DR, en esencia se acerca a un programa basado en incentivos. La Ley 1715 de 2014 relacionada con eficiencia energética (EE) y DR, reglamentada por el Decreto 2492 de 2014, ordena al ente regulador del mercado la inclusión de tarifas horarias o canasta de

tarifas, dentro del cargo que remunera la transmisión y distribución, así como mecanismos dentro de la fórmula tarifaria que garanticen la entrega de las señales horarias al usuario final para que puedan ofertar reducciones o desconexiones de demanda en el mercado mayorista.

Para hacer operativos los principios de la Ley 1715 de 2014, se requiere la modificación de la estructura tarifaria (Resolución 119 de 2007), pues actualmente no contempla mecanismos que incentiven la DR e impide el logro de propósitos mayores como el uso eficiente de la infraestructura eléctrica, la reducción de costos en la prestación del servicio, el aumento de la confiabilidad del sistema, así como el respaldo para las obligaciones de energía firme y reducción de la volatilidad de los precios en el mercado mayorista de energía eléctrica.

Tratar los recursos de la DR como generación requiere reglas de mercado complejas, tales como definir una línea base de consumo frente a la cual se pueda evaluar, y aún más difícil y controvertida es la definición del nivel correcto de remuneración. Para la implementación de los programas de la DR el Departamento de Energía y el regulador del mercado de EUA recomiendan realizar estudios de casos en cuyo alcance se involucre el diseño del programa, la legislación, la regulación, la respuesta del usuario y las lecciones aprendidas.

Como se ha mencionado, en Colombia no se tiene una estrategia definida para la incorporación de los recursos de la DR al mercado, por lo tanto, el propósito de esta investigación es identificar las estrategias implementadas en los mecanismos de mercado de Gran Bretaña y en el mercado PJM de EUA y, en su orden, analizar la viabilidad que tendrían en el contexto colombiano.

El capítulo 1 es especialmente importante porque familiariza al lector con los conceptos y elementos básicos y específicos que describen la DR en los mercados de electricidad y que sirven como punto de partida para gran parte del material tratado en este libro.

Los capítulos 2, 3 y 4 caracterizan de manera homogénea los mercados de electricidad de Colombia, Gran Bretaña y la región del PJM, respectivamente. De forma unánime, para cada mercado se establecen elementos a nivel de política, marco institucional y regulatorio, estructura y mecanismos de mercado, y formación de tarifas (para el caso de PJM, formación del precio). Adicionalmente, en los mercados de Gran

Bretaña y PJM se caracterizan las opciones de participación que ofrecen los programas de la DR en los diferentes mecanismos de mercado. En el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones.

REFERENCIAS

- Paterakis, N., Erdinç, O. y Catalão, J. (2017). An overview of Demand Response: Key-elements and international experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 871-891. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.167>
- Ventosa, M., Linares, P. y Perez-Arriaga, I. J. (2014). Power System Economics. En I. J. Pérez-Arriaga (ed.), *Regulation of the power sector* (pp. 47-123). London: Springer Science & Business Media. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5034-3_2

CAPÍTULO 1

RESPUESTA DE LA DEMANDA

Los sistemas de energía eléctrica tienen tres características importantes. En primer lugar, la oferta y la demanda de electricidad se deben mantener en equilibrio en tiempo real. En segundo lugar, las condiciones de la generación y los niveles de la demanda pueden cambiar significativamente en cuestión de segundos y de forma inesperada y los desajustes resultantes entre la oferta y la demanda ponen en peligro la confiabilidad de la red. En tercer lugar, el sistema eléctrico es altamente intensivo en capital, las inversiones en generación y transmisión tienen largos plazos de entrega y tiempos de vida económica de varias décadas (U.S. Department of Energy, 2006).

Estas características requieren que los sistemas eléctricos se planifiquen y gestionen con años de antelación para asegurar un funcionamiento fiable, a pesar de la existencia de diversas incertidumbres que envuelven las demandas futuras, las fuentes de combustible, la disponibilidad de activos y las condiciones de la red. Frente a estos desafíos la gestión de la demanda ofrece una variedad de beneficios financieros y operativos para el operador del sistema y los usuarios de electricidad.

En principio, la incorporación del concepto “gestión del lado de la demanda” o simplemente “gestión de la demanda” generó un cambio en la postura tradicional de planificación. Usualmente, el punto de partida para la planificación y expansión de los sistemas eléctricos se limitaba al pronóstico del crecimiento de la demanda, sin embargo, en las décadas recientes se amplió el campo de análisis con la inclusión de todas las actividades que tienen como objetivo la alteración del perfil de demanda, en tiempo y forma, para adecuarlo a la oferta (Gelazanskas y Gamage, 2014; U.S. Energy Information Administration, 2002). La gestión de la deman-

da también facilita la integración de la DER con la justa consecuencia de ahorros tanto en la generación como en la transmisión de energía. Toda la gestión que se realice desde el lado de la demanda tiene la capacidad de mitigar el riesgo de apagones y racionamientos e inducir reducciones en los costos operativos y disminución de las emisiones de CO₂. Actualmente, una de las principales estrategias para gestionar la demanda de energía eléctrica son las actividades denominadas colectivamente DR.

La DR se define como los cambios en el consumo de la electricidad por parte de los usuarios finales con respecto a sus patrones habituales en respuesta a las variaciones del precio o al pago de incentivos diseñados para inducir un menor consumo en momentos en que los precios en el mercado mayorista son elevados o cuando la confiabilidad del sistema está en riesgo (U.S. Department of Energy, 2006). En consecuencia, un DRP se define como un conjunto de normas pactadas entre usuarios y prestadores de servicio, que detallan la forma en que los usuarios gestionan su consumo y las empresas prestadoras de servicio se comprometen a remunerar dicha gestión (Marulanda, 2014).

Los DRP ofrecen a los consumidores de energía eléctrica la oportunidad de cambiar intencionalmente su carga en respuesta a las señales de precios o a los incentivos ofrecidos por las empresas comercializadoras, por consiguiente, el usuario está en capacidad de modificar el costo total de la electricidad que consume. El operador del sistema a través de los comercializadores y agregadores de recursos de DR utilizan las reducciones de demanda para gestionar la red, asegurando la confiabilidad del sistema y mitigando la volatilidad del precio. En el largo plazo, los recursos de la DR son un sustituto de la solución convencional que refiere la ampliación de la infraestructura de los sistemas de energía eléctrica.

La participación de los recursos de la demanda en los mercados mayoristas de electricidad depende de tres aspectos (Covino *et al.*, 2012).

- El precio de la electricidad: históricamente los usuarios han pagado una tarifa plana como resultado del promedio de los costos, aun cuando esta no brinda información sobre la variación del costo marginal del servicio de electricidad a lo largo del tiempo (por ejemplo, un día o un año). En temporadas de baja disponibilidad de fuentes primarias o cuando la curva de demanda se eleva, el precio de la electricidad puede ser muy alto, pero esto es

imperceptible para el usuario a través de la tarifa. En el escenario opuesto, cuando existe alta disponibilidad del recurso primario o cuando la demanda no es elevada el precio tiende a ser menor, pero el usuario tampoco percibe esta disminución, ya que su costo por consumo de electricidad corresponde a una tarifa plana.

- El valor de la electricidad para el usuario: la tarifa plana oculta los cambios del costo real del servicio de electricidad a lo largo del tiempo, por lo tanto, los usuarios no están en capacidad de evaluar el valor del uso de la electricidad en relación con el costo revelado en el mercado mayorista en tiempo real. Cuando el usuario conoce la dinámica del precio en tiempo real, puede modificar sus patrones de consumo de acuerdo con las señales de precios.
- El costo de equipos requeridos para participar en el mercado: la instalación de medidores inteligentes de energía, la evaluación de las instalaciones con capacidad de reducción de carga y la instalación de dispositivos de control, entre otros, pueden ser restrictivos, principalmente para los usuarios minoristas.

La DR propone una estructura de precios diferenciados (objetivo fundamental de los DRP), que actualmente están en vigor en muchos países y ganan relevancia con el despliegue de los dispositivos inteligentes para los procesos de medición, la incursión de las tecnologías para gestión y administración de la información en los sistemas eléctricos y los demás factores que asocia el concepto de la red inteligente. Con esto se ha creado un abanico de posibilidades que integran al usuario final como agente activo en el mercado, ofreciendo precios de venta de energía que reflejan los costos variables de la electricidad (Viqueira, 2001).

Este enfoque sugiere una serie de beneficios a nivel global tales como, reducción del pico de demanda, descongestión en el sistema de transmisión, aplazamiento de las inversiones para ampliar la capacidad instalada, entre otros. Los objetivos de la aplicación de la DR se resumen a continuación, según Vardakas *et al.* (2015)¹:

¹ Vardakas *et al.* (2015) presentan alrededor de 240 artículos de investigación clasificados según el tipo de DRP que abordan, el método de optimización y la función objetivo de optimización.

- Reducir el consumo total de energía en horario pico, de modo que se logre un beneficio mutuo para la empresa eléctrica y los consumidores.
- Reducir el costo total de generación, que es el resultado principal del objetivo antes mencionado. Bajo la implementación exitosa de un esquema de DR, se elimina la necesidad de activar plantas de energía costosas para satisfacer las demandas máximas.
- Modifica la curva de la demanda para que siga el suministro disponible (fuentes de energía renovable, la DER y la microgeneración), maximizando la confiabilidad del sistema y aprovechando los recursos de bajo costo.
- Reducción o incluso eliminación de sobrecargas en el sistema de distribución.

ESTADO DEL ARTE

Sumado a las políticas e informes de avance proferidas por gobiernos y entidades de diversos países, existe un amplio número de publicaciones científicas dedicadas al análisis de las condiciones políticas, económicas y tecnológicas que posibilitan el despliegue de los recursos de la DR en los mercados de electricidad. En esta sección se detalla un grupo reducido de artículos que abordan los siguientes tópicos: i) visión general de la DR, ii) análisis de la DR en el mercado de Reino Unido (UK por sus siglas en inglés) y Gran Bretaña, y PJM, iii) y análisis de estrategias de DR desde la perspectiva de un agente en particular.

Las publicaciones que ofrecen una visión general de la demanda usualmente presentan un marco teórico que incluye definiciones, clasificación de esquemas y programas, tipificación de beneficios y costos, métodos de evaluación y medición, y tecnologías habilitadoras. La Tabla 1.1 brinda una guía sobre los tópicos que abordan las publicaciones que se detallarán a continuación.

Tabla 1.1. Visión general de la DR

Referencia	Enfoque
Albadi y El-Saadany (2008)	Análisis de costos y beneficios de la DR para el consumidor y para el mercado.
Aghaei y Alizadeh (2013)	Análisis de los DRP implementados en diferentes escenarios a nivel global.
Siano (2014)	Análisis de los beneficios de acuerdo con la actividad de la cadena productiva donde se originan y discusión sobre tecnologías habilitadoras.
O'Connell <i>et al.</i> (2014)	Análisis de los supuestos incluidos en los modelos económicos y operativos para simular y evaluar la DR.
Shen <i>et al.</i> (2014)	Análisis de la política, la regulación, el mercado y la tecnología para una gestión óptima de la demanda de electricidad.
Good <i>et al.</i> (2017)	Clasificación discreta de las barreras y por consiguiente de los facilitadores para implementar la DR.
Deng <i>et al.</i> (2015)	Compilación y clasificación de publicaciones científicas para identificar modelos matemáticos, procesos de optimización y métodos de solución.
Vardakas <i>et al.</i> (2015)	Compilación y clasificación de publicaciones científicas para identificar casos de estudio aplicados en cada clase de esquema o tipo de programa de DR.
Bossmann y Eser (2016)	Compilación y clasificación de publicaciones científicas de acuerdo con propiedades temáticas, metodológicas, temporales, espaciales, tecnológicas y prácticas.

Albadi y El-Saadany presentan la clasificación de los DRP basada en incentivos y precios. El análisis de los beneficios desde la perspectiva de los participantes y el mercado, refleja que se pueden reducir los precios de la electricidad, mejorar la confiabilidad del sistema y reducir la volatilidad de los precios. El análisis de los costos muestra que tanto participantes como propietarios de los DRP incurren en costos iniciales de funcionamiento. Para la medición y evaluación de los DRP se estima la reducción de la carga máxima y la elasticidad de la demanda, respectivamente. El caso de estudio abordado demuestra el efecto de los DRP en situaciones de contingencia del sistema; los resultados sugieren una mayor eficiencia, al mantener la diferencia de precios entre periodos de alta y baja cargabilidad del sistema, tan pequeñas como sea posible (Albadi y El-Saadany, 2008).

Aghaei y Alizadeh (2013) realizaron un análisis de la actualización proferida por Federal Energy Regulatory Commission en cuanto a la definición y clasificación de los esquemas de la DR, la evaluación de los beneficios y los costos, y los métodos de medición y evaluación. Los DRP se abordan con referencia a la implementación lograda en diferentes escenarios, por ejemplo, los autores encuentran que en Estados Unidos los principales DRP representan el 79 % de la reducción total de la carga máxima; los programas de respuesta a emergencias, carga interrumpible y carga como recurso de capacidad son preferidos por usuarios industriales y comerciales mientras que los programas de control de carga directo suelen estar dirigidos a usuarios residenciales. En Noruega los estudios pilotos mostraron una disminución de 4,5 MW de la carga máxima de los usuarios finales comerciales y el ahorro de energía fue de alrededor del 15 %. En Italia los programas de carga interrumpible, aplicados a industrias muy grandes, representan el 6,5 % de la potencia máxima. El tamaño de la potencia de los programas de reducción varía de 1200 MW para programas en tiempo real (sin previo aviso) a 1750 MW para programas con preaviso. En España los DRP se centran en la industria bajo la modalidad de control de carga directa y carga interrumpible. En Beijing la implementación de los DRP y el despliegue de los dispositivos de almacenamiento condujo a una mejora significativa del factor de carga (Aghaei y Alizadeh, 2013).

Siano tipifica los beneficios potenciales que la DR ofrece en términos de si se acumulan directamente para los participantes o para todos los grupos de consumidores. Clasifica los beneficios que ofrece la DR de acuerdo con la actividad de la cadena productiva donde son originados. Las tecnologías y sistemas habilitadores, como medidores inteligentes, controladores de energía, sistemas de comunicación, se describen y discuten con referencia a proyectos de investigación, programas y pilotos de redes inteligentes y estudios de casos industriales, evidenciando su imperativa coexistencia para la implementación de programas avanzados de DR. Se concluye que la integración de dispositivos de almacenamiento, DER y fuentes de energía renovable en sitio, aportan flexibilidad al sistema, pero dada su complejidad exigen una gestión con tecnologías y métodos innovadores (Siano, 2014).

O'Connell *et al.* presentan una revisión crítica de la literatura para dar una visión general de los beneficios y desafíos de la DR. Los autores señalan los beneficios de la DR en la operación y planificación del sistema y en el ámbito económico, sin embargo, plantean una serie de inquietantes desafíos que captan mayor atención. En principio, en lo que concierne al modelado en el sistema eléctrico, si bien la DR es un recurso muy diverso y complejo que varía en función de múltiples factores externos, la escasa comprensión de su naturaleza —especialmente a nivel del sistema— conlleva a que la demanda de muchos sectores y aplicaciones diferentes se agregue bajo un único tipo de modelo, llegando a resultados poco realistas. En el ámbito económico los autores aducen que es evidente que la demanda no se ajusta al modelo convencional de racionalidad económica, luego la inclusión de supuestos, que van desde asumir una relación lineal fija entre el precio y la demanda para modelar la demanda sensible al precio, hasta la modelización de los recursos de la DR como un generador negativo único y centralizado, adoptando características y restricciones fijas nuevamente lleva a resultados simplistas. Otro aspecto que destacan los autores es la fiabilidad de la DR. La demanda se ve afectada por una serie de variables estocásticas, entre las que se encuentran las condiciones meteorológicas y la propia aleatoriedad del comportamiento de los usuarios finales, por consiguiente, la respuesta a los precios u otras señales de control es incierta. Una cuestión fundamental en relación con la interacción de la DR y el mercado de energía es quizás como debe fijarse el precio de la DR, teniendo en cuenta tanto la capacidad como los costos de operativos de la DR. Una vez más, la demanda no encaja en los modelos convencionales para calcular el costo marginal, ya que no hay un equivalente directo (O'Connell *et al.*, 2014).

Shen *et al.* (2014) proporcionan una descripción general de cómo la política, la regulación, la reforma del mercado eléctrico y el avance tecnológico en Estados Unidos y otros países ha posibilitado la implementación de los DR, convirtiéndolo en un recurso viable para abordar los desafíos energético-ambientales. Los autores brindan recomendaciones específicas respecto a las barreras regulatorias, de mercado y tecnológicas que deben ser eliminadas para desplegar el potencial de la DR, así como sistemas de información (o educación) para mejorar la recepción y apropiación por parte del consumidor.