

Trabajo de Fin de Master
Master en Sistemas de Energía Eléctrica

Estado del arte de la Gestión de la Energía Eléctrica
desde el lado de la Demanda

Autor: Vicente Mijail Matamoros Ojeda

Tutor: Esther Romero Ramos

Dpto. Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo de fin de master
Master en Sistemas de Energía Eléctrica

Estado del arte de la Gestión de la Energía Eléctrica desde el lado de la Demanda

Autor:

Vicente Mijail Matamoros Ojeda

Tutor:

Esther Romero Santos

Profesor titular

Dpto. Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2021

Proyecto Fin de Máster: Estado del arte de la Gestión de la Energía Eléctrica desde el lado de la Demanda

Autor: Vicente Mijail Matamoros Ojeda

Tutor: Esther Romero Santos

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

*A mis padres, las palabras no
bastan para expresar lo que el
sentimiento profesa.*

A David Duque Guillén.

Agradecimientos

Agradezco a la vida, que me ha dado tanto.

A mi familia, por manifestarme su amor e infinito apoyo.

A mis amigos, por brindarme sus risas y consejo.

A mis compañeros de maestría, en especial a Franco, Olivia, Rubén y Ulises, por su amistad y compañía.

A mi tutora de TFM, Esther Romero Santos, por guiarme y brindarme sus conocimientos.

A David, Eduardo, Koldo y Ramón, por hacerme sentir como en casa en tierra de extraños.

A Sevilla, porque sin dudas tiene un color especial.

A Claudia, Francesca, Marco, Rossella e Stacy, per avermi insegnato che l'amicizia non conosce paese né lingua. Grazie amici miei, grazie per essere la mia famiglia scelta.

El agotamiento de los recursos naturales y la dependencia a vectores energéticos importados ha generado varias crisis energéticas a lo largo de siglo XX, las cuales se han extendido a hasta nuestros días. Por otro lado, los efectos nocivos de los gases de efecto invernadero en el clima global han generado una crisis climática tal, que todos los países están comprometidos a mitigar. La comunidad internacional sugiere un cambio de enfoque en la explotación energética, ven necesario pasar del consumismo a la conservación. Es así como la gestión energética mundial inicia su innovación, conceptos como desarrollo sostenible, transformación digital o economía circular irrumpen en la escena de la prestación de servicios. Este nuevo paradigma ya no admite una gestión centralizada, sino una distribuida, y la gestión de la energía eléctrica desde el lado de la demanda engloba todos estos conceptos novedosos y los aplica en la explotación de la red eléctrica.

A pesar que la gestión de la demanda eléctrica (GDE) data desde 1975, su desarrollo e implantación en la estructura del sistema eléctrico empieza a tomar relevancia global en la segunda década de este siglo, esto a causa de la mejora de la infraestructura tecnológica disponible. La hipótesis general de la investigación radica en la idea de que la demanda se comporta de forma elástica a las variaciones de precio, y esto permite gestionarla. Por otro lado, con la finalidad de determinar el estado del arte de la GDE se realizó un barrido de información desde sus orígenes hasta la actualidad, esto permitió determinar los puntos de interés y a partir de estos, profundizar en el tema investigado.

Hasta inicios de este siglo, Estados Unidos era el principal consumidor de recursos energéticos, y el único que había desarrollado estrategias de GDE en la operación de su sistema eléctrico. Hoy por hoy, de sus experiencias se obtiene que los programas de conservación energética sirven para reducir la energía total consumida mientras que los programas de respuesta de la demanda sirven para reducir los picos de demanda. Además, mediante los dispositivos tecnológicos que necesita la GDE para operar, se puede integrar tecnologías que aportan a la flexibilidad de la demanda como la generación distribuida y el almacenamiento energético.

En la actualidad, la respuesta de la demanda (RD) se destaca de los otros programas de GDE debido a que tiene una amplia gama de oportunidades de negocio disponible. Además, el carácter dinámico de la demanda necesita una estrategia de control permanente la cual se dificulta sin un proceso automatizado. La comunidad científica se ha abocado al desarrollo de algoritmos que permitan la automatización de la respuesta de la demanda, en especial han tomado relevancia los algoritmos basados en inteligencia artificial ya que permiten la integración directa del cliente y del mercado.

En la actualidad, tanto Estados Unidos y China avanzan consistentemente en la implantación de programas de GDE. La Unión Europea, a pesar de ser el tercer mayor consumidor energético del mundo, y que el 67% de esos recursos energéticos provienen del extranjero, aún no ha consolidado una política clara sobre cómo implementar estos programas en la operación de sus redes eléctricas. Y es que la GDE no es solo una forma de reducirla o mejorar la eficiencia de la red, la GDE es un sofisticado proceso tecnológico que incluye un marco legal claro, financiamiento para modernizar la red e investigación que ahonde sobre las costumbres y preferencias del cliente, y cómo éstas inciden en su consumo energético.

The depletion of natural resources and dependence on imported energy carriers has generated several energy crises throughout the 20th century, which have extended to the present day. On the other hand, the harmful effects of greenhouse gases on the global climate have generated an environmental crisis that all countries are committed to mitigate. The international community suggests a change of approach in energy exploitation; they see the need to move from consumerism to conservation. This is how global energy management begins its innovation, concepts such as sustainable development, digital transformation or circular economy burst onto the scene of service provision. This new paradigm no longer allows for centralized but distributed management, and demand-side power management encompasses all these new concepts and applies them to the operation of the electricity grid.

Although demand side management (DSM) dates back to 1975, its development and implementation in the structure of the electricity system began to take on global relevance in the second decade of this century, due to the improvement of the available technological infrastructure. The general hypothesis of the research lies in the idea that demand behaves elastically to price variations, and this allows it to be managed. On the other hand, in order to determine the state of the art of DSM, a sweep of information was carried out from its origins to the present day, which made it possible to determine the points of interest and, based on these, to delve deeper into the topic under investigation.

Until the beginning of this century, the United States was the main consumer of energy resources and the only country that had developed strategies for DSM in the operation of its electricity system. Today, from its experiences, energy conservation programs serve to reduce the total energy consumed while demand response programs serve to reduce peak demand. In addition, through the technological devices that the DSM needs to operate, it is possible to integrate technologies that contribute to demand flexibility such as distributed generation and energy storage.

Currently, demand response (DR) stands out from other DSG programs because it has a wide range of business opportunities available. In addition, the dynamic nature of demand requires a permanent control strategy which is difficult without an automated process. The scientific community has focused on the development of algorithms that allow the automation of demand response; especially algorithms based on artificial intelligence have gained relevance as they allow direct integration of the customer and the market.

Currently, both the United States and China are making consistent progress in the implementation of DSM programs. The European Union, despite being the third largest energy consumer in the world, with 67% of its energy resources coming from abroad, has not yet consolidated a clear policy on how to implement these programs in the operation of its electricity grids. Because DSM is not just a way to reduce or improve grid efficiency, DSM is a sophisticated technological process that includes a clear legal framework, funding to modernize the grid, and research that delves into customer habits and preferences and how they affect their energy consumption.

Índice

Agradecimientos	viii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xii
Índice de Figuras	xv
Acrónimos	xvii
1 Introducción	19
1.1 <i>Antecedentes de la investigación</i>	20
1.2 <i>Justificación de la investigación</i>	22
1.3 <i>Hipótesis de la investigación</i>	23
1.4 <i>Objetivo de la investigación</i>	23
1.5 <i>Metodología de la investigación</i>	24
2 Fundamento Teórico	26
2.1 <i>Definición</i>	27
2.2 <i>Objetivo de la Gestión de la Demanda Eléctrica</i>	28
2.2.1 Reducción de picos de demanda	28
2.2.2 Rellenado de valles	29
2.2.3 Desplazamiento de carga	29
2.2.4 Conservación estratégica	29
2.2.5 Crecimiento estratégico de carga	29
2.2.6 Curvas de carga flexible	29
2.3 <i>Programas de la Gestión de la Demanda Eléctrica</i>	29
2.3.1 Programas de Conservación Energética	30
2.3.2 Programa de Sustitución del recurso energético primario	34
2.3.3 Programa de Respuesta de la Demanda	35
3 Modelo Conceptual	43
3.1 <i>Arquitectura de la GDE</i>	44
3.1.1 Los actores del Modelo	44
3.1.2 Las aplicaciones del Modelo	51
3.2 <i>El papel de las ESEE</i>	53
3.2.1 Conocer al cliente	54
3.2.2 Los perfiles de carga y la curva de carga objetivo	54

3.2.3	Tipos de cargas	55
3.2.4	Posibilidad de integración con tecnologías emergentes.	56
3.3	<i>El papel del mercado</i>	58
3.3.1	Los actores del Mercado Eléctrico	59
3.3.2	Las aplicaciones del Mercado Eléctrico en los programas de GDE	60
3.3.3	Participación de los clientes en el ME	61
3.3.4	El poder de mercado	61
3.4	<i>El papel de la red eléctrica</i>	62
3.5	<i>El papel del cliente</i>	62
3.5.1	Sicología del cliente	62
3.5.2	Clasificación de los clientes	63
4	Situación Actual	66
4.1	<i>Situación actual de la Conservación Energética</i>	67
4.2	<i>Situación Actual de la Sustitución del Recurso Energético Primario</i>	69
4.2.1	Irrupción de tecnologías energéticas emergentes	69
4.2.2	Los retos de los programas de SREP	70
4.2.3	Casos de aplicación de programas de SREP	71
4.3	<i>Situación Actual de la Respuesta de la demanda</i>	72
4.3.1	Sistema de control	73
4.3.2	Sistema de comunicación	79
4.3.3	Sistema de monitorización	80
4.4	<i>Beneficios de la GDE y su aporte en la agenda sostenible 2030</i>	82
4.4.1	Objetivo 3 sobre salud y bienestar	82
4.4.2	Objetivo 7 sobre energía asequible y no contaminante	82
4.4.3	Objetivo 8 sobre trabajo decente y crecimiento económico	82
4.4.4	Objetivo 9 sobre industria, innovación e infraestructura	83
4.4.5	Objetivo 10 sobre reducción de las desigualdades	83
4.4.6	Objetivo 11 sobre ciudades sostenibles	83
4.4.7	Objetivo 12 sobre producción y consumo responsable	83
5	Casos de aplicación	86
5.1	<i>Estados Unidos (USA)</i>	90
5.1.1	Situación energética actual	90
5.1.2	Política Energética en temas de Respuesta de la Demanda	92
5.1.3	Programas aplicados	93
5.1.4	Resultados	96
5.2	<i>China (CHN)</i>	100
5.2.1	Situación Energética Actual	100
5.2.2	Legislación en temas de GDE	101
5.2.3	Implantación de los programas	102
5.2.4	Resultados	103
5.3	<i>Unión Europea (UE)</i>	104
5.3.1	Situación Energética Actual	104
5.3.2	Política Energética en temas de GDE	105
5.3.3	Programas Aplicados	108
5.3.4	Resultados	109
6	Perspectivas a futuro	112
6.1	<i>La red eléctrica inteligente</i>	113
6.1.1	Componentes	113
6.1.2	Los agregadores de servicios	114
6.1.3	La Inteligencia Artificial en las REI	115
6.2	<i>Problemas y desafíos de la GDE</i>	116
a)	Fomentar la respuesta de la demanda basada en el precio	116
b)	Mejora de la respuesta de la demanda basada en incentivos	117

c) Reforzar el análisis y la valoración de la respuesta de la demanda	117
d) Adopción de tecnologías de apoyo	117
e) Integrar la respuesta de la demanda en la planificación de recursos	118
f) Instaurar un marco legal para la aplicación de los programas de GDE	118
g) Mercado eléctrico no liberalizado	118
7 Conclusiones y Recomendaciones	120
7.1 Conclusiones	120
7.2 Recomendaciones	121
Referencias	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.- Consumo energético mundial desde 1965 hasta 2019.	19
Figura 1-2.- Consumo de petróleo VS Generación de electricidad a nivel mundial.	20
Figura 1-3.- Consumo de petróleo en la década de los 70's.	21
Figura 1-4.- Energía generada por fuentes renovables desde 1990 hasta 2019.	22
Figura 2-1.- Curva de carga del sistema eléctrico nacional peninsular español.	26
Figura 2-2.- Generación de electricidad a nivel mundial VS Crecimiento poblacional.	27
Figura 2-3.- Métodos para modificar la forma de la curva de carga de la red.	28
Figura 2-4.- Programas de Gestión de la Demanda Eléctrica.	30
Figura 2-5.- Mejora esperada luego de aplicar programas de Conservación Energética.	30
Figura 2-6.- Categorización temporal de los programas de GDE.	31
Figura 2-7.- Campaña de reducción voluntaria de demanda, EcoWatt.	32
Figura 2-8.- Eficiencia de diferentes fuentes de iluminación.	33
Figura 2-9.- Funcionamiento del almacenamiento energético por aire líquido.	34
Figura 2-10.- Proceso de transición energética.	35
Figura 2-11.- Impacto de la respuesta de la demanda en la forma de la curva de carga.	36
Figura 2-12.- Programas de Respuesta de la Demanda basado en precios.	38
Figura 2-13.- Despacho del control de carga.	39
Figura 2-14.- Clasificación de los programas de la Gestión de la Demanda Eléctrica.	41
Figura 3-1.- Modelo conceptual de la GDE.	43
Figura 3-2.- Actores del modelo conceptual de la GDE.	45
Figura 3-3.- Ventajas de los sistemas de medición AMI.	47
Figura 3-4.- Arquitectura de un sistema de gestión de energía residencial.	48
Figura 3-5.- Ventajas y desventajas de las redes de comunicación por cable.	49
Figura 3-6.- Ventajas y desventajas de las redes inalámbricas.	50
Figura 3-7.- Perfil de carga de un refrigerador y un acondicionador de aire en un cliente residencial.	55
Figura 3-8.- Tipos de cargas eléctricas según la GDE.	55
Figura 3-9.- La GD en la red eléctrica.	56
Figura 3-10.- El almacenamiento energético en las redes eléctricas.	57
Figura 3-11.- Implementación de la RD en múltiples niveles del sistema eléctrico.	59
Figura 3-12.- Recomendaciones para implementar precios e incentivos en programas de GDE.	61
Figura 3-13.- Clasificación de los clientes por su tipo de demanda.	63
Figura 3-14.- Clasificación de los clientes por su comportamiento.	63
Figura 4-1.- Operación de la economía circular.	66
Figura 4-2.- Situación Actual de la GDE.	67
Figura 4-3.- Efecto de rebote energético en China.	68
Figura 4-4.- Pirámide energética.	69

Figura 4-5.- Apilamiento energético.	70
Figura 4-6.- Retos de los programas de Sustitución del Recurso Energético Primario.	71
Figura 4-7.- Interruptor de control de carga marca Eaton modelo LCR-6000.	73
Figura 4-8.- Termostato inteligente marca Emerson modelo Sensi ST55.	74
Figura 4-9.- Cantidad de publicaciones analizadas de acuerdo al año de su publicación.	75
Figura 4-10.- Objetivos de optimización a los modelos de RD analizados.	75
Figura 4-11.- Métodos utilizados para plantear el modelo óptimo de la RD.	76
Figura 4-11.- Modelos utilizados de acuerdo al nivel de aplicación de los programas de RD.	77
Figura 4-12.- Presencia de la GD y del AE en los algoritmos de RD.	78
Figura 4-13.- Logros obtenidos de la aplicación de los modelos analizados.	78
Figura 4-14.- Limitaciones obtenidas de la aplicación de los modelos analizados.	79
Figura 4-15.- Penetración de contadores por el tipo de tecnología.	80
Figura 2-16.- Beneficios de la GDE.	84
Figura 5-1.- Producción energética mundial desde 1990 hasta 2020.	86
Figura 5-2.- Consumo energético mundial desde 1990 hasta 2020.	87
Figura 5-3.- Diferencia entre Producción y Consumo energético mundial desde 1990 hasta 2020.	87
Figura 5-4.- Producción de electricidad a nivel mundial desde el año 1990 hasta el 2020.	88
Figura 5-5.- Consumo de electricidad a nivel mundial desde el año 1990 hasta el 2020.	88
Figura 5-6.- Diferencia entre Producción y Consumo de electricidad mundial desde 1990 hasta 2020.	89
Figura 5-7.- Evolución de la Intensidad Energética desde 1990 hasta 2020.	90
Figura 5-8.- Principales fuentes de energía en la producción de electricidad en USA.	91
Figura 5-9.- Carga horaria promedio durante un día típico por región.	92
Figura 5-10.- Ahorro energético y disminución del pico de demanda anual de los programas de CE.	96
Figura 5-11.- Clientes inscritos en programas de RD.	97
Figura 5-12.- Ahorro energético debido a los programas de RD.	98
Figura 5-13.- Ahorro del pico de demanda debido a los programas de RD.	98
Figura 5-14.- Ahorro energético mediante los programas de GDE.	99
Figura 5-15.- Disminución del pico de demanda mediante los programas de GDE.	99
Figura 5-16.- Generación de electricidad en China por tipo de recurso energético.	100
Figura 5-17.- Las cinco leyes energéticas que regulan el sector eléctrico en China.	101
Figura 5-18.- Resultados de la aplicación de programas RD en los mercados franceses.	110
Figura 6-1.- Grupos de enfoques de IA utilizados para la RD.	115
Figura 6-2.- Proporción de literatura revisada que utiliza técnicas de IA con fines de RD.	116

Acrónimos

GDE	Gestión de la energía desde el lado de la demanda (DSM)
DSM	Demand-Side Management (Gestión de la Demanda Eléctrica)
AE	Almacenamiento Energético
AMI	Advanced Metering Infrastructure (Infraestructura avanzada de medición)
AGC	Automatic Generation Control (Control automático de generación)
AMR	Automatic Metering Reading (Contador de lectura automática)
CDC	Control Directo de Carga
CE	Conservación Energética
CHN	China
CNDR	National Development and Reform Commission (Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma – Agencia gubernamental china)
DENA	Agencia Energética Alemana
DOE	Department of Energy (Departamento de Energía)
DSL	Digital Subscriber Line (Línea de suscriptor digital)
DSO	Distribution System Operator (Operador del Sistema de distribución)
EC	Economía Circular
EE	Eficiencia Energética
EM	Electromechanical meter (Contador electromecánico)
EMS	Energy Management System (Sistema de gestión de energía)
EPRI	Electric Power Research Institute
EPA	Energy Policy Act (Ley sobre política energética)
ESEE	Empresa de Servicios de Energía Eléctrica
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
FO	Fibra Óptica
GEI	Gases de efecto invernadero
GD	Generación distribuida
GLP	Gas Licuado de Petróleo
GRD	Generación renovable distribuida
HAN	Home Area Network (Red de área doméstica)
HEMS	Home Energy Management System (Sistema de gestión energética del hogar)
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning (Calefacción, Ventilación y Acondicionamiento de aire)
IA	Inteligencia Artificial
IE	Intensidad Energética
IEA	International Energy Agency
IED	Intelligent Electronic Device (Dispositivo Electrónico Inteligente)
IEEE	Institute of Electric and Electronic Engineers

IoT	Internet of Things (Internet de las cosas)
IS	Interrupción de Servicio
LP	Linear programming (Programación lineal)
ME	Mercado Eléctrico
MILP	Mixed Integer Linear programming (Programación lineal de entero mixto)
MINLP	Mixed Integer Non-Linear programming (Programación no lineal de entero mixto)
Mtoe	Millions of tonnes of oil equivalent (Millones de toneladas equivalentes de petróleo)
Mtce	Millions of tonnes of coal equivalent (Millones de toneladas equivalentes de carbón)
NAN	Neighbor Area Network (Red de área vecinal)
NLP	Non-Linear programming (Programación no lineal)
ODS	Objetivos de desarrollo sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PAR	Peak Average Ratio (Factor de cresta)
PIB	Producto Interno Bruto
RD	Respuesta de la Demanda
RDBP	Respuesta de la Demanda basada en Precios
RDBI	Respuesta de la Demanda basada en Incentivos
REI	Red Eléctrica Inteligente (Smart Grid)
SGE	Sistema de Gestión de Energía
SIE	Sistema de información energética
SREP	Sustitución del Recurso Energético Primario
TBI	Tarifa de bloque inclinado
TSO	Transport System Operator (Operador de la red de transporte)
TTC	Tarifación por tiempo crítico
TTR	Tarifación por tiempo real
TTU	Tarifación por tiempo de uso
UE	Unión Europea
UHF	Ultra High Frequency (Frecuencia Ultra Alta)
USA	United States of America (Estados Unidos)
V2G	Vehicle-2-Grid
VE	Vehículo eléctrico
VHF	Very High Frequency (Frecuencia muy alta)
VPP	Virtual Power Plant (Plantas de energía eléctrica virtuales)
WAN	Wide Area Network (Red de área amplia)
WI-FI	Wireless Fidelity (Fidelidad de señal inalámbrica)
USD	United States Dollars (Dólares estadounidenses)
ZEB	Zero Energy Building (Edificio de energía cero)

1 INTRODUCCIÓN

AMA KILLA, AMA LLULLA, AMA SHWA

(No ser ocioso, No mentir, No robar)

- Principios fundamentales de la cosmovisión de los pueblos ancestrales y nacionalidades indígenas -

Desde la sencillez de tallar piedras a lo elaborado de la orfebrería, desde las técnicas de pastoreo hasta la explotación hidrocarburífera, el ser humano no ha escatimado acciones en el aprovechamiento de todo recurso natural que estuviera a su paso. No obstante, y a pesar del desarrollo tecnológico en nuestros tiempos, la humanidad aún no ha comprendido el principio básico de conservación, se usan los recursos naturales como si estos fueran eternos y no hay nada más alejado de la verdad, ni el sol durará para siempre ¿Qué nos hace pensar que lo hará este planeta y sus recursos?

De acuerdo con [1], el actual desierto del Sahara era hace 10,000 años una “región de sabanas y praderas frondosas con algunos bosques... donde vivía una variedad de animales y plantas, sostenidos por lagos permanentes y grandes cantidades de lluvias”, pero el ritmo de consumo de recursos naturales desarrollado por el ser humano, tanto por la tala de árboles como por la implementación de técnicas de pastoreo, han llevado a dicha zona geográfica a la catástrofe ecológica que actualmente conocemos como el desierto más grande del planeta. Para hacernos una idea de su magnitud, dicho trecho continental tiene un área de 9.2 millones de [km²], es casi tan grande como China o Estados Unidos, y la versión sapiens-sapiens del homínido lleva rondando la tierra entre 200,000 y 300,000 años.

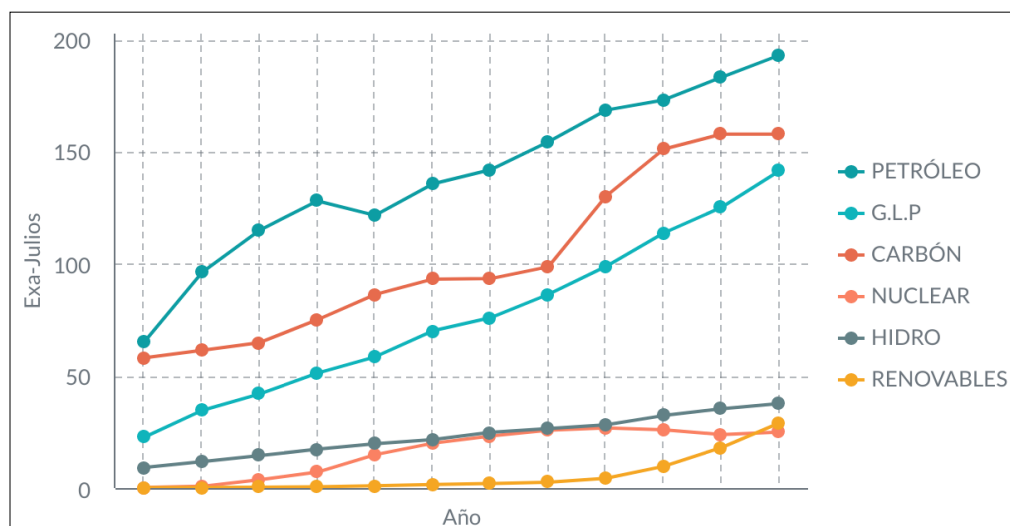


Figura 1-1.- Consumo energético mundial desde 1965 hasta 2019.

Con el paso del tiempo, el ser humano ha vinculado su propio desarrollo a la utilización de recursos energéticos, entre los principales recursos se pueden destacar:

- Los **recursos de origen fósil** como el petróleo, el gas natural y el carbón;
- los **recursos renovables** como el sol, el viento, el agua, las mareas, entre otras; y
- **Otros recursos naturales** como átomos de Uranio, cuya fisión libera grandes cantidades de energía

aprovechable.

En la figura 1-1 se muestra la evolución del consumo energético mundial de acuerdo al vector energético primario utilizado desde el año 1965 hasta el año 2019. En la gráfica se aprecia que el petróleo es el portador energético más utilizado, seguido por el carbón y el gas natural. La gráfica fue elaborada en base a los datos recolectados de [2].

La utilización del petróleo o sus derivados no es reciente. Se dice que las civilizaciones que se desarrollaron en la cuenca del río Tigris y Éufrates ya disfrutaban del uso del asfalto en el año 625 a.C. Al posicionarse el petróleo como vector energético primordial en el desarrollo industrial del siglo XX, los países que tenían acceso a él tenían garantizada la industrialización de sus procesos, que además podía brindarles réditos al comerciarla con países que carecían de ella. De acuerdo con [3], en el año 1973, los países árabes que conforman Oriente Medio generaron un gran alboroto mundial al manipular el mercado petrolero, gracias al poder de mercado que ejercían, causando profundas recesiones en los países industrializados al privar a las economías de su principal fuente de energía.

Por otro lado, desde finales del siglo XIX hasta la actualidad, la energía eléctrica se ha erigido como el principal artífice de la modernidad, su versatilidad y fácil manejo la han colocado como un servicio básico para el desarrollo de las sociedades actuales. De acuerdo con los datos de ENERDATA, en el año 2020 la diferencia entre producción y consumo de electricidad bordeó los 3,730 [TW-h], dicha cantidad representa el 13.86% de la producción total global, una cantidad comparable con el consumo de todo el continente europeo. Esto pone en evidencia la poca eficiencia de los métodos tradicionales de explotación del sistema eléctrico, por esta razón es urgente desarrollar nuevas y mejores alternativas que aprovechen la totalidad de la energía utilizada. En la figura 1-2 se compara el crecimiento del consumo de petróleo y de electricidad a nivel mundial desde el año de 1985 hasta el 2019, se puede apreciar que a pesar de haber empezado a ser explotadas en el mismo siglo, el petróleo ha sobrepasado al consumo eléctrico en casi tres veces. La gráfica fue elaborada en base a los datos recolectados de [2].

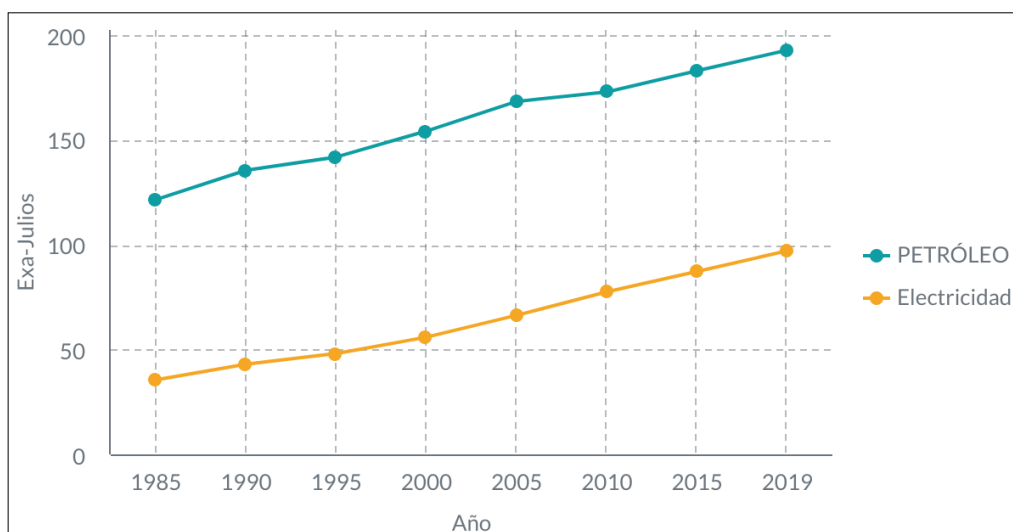


Figura 1-2.- Consumo de petróleo VS Generación de electricidad a nivel mundial.

Con los problemas ambientales, geopolíticos, de abastecimiento, entre otros; es primordial que los países analicen seriamente la agenda energética y elaboren planes sostenibles que introduzcan estrategias que reduzcan el consumo energético. Esto convierte a la Conservación Energética como una alternativa civilizada para **controlar y reducir** el consumo de los recursos energéticos que se destinan para la producción de electricidad. Estas prácticas de control y reducción han sido denominadas como Gestión de la Energía Eléctrica desde el lado de la Demanda o simplemente Gestión de la Demanda Eléctrica (GDE).

1.1 Antecedentes de la investigación

El origen de la Gestión de la Demanda Eléctrica data de finales de los años 70 en los Estados Unidos (USA) con la emisión de la PURPA (*Public Utility Regulatory Policies Act*), la cual estaba dentro de la *Energy Policy*

and Conservation Act [4]. En ella se establecen tres principios básicos a seguir con la finalidad de ahorrar el recurso energético:

- Aumentar el suministro y la disponibilidad de energía en el territorio nacional,
- Restringir la demanda de energía de los usuarios, y
- Prepararse para las emergencias energéticas.

Dicha ley surge para aplacar la falta de combustibles para la producción de electricidad y para el transporte, y por la recesión económica que sufría el país debido al embargo árabe de crudo del año 1973. Cabe recalcar que, y en contexto con la época, los países industrializados dependían absolutamente del petróleo y sus derivados, esta crisis en el suministro generó un atraso económico tal que a Estados Unidos le demoró más de una década en recuperar los niveles que hubiese tenido si no hubiera habido dicha crisis energética [5]. Este suceso de relevancia mundial mostró lo frágil del comportamiento de las economías industrializadas ante la falta de su combustible primordial, era el talón de Aquiles de aquel modelo económico basado en los recursos hidrocarbúricos como única fuente de energía primaria. En la figura 1-3 se muestra la evolución del consumo de petróleo en la década de los 70's y como la crisis afectó las economías industrializadas mientras que en los países menos industrializados la afectación fue casi mínima. La gráfica fue elaborada en base a los datos recolectados de [2].

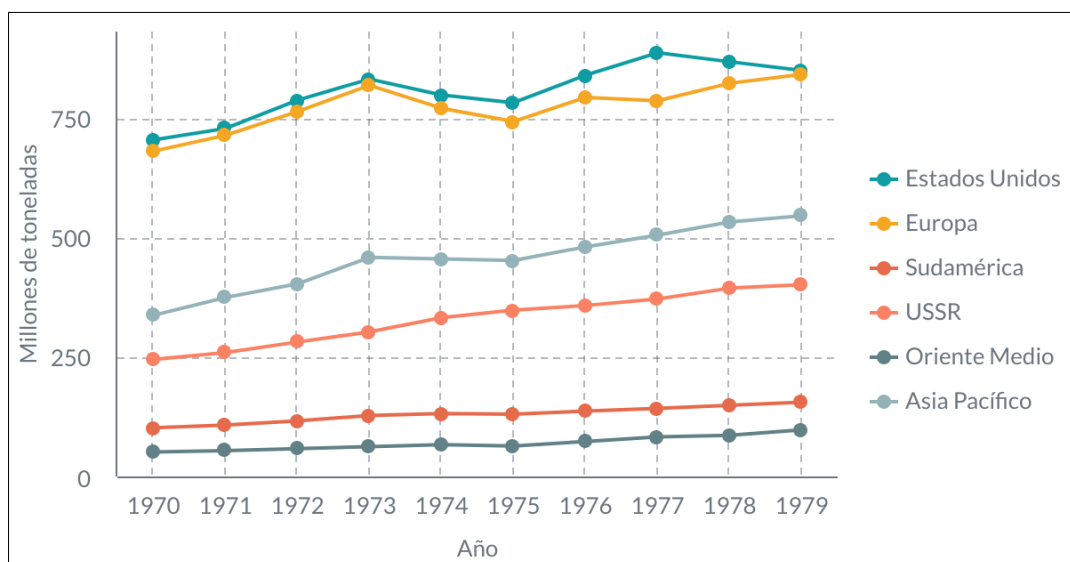


Figura 1-3.- Consumo de petróleo en la década de los 70's.

Otro pequeño paso al desarrollo de los programas de GDE se dio con la firma del Protocolo de Kioto de 1997 [6] y su posterior ratificación en el Tratado de París del año 2015, donde los países suscritos se comprometieron a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) progresivamente y así, doblar los efectos del calentamiento climático y su incidencia en el planeta. Entre los principales puntos de dicho tratado también se incluye a la conservación energética como herramienta para generar prácticas eficientes en la explotación de la red eléctrica. La generación de electricidad ha sido dominada por vectores energéticos de origen fósil, sin embargo, en la figura 1-4 se observa como la generación de energía por fuentes renovables se incrementa a raíz de la firma del Protocolo de Kioto. Además, se evidencia como mayoritariamente los países afectados por el embargo energético de los años 70's son los que mayoritariamente han apostado por la generación de energía renovable. La gráfica fue elaborada en base a los datos recolectados de [2].

Cuarenta y cinco años después, indudablemente la situación global ha cambiado, los países avanzan hacia la descarbonización de sus economías pero han surgido otros problemas urgentes que resolver como: la hiperurbanización, la industrialización, el ingreso de los vehículos eléctricos a la red, el uso de vectores energéticos contaminantes, la falta de acceso a electricidad, entre otros; los cuales ponen en evidencia la urgencia en desarrollar cambios en las políticas energéticas de los países.

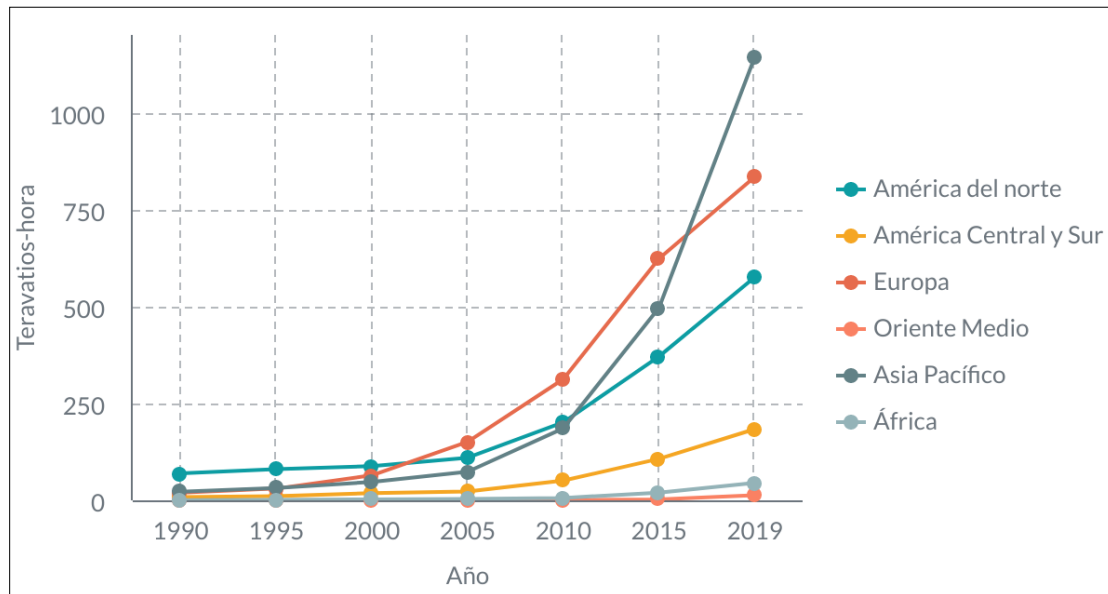


Figura 1-4.- Energía generada por fuentes renovables desde 1990 hasta 2019.

1.2 Justificación de la investigación

Es indudable la importancia de los recursos energéticos para el desarrollo de los pueblos, y es cierto que el crecimiento económico es directamente proporcional a la cantidad de recursos energéticos que se consume, lo discutible son las formas en las que estos son aprovechados y la forma en la que estos son adquiridos. De acuerdo con Juan Lema [7], Presidente de la Real Academia de las Ciencias de Galicia, la evidente correlación entre estas dos variables llega a un punto de inflexión donde estas nos siguen aumentando, por ello es necesario controlar el consumo energético en ciertas regiones porque este cae en lo superfluo.

En [8] se define a la **soberanía energética** como “El derecho de los individuos conscientes, las comunidades y los pueblos a tomar sus propias decisiones respecto a la generación, distribución y consumo de energía, de modo que estas sean apropiadas a las circunstancias ecológicas, sociales, económicas y culturales, siempre y cuando no afecten negativamente a terceros”. La paradoja radica en que el consumismo de recursos energéticos y la idea de soberanía energética no son mutuamente incluyentes. El consumo desmesurado de recursos lleva al agotamiento de los mismos, y cuando estos se acaben ¿Qué se va a utilizar? De acuerdo con [9], el 29 de julio del 2021 fue el día del sobregiro ecológico de la tierra, es decir que para este día se había consumido todos los recursos naturales que el planeta puede suministrar en un año, y lo sorprendente es que cada vez va ocurriendo más temprano. Un marco legal energético basado en conservación podría resultar útil para garantizar la soberanía energética de los pueblos.

La costumbre en la gestión de la energía eléctrica ha estado enfocada desde el lado del suministro, el cliente ha sido considerado como un mero observador que requiere energía eléctrica a su gusto y placer, y cuyo mercado obedece a modelos inelásticos de demanda. Pero si algo nos ha enseñado la historia es que los momentos de crisis sirven para generar cambios, la crisis energética del año 1973 nos enseñó que los clientes mostraban sensibilidad a la variación de los precios de la energía y que cuando el sistema eléctrico no se puede estirar operativamente siempre puede recurrir al cliente como una variable más que se puede gestionar para mantener los niveles de seguridad y confianza de la red. La demanda puede ser elástica, todo depende de la forma en cómo se presente el producto.

Es importante recordar que vivimos en comunidad y que estamos para ayudarnos, el triunfo de uno es la alegría de todos y el fracaso de uno es la condena de todos, y esto es algo que las culturas ancestrales latinoamericanas lo entendían a la perfección. Para las culturas andinas, el arte de vivir en comunidad, el convivir, ya que no puede existir una vida plena al margen de una comunidad pues en ella se materializan las diferentes formas de solidaridad y de respeto a la naturaleza, se denomina como *Sumak Kawsay*. Esta filosofía ancestral plantea una forma de vida en armonía con la naturaleza, “no es simplemente una forma de economía sostenible, sino que tiene un sentido más trascendente que enlaza con las creencias de los pueblos y

nacionalidades indígenas. Los pueblos indígenas entienden a la naturaleza desde una perspectiva holística, como un ente vivo que lo engloba todo, incluidos los seres humanos” [10].

La Gestión de la Demanda Eléctrica surge como una herramienta que, basada en los principios de Conservación, podría brindar soluciones a los problemas energéticos existentes y así consolidar un sistema eléctrico eficiente, moderno y soberano. Es necesario que desde todas las ramas del conocimiento se cree conciencia sobre el uso y abuso de los recursos naturales de nuestro planeta ya que no es cuestión de producir toda la energía que seamos capaces de consumir sino de consumir eficientemente para producir energía consumiendo lo mínimo de recursos energéticos.

1.3 Hipótesis de la investigación

La consigna máxima de la GDE es la reducción de la demanda eléctrica, para lo cual es necesario establecer las siguientes proposiciones:

- La demanda eléctrica es elástica.
- La demanda, analizada bajo el principio de superposición, es la suma total de cada una de las demandas individuales, por lo tanto una disminución en la demanda individual de un gran grupo de abonados se materializa como una gran reducción en la demanda total del sistema. Por otro lado, un aumento en la demanda individual de un gran grupo de abonados se materializa como un gran aumento en la demanda total del sistema.
- Actualmente disponemos de la tecnología para implementar este tipo de estrategias de gestión.

La hipótesis general de la investigación es la siguiente:

La electricidad se genera a partir de la utilización de diversos vectores energéticos, por lo tanto si se reduce la demanda eléctrica entonces se utiliza menos vectores energéticos implicados en dicha generación como: carbón, gas natural, petróleo, entre otros. Si se utiliza menos vectores energéticos para producción de electricidad entonces no se necesita o importarlos o producirlos o subsidiarlos, y los recursos que antes se destinaban para dichas tareas de adquisición y reposición quedan libres para ser invertidos en otras áreas. Se crea un ahorro. El ahorro generado puede ser utilizado de diversas formas: aumentar la tasa de electrificación, aplazar el incremento de infraestructura en la red eléctrica, desarrollar tecnología que potencie la reducción de la demanda, acceder a mejores vectores energéticos que sean más saludables, menos contaminantes y más eficientes; todo englobado en una estratégica planificación energética y un marco legal competitivo puede originar un fortalecimiento económico y esto a su vez, generar un incremento en el Producto Interno Bruto (PIB) de la Nación. Si el consumo energético disminuye y el PIB aumenta, entonces la intensidad energética se reduce. Por lo tanto, el sistema eléctrico se vuelve más eficiente, lo cual es justamente lo que plantea la GDE.

1.4 Objetivo de la investigación

Se plantean los siguientes objetivos, siendo el primero el objetivo principal del trabajo de investigación, y el resto objetivos secundarios del principal

- Determinar el avance en temas de Gestión de la Demanda Eléctrica hasta la fecha, haciendo especial énfasis en la Respuesta de la Demanda (RD) y su aporte a la eficiencia de los sistemas eléctricos.
 - Definir los conceptos que engloban la Gestión de la Demanda Eléctrica, sus programas y características.
 - Describir un modelo conceptual que englobe a los actores que intervienen en los programas de Gestión de la Demanda Eléctrica.
 - Describir la situación actual de los programas de Gestión de la Demanda Eléctrica, y el aporte del Almacenamiento Energético en los mismos.
 - Ejemplificar mediante casos reales la aplicación de los programas de Gestión de la Demanda

Eléctrica.

- Analizar el aporte de la Gestión de la Demanda Eléctrica en el desarrollo de las redes eléctricas inteligentes y de políticas energéticas basadas en la conservación.
- Definir y analizar el aporte de los planes de Gestión de la Demanda Eléctrica en los objetivos 2030 de la ONU sobre el desarrollo sostenible de los pueblos.

1.5 Metodología de la investigación

El estado del arte, del vocablo anglosajón *state-of-the-art*, se utiliza para referirse a las investigaciones técnicas o científicas donde el objetivo principal es determinar lo más innovador o reciente con respecto a un “arte” específico, en este caso se busca brindar una actualización de los últimos avances científicos con respecto a la Gestión de la Demanda Eléctrica. Para el desarrollo de la investigación se ha implementado la siguiente metodología la cual se ha basado en varios métodos de investigación como el histórico, exploratorio, explicativo, descriptivo y comparativo.

La investigación inicia bajo una metodología histórica que analiza las publicaciones científicas emitidas desde 1981 hasta la actualidad. Mediante este método se busca producir la historiografía del tema y así, establecer los acontecimientos inherentes a la trama de la forma más justa posible. Este método permite analizar objetivamente las fuentes y toda la evidencia recopilada, e interrelacionar hechos presentes con la finalidad de determinar patrones de repetición. Como fuente primaria de investigación se utilizó recursos bibliográficos científicos avalados universalmente, como el repositorio de la IEEE o el de *Elsevier*, de los cuales se seleccionaron un promedio de 5 publicaciones por lustro desde 1985 hasta el 2020. Como fuentes secundarias de investigación se utilizó reportes energéticos de organizaciones internacionales como IEA o EPRI, además de archivos oficiales de países y demás instituciones públicas y privadas.

La siguiente etapa de investigación se basa en el método exploratorio, el cual sirve para estudiar problemas que no están claramente definidos. Su objetivo es la comprensión del tema de una mejor forma pero sin proporcionar resultados concluyentes. Para el desarrollo de este trabajo se utilizan métodos basados en investigación bibliográfica y casos de estudio, de esta forma se selecciona la información más relevante obtenida del proceso anterior y se le brinda una trazabilidad desde el inicio hasta el fin.

La siguiente etapa de investigación se basa en el método explicativo, el cual se realiza con el objetivo de estudiar el problema con más profundidad y entender el tema de estudio de una forma eficiente. En esta etapa se busca determinar y especificar las relaciones existentes entre las diferentes variables que influyen en la GDE, de modo que se puedan poner en manifiesto las relaciones causa y efecto entre esas variables. Para el desarrollo de este trabajo se utilizan métodos de investigación de literatura y estudio de casos, de esta forma se profundiza en los temas relevantes y se determina los puntos de interés que se pretende exponer en la investigación.

La siguiente etapa de investigación se basa en el método comparativo, el cual se realiza con el objetivo de generar o refutar teorías a través de comparaciones basadas en procedimientos análogos a los del método científico, y usualmente utiliza datos estadísticos para calificar las comparaciones. En este caso las comparaciones no se realizan con la finalidad de refutar teorías sino de ejemplificar los usos reales de la GDE en las diferentes naciones, de tal forma que sirvan como refuerzos sobre las bondades de su aplicación.

La siguiente y última etapa de investigación se basa en el método descriptivo, el cual tiene el objetivo de describir las características fundamentales del objeto de estudio, utilizando criterios ordenados que permitan establecer la estructura de la investigación, proporcionando información sistemática y comparable con otras fuentes. En este caso de estudio, la información obtenida producto de la investigación se presenta en siete capítulos distribuidos de la siguiente forma: Introducción, Fundamento teórico, Modelo conceptual, Situación actual, Casos de Aplicación, Perspectivas a futuro y Conclusiones.

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

“Somos como la paja del páramo que se arranca y vuelve a crecer... y de paja de páramo sembraremos el mundo.”

- Dolores Cacuango, líder indígena ecuatoriana -

La forma en la que actualmente se explota la red eléctrica se desarrolla en función de satisfacer, a toda costa, la demanda eléctrica de los clientes; y son estos los que, con su diario actuar, dibujan las curvas de carga de los sistemas eléctricos. Cuando el usuario energiza eléctricamente un dispositivo desencadena una serie de procesos, sin saber, que le permiten el disfrute de la electricidad a su gusto y placer. El cliente desconoce que con este simple acto ha puesto en marcha la mayor obra de ingeniería que ha desarrollado el ser humano en función de servirlo.

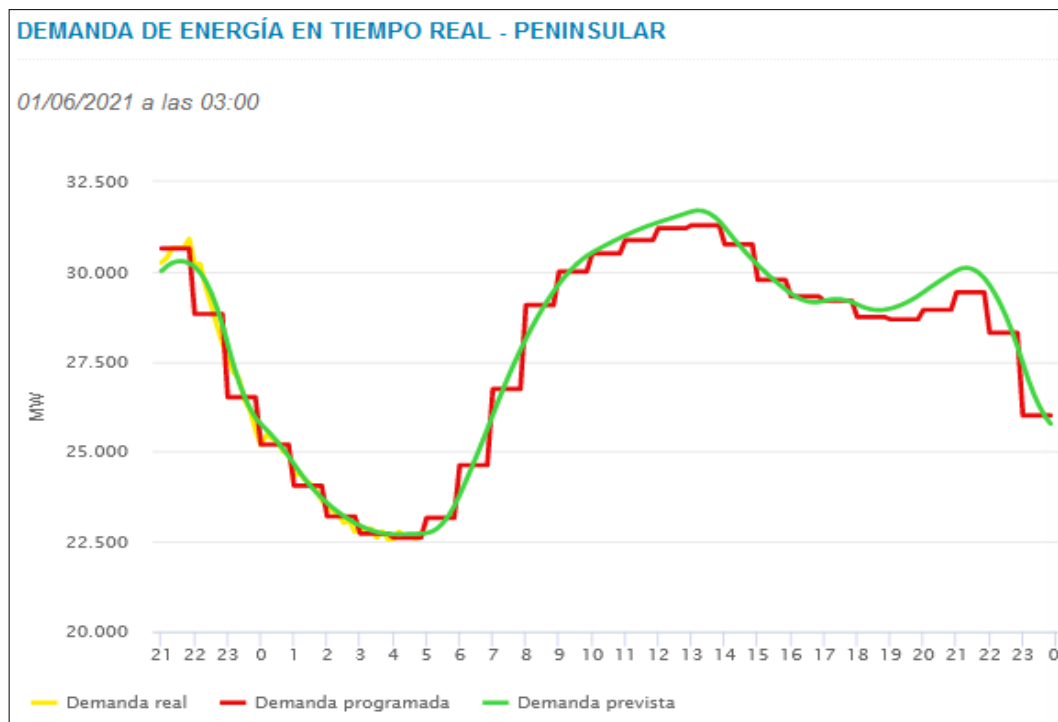


Figura 2-1.- Curva de carga del sistema eléctrico nacional peninsular español.

La demanda del cliente dibuja la forma de la curva de carga segundo a segundo, la cual evidencia la poca eficiencia con la que la red es explotada. Como ejemplo de esto en la figura 2-1 se puede ver la curva de carga del sistema eléctrico nacional peninsular de España del día 01 de junio del 2021. Es necesaria una gran infraestructura eléctrica que supla de energía en los picos de gran consumo que luego tiene que ser desconectada en los periodos de bajo consumo, existiendo una gran capacidad infrutilizada gran parte del año. A esto, se suma la creciente demanda de energía y la responsabilidad de las empresas de servicios de energía eléctrica (ESEE) por suplir dicha demanda de forma confiable y eficiente, lo que genera la necesidad de tomar acciones correctivas en función de evitar futuros colapsos en el sistema. En la figura 2-2 se puede observar cómo avanza el crecimiento de generación de energía eléctrica comparado con el crecimiento poblacional desde el año 1985 hasta el año 2019 a nivel mundial.

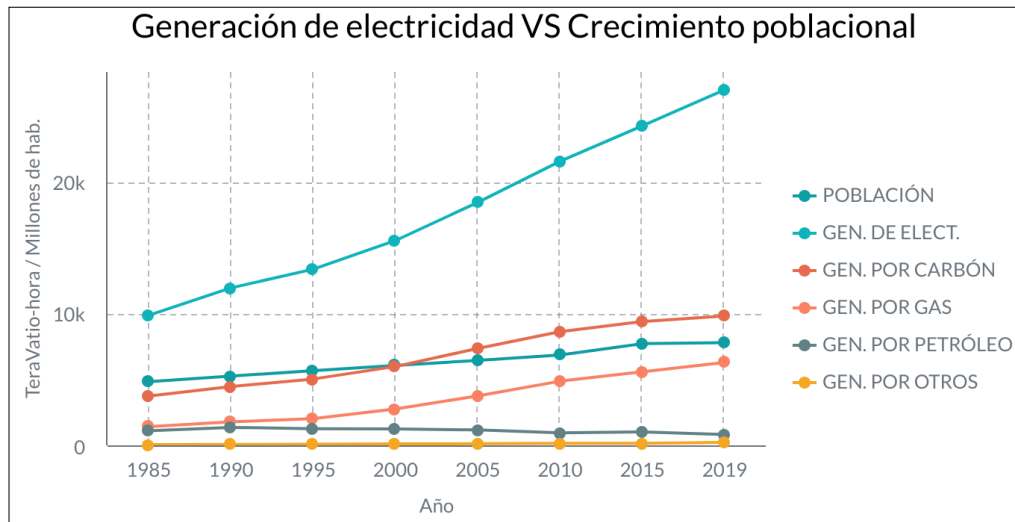


Figura 2-2.- Generación de electricidad a nivel mundial VS Crecimiento poblacional.

Las soluciones de aumento de red son la forma usual por la cual las ESEE buscan satisfacer la demanda a largo plazo, siendo esta una parte importante de la planificación de los sistemas eléctricos. Se determina mediante un análisis de contingencias realizado en los diferentes puntos de la red que muestran problemas, cuyos resultados indican si estos necesitan ser reforzados o no. Otra forma de resolver el problema es a través de soluciones que no implican el aumento de la red, tal como la instalación de proyectos de generación distribuida (GD), especialmente si se trata de fuentes de energía renovable (FER), o con la aplicación de estrategias de gestión de la energía eléctrica desde el lado de la demanda. Esta última aplicación toma especial relevancia debido a que, a priori, podría disminuir el consumo de energía eléctrica en el lado del cliente y esto, a gran escala, repercutiría en la planificación de la red eléctrica arrojando beneficios como:

- Aplazar el aumento de equipos y sistemas en la red.
- Impulsar el avance tecnológico en las redes de distribución.
- Mejorar el balance entre generación y consumo debido a la flexibilización de la demanda.
- Optimizar la eficiencia del sistema.
- Reducir las pérdidas en la red.

Cabe recalcar que el grado de efectividad de este método depende del grado de adaptación del cliente a los planes de gestión de la demanda [11].

La gestión de la demanda eléctrica (GDE) es una técnica que se ha venido implementando desde mediados de los años setenta [12] en algunas ESEE de Estados Unidos y ha permitido controlar de una mejor manera el balance entre generación y consumo. Sin embargo, es a inicios del nuevo siglo que la GDE ha tomado mucha fuerza debido a la mejora de las redes de comunicación y de los equipos electrónicos, permitiendo así que esta herramienta se convierta esencial en la senda hacia automatización de la red de distribución.

2.1 Definición

De acuerdo con [13], se señala que la GDE “son estrategias que permiten modificar la curva de carga con la finalidad de mitigar los efectos del creciente número de abonados en las redes eléctricas”. En [14] se señala que la GDE “son las actividades que permiten influir y el monitorear la forma en la que los clientes consumen energía eléctrica con la finalidad de evitar un refuerzo en la red”. En [15] se establece que la GDE “son las iniciativas y tecnologías diseñadas para optimizar el uso de energía e involucra programas o estrategias en eficiencia energética, conservación de la energía y en la gestión energética de forma eficaz”. Pero ¿Qué es la Gestión de la Demanda Eléctrica?

Basado en las definiciones antes descritas se puede definir a la GDE de la siguiente forma:

“Es la influencia deliberada de la empresa de servicios de energía eléctrica en los patrones de consumo del cliente con la finalidad de lograr una reducción en la demanda total de la red o una forma de curva de carga consistente con los objetivos de la ESEE”.

2.2 Objetivo de la Gestión de la Demanda Eléctrica

El objetivo de la GDE es mejorar la eficiencia del sistema eléctrico, y reducir las pérdidas a cero, a través de la reducción de la energía consumida por el usuario final. Para ello es necesario influenciar la demanda del cliente [16] de forma que esto se refleje en la forma de la curva de carga de la ESEE. De esta forma, la mejora de la eficiencia del sistema eléctrico se traslada a los dominios de la modificación de la forma de curva de carga del cliente, la cual puede ejecutarse a través de seis medios conocidos.

De acuerdo a lo indicado en [[11],[17], [18]], hay seis métodos por los cuales se puede lograr modificaciones en la forma de la curva de carga, estos son: Reducción de picos de demanda, rellenado de valles, desplazamiento de carga, conservación estratégica, crecimiento estratégico y curva de carga variable. En la figura 2-3 se muestran los métodos para modificar la forma de la curva de carga de la red, los cuales se describen a detalle a continuación:

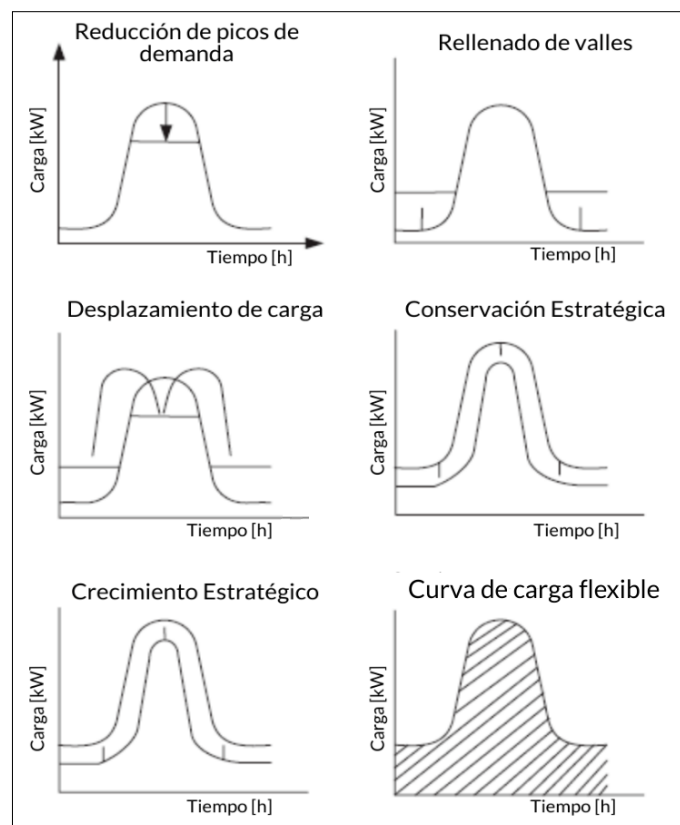


Figura 2-3.- Métodos para modificar la forma de la curva de carga de la red.

2.2.1 Reducción de picos de demanda

Originalmente descrito como *Peak Clipping*, son las actividades enfocadas a la reducción del pico de demanda, ya sea diario o estacional, en los periodos de máxima demanda. Este tipo de soluciones brinda flexibilidad a las ESEE que tienen problemas de capacidad y que en los periodos de máxima demanda ponen en riesgo la estabilidad del sistema. Entre las ventajas que presta este tipo de actividades en la red se puede citar que:

- Reducen el costo de producir energía eléctrica, ya que al disminuir el pico se margina las plantas con costos elevados

- Se pospone la necesidad de ampliar la capacidad de la red.

Esta reducción de pico de demanda requiere, para efectos observables en la curva de carga de la red, la participación de grandes consumidores o en su defecto, de un gran bloque de pequeños consumidores.

2.2.2 Rellenado de valles

Originalmente descrito como *Valley Filling*, son las actividades enfocadas a fomentar el consumo de los clientes en los periodos de bajo consumo, sin afectar el consumo en las horas pico. Este tipo de soluciones nacen con la intención de disminuir la rampa entre los periodos de mínimo y máximo consumo y así aumentar la eficiencia del sistema. La selección de un costo adecuado en periodos valle puede ayudar a reducir el precio promedio de la electricidad para el cliente y así, proveer de beneficios monetarios y/o de capacidad operativa a la ESEE. Este crecimiento del valle de demanda requiere que los clientes o sus automatismos realicen las actividades de conexión y desconexión de los equipos en los horarios establecidos, siendo estos horarios usualmente entre las 00:00 y las 06:00.

2.2.3 Desplazamiento de carga

Originalmente descrito como *Load Shifting*, son las actividades enfocadas a trasladar la carga desde los periodos de máximo consumo a los de mínima demanda sin que haya ningún cambio en el consumo total de energía. Básicamente produce el efecto combinado del método de reducción de los picos de demanda con el relleno de valles, y puede ser implementado mediante cambios en las pautas de funcionamiento de clientes industriales o mediante el uso de opciones de almacenamiento. El desplazamiento de la carga ocurre usualmente en un periodo de 24 horas. Cabe recalcar que no es necesaria que la totalidad de la energía usada por el cliente sea afectada por este tipo de estrategia. Se usa primordialmente cuando la ESEE tiene dificultades en su capacidad en horas pico y la carga del cliente puede ser fácilmente desplazable en el día.

2.2.4 Conservación estratégica

Originalmente descrito como *Strategic Conservation*, son las actividades enfocadas a reducir el consumo energético de uso final, a menudo a través de una mejora en la eficiencia energética del sistema. Mediante este método se puede obtener una disminución tanto de la demanda máxima como del consumo total de energía. Además, las medidas implementadas en conservación energética se consideran como cambios permanentes en el tiempo ya sean estos aplicados en los equipos o mejoras en las propiedades físicas de los sistemas.

2.2.5 Crecimiento estratégico de carga

Originalmente descrito como *Strategic Load Growth*, son las actividades enfocadas a incrementar la demanda debido a un exceso de capacidad de generación o cuando se han desarrollado planes para sustituir el recurso de energía primaria por electricidad. Este tipo de aplicaciones reducen el costo promedio de servicio al repartir el coste fijo entre una amplia base de ventas de energía, lo que beneficia a todos los consumidores.

2.2.6 Curvas de carga flexible

Originalmente descritas como *Flexible Load Shape*, son las actividades enfocadas a adaptar la demanda del cliente de acuerdo a la disponibilidad de energía eléctrica o a la estabilidad de la red en ese momento. Para este tipo de servicio se han desarrollado servicios por suscripción de demanda y la tarifación de servicio prioritario.

2.3 Programas de la Gestión de la Demanda Eléctrica

Con los medios ya establecidos para la modificación de la curva de carga, se podría elaborar diversas estrategias para lograr esta reducción siempre y cuando se llegue al objetivo deseado. Cada usuario es diferente, por lo tanto las estrategias a implementar no necesariamente van a ser recibidas de igual forma por todos los clientes; estrategias para países con climas fríos no serán las mismas que para países con climas

mucho más cálidos. Con el objeto de guiar a las ESEE, el EPRI formuló en el año 1992 una serie de guías y recomendaciones que establecen varias estrategias estándar para modificar de la curva de carga. A estas estrategias con el pasar de los años se las denominó como **programas de la GDE**. Estos programas no son normativos, son una receta para la creación de estrategias por parte de cada una de las ESEE de acuerdo a sus necesidades, pero sobretodo de acuerdo a las necesidades de sus clientes. Todos estos programas se circunscriben dentro del concepto de Conservación Energética, pues cada programa busca reducir u optimizar la demanda y el uso de la energía.

Usualmente se clasifica a los programas en dos tipos de categorías: “Programas de conservación energética” y “Programas de respuesta de la demanda”, si bien se ha optado por incluir un tercer programa adicional que ha sido considerado en el glosario del EPRI [19] del año 1992 sobre *Demand-Side Management* (DSM). En dicho documento se incluye el “programa de sustitución del recurso energético primario”, el cual toma especial relevancia en la actualidad debido a la inminente irrupción de los vehículos eléctricos enchufables, y además debido a que cumple con el objetivo de crecimiento estratégico de carga indicado en el apartado 2.2. En la figura 2-4 se muestra la clasificación de los programas de GDE de acuerdo a lo investigado.

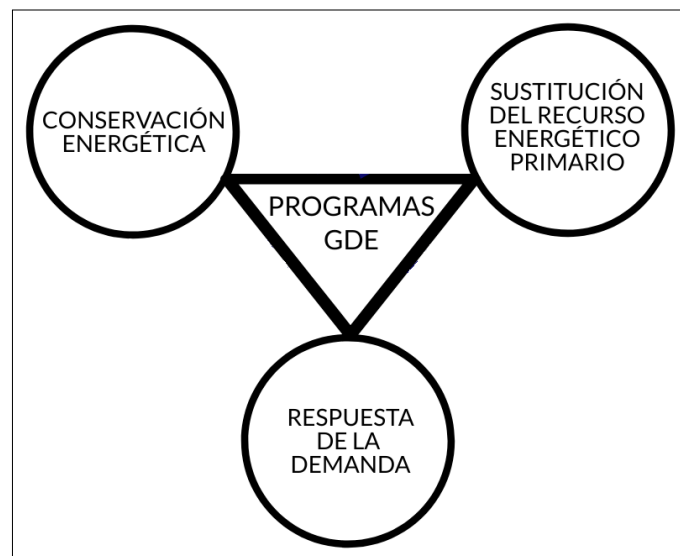


Figura 2-4.- Programas de Gestión de la Demanda Eléctrica.

2.3.1 Programas de Conservación Energética

Los programas de Conservación Energética (CE) son el corazón de la GDE, y se podría decir que todos los programas se resumen en este concepto, si bien por motivos didácticos es preferible separarlos para tratarlos más objetivamente.

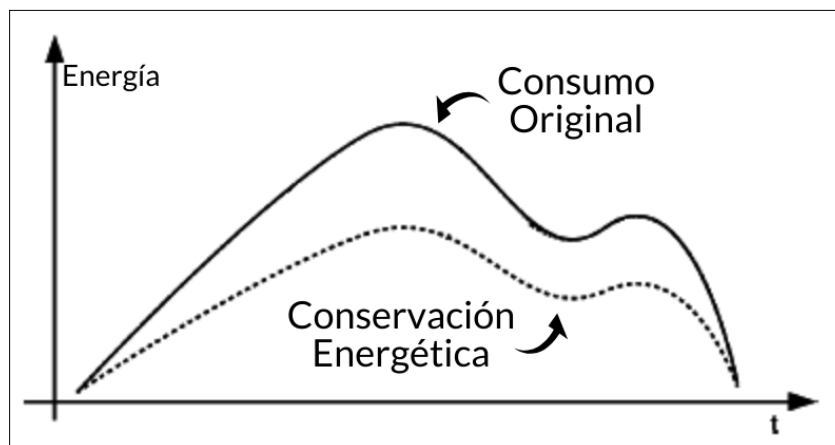


Figura 2-5.- Mejora esperada luego de aplicar programas de Conservación Energética.

Se define a la **conservación energética** como el conjunto de actividades encaminadas a concienciar al

cliente sobre la importancia de reducir el consumo energético, obteniendo como resultado una reducción del mismo. En la figura 2-5 se muestra el efecto en la curva de carga de la aplicación de programas de CE en la operación de la red.

De acuerdo con [11], hay cuatro escenarios principales en los que se puede aplicar este tipo de programas, y estos son:

1. Para educar a los clientes sobre las oportunidades de mejorar la eficiencia de su consumo y hacerlos conscientes de la utilidad de estos programas.
2. Para mejorar la disponibilidad en el mercado de equipos de alta eficiencia energética.
3. Mediante un contrato o acuerdo entre la ESEE y el usuario final donde este se comprometa a ejecutar programas de conservación energética.
4. Mediante incentivos financieros a los clientes con la finalidad de que modifiquen el uso energético o que cambie un determinado equipo.

La conservación energética consiste en cambios permanentes sobre los equipos o en las propiedades físicas del sistema, por lo tanto la aplicación de este programa resulta en la inmediata y permanente disminución del consumo de energía. Esta es la razón por la cual es el método más utilizado dentro de la aplicación de programas de GDE [20]. En la figura 2-6 se muestra la categorización temporal de los programas de CE dentro de los diversos programas de GDE.

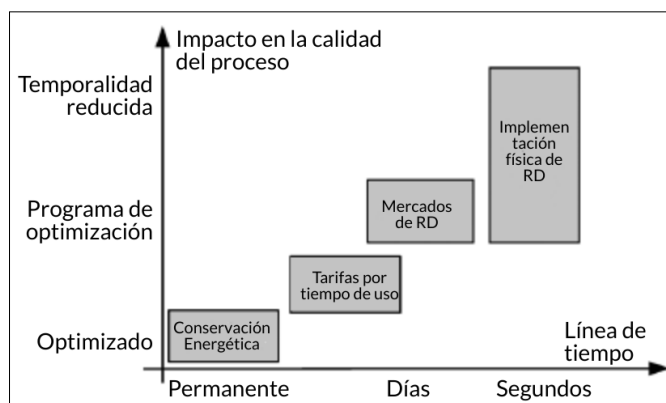


Figura 2-6.- Categorización temporal de los programas de GDE.

De acuerdo al EPRI, la CE puede ser aplicada a través de dos estrategias independientes: reducción voluntaria de demanda y eficiencia energética, las cuales se describen a continuación:

2.3.1.1 Estrategia de reducción voluntaria de demanda

La estrategia de reducción voluntaria de la demanda se refiere a las diversas formas que la ESEE tiene para educar al cliente y promover en él, de forma autónoma, prácticas de conservación energética. Esta estrategia se basa en las herramientas informativas que utiliza la ESEE. Dentro de las estrategias de reducción de demanda, según [19] se pueden utilizar las siguientes herramientas:

- Las **auditorías energéticas** proporcionan a la ESEE sugerencias importantes sobre su consumo de energía eléctrica y el potencial que estrategias de eficiencia energética puedan tener. Además, la información recopilada podría ser beneficiosa para el análisis de consumo energético y la evaluación del mismo [21].
- El **desglose de valores en la facturación** es una manera de informar y educar a los clientes mientras se cobra por el servicio. La factura que recibe cada consumidor es un eficaz portador de información del entorno [22], es una herramienta rentable y fácilmente disponible que puede utilizarse para aumentar la eficacia de los precios y estimular la conservación. Sin embargo los consumidores rara vez son capaces de interpretar la información sobre el consumo a partir de la factura, por lo tanto es necesario proveer facturas claras y comprensibles [23].
- El uso del **correo postal o del correo electrónico directo al cliente** proporciona información de

primera mano entregada por el emisor, en este caso la ESEE, para el usuario final. El correo electrónico es una forma de comunicación versátil ya que, a más de informar al cliente, permite enviar mensajes personalizados y generar evaluaciones oportunas del impacto de estos mensajes en ellos [24]. Dentro de esta categoría se puede incluir a los documentos que sirven para rellenar las facturas emitidas por las comercializadoras como notificaciones o promociones.

- El uso de **talleres, cursos y seminarios** como herramientas para educar y motivar al cliente a aplicar planes de conservación energética en su domicilio es una forma de aportar socialmente en el entorno. Se podría utilizar herramientas como charlas en colegios, universidades, simposios, congresos o concursos donde se aliente a la ciudadanía a participar activamente de este tipo de programas.
- Los **estudios de viabilidad** sirven para determinar el impacto que podría tener una determinada estrategia en su aplicación al cliente y su reflejo en una disminución del consumo de energía global. Si bien es cierto que este tipo de estudios son aplicables a cualquier proyecto, se pretende resaltar su importancia en la creación de estrategias o programas de la GDE.

Para ejemplificar este tipo de estrategias, en la figura 2-7 se muestra la estrategia utilizada por la operadora de la red de transporte francesa RTE. *EcoWatt* es un sistema voluntario introducido en Provenza-Alpes-Costa Azul y Bretaña a finales de la década de 2000 para hacer frente a los problemas específicos de los sistemas eléctricos locales. Este sistema pone a disposición de los ciudadanos un barómetro de electricidad con el que pueden consultar las previsiones de consumo local en cualquier momento del día. Estas previsiones se ofrecen con señales de colores: verde si la demanda es razonable, naranja si es alta y rojo si es muy alta. Los usuarios tienen entonces una forma interactiva de ayudar a afrontar el reto adoptando medidas que reduzcan su consumo de electricidad.

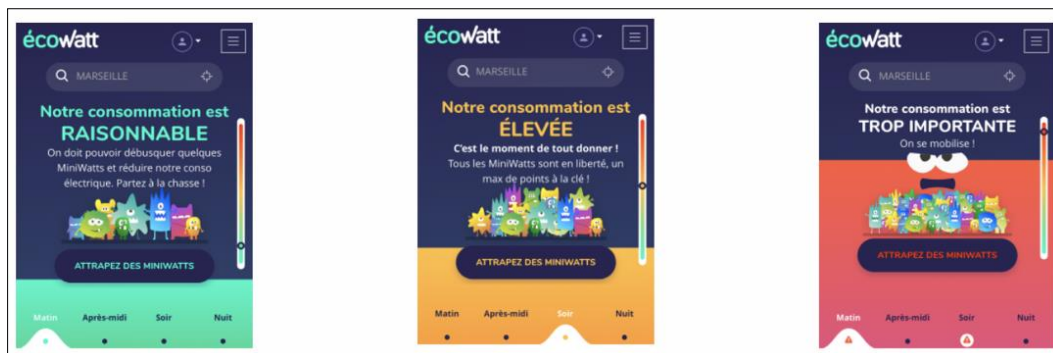


Figura 2-7.- Campaña de reducción voluntaria de demanda, EcoWatt.

2.3.1.2 Estrategia de Eficiencia Energética

Este tipo de estrategias se erigen bajo el concepto de eficiencia energética (EE), concepto muy arraigado en la conciencia mundial debido a los tratados internacionales creados para reducir las emisiones de GEI. No es objetivo de este estudio profundizar en la EE ya que esta tiene una amplia trayectoria fuera de la GDE, si bien se pretende indicar su importancia dentro de la GDE y las aplicaciones novedosas desarrolladas hasta la fecha.

La **eficiencia energética** se define como las acciones encaminadas a promover el uso de aparatos, equipos o procedimientos de tal forma que proporcionen un servicio completo pero con un uso reducido de energía; en ingeniería el proceso de eficiencia usualmente se logra bajo el paradigma de la optimización, el cual se basa en la obtención de un modelo matemático que simula un determinado proceso para su posterior optimización a través de métodos deterministas o estocásticos. A continuación se listan diferentes procesos de ingeniería que han sido optimizados mediante estrategias de EE.

- **En la operación de la red eléctrica.-** La implementación de la herramienta de flujo de potencia óptimo (OPF) [25] permite determinar el funcionamiento más eficiente, de bajo coste y fiable de un sistema eléctrico mediante el despacho de la generación eléctrica disponible para abastecer la carga a través del ajuste correcto de las variables de control como nivel de voltaje, potencia activa y reactiva

a generar, de tal forma que se satisfaga la función objetivo sea esta la disminución de pérdidas en el sistema, o la generación al costo más bajo posible, entre otros.

- **En la edificación.-** La eficiencia energética en la edificación está enfocada en promover un mejor aprovechamiento de los recursos, tanto en la fase constructiva como en la fase post-construcción. En los últimos años ha tomado especial relevancia la implantación de tecnologías *Energy-Zero* y *Net-Energy-Zero* en los edificios, los cuales pretenden mantener una neutralidad equivalente a cero en la emisión de GEI en las edificaciones. En [26] se habla sobre la transición de los edificios desde la tecnología *Net-Energy-Zero* a tecnologías *Energy-Zero* a través del almacenamiento de energía, de este estudio se determinó que la autonomía energética del edificio podría pasar de 44% a 54%.
- **En los sistemas de climatización.-** Con el incremento de las fuentes de energía renovable, y la diversificación de la generación eléctrica, también se han implementado nuevas soluciones híbridas capaces de producir calefacción, refrigeración o energía eléctrica; y dado que la demanda de los sistemas de climatización es aproximadamente un 40% de la demanda total en los edificios, en [27] se presenta el análisis experimental y numérico de un sistema híbrido de calefacción y refrigeración solar para un usuario residencial ubicado en dos latitudes diferentes, uno en Varsovia y otro en Lisboa, donde la demanda de refrigeración se iguala entre el 23.6 - 46.2 [%] con la energía solar en Varsovia, mientras que en Lisboa lo hace entre el 38.2 - 46.1 [%].
- **En los sistemas de iluminación.-** De acuerdo a *Eurelectric*, la demanda de energía eléctrica por concepto de iluminación es del 15% del total demandado. Fundamentalmente, la EE en sistemas de iluminación está íntimamente relacionado con la eficiencia del tipo de fuente de iluminación [11]. En la figura 2-8 se muestra los distintos valores de eficiencia en función del tipo de tecnología utilizado.

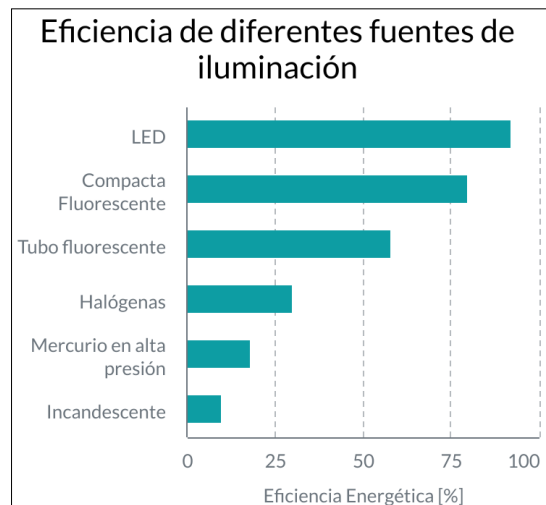


Figura 2-8.- Eficiencia de diferentes fuentes de iluminación.

En [28] se realiza un estudio comparativo sobre la eficiencia, calidad de la energía e impacto ambiental de tres tipos de fuentes de iluminación artificial diferentes, las cuales son: lámpara incandescente, lámpara compacta fluorescente (CFL) y lámpara LED; de dicho estudio muestra que a pesar de que las lámparas LED y CFL son mucho más eficientes que las incandescentes, estas generan armónicos en el sistema, siendo el tercer armónico el más predominante. Además, trabajan con un bajo factor de potencia, 0.55 capacitivo en promedio. Y a pesar que las lámparas LED tienen altos índices de contaminación debido al proceso de fabricación y de transporte al sitio de comercialización, en el análisis del ciclo de vida total estas siguen siendo una opción más sostenible a la tecnología de lámparas incandescentes.

- **En los motores.-** Se dice que el 60% de todo el consumo de energía eléctrica es demandado por motores. Para un motor que opera por cortos periodos de tiempo la eficiencia no es un tema primordial, por el contrario si el motor trabaja en estado permanente es necesario manejarlo adecuadamente para mejorar su eficiencia. Para mejorar la EE de los motores de inducción es necesario tomar en consideración lo siguiente: eficiencia de los componentes mecánicos del motor,

pérdidas internas del motor y la calidad de la energía que energiza al motor; los dos primeros ítems vienen en función del diseño del equipo pero por el tercero si se puede tomar acciones adicionales tal como en [29], donde se realizó un estudio sobre uso de variadores de velocidad como estrategia para incrementar la eficiencia en la operación de los motores eléctricos, el uso de estos equipos con otros componentes para la operación eficiente de los motores podrían generar un ahorro del 30% en el consumo de energía.

- **En los sistemas de almacenamiento de energía.-** El almacenamiento energético está tomando mucha relevancia en la actualidad ya que es una herramienta que permite flexibilizar la demanda, tecnologías como baterías de ion-litio o hidrogeno verde se levantan como artífices del cambio energético. En [30] se trabaja con un nuevo paradigma en el almacenamiento energético con la tecnología en aire líquido (LAES), y su integración en la red eléctrica española, la cual promete alcanzar una eficiencia de 51.7% y, considerando el gran despliegue de potencia fotovoltaica en la región, se favorecería el almacenamiento de energía de la forma “carga corta” durante los picos y “descarga larga” durante los valles nocturnos. El modelo ha arrojado unos precios con valores tan bajos como 150 €/MWh y 50 €/MWh respectivamente, haciéndolos competitivos comparados con el almacenamiento de energía en aire comprimido o el almacenamiento hidroeléctrico por bombeo. En la ciudad inglesa de Manchester se encuentra en construcción una planta de almacenamiento de estas características la cual, se planea entregue 250 [MW-h] de energía y abastezca a 200,000 hogares durante al menos 5 horas [31]. En la figura 2-9 se muestra un esquema sobre el funcionamiento de LAES como herramienta de almacenamiento energético.

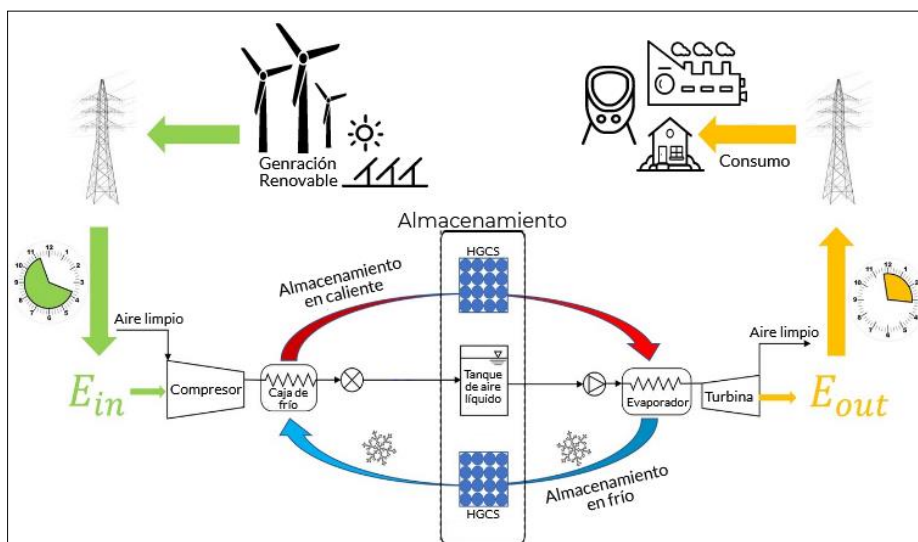


Figura 2-9.- Funcionamiento del almacenamiento energético por aire líquido.

Fuente: (Imagen adaptada de Legrand et. al., 2019) [30]

2.3.2 Programa de Sustitución del recurso energético primario

Indudablemente este tipo de programa nace dentro de los programas de conservación energética, siendo su característica principal la complejidad de su aplicación social. Sustituir un recurso energético por otro, sin un previo análisis, podría dejar a muchas personas sin el acceso a satisfacer sus necesidades energéticas más básicas. En la actualidad más de 2,000 millones personas dependen de la biomasa tradicional para satisfacer sus necesidades energéticas, y este tipo de fuente de energía primaria puede tener graves consecuencias en la salud humana, en el medio ambiente y, en el desarrollo económico y social de los pueblos [32].

El programa de sustitución del recurso energético primario (SREP) se basa en la hipótesis de “Escalera energética”, la cual indica que “los consumidores imitan el comportamiento de un consumidor neoclásico que maximiza la utilidad, lo que implica que cambiarán a portadores de energía más sofisticados a medida que aumenten sus ingresos” [33]. Estudios recientes han demostrado que el uso de vectores energéticos en los hogares muestra una transición que no se produce a pasos lineales y discretos, sino que es más común el uso de múltiples combustibles, lo cual genera un apilamiento en el uso de los mismos. Estos están

disponibles para el usuario especialmente para los estratos sociales pertenecientes a la base de la pirámide [34]. En el gráfico 2-10 se muestra un esquema del proceso de transición energética de acuerdo al modelo de escalera energética y al de apilamiento energético.

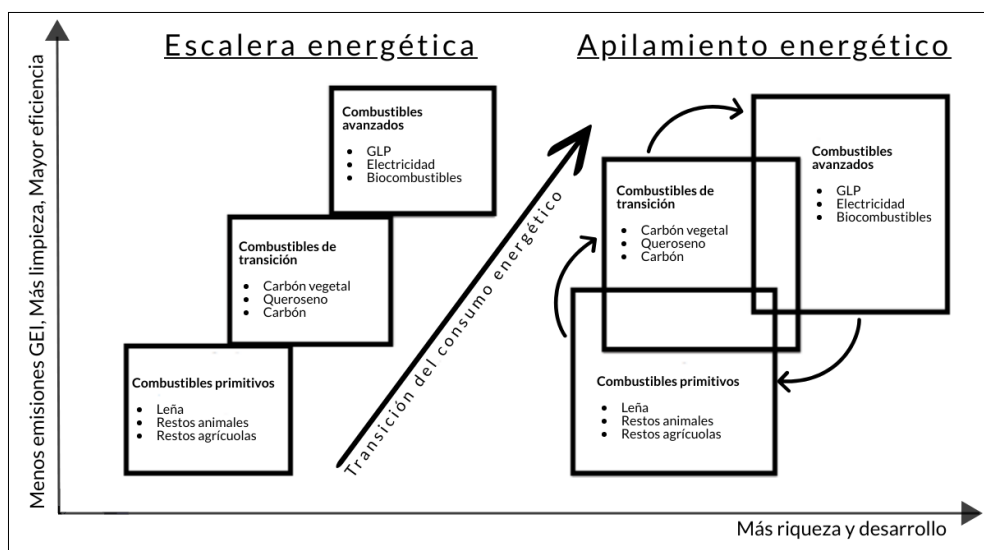


Figura 2-10.- Proceso de transición energética.

Los programas de SREP son planes que promueven el uso de vectores energéticos más eficientes, sostenibles, saludables, que permitan una mejora en las condiciones de vida de los pueblos y que ayuden a erradicar la pobreza energética. Usualmente, debido a lo delicado que representa el papel de la energía en la vida de las personas, este tipo de planes son llevados a cabo por entes gubernamentales a través de planes de electrificación o desarrollo estratégico. La aplicación de este tipo de programas permite, principalmente, la consecución de dos de los objetivos para modificar la forma de la curva de carga de la red, uno es el llenado de valles y el otro es la crecimiento estratégico de carga. Estos objetivos se basan en el escenario donde se traslada de cualquier tipo de combustible primario a la utilización de electricidad.

2.3.3 Programa de Respuesta de la Demanda

Al igual que los programas de CE, los programas de respuesta de la demanda (RD) nacen de la PURPA estadounidense de 1975. De acuerdo con [35], en 1981 este tipo de programas eran denominados como “gestión de carga” o “control de carga”. Estas estrategias pretendían encender o apagar los equipos de los consumidores para modificar la demanda total de la ESEE a través de esquemas cíclicos de control [12]. El control de la carga implicaba también otra estrategia llamada como “interrupción de carga”, esta permitía que la ESEE desconecte el equipo que esta considere oportuno con el objetivo de reducir los picos de demanda de la red. Actualmente la RD tiene más estrategias originadas por la implementación de los mercados eléctricos, pero sin duda las dos estrategias clásicas de la RD, y las que más se han difundido en la actualidad, son el “control de carga” y la “interrupción de carga”.

Una de las definiciones de RD más difundidas es la emitida por la Comisión Federal de Regulación de la Energía (FERC), la cual la define como: “Son los cambios en los patrones de uso normales de electricidad por parte de los usuarios finales en respuesta a cambios en el precio de la energía a lo largo del tiempo, o a pagos de incentivos diseñados para inducir un menor uso de electricidad en momentos de altos precios del mercado mayorista o cuando la fiabilidad del sistema está comprometida”. La aplicación de este tipo de programas permite, principalmente, la consecución de tres de los objetivos para modificar la forma de la curva de carga de la red: uno es el desplazamiento de carga, el segundo es la disminución del pico de carga y el tercero es la creación de una curva de carga flexible.

Al contrario que en los programas de conservación energética y en los programas de sustitución del recurso energético primario, los programas de respuesta de la demanda no son permanentes sobre los equipos o las propiedades físicas del sistema, por lo tanto la aplicación de estos resulta en la influencia en el patrón de la curva de demanda mas no necesariamente hay una disminución en la energía consumida. Esto se debe a que si un proceso es interrumpido a la mitad de su tarea, este tendrá que retomar sus acciones cuando las

restricciones de la red se lo permitan, como por ejemplo el uso de bombas para almacenamiento de agua.

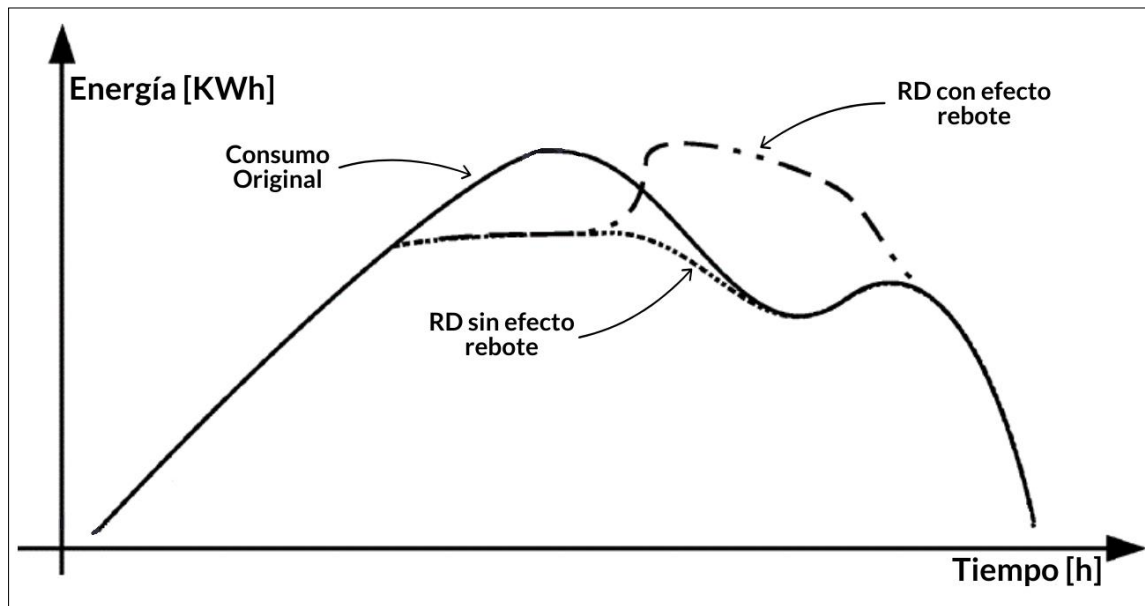


Figura 2-11.- Impacto de la respuesta de la demanda en la forma de la curva de carga.

Ciertos estudios han sugerido que esta interrupción podría generar un pico de demanda rebote efecto de la puesta en marcha de todos los equipos que en un principio fueron detenidos en el primer pico de demanda, tal como se muestra en la figura 2-11. Los programas que se diseñen deben prever esta anomalía y evitar que el rebote genere un problema mayor en la red. La respuesta de la demanda se clasifica en dos tipos de programas dependiendo en que estén basados, o en incentivos o en precio, los cuales se detallan a continuación:

2.3.3.1 Programas de RD basados en precios

Todos los portadores energéticos tienen un costo inherente a su uso. En el caso de la electricidad, este costo suele estar caracterizado por los costos de funcionamiento y los costos fijos. Sin embargo, el costo que paga el cliente viene en función de la cantidad de kilovatios-hora que se ha consumido y este costo comúnmente es conocido como tarifa. Hay varios tipos de tarifas utilizados comercialmente pero la principal es la tarifa simple o estática, método por el cual se carga al cliente los costos proporcionales al consumo realizado más los costos de comercialización. El paradigma de la explotación de la red eléctrica ha cambiado mucho en la última década, la incursión de la generación distribuida, el almacenamiento energético y los vehículos eléctricos prometen con revolucionar todo el concepto hasta ahora establecido sobre las redes de distribución, y esto incluye también a las tarifas eléctricas. El concepto estático de tarifas eléctricas empieza a quedar en desuso, principalmente porque es una forma poco justa de fijar los precios. Como solución a este nuevo marco se abre paso el concepto de tarifación bajo un esquema dinámico de precios [36].

Los programas de respuesta de la demanda basada en precios (RDBP) se establecen en esquemas dinámicos donde las tarifas no son planas, y por lo tanto son tarifas que fluctúan de acuerdo al costo en tiempo real de la electricidad [37]. El objetivo de este esquema de tarifación es fomentar el uso de la electricidad cuando los precios son más bajos y así disminuir los picos de demanda.

Hay una amplia literatura investigativa sobre este tipo de programas. Por ejemplo:

- a) En [38] se describe un estudio en 582 ESEE sobre los efectos de la penetración de contadores inteligentes en la tarifación dinámica de la electricidad; los resultados muestran que un aumento de diez puntos porcentuales en la penetración de los contadores inteligentes se asocia con un aumento medio de 0.56 puntos porcentuales en la participación de los clientes en programas de precios dinámicos.
- b) En [39] se analiza bajo criterios técnicos y económicos el impacto de los precios dinámicos en una red inteligente con alta penetración de energía solar, esta a su vez incluye almacenamiento

distribuido. Se obtuvo que para los 10 casos analizados, el que incluye una planta solar de 300 [MW] tenía un porcentaje de penetración de hasta 67.78% y era el más viable de desarrollar en función del coste nivelado de energía, coste de almacenamiento, periodo de amortización y valor actual neto.

- c) En [40] se realiza un estudio sobre la programación de la producción de una fábrica teniendo en cuenta el precio dinámico de la electricidad en las fábricas, asumiendo que la fábrica tiene una planta fotovoltaica, los precios dinámicos proveen de un ahorro de costes energéticos que puede alcanzar el 29%.
- d) En [41] se presenta un programa para optimizar la demanda de carga de vehículos eléctricos basado en un sistema de múltiples tarifas para diferentes grupos de clientes, y el resultado arroja que el programa multitarifa podría ayudar a las ESEE a reducir el coste diario en un 1.5% y los clientes podrían ahorrar un 7% en su factura eléctrica.

Los programas de RDBP pueden dividirse de la siguiente forma [42]:

- **Tarifa de bloque inclinado (TBI).**- Este tipo de tarifas no obedecen el concepto de precios dinámicos pero se considera como un programa de RDBP. En este tipo de tarifa el precio aumenta a partir de determinado o determinados límites. Se utiliza principalmente para evitar la sincronización de carga, especialmente a las horas de los precios bajos. Es recalable mencionar que este tipo de tarifas suelen utilizarse en combinación de tarifas por tiempo de uso con la finalidad de obtener las ventajas de ambos tipos de tarifación.
- **Tarifa por tiempo de uso (TTU).**- Son el tipo más sencillo de programas RDBP, es un tipo de tarifa que refleja el coste de producir electricidad en distintos momentos del día en función de la demanda. Este tipo de tarifa puede dividirse en varios periodos, siendo el más utilizado el de tres etapas:
 - En el pico, cuando la demanda y el coste de la energía son altos.
 - En el pico medio, cuando la demanda y el coste de energía son moderados.
 - En el valle cuando la demanda y el coste de la energía son bajos.

Según [43], esta estrategia de precios afecta significativamente al patrón de consumo de los usuarios residenciales.

- **Tarifa en tiempo real (TTR).**- En este tipo de tarifa a los clientes se les cobra en función del coste real de la electricidad en el mercado a escala. Este tipo de esquema de precios es el que ofrece mayores beneficios económicos y medioambientales, pero en la realidad es bastante complejo de implementar. Por otro lado, para la ESEE supone un gran reto ya que la fijación de precios minoristas en tiempo real afecta a la estabilidad y la volatilidad de la red. Según [36], los precios dinámicos, especialmente la tarifa en tiempo real, son los esquemas más eficientes y seguros de implementar en los futuros ambientes de redes inteligentes.
- **Tarifa de tiempo crítico (TTC).**- Este es un tipo de tarifa similar a la TTU ya que proporciona dos precios diferentes entre periodos valle y pico. Este tipo de tarifas se declaran solamente cuando se pronostica un periodo crítico en el sistema, en ese caso se notifica a los clientes con antelación la existencia de un periodo crítico (pueden ser un número limitado de días al año), durante el cual se espera que las tarifas sean mucho más altas que la media.

El éxito de este tipo de programas radica en la penetración que estos tengan en el usuario final y su aplicación se debilita si no son transparentes. En la figura 2-12 se muestra un esquema sobre las cuatro estrategias del programa de respuesta de la demanda basada en precios. Cabe recalcar que en la Unión Europea (UE) este tipo de programas se los denomina como “Respuesta de la demanda implícita”, y se refiere a los consumidores que eligen estar expuestos a precios de la electricidad que varían en el tiempo; estos precios siempre forman parte de su contrato de suministro [44].

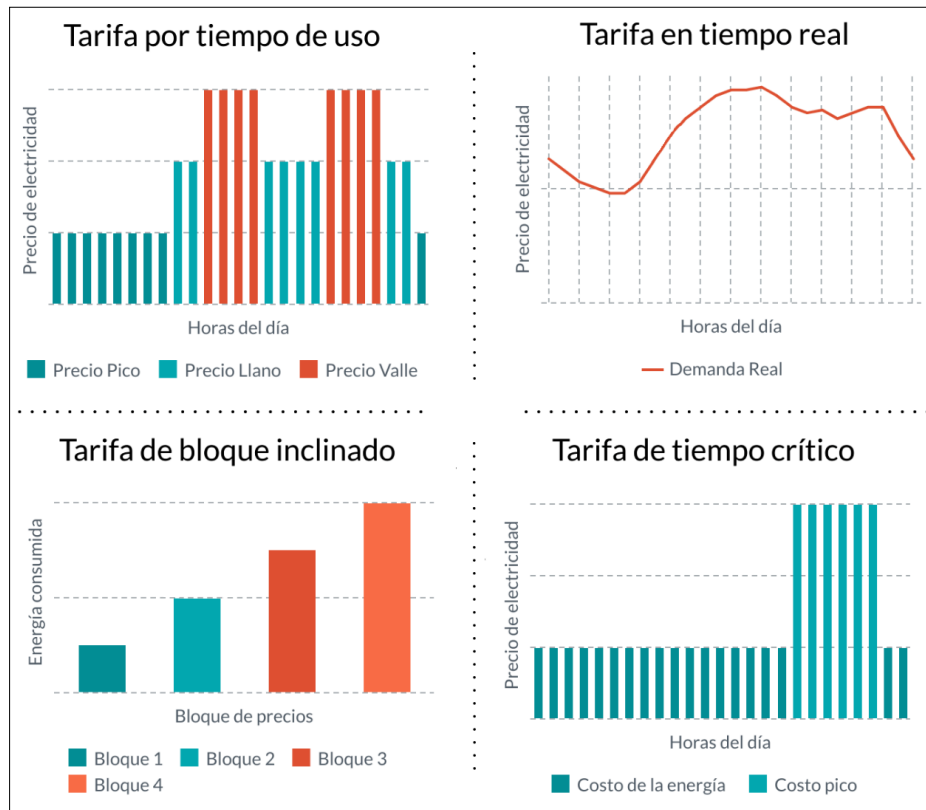


Figura 2-12.- Programas de Respuesta de la Demanda basado en precios.

2.3.3.2 Programas basados en incentivos

Los usuarios de la red eléctrica no compran electricidad en sí, porque no comprenden a fondo el fenómeno que sucede detrás de sus interruptores. Lo que los usuarios compran es poder encender la calefacción cuando hace frío, jugar sus video juegos favoritos en sus tiempos libres, lavar su ropa, calentar alimentos en un horno microondas, entre otros; lo que los clientes compran es confort, compran un mejor estilo de vida a través de la energía eléctrica [45]. Y aunque suene contra natura en el mundo de la electricidad, este tipo de programas lo que hacen y piden al usuario es justamente lo contrario, es decir que pretenden jugar con el confort de los usuarios y que estos consuman menos energía eléctrica a cambio de recibir un incentivo que les compense por el confort perdido, todo esto en función de balancear la oferta y demanda de energía eléctrica desde el lado del consumo.

Los programas de respuesta de la demanda basados en incentivos (RDBI) son estrategias que les permiten a la ESEE regular la carga mediante incentivos a los clientes. Los participantes en los programas RDBI clásicos reciben pagos por inscribirse en estos programas, normalmente como un crédito en la factura o una tasa de descuento por su participación en los programas. En los programas RDBI de mercado, los participantes son recompensados con dinero por su actuación en función de la cantidad de reducción de carga durante las condiciones críticas. En la UE se refiere a los programas de RDBI de mercado como “respuesta de la demanda explícita” debido a que se considera que la demanda compite directamente con la oferta en los mercados mayoristas, de equilibrio y de servicios auxiliares a través de los servicios de los agregadores o de los grandes consumidores individuales. Esto se consigue mediante el control de los cambios agregados en la carga que se comercializa en los mercados de electricidad, proporcionando un recurso comparable a la generación y recibiendo precios comparables [44].

Hay una amplia literatura investigadora sobre este tipo de programas. Así:

- a) En [46] se analiza la RDBI para múltiples portadores de energía bajo los efectos de las incertidumbres, por un lado la incertidumbre de las fuentes renovables de energía eléctrica en el lado de la oferta y por el lado de la demanda la incertidumbre de la capacidad de respuesta de los consumidores; así como los efectos del doble acoplamiento que incluye el efecto de conversión de la energía en el lado del agregador multienergético y el efecto de acoplamiento de los

electrodomésticos en el lado del consumidor, obteniendo como resultado que el modelo propuesto puede lograr un escenario en donde todos los participantes ganan, mostrando mérito la disminución de costes totales del agregador y el aumento de los beneficios de los consumidores.

- b) En [47] se estudia el rol de los programas de RDBI en el desarrollo de la red inteligente en el cual se obtiene que la aplicación de tarifas en tiempo real más los modelos de incentivos pueden proveer de una disminución considerable de los picos de demanda de acuerdo a los objetivos de eficiencia de la red inteligente.
- c) En [48] se busca obtener el precio óptimo bajo un esquema de precios en tiempo real basado en un modelo estadístico de elasticidad de la demanda eléctrica, en el cual se pudo concluir que el modelo elástico del precio de las cargas agregadas al sistema eléctrico, y basado en el esquema de precios en tiempo real, mejora el bienestar social del sistema eléctrico y reduce la relación pico-promedio de la curva de carga.

Los programas de RDBI pueden dividirse de la siguiente forma [[49], [15]]: RBDI clásicos se refiere a las estrategias de control directo de carga e interrupción de servicio, los restantes son RBDI basados en el mercado.

- **Control directo de carga (CDC).**- En este tipo de estrategia la ESEE tiene la potestad de manipular las cargas del usuario final de forma remota, con poca antelación, previo a la autorización expresa del cliente y este en recompensa recibe un incentivo. Usualmente este tipo de programas suelen aplicarse a usuarios residenciales, y hasta cierto punto a usuarios comerciales pequeños. Los equipos que mayoritariamente tienden a ser controlados son los acondicionadores de aire y los calentadores de agua [49]. CDC es un programa que viene aplicándose desde 1980 en algunas ESEE de Estados Unidos a través de estrategias como: control cíclico remoto, controlador local, control de termostato, entre otros; siendo el más utilizado el control cíclico remoto.

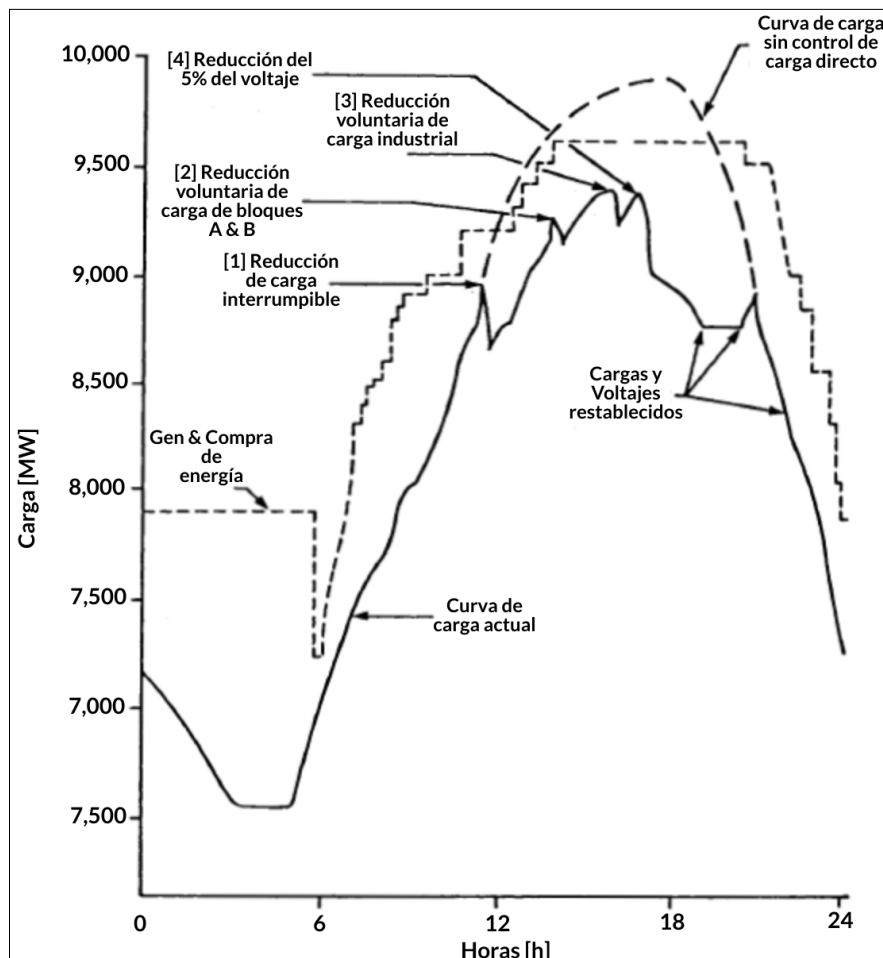


Figura 2-13.- Despacho del control de carga.

El **control cíclico remoto** es el control directo, en tiempo real, de la operación de un determinado equipo, a través de un enlace de comunicación bidireccional entre el cliente y la ESEE, el cual apaga por un periodo de tiempo determinado un equipo, luego se le permite reanudar su funcionamiento durante otro periodo de tiempo determinado, y luego se vuelve a apagar. Las ESEE tienen varios modelos de control cíclico que van desde el 20 al 100 %; por ejemplo el modelo de control cíclico al 25% mantendría al equipo apagado durante 7,5 [min] y luego se energizaría por 22,5 [min]; la reducción de la demanda se obtiene de las reducciones totales de cada uno de los equipos inscritos en el programa [50]. En la figura 2-13 se muestra cómo se realiza el despacho de control directo de carga a través de control cíclico.

- **Interrupción del servicio (IS).**- Este tipo de estrategia es bastante similar al CDC ya que el cliente recibirá pagos incentivados por adelantado o descuentos en la tarifa por sus servicios de desconexión/reducción de carga a unos valores predefinidos. Los participantes que no acaten las disposiciones acordadas pueden ser sancionados en función de las condiciones del programa. Este tipo de programa, como todos los de esta categoría, buscan actuar como un grado más de libertad en la operación de la red y así aportar confiabilidad al sistema.

El **control remoto de encendido y apagado** es una forma en la que las ESEE, a través de un contrato con el cliente, pueden remover carga del sistema según sea necesario dentro de los límites fijados en el contrato sobre el número de veces y la duración de la interrupción. Se diferencia del control cíclico que con este tipo de servicio se deja fuera de servicio al equipo durante todo el tiempo que dure la señal de control. Este tipo de servicio no requiere sofisticados implementos para ser ejecutado, basta con un sistema de comunicaciones de una sola vía [50].

- **Licitación de la demanda (LD).**- También se lo conoce como programa de recompra, en este tipo de servicios los consumidores ofertan una reducción específica de carga en el mercado de venta de electricidad o en el mercado minorista con un día de antelación [49], y la oferta es aceptada solamente si el valor es inferior al precio de mercado. Cuando la oferta es aceptada, el usuario debe reducir su carga de acuerdo a lo especificado en la oferta y en caso contrario será penalizado [37].
- **Respuesta de la demanda de emergencia (RDE).**- En este tipo de programas se relaciona los eventos de emergencia previamente planificados por la ESEE con la capacidad del cliente de disminuir su carga, y a cambio de la voluntad de participar se ofrecen incentivos a los consumidores. Las penalizaciones a los clientes que no cumplan lo pactado pueden cumplirse o no dependiendo de la gravedad de la contingencia.
- **Programas de capacidad de mercado (PCM).**- Este tipo de programas están dirigidos a los clientes que están dispuestos a reducir la carga seleccionada con antelación durante un tiempo determinado. Una vez formalizado el contrato, los clientes recibirán un aviso con un día de anticipación y están en la obligación de realizar las reducciones predefinidas cuando se produzcan contingencias en el sistema, caso contrario serán penalizados cuando no responda a la llamada de reducción de carga. En retribución por su apoyo en la contingencia suscitada se les ofrecen incentivos. Al igual que en los otros programas de RDBI, el requisito mínimo para llevar a cabo este programa es la capacidad de controlar la carga de forma remota, local o a través de un canal de comunicación adecuado.
- **Programas de mercado de servicios auxiliares (PMSA).**- Este tipo de programas son razonablemente similares a los programas de licitación de demanda, con la diferencia que aquí los clientes pueden ofertar reducciones de carga en el mercado spot de forma que pasan a formar parte de la reserva operativa de la red. Cuando las ofertas son aceptadas los participantes son incentivados monetariamente al precio de mercado spot debido a que están a la espera de conectarse a la red. Hay varios servicios asociados a los PMSA como programas de reserva giratoria, programas de reserva no giratoria y servicio de regulación.

El **programa de reserva giratoria** es un sustituto tecnológico de la idea original de reserva giratoria donde mediante un algoritmo se controla una red de usuarios interconectados y que estos sustituyan la instalación de generación tradicionalmente inactiva. En caso que se necesite incrementar la producción de energía en las plantas reales, los clientes abonados a este servicio estarán listos para desconectarse de la red a cambio de algún tipo de incentivo. Cabe recalcar que es fundamental que

el algoritmo de control implemente la respuesta completa del programa en el tiempo deseado sino no sería idóneo el programa.

El **Programa de reserva no giratoria** hace lo contrario que el programa de reserva giratoria con la diferencia que para este tipo de programas no es imprescindible el tiempo de respuesta ya que se tiene más tiempo para responder los requerimientos de la ESEE.

En el **Programa de regulación** el recurso de demanda aumenta o disminuye la carga conectada a la red en función de las señales emitidas por la ESEE en tiempo real. Este tipo de servicios se prestan de forma continua durante el periodo contractual, lo que ayuda a igualar la generación total de electricidad con la demanda total durante cada segundo. Esta instalación requiere estar interconectada con el “control automático de generación” para realizar el balance entre generación-carga de una forma adecuada.

Resumen del capítulo

En este capítulo se ha definido la GDE y sus seis formas de modificar la forma de la curva de carga. Además, se han definido tres programas para conseguirlo y las estrategias posibles para cada uno de ellos. Estos son (Ver figura 2-14):

- Los programas de “Conservación Energética” que buscan la reducción del consumo energético total. Se realizan mediante la aplicación de dos estrategias: Reducción voluntaria de demanda y eficiencia energética. La primera intenta educar al cliente para que este reduzca su demanda y la segunda optimiza el consumo energético.
- Los programas de “Sustitución del recurso energético primario” que buscan mejorar el acceso a vectores energéticos por parte de los clientes, y consiste en el desarrollo de planes gubernamentales de electrificación y desarrollo estratégico.
- Los programas de “respuesta de la demanda” que buscan reducir el pico de demanda máxima para mejorar la eficiencia total del sistema. Se realizan mediante la aplicación de estrategias: Basado en precios y basado en incentivos. La primera busca trasladar el consumo energético desde los periodos de máxima demanda hasta los de mínima demanda, y la segunda busca premiar las reducciones adicionales de demanda que realice el cliente.

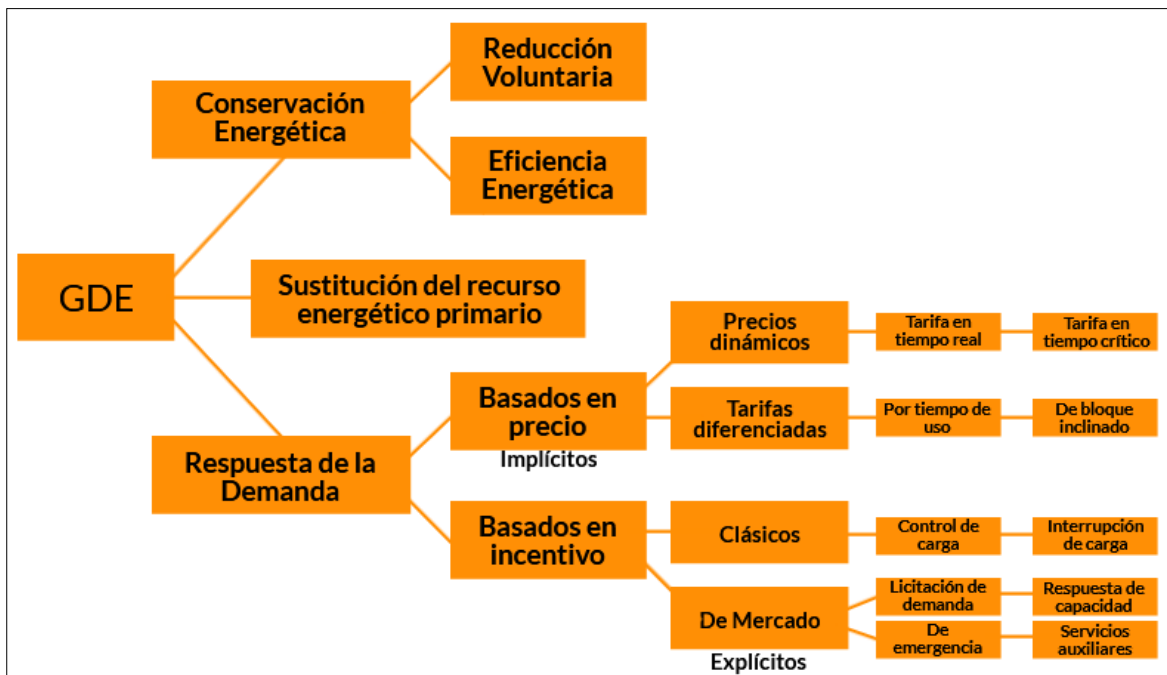


Figura 2-14.- Clasificación de los programas de la Gestión de la Demanda Eléctrica.

3 MODELO CONCEPTUAL

“Solo unidos seremos...”

- Frase ubicada en el mural a la Patria de la Asamblea Nacional de Ecuador -

En función del documento emitido por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) en su publicación especial N° 1108 sobre la Estructura para las Normas de Interoperabilidad de las Redes Inteligentes (RI) [51], se propone un modelo conceptual de la Gestión de la Demanda Eléctrica de tal forma que permita comprender a profundidad la estructura de los programas de la GDE. El modelo desarrollado se muestra en la figura 3-1. El modelo conceptual permite la planificación y organización de la amplia y progresiva colección de información, además de los avances tecnológicos originados alrededor de la GDE, y así presentarlos de una forma comprensiva.

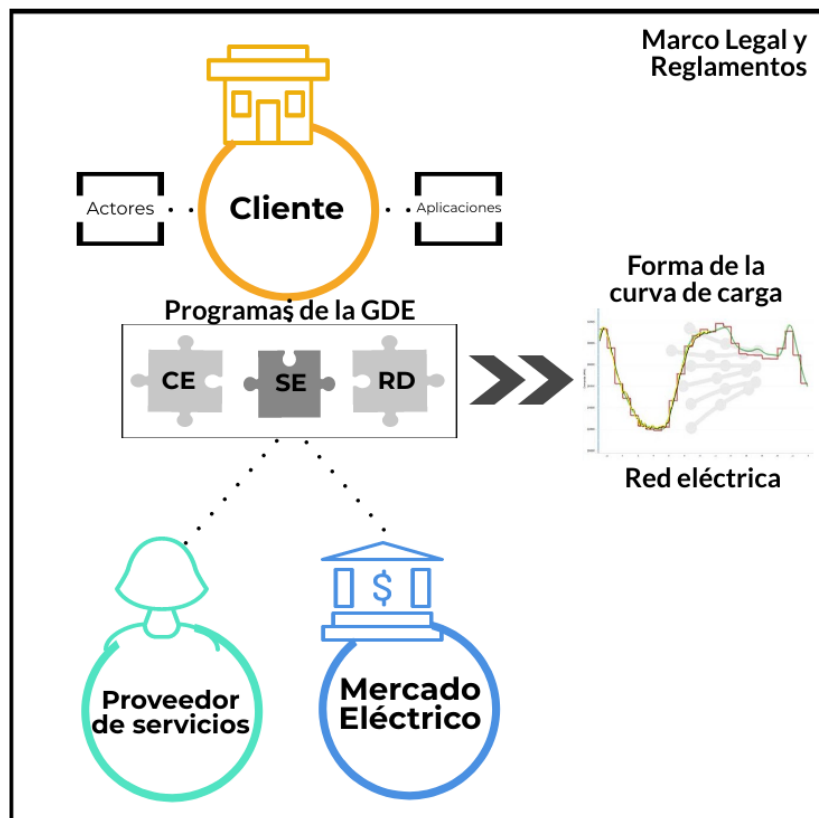


Figura 3-1.- Modelo conceptual de la GDE.

El corazón del modelo es el cliente y éste a su vez está conectado con la ESEE y el Mercado Eléctrico (ME) a través de los distintos programas que este posee. Los programas hacen de interfaz entre el cliente y la red eléctrica de tal forma que el primero incida en el segundo y en su forma de curva de carga. El cliente será el dominio de este modelo y, a su vez, está conformado por un solo subdominio que está compuesto por tres programas independientes: Conservación Energética (CE), Sustitución del recurso energético primario (SE) y Respuesta de la demanda (RD); este dominio incluye además a los actores y aplicaciones del modelo. Los actores son los dispositivos o sistemas que determinan acciones e intercambian la información necesaria para la realización de las aplicaciones. Las aplicaciones representan las tareas que uno o varios actores de un

dominio tienen que realizar. Mientras que, por ejemplo, los contadores inteligentes, los sistemas de control y sus algoritmos de optimización representan los actores, las aplicaciones correspondientes pueden ser la automatización del hogar, reducir los picos de demanda, minimizar las pérdidas del sistema, maximizar el confort de los usuarios y la gestión energética desde el lado de la demanda, entre otros [52].

Como se puede ver en la figura 3-1, el esquema del modelo se encuentra enmarcado dentro de un *Marco legal y Reglamentario*, y es que ninguno de los actores ni aplicaciones de la GDE podría consolidarse si no se establece una serie de políticas y requisitos que los validen, su objeto es garantizar que las tarifas seleccionadas sean justas, razonables, seguras y fiables, y que los programas que permiten la GDE sean confiables, protejan la privacidad de los usuarios y cumplan con el resto de políticas públicas del sector. El cambio de paradigma de la gestión desde el lado de la oferta a la gestión desde el lado de la demanda introducirá nuevas consideraciones que trascenderán límites jurisdiccionales y exigirá una mayor coordinación entre los órganos gubernamentales, los operadores de la red tanto a nivel de transmisión como en distribución, administraciones zonales y locales. La transición de la gestión desde el lado de la oferta implica una fuerte inversión y el marco legal donde se desarrollan estas actividades debe motivar las inversiones en la modernización de la infraestructura eléctrica que se requiere y no lo contrario.

Llegados a este punto es necesario aclarar la dicotomía que se genera con respecto a los términos *Gestión de la demanda* y *Respuesta de la demanda* ya que en muchas fuentes bibliográficas se las toma como similares o como que fueran antónimos. La respuesta de la demanda es una subordinada de la gestión de la demanda por lo tanto no pueden ser tratadas de forma intercambiable ya que cada una tiene su definición y propósito. Con el pasar de los años la RD ha tomado más notoriedad que la GDE debido a la cantidad de estudios que se han generado en torno de ella ya que los programas de CE y de SREP, al ser de tipo permanente, no necesitan de la participación y contribución continua del cliente como los planes de RD [49]. Los estudios de Conservación o de Sustitución del recurso energético se asocian más a una mejora en la eficiencia de los procesos, o un aporte a la eficiencia energética en sí, mas no como una parte de la GDE. Por el contrario, los estudios de RD son asociados directamente con la gestión de la demanda ya que son los encargados de interactuar con el usuario constantemente, además de ser las herramientas que permiten la gestión de la carga.

Otra razón por la cual los programas de RD eclipsan a los demás programas radica en que tiene más modelos de negocio disponibles. En [53] se realizó un análisis desde diferentes tipos de negocio, tanto para programas de CE y RD de varios mercados eléctricos, y se concluyó que hay más modelos de negocio disponibles para los programas de RD que para los programas de CE, concretamente en la operación del sistema y en el mercado minorista. Esto atrae a los inversores que buscan implementar nuevos modelos de negocio.

3.1 Arquitectura de la GDE

La arquitectura de los programas de GDE está compuesta, de acuerdo al modelo conceptual establecido, por actores y aplicaciones, los cuales se detallan a continuación:

3.1.1 Los actores del Modelo

A pesar que el concepto de “gestionar la demanda” se originó a mediados de los años setenta, su aplicación en la red eléctrica no ha sido ampliamente acogida debido a la falta de herramientas tecnológicas que faciliten su implementación [52]. Por ejemplo, todos los programas de RD necesitan de un sistema de comunicación que vincule al usuario con la ESEE, y antes del año 2000 la principal tecnología de comunicación que se utilizaba era la comunicación por línea portadora (PLC) [12]. Bajo este paradigma de red de comunicación no se hubiera podido estudiar ni diseñar los sofisticados programas de RD que actualmente se tratan.

Hay una gran variedad de herramientas tecnológicas que permiten el desarrollo de los programas de GDE en la actualidad. En este estudio los actores de la GDE se han clasificado en:

- Sistemas de control.
- Sistemas de monitorización.
- Sistemas de comunicación.

En la figura 3-2 se muestra la clasificación de los actores del modelo conceptual de GDE implementado.

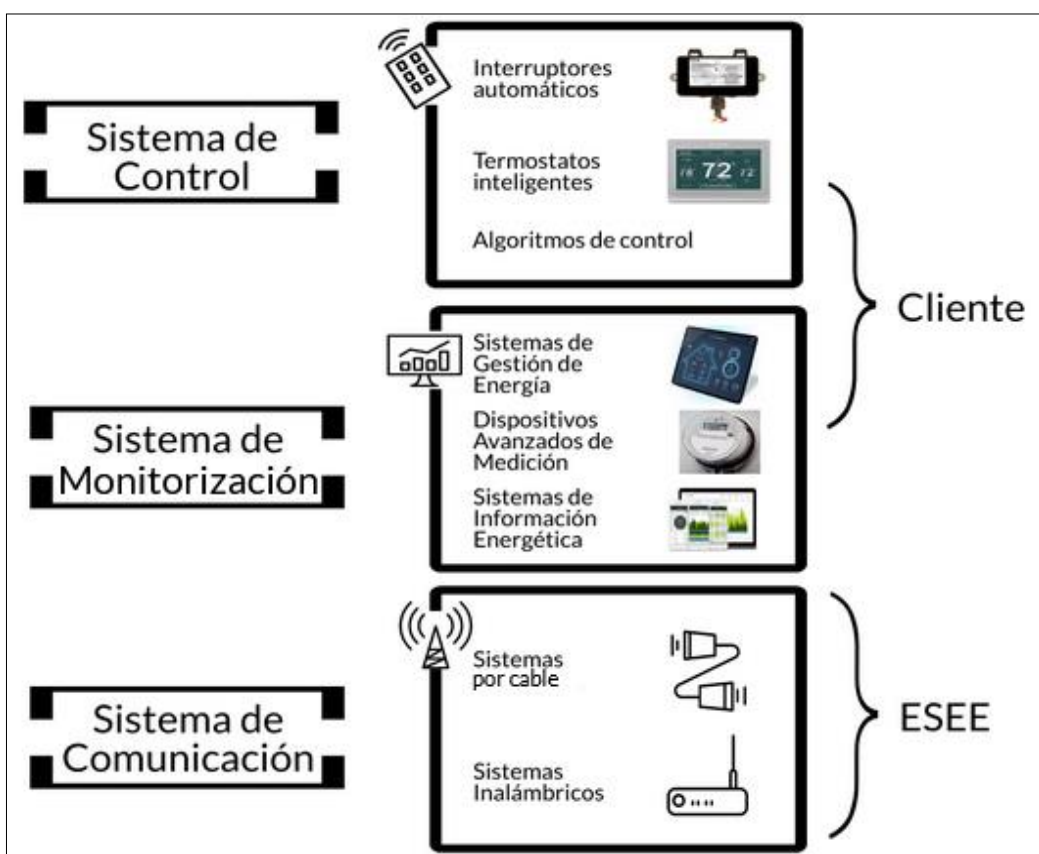


Figura 3-2.- Actores del modelo conceptual de la GDE.

3.1.1.1 Sistemas de control

La RAE define al control como *la regulación, manual o automática, de un sistema*. En este caso lo que se desea controlar es la operación de los distintos programas de GDE teniendo en cuenta la interacción del cliente con los operadores y el mercado eléctrico. Los dispositivos de control para regular la demanda pueden ser tanto autónomos, para clientes residenciales, como integrados a un Sistema de Gestión de Energía (EMS), para grandes instalaciones.

Cabe puntualizar que el uso de equipos o sistemas inteligentes solo bajo el paradigma de poder encenderlos y apagarlos a gusto y deseo del cliente, sin ninguna estrategia de RD detrás, no cuenta como gestión energética. Para que esta pueda darse es necesario que haya un “ente” rector que determine cuando los equipos pueden usarse, ya sea de forma manual o automática, ya que el principio fundamental de la GDE es reducir los picos de la curva de carga, y la RD está suscrita a los mismos principios.

Dentro de las herramientas del sistema de control se pueden citar las siguientes:

a) Dispositivos inteligentes de gestión de carga

Estos dispositivos de control son los intermediarios entre el suministro energético y la carga, y son los encargados de manipular directamente las variables que determinan el consumo de energía hasta el punto de bloquear el suministro de electricidad si así fuese la orden de control. Los dispositivos que más ampliamente se han difundido dentro de esta categoría son los interruptores de control de carga y los termostatos inteligentes.

Los **interruptores de control de carga** son un componente integral dentro de los programas de RD, se instalan en el lado del cliente y se utilizan para el control remoto de cargas específicas de uso final, como compresores de aire acondicionado, calentadores de agua o motores, y están conectados a la empresa de servicios públicos mediante una red de comunicación.

De acuerdo con [42], un **termostato inteligente** es un dispositivo utilizado en las cargas

controlables por termostato para modificar su patrón de demanda a gusto de la ESEE, además de aprender las preferencias de temperatura de los consumidores. Los termostatos inteligentes son controlados a distancia por la compañía eléctrica y/o el cliente, y permiten programar variaciones en los ajustes de temperatura con un control más suave en lugar de utilizar dispositivos de encendido y apagado.

De acuerdo con [42], los **electrodomésticos inteligentes** utilizan la tecnología del Internet de las cosas (IoT) para interactuar con otros dispositivos inteligentes como los teléfonos inteligentes o las tabletas, que permiten el acceso y control remoto del usuario final. De acuerdo con [54], hay varios factores que influyen en los consumidores para la compra de electrodomésticos inteligentes. Estos son: la utilidad del aparato, la satisfacción del consumidor, el ahorro de costes y la facilidad de control.

b) **Generación de reserva y almacenamiento de energía**

Mediante el uso de generadores de reserva, los clientes pueden emplear un esquema sencillo y adecuado para reducir la carga de la red a cambio del pago de la ESEE. Los generadores de reserva pueden estar conformados por generación distribuida (GD) o grupos electrógenos, si bien las emisiones contaminantes de estos últimos representan un gran problema cuando se utilizan para la RD. Sin embargo cuando a GD se refiere, la posibilidad de flexibilizar la demanda mediante su uso toma una mayor relevancia debido a los beneficios de las fuentes renovables. En otros casos, la gestión de la generación local también es posible gracias a algunos electrodomésticos, como el lavavajillas, el acondicionador de aire o la lavadora, que, en condiciones favorables de generación, permiten lograr una especie de despacho local. Esta estrategia, según la cual se optimiza la gestión de todos los recursos locales, puede adaptarse fácilmente también en el sector terciario o en los edificios inteligentes. Los edificios inteligentes podrían operar de forma coordinada para ofrecer otras funciones y servicios, tanto para el propio edificio como para el sistema eléctrico de distribución.

Las unidades de almacenamiento de energía también pueden incluirse en la gestión de la energía de una residencia, de un edificio o de la red de distribución; para aumentar las funciones relacionadas con la gestión de la carga y los niveles de seguridad para algunas aplicaciones críticas. Además, el excedente de energía de la generación local puede utilizarse para cargar los vehículos eléctricos personales y o para gestionar la demanda mediante los programas descritos.

3.1.1.2 **Sistemas de monitorización**

La RAE define la monitorización como *observar mediante aparatos especiales el curso de uno o varios parámetros para detectar posibles anomalías*. En este caso lo que se desea monitorear la operación de los distintos programas de GDE teniendo en cuenta la interacción del cliente con los operadores y el mercado eléctrico. De acuerdo con [52], dentro de las herramientas del sistema de monitorización se pueden citar las siguientes:

a) **Infraestructura avanzada de medición**

Es un sistema integral de medición el cual, a través de un sistema de comunicación y de contadores inteligentes, proporciona de forma remota el detalle del uso de electricidad de cada cliente a intervalos regulares de 15 [min] o de 1 [h]. Hoy en día se la considera como un componente clave en el desarrollo de las redes inteligentes ya que integra componentes de software y hardware, sistemas de gestión, monitorización de datos y contadores inteligentes [55]. Todo esto permite la comunicación bidireccional entre las ESEE, los medidores inteligentes y los consumidores.

De acuerdo con [55], la implementación de sistemas AMI en la red eléctrica brinda muchas ventajas en la operación de la red, como prevenir el uso ilegal de electricidad mediante el análisis de los datos históricos almacenados de los medidores inteligentes, entre otros. Las ventajas de este tipo de sistemas se indican en la figura 3-3.

Este tipo de sistemas añaden un problema importante relacionado con la privacidad y confidencialidad de la información concerniente al consumo energético de los clientes. Terceras personas podrían tener acceso a esta información clasificada creando problemas de ciberseguridad

los cuales deberán ser solucionados por la ESEE. Según [55], se pueden tomar varias medidas de ciberseguridad, a saber: confidencialidad, integridad, autorización y autenticación de los datos intercambiados. Estas medidas pueden ayudar a prevenir algunos de los siguientes ciberataques: escuchas, análisis de tráfico, repetición, modificación de mensajes, suplantación de identidad, denegación de servicio y malware.

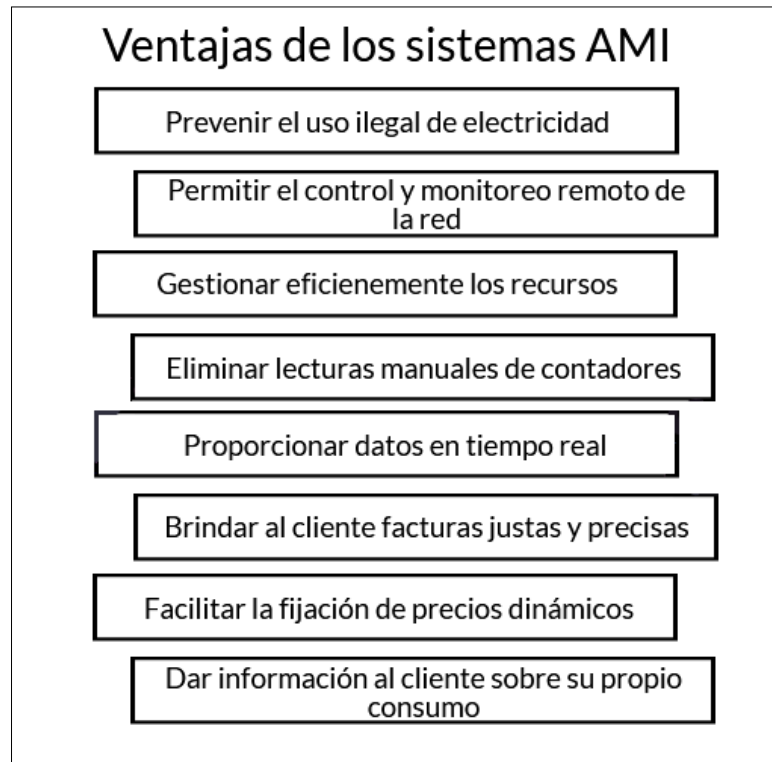


Figura 3-3.- Ventajas de los sistemas de medición AMI.

El uso de contadores de demanda y energía ha estado dominado por medidores electromecánicos (EM) durante la mayor parte del siglo XX. Este tipo de medidores utiliza como método de medición un disco rotatorio que gira de acuerdo a la inducción que le provee la corriente consumida por determinado predio. Con la incursión de los equipos electrónicos en la automatización de todos los ámbitos tecnológicos la estrategia de medición se vio modificada por esta, dando como resultado los medidores de lectura automática (AMR). Estos medidores permiten la recolección automática de datos de consumo, diagnóstico y estado del contador.

De acuerdo con [56], AMI es la versión mejorada de AMR, y sus diferencias se muestran a continuación:

- Los sistemas AMR se comunican mediante canales unidireccionales, mientras que los sistemas AMI se comunican mediante canales bidireccionales.
- Los sistemas AMR solamente transmiten información concerniente al consumo energético mientras que los sistemas AMI abarcan mayor información, como: uso acumulado de energía, uso diario, demanda pico, perfil de voltaje, desconexiones, entre otras.

b) Sistema de gestión de energía

Este tipo de tecnologías ya han sido utilizadas por las ESEE para gestionar la red eléctrica, ya que permiten supervisar, analizar y controlar los sistemas y equipos de la red mediante una serie de sensores, interruptores, controles y algoritmos. Con la irrupción tecnológica que plantea la GDE, no fue difícil generalizar y justificar el uso de los sistemas de gestión de energía (SGE) en el cliente, de tal forma que cada centro de consumo pueda gestionarse así mismo mediante IED a través de la red de comunicación. Con esta mejora se facilita la monitorización de cargas y aparatos individuales necesaria para las estrategias de control de carga, la verificación de la respuesta de control y, el desarrollo y actualización de los modelos de carga. De aquí surge la tecnología HEMS (*Home*

Energy Management System) para gestionar la energía del hogar, BEMS (*Building Energy Management System*) para gestionar la energía desde un edificio o simplemente EMS (*Energy Management System*) para gestionar la energía de cualquier emplazamiento industrial o comercial grande. En la figura 3-4 se muestra un esquema de la arquitectura de un sistema de gestión energética en un cliente residencial.

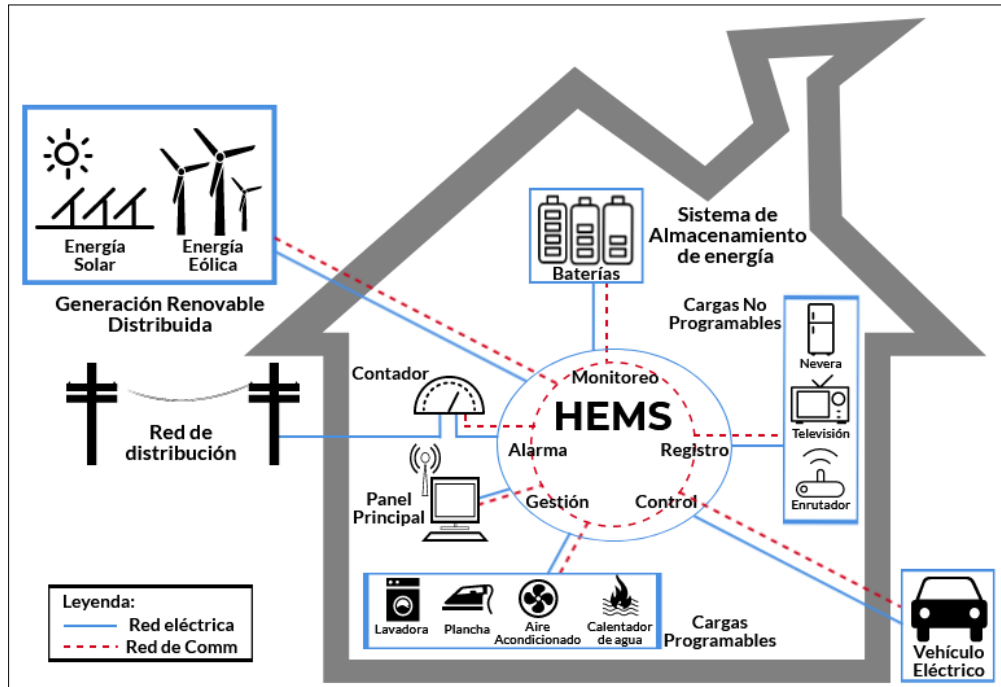


Figura 3-4.- Arquitectura de un sistema de gestión de energía residencial.

De acuerdo con [57], el SGE engloba cualquier producto o servicio que supervise, controle y analice la energía eléctrica. En esta definición se incluye los programas de RD de los servicios públicos residenciales, los servicios de automatización del hogar, la gestión personal de la energía, el análisis y la visualización de datos, la auditoría y los servicios de seguridad relacionados. El objetivo final de estos sistemas es el de reducir el coste energético, conservar la energía, mejorar el nivel de confort de los consumidores, mejorar el rendimiento energético de las instalaciones eléctricas, sean estas redes eléctricas o edificios, mediante el ahorro de energía y la reducción de los picos de demanda, aunque también puede llevar a cabo funciones automatizadas de la RD implicadas en el mercado mayorista.

Las aplicaciones de los SGE en los clientes son una realidad. En [58] se realizó un estudio piloto donde se indica que debido a la introducción de HEMS se provocó una reducción del 9.3% de la energía consumida por los clientes, un total de 2.9 [kW-h] por día.

c) Sistema de información energética

Los sistemas de información energética (SIE) son un alter-ego de los SGE, y de hecho podrían funcionar de forma combinada o independiente. Se utilizan principalmente para recopilar datos y poner a disposición de los usuarios finales y las ESEE la información relacionada con el rendimiento del sistema, en este se podría mostrar al cliente la energía consumida en el periodo de facturación, la energía consumida en tiempo real, la cantidad de energía generada desde las distintas fuentes de generación o el nivel de carga de los dispositivos de almacenamiento, o las condiciones climáticas, la previsión de generación para el día siguiente y los respectivos anuncios de programas de RD disponibles. Además, también pueden permitir la respuesta automatizada a los eventos solicitados por la ESEE o el apoyo para detectar errores, analizar los efectos de los cambios operativos realizados en respuesta a un evento y tomar decisiones.

3.1.1.3 Sistemas de comunicación

La RAE define a la comunicación como *la transmisión de señales mediante un código común al emisor y al receptor*. En este caso lo que se desea es establecer canales de comunicación, ya sean unidireccionales o bidireccionales, que emitan las señales de mercado y de emergencia entre los integrantes que permiten el desarrollo de los distintos programas de GDE como son: el cliente, la ESEE y el ME [52].

Los dispositivos de comunicación bidireccional presentan mayor funcionalidad a la hora de implementar programas de GDE ya que permiten que las empresas ESEE tengan confirmaciones de respuesta de sus clientes. El gran inconveniente al despliegue de redes con equipos bidireccionales es su elevado costo comparado con su homólogo unidireccional. De acuerdo con [52] este sistema de comunicación bidireccional es el más adecuado debido a que permite controlar el número de instalaciones disponibles en el momento de requerir la implantación de algún programa de RD e identificar el nivel de diversidad de carga; además, facilita la liquidación de la facturación o del pago de los incentivos. En las principales ventajas de este método sobre su par unidireccional se pueden citarlas siguientes:

- Controla de una manera más eficiente el número de instalaciones disponibles en el momento de registrarse un evento de RD.
- Identifica el nivel de diversidad de carga.
- Realiza un seguimiento y verificación preciso sobre el impacto de la RD.
- Realiza una mejor liquidación de la facturación o de los pagos de incentivos de los programas al cliente.
- Permite que la ESEE gestione la GD mediante el uso de la RD combinada con otras tecnologías como el AE o el V2G, con el fin de proporcionar servicios auxiliares como la reserva rodante, el control de frecuencia o el apoyo a la tensión.

El tipo de tecnología de comunicación que se elija tiene que ser rentable, debe proporcionar un buen alcance de transmisión, excelentes características de seguridad, ancho de banda, calidad de la energía y con el menor número posible de repeticiones. Además, las arquitecturas de comunicación utilizadas deben permitir la integración de un número cada vez mayor de dispositivos eléctricos inteligentes (IED). En la actualidad, el sistema de comunicación se clasifica principalmente en dos categorías: sistema de comunicación por cable y sistema de comunicación inalámbrico. Además, y de acuerdo con [52], tanto la tecnología de comunicación inalámbrica como la alámbrica deben cumplir con la norma IEC 61850.

a) Sistemas por cable

Este tipo de redes conectan a los usuarios con la ESEE de forma física mediante cables de datos. Este tipo de sistemas presentan ciertas ventajas y desventajas que se señalan en la figura 3-5.

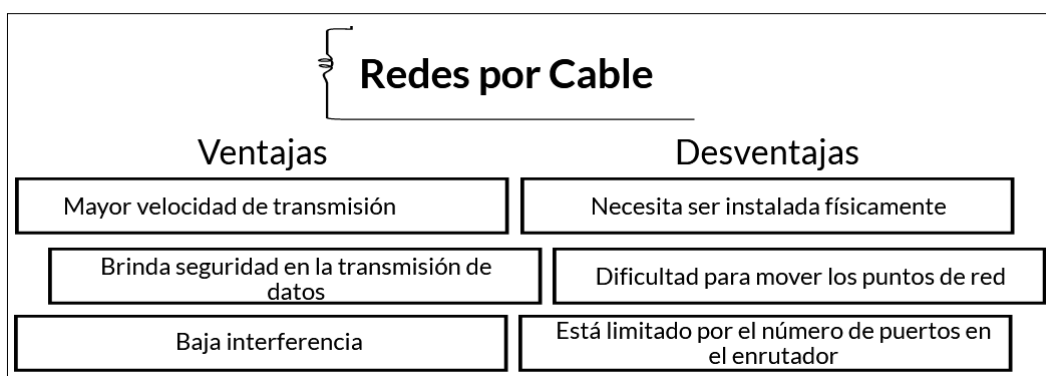


Figura 3-5.- Ventajas y desventajas de las redes de comunicación por cable.

Hay varias tecnologías por cable que se pueden utilizar para establecer enlaces de comunicación entre los usuarios:

- El enlace por medio de **línea eléctrica portadora (PLC)** es la técnica más utilizada y utiliza la red eléctrica como medio para enviar información. Este tipo de tecnología puede adaptarse para el

desarrollo de las redes de área vecinal (NAN) y para las redes de área local (HAN) con la finalidad de cubrir porciones locales y pequeñas de un área específica (hasta cientos de metros). De acuerdo con [52], este tipo de enlace podría brindar una solución idónea en las micro redes inteligentes ya que garantizan robustez y fiabilidad, sin necesidad de nuevas estructuras. Existen dos sub-familias de tecnologías PLC que se puede identificar: de banda estrecha y de banda ancha. Los **PLC de banda estrecha**, caracterizados por un ancho de banda limitado a bajas frecuencias, con una atenuación de muy pocos decibelios por kilómetro, una tasa de bits limitada y una dimensión de paquete larga (comparable al ciclo eléctrico de 20 ms), son adecuados para aplicaciones centralizadas, de baja velocidad y alta latencia, como: la recopilación de datos, la monitorización y el control del consumo eléctrico de los hogares, la programación de la carga y la RD. Los **PLC de banda ancha** son adecuados para las comunicaciones en el hogar ya que funcionan con frecuencias más altas, normalmente de 2 a 30 [MHz], que garantizan tasas de bits más altas pero a una cobertura mucho menor de hasta unos cientos de metros, principalmente debido a la atenuación más severa que acontece en este rango de frecuencias.

- El enlace por medio de **fibra óptica (FO)** es la técnica que utiliza fibras de sílice, cuyo diámetro está en el orden de las micras, como medio para enviar información. Este tipo de tecnología puede adaptarse para el desarrollo de redes de área amplia (WAN) (hasta decenas de kilómetros). Existen dos sub-familias de tecnologías de FO que se puede identificar: monomodo y multimodo. La **FO monomodo** es aquella que posee un solo canal de propagación y generalmente se usan para enlaces cuya distancia física sea mayor a 1 [km]. La **FO multimodo** es aquella que posee varios canales de propagación, generalmente el diámetro de su núcleo es más grande que su homólogo, y se usa para enlaces de corta distancia y/o aplicaciones donde se requiere transferir mensajes con alta potencia.
- El enlace por medio de **línea digital de abonado (DSL)** es la técnica que utiliza la red telefónica de voz como medio de transmisión digital de datos de alta velocidad. La amplia disponibilidad, el bajo coste y el gran ancho de banda de las transmisiones de datos son las razones más importantes para considerar la tecnología DSL como un candidato adecuado para las comunicaciones de los contadores inteligentes a la ESEE.
- Hay una categoría adicional a tomar en cuenta y está conformada por la utilización de uno o más enlaces de comunicación por cable, se denomina a este tipo de conexión como **enlace mixto**. Este tipo de sistema surge de la necesidad de proveer flexibilidad operativa y de costo al sistema sin comprometer la fiabilidad del mismo.

b) Sistemas Inalámbricos

Este tipo de redes conectan a los usuarios no de forma física, sino que se utiliza ondas electromagnéticas para transmitir la información necesaria a la ESEE. Este tipo de arquitectura de comunicación puede ser una opción viable para redes HAN, NAN y WAN, y de acuerdo a [52], obligatoria para el caso de las comunicaciones en tecnologías Vehicle-2-Grid (V2G), además que podrían subsistir varias tecnologías y estándares de comunicación en diferentes partes de la red. La figura 3-6 resume sus ventajas y desventajas.

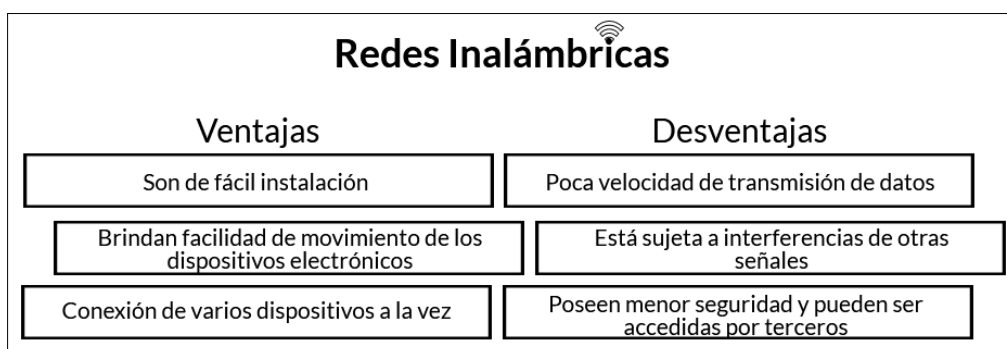


Figura 3-6.- Ventajas y desventajas de las redes inalámbricas.

Hay varias tecnologías inalámbricas que se pueden utilizar para establecer enlaces de comunicación entre los usuarios:

- El enlace por medio de protocolo **Zigbee** consiste en un sistema de alto nivel para zonas de corto alcance, de decenas hasta cientos de metros, y está basado en el estándar IEEE 802.15.4. De acuerdo con [59], este tipo de tecnología es apropiada para ser implementada, tanto entre los equipos inteligentes en redes domésticas como en los contadores inteligentes en redes vecinales, debido a la baja tasa de envío de mensajes, a su topología de red en malla, a los bajos costos de instalación y a lo fácil de su integración.
- El enlace por medio de protocolo **Wireless Fidelity (Wi-Fi)** es un sistema de alto nivel para zonas de corto alcance, de decenas a cientos de metros, y está basado en el estándar IEEE 802.11, este tipo de tecnología es apropiada para ser implementada en los contadores inteligentes tanto en redes domésticas como en redes vecinales debido a su topología en estrella que permite agregar o quitar dispositivos sin afectar el funcionamiento de la red pero a diferencia del protocolo Zigbee, no es una red de bajo consumo.
- El enlace por medio de protocolo **Z-Wave** es un sistema de comunicaciones usado primordialmente en la automatización del hogar, su estructura mallada basada en ondas de radio de baja energía permite establecer la comunicación entre los distintos dispositivos a ser controlado, como: el sistema de iluminación, termostatos inteligentes, equipos de bombeo, entre otros. Este tipo de protocolo aún no ha sido implementados en estrategias de GDE pero surge como competencia para los protocolos Wi-Fi y Zigbee.
- El enlace por medio de **redes celulares** es una red de medio alcance con cobertura de redes WAN, conformada por celdas de radio, las cuales cubren diversas áreas a través de torres de transmisión como GPRS, UMTS o LTE. Las principales ventajas de este tipo de enlace con respecto a los demás son: incrementan la capacidad debido a la reutilización del espectro, mejora la experiencia de uso del cliente, adiciona celdas más pequeñas en sitios urbanos, reduce el uso de energía, brindan mayor cobertura y acceso a internet, y facilidad en el montaje de nuevas torres. Por otro lado, en [60] se propone a las redes 5G como candidato idóneo para llevar a cabo la RD en las redes inteligentes debido a su capacidad de soportar conexiones masivas de máquinas y por la transmisión de datos a una tasa de velocidad muy alta con ultra fiabilidad y baja latencia.
- El enlace por medio de protocolo **Wi-Max** de medio alcance con cobertura de redes WAN, de miles de metros, basada en el estándar IEEE802.16. La principal ventaja de este protocolo es que permite brindar servicios en zonas donde el despliegue de otros métodos de comunicación no justifica los costos de instalación debido a la baja densidad poblacional. Como desventaja se puede citar que este protocolo tiene una velocidad asimétrica, es decir que no se garantiza la misma velocidad de bajada que de subida.
- El enlace por medio de **ondas de radio moduladas por desplazamiento de frecuencia (FSK)** en el espectro de los espacios blancos también pueden representar una opción válida para las redes de comunicación inalámbrica. La migración desde la televisión analógica a la digital ha dejado espacios en blanco en las regiones VHF y UHF que no son utilizados, lo cual brinda un nuevo espacio para el desarrollo de sistemas de comunicación inalámbricos. Estos espacios en el espectro de radiofrecuencia tienen esencialmente un mayor alcance y una mayor fiabilidad de enlace si se comparan con *Wi-Fi*, *ZigBee* y otras señales que operan en la banda de las microondas [61].

3.1.2 Las aplicaciones del Modelo

Cada uno de los actores del modelo tiene su función. Las aplicaciones representan a las tareas que cada uno de esos actores tiene que cumplir, puede ser: reducir al máximo el pico de demanda, automatizar el control del sistema eléctrico del usuario final, minimizar las pérdidas de la red eléctrica, maximizar el confort del usuario, maximizar el uso de la generación distribuida y del almacenamiento energético, entre otras. Por lo tanto, dentro de las restricciones dadas y los objetivos bien definidos, el DSM se convierte en un típico problema de optimización [42].

El perfil de carga de los usuarios depende del comportamiento estocástico de los consumidores y de las condiciones climáticas que los rodean, por lo que desarrollar un algoritmo de optimización que incluya los hábitos de todos los consumidores es altamente desafiante. Así mismo, resulta complicada la elaboración de un algoritmo de previsión generalizado que pueda predecir el consumo de energía de diferentes equipos para

diferentes consumidores [36], mas no es imposible. De acuerdo con [62], para la elaboración del modelo de GDE es necesario tener en cuenta los siguientes criterios:

3.1.2.1 Interacción entre usuarios

Los programas de GDE se diseñan para optimizar la demanda de usuarios, estos pueden ser analizados de la siguiente forma:

- **Usuarios individuales.-** Los usuarios se gestionan individualmente y se manejan de forma separada del resto de clientes. Los clientes comerciales pequeños y residenciales, dado el tamaño de sus cargas, podrían ser analizados como usuarios cooperativos para que en conjunto generen una reducción considerable de carga.
- **Usuarios comunitarios.-** Los usuarios se gestionan de forma comunitaria en función de optimizar una la utilidad compartida. Los clientes industriales y comerciales grandes, dado el tamaño de su carga y de sus posibles reducciones, podrían ser analizados como usuarios individuales.

3.1.2.2 Enfoque de optimización

Otro criterio a tener en cuenta viene en función de las técnicas de optimización que se utilizan para el desarrollo de los algoritmos de control de los programas de GDE. Hay una amplia bibliografía que analiza las diferentes estrategias de optimización, de acuerdo con [63] estas pueden tener los siguientes enfoques:

- **Determinista.-** En este enfoque los parámetros se definen como datos deterministas.
- **Estocástico.-** En este enfoque los parámetros se definen como datos o restricciones aleatorias. Para resolver este tipo de problemas es necesario realizar suposiciones estructurales como límites en el tamaño de los espacios de decisión y de resultados.

3.1.2.3 Escala de tiempo

La ejecución de los algoritmos de control de los programas de GDE puede clasificarse en función de la escala temporal utilizada para gestionar los recursos de los clientes, estos son:

- **Esquema a un día vista.-** En este esquema el plan de operación de los recursos eléctricos de los usuarios se define para el siguiente periodo de 24 horas, para ello los mecanismos de GDE requieren predicciones/estimaciones de algunos parámetros del sistema.
- **Esquema en tiempo real.-** En este esquema el plan de los usuarios se define en función de los eventos y datos en tiempo real.

3.1.2.4 Restricciones del modelo

Dado que la GDE se resume como un problema de optimización [42], es necesario identificar cuáles son las posibles restricciones a las que el modelo se enfrenta con la finalidad de poder modelarlas en el algoritmo de optimización. A continuación se detallan las restricciones más importantes, si bien estas variarían de acuerdo al sistema a controlar.

- Balance entre la oferta y la demanda de electricidad, donde se incluye la potencia de la batería si la hubiere y la potencia de las cargas desplazables y no desplazables.
- Limitación de temperatura para las cargas controlables por termostato de tal forma que esta se mantenga en un rango predeterminado en los periodos de alta demanda.
- Limitaciones de batería que permitan que el nivel de carga de la batería permanezca en el valor recomendado por el cliente o por el fabricante.
- Limitaciones de carga y descarga de vehículos eléctricos (VE). Es fundamental que se controle el acceso de los vehículos eléctricos en la fase de carga y que no carguen todos al mismo tiempo, sino que accedan de forma escalonada; todo ello con el fin de evitar un posible pico de consumo debido a la carga de los vehículos eléctricos. Lo mismo para la descarga de los mismos cuando sirvan como

fuentes de electricidad.

- Limitaciones de seguridad eléctrica que limiten el intercambio de energía entre el usuario y la red a un valor tope predefinido en cada franja horaria.
- Limitaciones de tiempo para terminar una tarea que impongan un límite superior a la energía total asignada en cualquier franja horaria, la cual debe ser siempre inferior a la energía máxima de la red.
- Operación ordenada de aparatos que garantice el orden de funcionamiento de los mismos y, de tal forma que las cargas desplazables funciones en una secuencia dada si fuera necesario.

3.1.2.5 Nivel de aplicación

De acuerdo con [20], se puede distinguir de entre dos niveles de aplicación de los programas de GDE, estos son:

- **Nivel I.-** En este nivel, la ESEE implementa programas con la finalidad de cumplir con los objetivos propuestos sobre la forma de curva de carga a través de los programas clásicos de RD pero sin incluir la participación directa del mercado en ellos. En este nivel se puede destacar la aplicación de programas a clientes individuales y a grupos de clientes.
- **Nivel II.-** En este nivel, la ESEE implementa programas complementarios entre sí con la finalidad de obtener el máximo provecho de cada una de las estrategias de GDE. Entre ellos se puede citar: tecnologías de almacenamiento energético, generación distribuida, técnicas de respuesta de la demanda de mercado, entre otras. En este nivel se puede destacar la aplicación de programas a nivel de la red, o a nivel de mercado.

Tanto la Gestión de la energía eléctrica desde el lado de suministro como desde el lado de la demanda se reducen a situaciones que necesitan ser resueltas mediante técnicas de optimización matemática, siendo este el corazón de la mayoría de los procesos que guían a la automatización eficiente de los sistemas. Un cambio de paradigma de la forma en cómo se gestiona la red no implica el escoger desde que sector de la red lo vamos a hacer. Sería impensable gestionar la red solo desde el lado de la demanda y no desde el lado del suministro, pero lo mismo se puede decir para la recíproca de dicha proposición; es impensable la gestión de la red solo desde el lado de la oferta y no del de la demanda. Y si bien esta última es la habitual, las pérdidas detrás de dicha gestión pueden ser muy elevadas (3.730 [TW-h] en el año 2020). Introducir la GDE a la gestión tradicional puede reducir dichas pérdidas, y más aún si se trabaja de forma conjunta con técnicas de Generación Distribuida y Almacenamiento Energético.

3.2 El papel de las ESEE

Con *Empresa de servicios de energía eléctrica (ESEE)* se refiere a todas las empresas que están relacionadas con el sector eléctrico, como los operadores de red o las comercializadoras, si bien cabe recalcar que es responsabilidad de los operadores del sistema de distribución (DSO) la elaboración de los programas de GDE que se implantaran en sus áreas de concesión [64]. El desarrollo de este tipo de programas incurre en un proceso de tomar un programa desde su concepción, hacerlo operativo y efectivo para el cliente, y continuar operándolo de manera que responda al cliente, y su implementación requiere la ampliación de la gama de servicios de marketing y de energía que ofrece la ESEE.

Los programas de GDE, a pesar de ser similares a otros servicios provistos por la ESEE, implican la comercialización de conceptos, productos o servicios que históricamente no han sido ofrecidos por estas, por lo que el personal responsable de la aplicación de los programas suele encontrarse ante un nuevo entorno de trabajo. Hay que tener en cuenta que cada ESEE y cada programa requerirán distintos niveles de esfuerzo en la aplicación de los mismos, desde un proceso simplificado y racionalizado hasta un proceso exhaustivo que no deje ninguna piedra sin remover. Los criterios utilizados para determinar el nivel de esfuerzo empleado son, en primer lugar, los recursos disponibles y la naturaleza del programa que se ejecuta. Las necesidades específicas de la DSO y la correspondencia de estas necesidades con los recursos disponibles de la empresa determinarán el nivel de esfuerzo que es necesario aplicar [65].

Dentro de los objetivos de este trabajo no está un análisis de la planificación de los programas de GDE, si bien en los siguientes apartados se presentan factores importantes a tener en cuenta por la ESEE antes de la

creación de sus propios programas.

3.2.1 Conocer al cliente

De acuerdo con [45], la GDE implica un cambio en el paradigma de la operación de la red eléctrica donde se busca centrar la gestión de la energía eléctrica en el cliente o en su defecto, brindar holgura a la operación de la red añadiendo capacidad de control de carga en el lado del usuario. Para lograr este cometido y que la GDE surja como una solución real es necesario que las ESEE tomen en consideración de forma contundente la importancia del cliente.

Por definición el cliente es el actor central del modelo conceptual de GDE aunque este no sabe que lo es. Poniendo el caso hipotético donde los clientes acuerden unánimemente a no inscribirse en los programas de gestión de la demanda, la aplicación de los programas sería inútil ya que no se cumpliría con los objetivos del programa en sí. Por lo tanto, el grado de éxito o fracaso de la aplicación de los programas de GDE depende del grado de aceptación que tenga. Por consiguiente, si el cliente es fundamental en el desarrollo de los planes de GDE, la ESEE tendrá que convencerlo de inscribirse en los programas a través de beneficios como precios preferenciales por el consumo de energía o mediante incentivos económicos ya que sin ellos el cliente no va a sacrificar su comodidad para un “beneficio” que no le genera bienestar sino todo lo contrario.

Si para la ESEE la implementación de los programas de GDE es una tarea nueva, lo es de la misma forma para el cliente. Lograr que el cliente se adhiera a los programas requiere que estos previamente sean educados y capacitados sobre las ventajas que los programas aportarán a sus vidas, sean estos motivos económicos, o de conciencia social o ambiental; solo así la inscripción en los programas será efectiva. Es fundamental que la ESEE eduque a su cliente pero también es su responsabilidad proveer un servicio que satisfaga tanto las necesidades como el presupuesto del cliente. Se agradece que la TSO procure el menor coste operativo en la operación de la red, pero en el caso de la GDE la DSO debería incluir también la comodidad y conveniencia del cliente.

Clientes diferentes tienen costumbres diferentes, por ende sus patrones de consumo serán también diferentes, en consecuencia los programas de GDE tendrán que ser lo suficientemente variados para el universo de clientes. Es fundamental que la DSO haga un verdadero estudio, con una muestra que sea concluyente, y así determine la forma en la que puede satisfacer las necesidades del cliente basado en sus objetivos y capacidad, y no al revés.

Como punto final, todos los programas deben estar coordinados de tal forma que sean claros de entender y que no confundan al cliente, o peor aún, que el cliente se sienta estafado debido a información incompleta en los mismos, esto solo disminuirá la intención del cliente de agregarse a los programas de GDE. Hay varios estudios que determinan que para que la aplicación de los programas de DR sea efectiva es necesario que una parte importante de la población participe en ellos sino el coste de inversión va a ser muy alto como para sacar el proyecto a flote.

3.2.2 Los perfiles de carga y la curva de carga objetivo

La implementación de programas de GDE depende de una variedad de factores como el perfil de carga de los aparatos, la categorización de la carga, categorización de consumidores, la curva de carga de la red y por supuesto, de una curva de carga objetivo, entre otros. Todos ellos surgen de un exhaustivo estudio al consumidor, siendo estos factores una forma de cuantificar al cliente. Por un lado, los perfiles de carga de los distintos aparatos eléctricos ofrecen una idea específica sobre los patrones de carga de los consumidores y, mediante algoritmos de gestión de carga adecuados, podrían servir para minimizar el coste de energía y gestionar los recursos de forma precisa y eficiente. Hay dos formas de obtener los perfiles de carga, una es utilizando contadores inteligentes y la otra es a través de encuestas a los consumidores. En la figura 3-7 se muestran la curva de carga típica de un refrigerador y un acondicionador de aire.

La curva de carga es la superposición de la energía usada por todas las cargas del sistema durante cada segundo o cada minuto, es decir que el aporte temporal de las cargas es lo que queremos controlar con los planes de GDE, y dentro de este escenario las cargas pueden ser categorizadas en función de su importancia y utilidad. Por lo tanto, dentro de las restricciones dadas y la curva de carga objetivo, la GDE puede ser tratada como un problema de optimización.

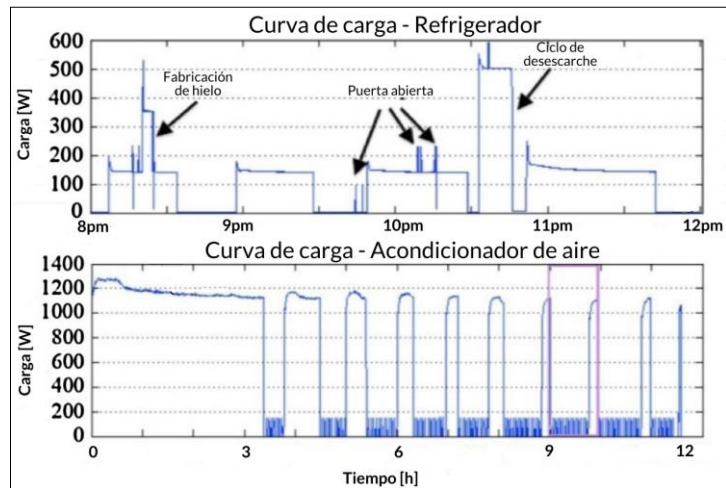


Figura 3-7.- Perfil de carga de un refrigerador y un acondicionador de aire en un cliente residencial.

Fuente: (Imagen adaptada de Sharda et. al., 2020) [42]

3.2.3 Tipos de cargas

Es importante, para la optimización de los programas de GDE, agrupar los equipos de forma adecuada en función de las necesidades que suplen o el comportamiento que tienen. Los equipos, en función de su capacidad de participar en programas de GDE, se pueden dividir en los siguientes grupos [42] (Ver figura 3-8):

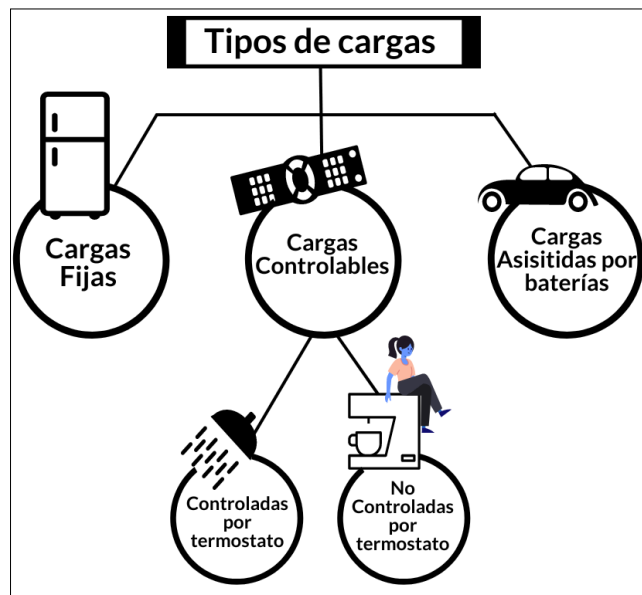


Figura 3-8.- Tipos de cargas eléctricas según la GDE.

- **Cargas fijas.-** Son todas aquellas que no pueden participar en los programas de RD debido a que son esenciales en el desarrollo de las actividades de los clientes como por ejemplo: el sistema de iluminación principal de la casa, equipos de ventilación, la estufa, la televisión, el ordenador, dispositivos que brinden acceso a internet, entre otros. En [42] se presenta una tabla donde se categoriza diferentes equipos domésticos de acuerdo al tipo de carga que pertenece. Además, se incluye como dato curioso que solamente el 28% de las cargas residenciales pertenecen a esta categoría por lo que se puede intuir un gran potencial de reducción de carga mediante programas de RD.
- **Cargas asistidas por baterías.-** Son todas aquellas cargas que pueden ser desplazadas o diferidas debido a que poseen un dispositivo de almacenamiento energético incluido, por ejemplo: vehículos eléctricos, sistemas de almacenamiento eléctrico por baterías, entre otros. Bajo este principio, con

una capacidad suficiente de generación y almacenamiento, todas las cargas podrían ser desplazables. Bajo este principio es posible desarrollar edificios cuyo balance energético sea cero.

- **Cargas reducibles.-** Son todas aquellas cargas que pueden ser reducidas mientras se encuentran operando, además esta característica las hace ser consideradas como posibles participantes activos de la GDE. Este tipo de cargas se clasifican en dos categorías:
 - **Controlables por termostato.-** Se refiere a las cargas que utilizan almacenamiento térmico aprovechando su inercia térmica; en esta categoría se incluyen los calentadores de agua y sistemas de climatización. Dado que estos equipos usualmente manejan potencias de operación grandes, contribuyen aproximadamente al 60% de la factura de electricidad.
 - **No controlables por termostato.-** También se las conoce como cargas desplazables debido a que, al no ser cargas importantes, se puede aplazar su uso a un momento posterior. En este tipo de cargas se incluyen: lavavajillas, lavadora y secadora de ropa, entre otros.

3.2.4 Posibilidad de integración con tecnologías emergentes.

En la actualidad el sector eléctrico se encuentra en una constante transformación desde una operación centralizada a una más distribuida y flexible. El desarrollo tecnológico de las dos últimas décadas ha originado el acoplamiento entre varios tipos de tecnologías emergentes que, sin ser creadas originalmente como complementarias, hoy lo son ya que los beneficios de una son potenciados por los beneficios de otra. Las principales tecnologías emergentes en el sector eléctrico son:

- Generación Distribuida
- Almacenamiento energético

De acuerdo al DOE, la **Generación Distribuida (GD)** define a la actividad de generar energía eléctrica mediante una variedad de pequeñas fuentes de generación que se instalan cerca de los puntos de consumo, generalmente se trata de fuentes renovables pero el uso no se restringe a ellas.

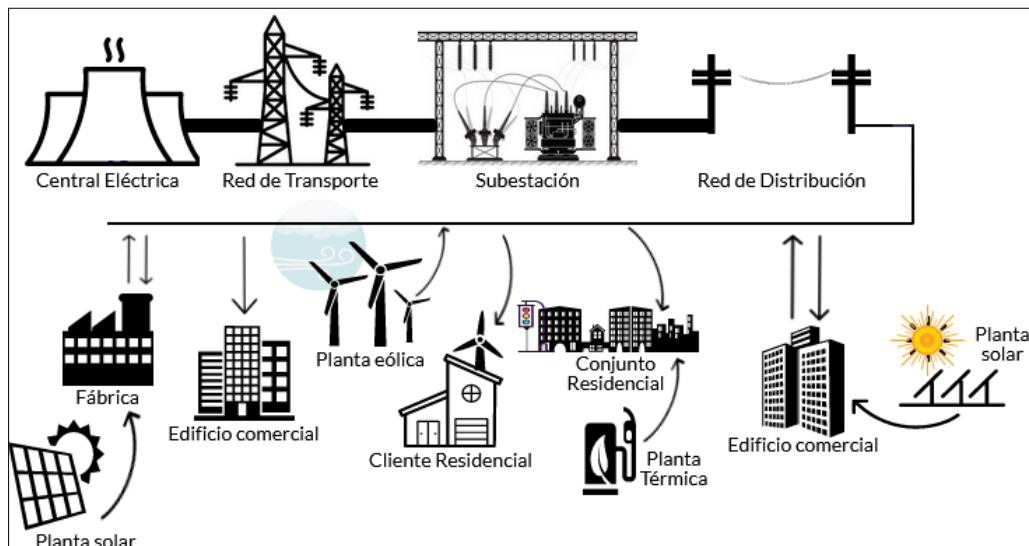


Figura 3-9.- La GD en la red eléctrica.

Pueden servir de forma individual a un cliente residencial o comercial pequeño, o pueden estar conectados a una micro-red perteneciente a un cliente comercial grande o industrial. Además, también pueden conectarse a las líneas de distribución de baja tensión y así, suministrar de energía limpia y fiable a los clientes. Una de las principales ventajas de este tipo de tecnología es que permite la reducción de las pérdidas en las líneas de transmisión y distribución. En la figura 3-9 se indica un esquema del aporte de la GD en la red.

El concepto de RD, muy a grosso modo, busca reducir la demanda del cliente cuando este se encuentra conectado a la red; en ausencia de demanda de electricidad no tendría sentido gestionarla desde el punto de vista del sistema eléctrico. La importancia de la GD para la RD se basa en la idea de que si un cliente está en

la capacidad de autoabastecerse por medio de GD sin necesidad de estar inscrito en un plan de RD, estaría indirectamente aportando a la reducción de la demanda total del sistema.

Hay un número considerable de estudios que validan la idea de que la GD y la RD trabajan simbióticamente juntas. Por ejemplo:

- En [66] se demuestra que los programas de RD, como las señales de precios en tiempo real, sirven para suavizar las fluctuaciones que la operación de plantas de GD ocasionan en la red.
- En [67] se utiliza un algoritmo para determinar la asignación óptima de unidades de GD en un sistema de transmisión basado en confiabilidad. Según los resultados, al incluir en las simulaciones modelos de programas de RD, se concluye que se puede conseguir un funcionamiento más fiable de los sistemas de energía en presencia tanto de la RD como de las unidades de GD colocadas de forma óptima, además la integración de la RD y la GD puede conducir a una condición operativa más económica.
- En [68] se modela una micro-red inteligente para estudiar la estrategia de programación óptima de unidades de GD, teniendo en cuenta la RDBP, a través de optimización económica de la operación del sistema. Se obtiene como resultado que al optimizar el funcionamiento de la micro-red con RD se puede reducir eficazmente el coste de funcionamiento y mejorar la tasa de utilización de las fuentes de GD renovable.

La Comisión Europea define al **almacenamiento energético (AE)** como el acto de diferir una cantidad de la energía generada hasta el momento de su utilización, ya sea como energía final o convertida en otro vector energético, con la finalidad de ofrecer una opción para suministrar energía cuando se necesite sin tener que recurrir necesariamente a vectores energéticos de origen fósil. Al mismo tiempo, el AE permite integrar mayores cuotas de GD debido a que reduce la inestabilidad de la generación renovable, contribuyendo así al desarrollo y la descarbonización de todo el sistema energético. En los últimos años se ha desarrollado estrategias basadas en el almacenamiento energético (AE), de tal forma que estas puedan ser utilizadas para reducir las fluctuaciones que las fuentes de energía renovable producen, además son útiles para mejorar el desequilibrio entre las cargas, la calidad de la energía, la confiabilidad del suministro y que los recursos generados brinden mayor estabilidad en la red [69].

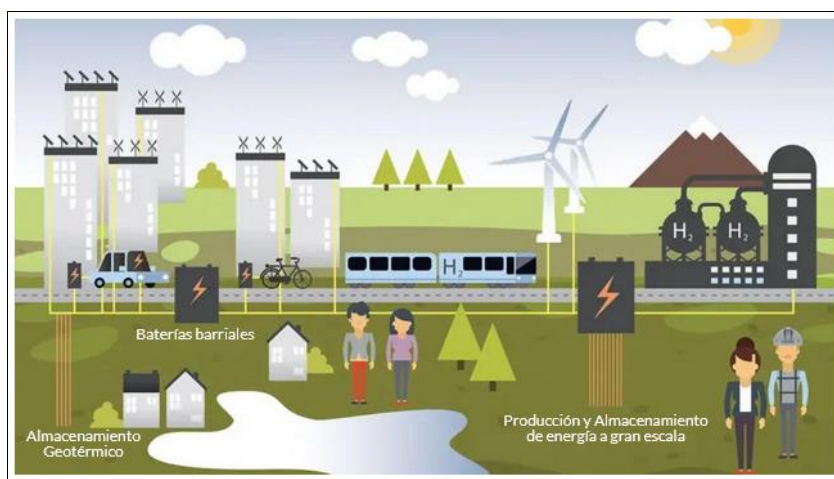


Figura 3-10.- El almacenamiento energético en las redes eléctricas.

Fuente: Adaptado del reporte “Urban Energy” del año 2019 de SWECO.

Una de las características distintivas del sector de la energía eléctrica es que la cantidad de electricidad que puede generarse es relativamente fija en períodos cortos de tiempo. Aunque la demanda fluctúa constantemente a lo largo del día, el AE nace como una solución a este desbalance entre oferta y demanda. Los dispositivos de AE gestionan la cantidad de energía necesaria para abastecer a los clientes en los momentos de mayor necesidad, usualmente ubicados durante los picos de carga. Siendo estrategia de la RD disminuir los picos de carga, los programas optimizarían el consumo energético de cada cliente aprovechando toda la energía almacenada en el dispositivo. Estos dispositivos también pueden ayudar a que la energía renovable, cuya producción de energía no puede ser controlada por los operadores de la red, sea

suave y despachable, en la figura 3-10 se muestra una representación de cómo se aprovecharía el AE en la red.

Hay un número considerable de estudios que validan la idea de que el AE, la RD y la GD trabajan simbióticamente juntas. Por ejemplo:

- En [70] se presenta un novedoso estudio para gestionar la carga residencial basado en un análisis de minería de datos de los patrones de consumo de cliente, e incluyendo el despliegue de sistemas de almacenamiento de energía con la finalidad de reducir el coste energético y mejorar el rendimiento del modelo de RD propuesto. Se demostró que el coste de la energía disminuye en aproximadamente un 19% mediante la RD propuesta sin que esto represente en ningún coste adicional ni disminución de la comodidad de los clientes.
- En [71] se propone un mecanismo para equilibrar la oferta/demanda de la red eléctrica mediante los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) a través de un método de RD que combina el almacenamiento activo de energía fría (ACES) con el ajuste global de temperatura (GTA). Como resultado se obtuvo una reducción en los picos de carga con poco impacto en el confort térmico de los clientes, además que la tasa de ahorro comparada con el método convencional alcanza el 7,02%.

3.3 El papel del mercado

De acuerdo con [18], la GDE es un concepto complicado de entender debido a que puede ser visto tanto desde el punto de vista técnico como del económico, y aunque su naturaleza dinámica se percibe de forma estática, es una alternativa en forma de nueva capacidad en el lado de la oferta que se traduce como el beneficio debido a un costo evitado para esta nueva capacidad. Actualmente a esta idea se la define como Nega-Watio y básicamente se resume como una unidad de potencia ahorrada. Bajo este paradigma se implica al ME dentro de las actividades que desarrolla la GDE, por mucho o poco que este se encuentre liberalizado.

El concepto de mercados eléctricos, en un principio, puede ser complicado de comprender y más si se vienen de un entorno técnico de ingeniería. En contexto general [63], los ME se dividen en:

- **Mercados minoristas**, en donde los minoristas de electricidad contratan el suministro de electricidad con los usuarios finales, y
- **Mercados mayoristas**, en los que minoristas, proveedores, productores, operadores de red y agregadores interactúan para permitir a los minoristas suministrar el servicio eléctrico a sus clientes de acuerdo a estándares de calidad. El mercado mayorista de la electricidad (MME), a su vez, se divide en:
 - Mercado de energía.
 - Mercado de capacidad.
 - Mercado de servicios auxiliares.

Todos ellos concebidos para ofrecer incentivos económicos a las distintas partes interesadas para que contribuyan al suministro de energía y, al funcionamiento y la integridad de la red. La RD está asociada a todos los tipos de MME.

Dependiendo del país, los contratos entre los actores del mercado pueden realizarse a través de operaciones bilaterales o a través de un mercado organizado. En ambos casos, los productos pueden negociarse en el mercado al contado, ya sea con un día de antelación y/o intradiario, o en el mercado al contado gestionado por el ESEE para los mercados de servicios auxiliares. Una vez que un proveedor de recursos se compromete a suministrar una determinada cantidad de energía a la red, se espera su obligado cumplimiento; de lo contrario, se incurre en una penalización. Por lo tanto, es muy importante que los agregadores de RD se aseguren de que los usuarios finales se comprometan y proporcionen la flexibilidad energética que previamente fue pactada.

En [72] se plantea el modelo conceptual de la RD donde el mercado eléctrico toma el rol principal del modelo. Para ello, se implementan los programas de RD mediante una estructura multinivel donde los

principales actores son:

- Los generadores o fuentes de energía renovable.
- Los agregadores o minoristas.
- El operador del sistema.

Los agregadores de carga y los generadores presentan sus ofertas a la operadora del sistema, que resuelve el problema de compensación del mercado e informa de la energía y los precios de compensación tanto a los generadores como a los agregadores. En la figura 3-11 se muestra la implementación de la RD en un sistema eléctrico multinivel en donde:

- La RD para un solo cliente u multihogar requiere la información del precio de la electricidad previsto por el agregador.
- La RD multihogar se implementa tomando la información de precios del agregador, donde los usuarios se coordinan para alcanzar el objetivo global como la minimización del factor de cresta (PAR).
- La RD integrada en la red es un problema a nivel del agregador en el que se espera que el este minimice el coste de las compras de energía en el MEM, las pérdidas de la red y el riesgo asociado.
- En la RD integrada al mercado, los agregadores de carga y los generadores presentan ofertas de RD a la Operadora, la cual resuelve el problema de compensación e informa del volumen y el precio de la RD compensada a los agregadores y generadores.

Se pasa a describir cuales son los principales actores del ME y el papel de los distintos mercados en relación a la GDE.

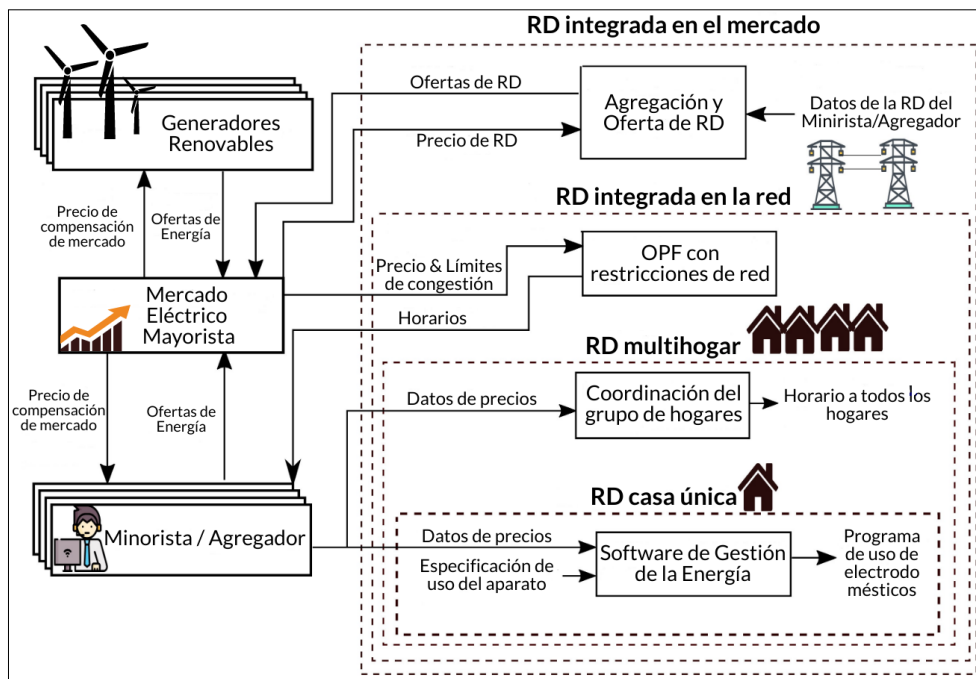


Figura 3-11.- Implementación de la RD en múltiples niveles del sistema eléctrico.

Fuente: (Imagen adaptada de Patnam et. al., 2020) [72]

3.3.1 Los actores del Mercado Eléctrico

Los principales actores del ME son los siguientes:

3.3.1.1 Los operadores de red

El operador del sistema de transporte (TSO) es un facilitador de los mercados que asegura que cada comercio

cumple con las restricciones de la red. Además, suelen gestionar los mercados de servicios auxiliares. Los TSO y los operadores de sistemas de distribución (DSO) pueden comprar o vender productos en todos los mercados.

3.3.1.2 Productores

Producen electricidad y proponen su producción a un precio determinado en los mercados mayoristas. Sus productos pueden ser sólo energía y/o servicios de red como respuesta a la frecuencia.

3.3.1.3 Responsables de equilibrio (RE)

Son los encargados de equilibrar la cartera de sus clientes (minoristas/proveedores). Compran la producción o el consumo de electricidad en el mercado mayorista.

3.3.1.4 Agregadores o proveedores de servicio

Agregan a los clientes finales o a los pequeños productores para alcanzar la capacidad mínima permitida para ofrecer productos de flexibilidad en el mercado de la energía y los servicios auxiliares. Por lo tanto, tienen contratos directos con los clientes finales y ofrecen su flexibilidad agregada a los proveedores o a los RE en el mercado mayorista.

3.3.1.5 Los minoristas y proveedores

Participan tanto en el mercado minorista como en el mayorista, y se aseguran de que la cantidad de energía comprada en el mercado mayorista equilibre el consumo de sus usuarios finales en su cartera. Para lograr este equilibrio, pueden subcontratar a los responsables del equilibrio (RE) o gestionar ellos mismos su cartera. Pueden proponer a los clientes finales contratos particulares como tarifas planas o programas de RD. Cuando proponen programas de RD, el reto para los proveedores es evaluar cómo afectarán estos programas al consumo de su cartera. En cuanto a los minoristas/proveedores, deben asegurarse de que los clientes finales se comprometan con la flexibilidad negociada en el mercado mayorista.

3.3.1.6 Los clientes finales

Son los que compran la electricidad a un proveedor. Cuando se suscriben a un programa de RD, pueden responder manualmente a una solicitud o a un precio, o automáticamente a través de un sistema de gestión de la energía en el hogar.

3.3.2 Las aplicaciones del Mercado Eléctrico en los programas de GDE

3.3.2.1 Mercados de Capacidad

En estos mercados a largo plazo, los reguladores se aseguran de que la capacidad de producción de los años siguientes satisfaga la evolución de la demanda. Los productos de RD rara vez se intercambian en estos mercados.

3.3.2.2 Mercados de Energía

Son los principales mercados que permiten a los minoristas comprar electricidad a los productores de electricidad. En estos mercados, se suele exigir a los minoristas o proveedores que mantengan una cartera equilibrada en cada intervalo de tiempo del mercado, con tanto consumo de electricidad como producción de electricidad, para mantener la frecuencia de la red en su nivel nominal. La RD es un producto particular que se intercambia en este mercado para permitir a los proveedores ajustar su demanda y mantener el equilibrio en cada intervalo de tiempo.

3.3.2.3 Mercados de Servicios Auxiliares

La electricidad puede considerarse como un producto transportado por la red eléctrica que debe satisfacer

características y requisitos contractuales. El operador de la red eléctrica es responsable de que se cumplan estos requisitos, a cambio de una remuneración. La regulación de la red eléctrica puede resumirse en el control de la frecuencia de la red, de la tensión en cada nodo de la red, de la calidad de la energía (armónicos, parpadeos, etc.), y también en el control de los minutos de inactividad por cliente al año. Para garantizar la prestación de estos controles, el Operador del Sistema se asegura de que una parte de los productores y consumidores contribuyan a estos servicios, ya sea ofreciendo incentivos basados en el mercado o estableciendo requisitos obligatorios.

Estos servicios se denominan servicios auxiliares. Pueden distinguirse mercados de servicios auxiliares específicos en función del tipo de producto que se requiera. De acuerdo con [73], el operador del mercado energético australiano facilita actualmente ocho mercados distintos que pueden clasificarse en mercados de servicios auxiliares de control de frecuencia, mercados de servicios auxiliares de control de red o en la categoría de mercados de servicios auxiliares de reanudación del sistema. La RD puede contribuir principalmente a dos de estos servicios, que son el control de la frecuencia, a escala nacional, y el control de la tensión, a nivel local. De hecho, aunque en la práctica actual la RD se asocia principalmente con el control de la frecuencia, también podría proporcionar apoyo local a la tensión, ya que implica activos que están potencialmente disponibles en cada nodo de la red.

3.3.3 Participación de los clientes en el ME

De acuerdo a [72], y como se destacó en el capítulo 2, la participación de los usuarios en los mercados eléctricos puede realizarse a través de las siguientes formas:

- Un *sistema de tarificación diferenciado* que penalice la demanda en periodos de alto consumo.
- Un *sistema de incentivos* donde se motive el consumo de electricidad en los periodos de bajo consumo.
- O ambos.

Ajustar la demanda en respuesta a señales de precio o de incentivo determinará la acogida de los programas de GDE por el lado del cliente además que se mejorará significativamente la eficiencia del mercado. Es importante que los precios y los incentivos sean atractivos para el cliente, en la figura 3-12 se muestra una serie de recomendaciones a tener en cuenta en la implementación de precios e incentivos para atraer a los clientes a optar por los distintos planes de la GDE.

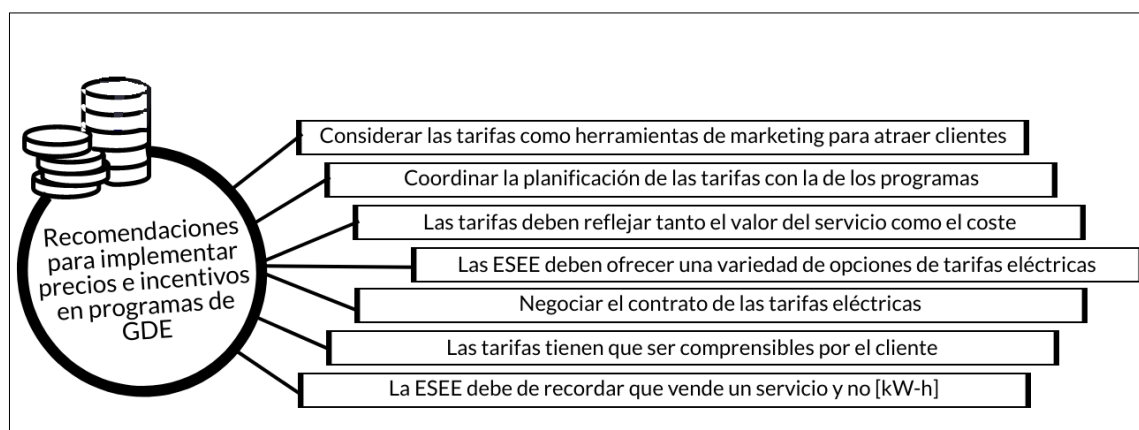


Figura 3-12.- Recomendaciones para implementar precios e incentivos en programas de GDE.

3.3.4 El poder de mercado

Cuando hablamos de mercados energéticos usualmente se tiende a asumir que ningún participante del mercado tiene la habilidad de influenciar el precio a través de acciones individuales, esta asunción es válida siempre y cuando el número de participantes sea grande y ninguno de ellos controla una gran proporción de la producción o del consumo. Bajo estas circunstancias, cualquier productor que pida un precio mayor al que se ofrece en el mercado o cualquier consumidor que ofrezca menos al precio pactado será ignorado debido a que otros pueden reemplazar su contribución en el mercado. Por ende, el precio se fija por las interacciones

entre los compradores y los vendedores agrupados. Un mercado donde todos los participantes actúan como fijadores de precio se considera como de competencia perfecta. Aproximarse a una competencia perfecta es el objetivo deseable de todo mercado desde una perspectiva global ya que asegura que el costo marginal de producción es igual al valor marginal del bien que consume el cliente, esta situación propicia un comportamiento eficiente en ambos lados del mercado.

Por el contrario, cuando algunos productores y algunos consumidores controlan una gran parte del mercado energético podrían repercutir de tal forma que ejerzan su poder en el mercado dando lugar a una competencia imperfecta, a estos participantes usualmente se les da el nombre de jugadores estratégicos ya que pueden manipular los precios de tal forma que se altera de manera rentable los precios con respecto a su nivel competitivo, ya sea reteniendo productos, subiendo el precio, bajando el precio para eliminar a la competencia o persuadiendo la entrada de nuevos productores.

Los ME reúnen varias características que lo hace vulnerables al ejercicio del poder de mercado. De acuerdo con [74], en la Europa de los 15, la concentración en generación de las tres mayores compañías se sitúan por encima del 60% en 10 de los 15 mercados clasificados de acuerdo a su capacidad instalada, mientras que en el suministro y la comercialización por número de clientes estas mismas cuotas se extienden a doce países. También es interesante destacar, de cara al futuro, que más de dos tercios del mercado europeo se concentra en ocho grandes empresas. En el año 2007, la *Energy Sector Inquiry* publicada por la Dirección General de Competencia de la Comisión Europea [75], aportó evidencia sobre el ejercicio de poder de mercado en varios países europeos. De acuerdo con [76], “un caso de ejercicio de poder de mercado en los mercados de generación de electricidad lo aporta la investigación abierta contra E.ON por abuso de posición dominante (Violación del artículo 102 del Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea, MEMO/06/483)”.

Los mecanismos de respuesta al precio permiten una disminución de la demanda cuando los precios de compensación del mercado aumentan, evitando así la posibilidad de que el proveedor ejerza su poder de mercado, aumentando el número de proveedores en el mercado, reduciendo la concentración y dificultando la colusión [52].

3.4 El papel de la red eléctrica

El papel de la red eléctrica, en general, ante cualquier programa de GDE es de un carácter reactivo ya que solamente responde al crecimiento o reducción de carga originado por cada uno de los objetivos de modificación de la forma de la curva de carga. Los programas que promuevan una reducción de la demanda eléctrica generaran mayor holgura en las redes de distribución, y por efecto de superposición, también lo harán en las redes de transporte. Por el contrario, los programas que promuevan un aumento de la demanda eléctrica requerirán mayor capacidad de las redes de distribución y, por ende, de las redes de transmisión. La red eléctrica responde a la GDE más sigue siendo responsabilidad de los operadores el correcto funcionamiento de las distintas redes eléctricas una vez implementados los programas de GDE. En todo caso, es recomendable que la red eléctrica también sea sujeto de estudio dentro de la aplicación de los planes de GDE, especialmente los planes orientados a la conservación energética, a través de la mejora de los esquemas de explotación de la red, o en el recambio de equipos por unos de mayor eficiencia.

3.5 El papel del cliente

Sin duda el papel del cliente es el de participar activamente en los programas de GDE. A continuación se profundiza en distintos aspectos intrínsecos que permitirían a la ESEE conocer más a este importante actor.

3.5.1 Psicología del cliente

Indudablemente la forma en cómo percibe la energía el operador de la red es diferente a como la percibe el cliente. Para el primero se tratan de kilovatios-hora pero para el segundo se trata de comodidad, el cliente no compra energía sino que compra un estándar de vida. Por definición, la GDE limita este “estándar de vida” al intentar reducir la demanda individual de los clientes, ¿Por qué los clientes se registrarían en programas que limiten su confort?

Desde el punto de vista psicológico los programas de GDE funcionan como un juego donde los clientes son estimulados con una recompensa cuando hacen lo que se les pide pero cuando no son castigados. De acuerdo

con [77], la recompensa y el castigo son dos políticas fundamentales que se emplean para estimular comportamientos específicos en individuos o en grupos de consumidores. Además la teoría de interdependencia dice que los incentivos y desincentivos son herramientas efectivas para resolver dilemas sociales y reducir discrepancias entre el beneficio personal y el beneficio colectivo. Los incentivos o desincentivos económicos pudieran también provocar la reacción psicológica contraria cuando estos son percibidos como intrusivos o controladores, y esto se debe a que son una señal de desconfianza [78] y al hecho de que los consumidores los perciben como una amenaza para la libertad personal.

Como conclusión, en [77] se establece que tanto el castigo como la recompensa pueden ser herramientas eficaces para aumentar la participación y motivar la adopción de sistemas automatizados de respuesta de la demanda, y parecen no poner en riesgo la fidelidad de los clientes.

3.5.2 Clasificación de los clientes

Cómo se ha comentado en numerales anteriores sobre la importancia del cliente y su papel fundamental dentro del desarrollo de los planes de GDE, la manera en la que este puede clasificarse ayuda a la ESEE a seleccionar de mejor manera los programas a aplicar de tal forma que se pueda garantizar un éxito en su implementación operativa. En la figura 3-13 se muestra una clasificación de los clientes a través de su demanda eléctrica. No es lo mismo aplicar un plan de GDE para un cliente residencial, para un grupo de clientes residenciales que para un cliente industrial.

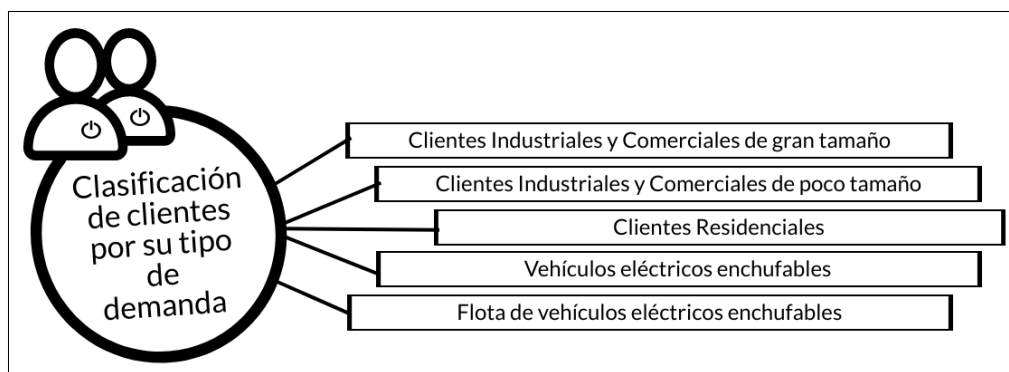


Figura 3-13.- Clasificación de los clientes por su tipo de demanda.

Por otro lado, en [42] se categoriza a los consumidores de electricidad en función de su comportamiento frente a la adopción de cualquier programa que les permita gestionar su demanda. Esto brinda un punto de vista sobre qué tipo de programas estos clientes estarían dispuestos a aceptar y que tipo de programas no. En la figura 3-14 se presenta dicha clasificación de los clientes. La previsión del comportamiento del consumo de energía del cliente tendrá un impacto positivo en la predicción de la demanda, en [79] se denomina como consumidor elástico a aquellos consumidores que son más sensibles a los precios que otros, estos serán participantes activos en los programas de GDE, mientras otros serán relativamente indiferentes.

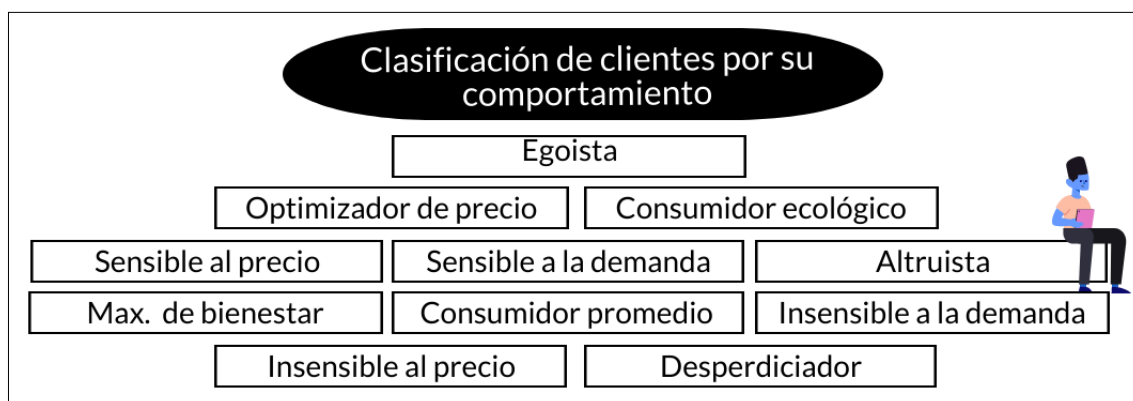


Figura 3-14.- Clasificación de los clientes por su comportamiento.

Resumen del Capítulo

Se define un modelo conceptual con todos los representantes y partes esenciales que conforman la GDE. Esto permitirá evaluar el rol de cada entidad y los retos que deben abordar cada uno para conformar un modelo de GDE de éxito. Además, se ha mostrado como el aporte de la Generación Distribuida y del Almacenamiento Energético a la GDE permite flexibilizar aún más el consumo de energía eléctrica.

La arquitectura del modelo está compuesta por actores y aplicaciones:

- Los **actores** son los equipos y sistemas que determinan acciones e intercambian la información para la realización de las aplicaciones de la GDE. Estos son:
 - **Sistemas de control.-** Son los equipos que intervienen en la red eléctrica, y que permiten la ejecución de los programas de la GDE. Se ejecutan a través de dispositivos inteligentes de gestión de carga, generación distribuida y almacenamiento energético.
 - **Sistemas de monitorización.-** Son los equipos que monitorizan la operación de la red eléctrica y determinan si es necesario aplicar programas de GDE o no, estos pueden ser: infraestructura avanzada de medición, sistemas de gestión de carga y sistemas de información energética.
 - **Sistemas de comunicación.-** Es el tipo de enlace utilizado para comunicar al cliente con la ESEE, pueden ser: por cable o inalámbrico.
- Las **aplicaciones** son las distintas tareas que uno o varios actores tienen que realizar, como: Reducir los picos de demanda y/o la energía consumida, maximizar el bienestar del cliente o maximizar el uso de fuentes renovables y almacenamiento energético, entre otros.

Aunado a esto, los integrantes del modelo son:

- **La ESEE.-** Su función es conocer al cliente, y su tipo de carga, con la finalidad de ofrecerle una serie de programas atractivos para su inscripción y acorde a sus necesidades.
- **El Mercado.-** Su función es habilitar a los mercados de energía y de servicios auxiliares para que los agregadores de carga y los responsables de equilibrio puedan ejecutar los distintos programas de RD.
- **La red eléctrica.-** Su función es brindar información sobre el servicio eléctrico, se incluye también la función de servir como enlace de comunicación entre el cliente y la ESEE.
- **El cliente.-** Es el integrante clave del modelo. Su función es inscribirse en los programas de GDE.

La GDE debe de estar inscrita en un Marco Legal sólido establecido por el órgano de control del recurso eléctrico.

4 SITUACIÓN ACTUAL

“Yo lloré porque no tenía zapatos hasta que vi un niño que no tenía pies”

- Oswaldo Guayasamín, pintor ecuatoriano -

Según el último informe sobre las bases físicas del cambio climático del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), es necesario “una reducción enérgica y duradera de las emisiones de GEI ya que solo así se podría limitar la magnitud del cambio climático”. Si no se toman soluciones correctivas a corto plazo se prevé que en 20 años el aumento porcentual de temperatura sea de 1.5 a nivel global, lo cual desataría más olas de calor, estaciones cálidas más largas, y las frías más cortas, entre otras; las cuales no serán de carácter reversible [80].

El Acuerdo de París del año 2015 pide a sus firmantes mantener por debajo de 2 [°C] el incremento de la temperatura global del planeta y hacer esfuerzos para limitarlo a 1,5 [°C], todo basado en el firme propósito de lograr una reducción de la emisión de GEI en los países socios. Dentro de los últimos años ha tomado especial relevancia el concepto de Economía Circular (EC) como estrategia de acción para lograr reducir la emisión de GEI, de acuerdo con [81] la EC “podría reducir hasta un 99% los desechos de algunos sectores industriales y un 99% de sus emisiones de GEI”, su aplicación dentro de las economías se representa en la figura 4-1.

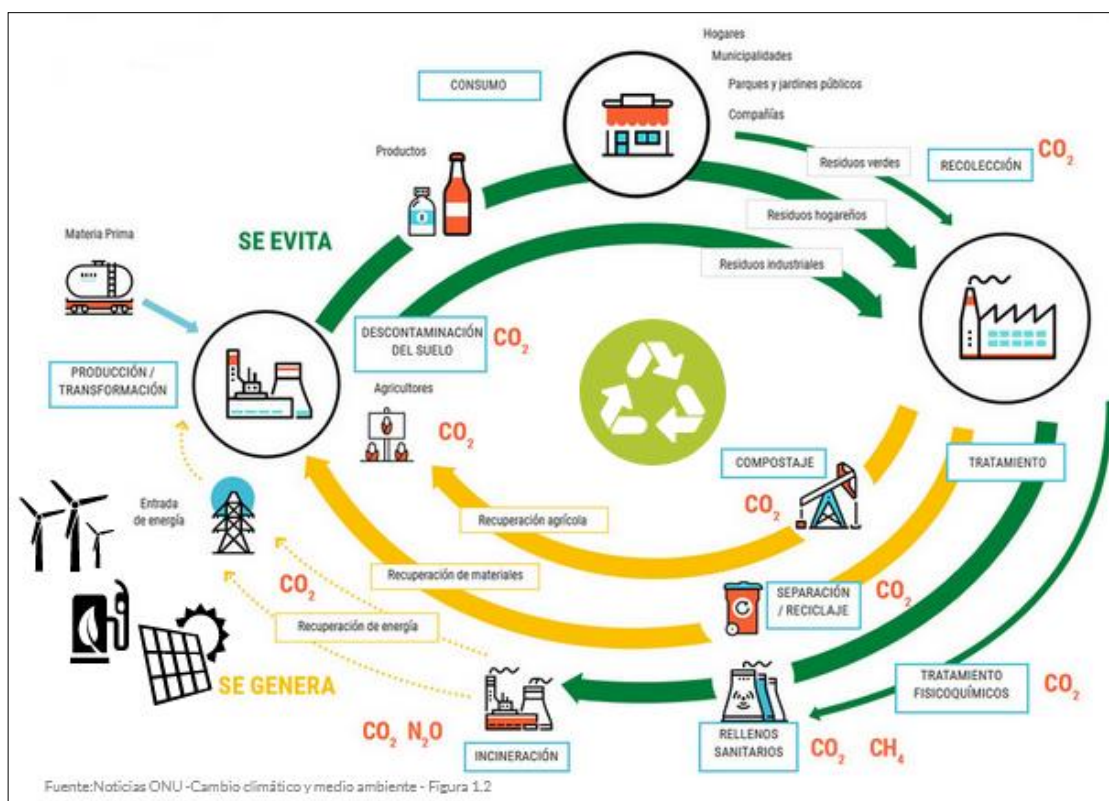


Figura 4-1.- Operación de la economía circular.

Fuente: (Imagen adaptada de ONU Medio Ambiente, 2018) [81]

Por su parte, la Comisión Europea en su “Plan de Acción para una Economía Circular” define a la EC como: “Una economía en la cual el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y en la que se reduzca al mínimo la generación de residuos”. En un estudio realizado por Deloitte para *Finnish Energy* [82] se determina el concepto de EC aplicado a los sistemas energéticos, el cual reza lo siguiente: “Son el conjunto de diseños, procesos y soluciones que maximizan la eficiencia en el uso de recursos naturales para la producción de energía, en el uso de energía final y en el aprovechamiento del exceso de energía y corrientes residuales”. En dicho estudio se concluye que una táctica que la industria energética puede usar para incursionar su sector dentro del paradigma de la EC a través del cliente es con programas de RD y EE. Por consiguiente, a través de la GDE se puede transformar el sistema eléctrico en uno que se base en los principios de la EC y así, optimizar el uso de la red eléctrica y reducir la emisión de GEI.

Bajo la definición establecida [82] sobre la EC aplicada en los sistemas energéticos se erige el concepto de *Zero Energy Building* (ZEB). De acuerdo con [83], ZEB es un “edificio energéticamente eficiente en el que, sobre la base de la energía de origen, la energía anual real suministrada es inferior o igual a la energía renovable exportada in-situ”. Dado que el objetivo de la GDE es el de mejorar la eficiencia de la red eléctrica mediante diversos programas, sería impensable desarrollar planes de implementación de ZEB sin considerarla como parte importante del proceso, y dado que sus programas agrupan otro tipo de tecnologías emergentes actuales como la generación renovable por fuentes distribuidas, sistemas de almacenamiento energético y tecnología V2G; hoy por hoy la GDE podría ser considerada como una pieza dentro de la consolidación de redes automatizadas y libres de emisiones de GEI. En la figura 4-2 se muestra lo antes enunciado.

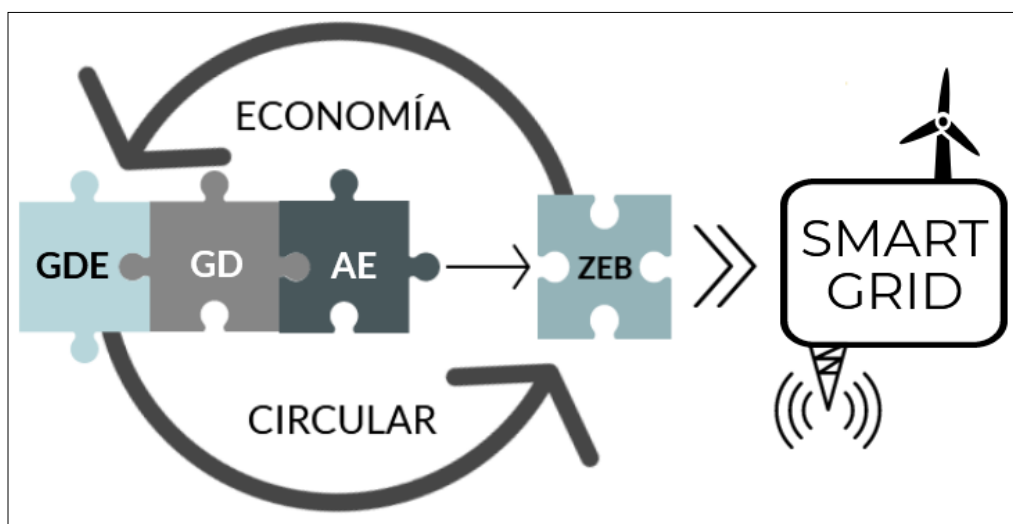


Figura 4-2.- Situación Actual de la GDE.

4.1 Situación actual de la Conservación Energética

La conservación energética tiene una vertiginosa carrera propulsada por los protocolos mundiales para la conservación del medioambiente y por la reducción del consumo energético. Ahondar en cada uno sus avances no sería abarcable para un solo trabajo, más la CE tiene efectos reales en la red y en el mercado eléctrico que podrían ser contraproducentes desde el punto de vista de reducción del consumo de electricidad.

La idea del rebote energético surge en el libro de 1865 de William Stanley Jevons titulado como *The coal question* (La cuestión del carbón), tal como se cita en [84], en el cual se propone que “Es una confusión de ideas suponer que el uso económico del combustible equivale a la disminución del consumo. La verdad es justamente lo contrario” siendo esta la primera vez que se ponía en duda el papel de la eficiencia energética como aporte en las esferas económicas.

De acuerdo con [85], el consejo de Estado de China publicó en el 2010 un “Programa integral de conservación de la energía y reducción de las emisiones durante el 12° quinquenio” donde se conmina el país a fomentar la conservación energética promoviendo el progreso tecnológico a través de la eficiencia energética. Si bien la aplicación de programas de CE para reducir la demanda, y por consiguiente la emisión

de GEI, expone un dilema debido a que el crecimiento económico provoca justamente lo contrario. Esta paradoja pone en evidencia que los programas de CE provocan a la larga un efecto rebote en la demanda eléctrica, de acuerdo a lo mostrado en la figura 4-3.

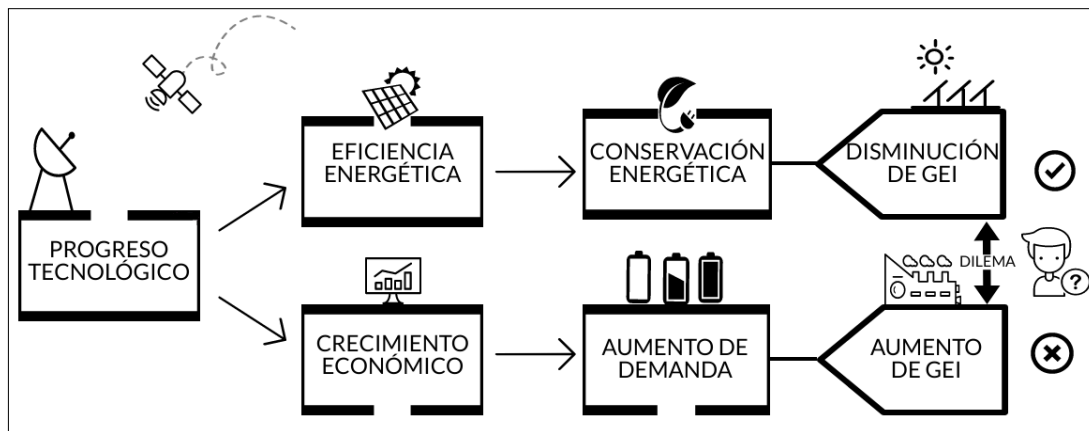


Figura 4-3.- Efecto de rebote energético en China.

Como continuación al estudio publicado en [85], en [86] se establece que la mejora de la eficiencia energética en la red produce una reducción del coste real de los servicios eléctricos, lo que a su vez provoca un aumento de la demanda de dichos servicios, obteniendo como resultado que el potencial ahorro podría compensarse con el aumento de la demanda ocasionado por dicho ahorro. Entre 1981 hasta el 2009 en China ha habido un efecto de rebote energético del 53.2%.

Según la teoría del efecto rebote, los resultados obtenidos en temas de CE y reducción de GEI no pueden alcanzarse si los objetivos de CE hacen hincapié en las mejoras de la EE pero carecen de reformas en los precios. Tanto [85] como [86] coinciden que la solución al rebote energético es la aplicación de instrumentos económicos, como reformas en los precios de energía, que garanticen la CE y la reducción de los GEI al mismo tiempo.

Por otro lado, en [87] se realiza un estudio, esta vez en los países pertenecientes a Medio Oriente y África del Norte (conocidos como MENA), donde se pretende determinar la relación causal que existe entre el crecimiento energético, el crecimiento económico y las emisiones de CO₂ a través del método de Análisis de causalidad de Granger, donde se determinó que:

- No existe un nexo causal entre crecimiento económico y el nivel de emisiones de CO₂.
- Los programas de conservación energética son eficaces a corto y mediano plazo pero su impacto en el crecimiento económico será negativo a largo plazo.
- Se determina un efecto de retroalimentación negativa entre el consumo de energía a medio y largo plazo.

Las conclusiones de [87] coinciden con lo determinado en [85] y [86] y, aunque las medidas administrativas pueden ser eficaces a corto plazo, la existencia del efecto rebote energético pone de manifiesto la importancia de las medidas orientadas al mercado para cumplir con los objetivos que enmarca la CE, tales como:

- Reformas a los precios de energía eléctrica.
- Impuestos sobre los recursos energéticos.
- Impuestos sobre el carbono.
- Comercio de las emisiones de CO₂.

En la actualidad, no se cuestiona la importancia y los beneficios de la implementación de programas de CE en las sociedades ya que todos quieren sacarle toda la rentabilidad posible a sus procesos y servicios. Con las soluciones planteadas en [85] orientadas al mercado como forma de evitar el rebote energético, se podría intuir que los programas de Respuesta de la Demanda serían un complemento idóneo para las estrategias de

Conservación Energética. Esto solamente deja en evidencia que la aplicación de los programas de GDE tiene un efecto multiplicador en la reducción de demanda cuando se aplican simultáneamente y de forma que los unos apoyan a los otros.

4.2 Situación Actual de la Sustitución del Recurso Energético Primario

El programa de sustitución del recurso energético ha tomado gran relevancia en los últimos años motivado primordialmente por la necesidad de reducir la huella de carbono que los vectores energéticos tradicionales dejan como resultado de su utilización. El caso más próspero de programas de este tipo es el implementado por la UE el 28 de noviembre del 2018 [88] donde se establece una estrategia para fomentar una economía moderna, competitiva y neutra en carbono para el año 2050 [89] a través de la erradicación de los combustibles de origen fósil de los procesos económicos, incluido el energético. Este tipo de estrategias surgen como solución a los problemas de desarrollo en las sociedades, y que se pretende corregir mediante los ODS planteados por la ONU para el año 2030, siendo el acceso a las fuentes energéticas limpias y sostenibles un importante vector de desarrollo y condición necesaria para provocar el desarrollo sostenible de los pueblos.

Sin embargo, la realidad global es otra totalmente diferente. El acceso a los portadores energéticos limpios y sostenibles no es una realidad en todas las naciones, una parte de la población sigue relegada al uso de fuentes energéticas que terminan agravando la precariedad social en la que conviven. De acuerdo con [90], una de cada siete personas no tiene acceso a electricidad y el 42% de la población mundial aun utiliza combustibles contaminantes como el queroseno, leña, carbón vegetal y estiércol para cocinar sus alimentos. Estas realidades no hacen más que acentuar la imperiosidad de este tipo de programas que pretenden erradicar totalmente los combustibles ubicados en la base de la pirámide energética, la cual se muestra en la figura 4-4, y con la ayuda de las fuentes renovables de energía, poder llegar a energizar zonas rurales donde nunca se había encendido antes una bombilla eléctrica.

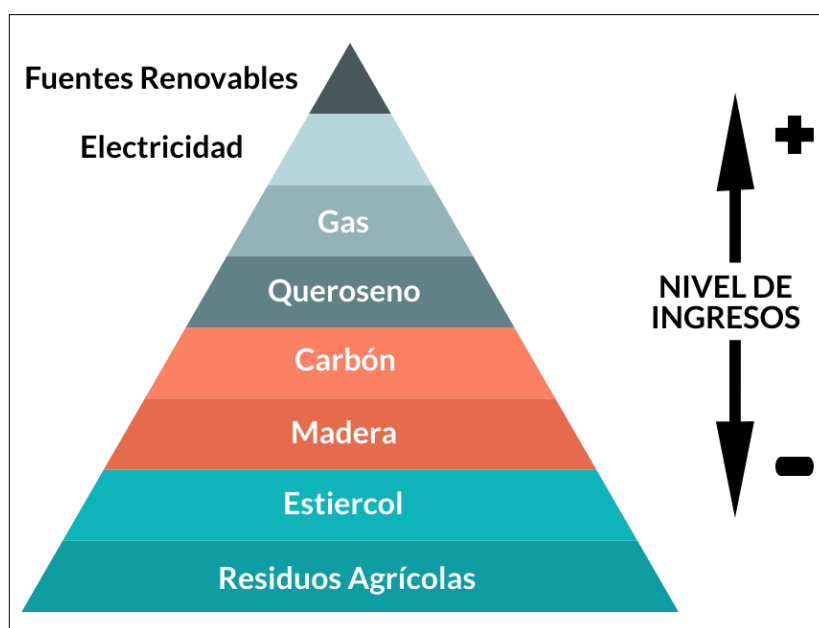


Figura 4-4.- Pirámide energética.

4.2.1 Irrupción de tecnologías energéticas emergentes

El aumento de consciencia sobre la perjudicial dependencia a los combustibles de origen fósil y la creciente elevación de la temperatura ambiental, y a pesar de ser una idea que data del año 1972 (antes de la primera crisis petrolera) enunciada en el libro *The limits of growth* [91] con el grupo de Roma, no es hasta inicios del siglo XXI que se consolida la generación de electricidad por fuentes renovables. Estas permiten la utilización sostenible de los recursos naturales en pro de descarbonizar poco a poco los diversos sectores económicos de las naciones, en la figura 1-4 se puede apreciar cómo ha evolucionado la producción de energía por fuentes renovables desde el año 1990.

La **producción de energía renovable** ha irrumpido como un ente transformador en la explotación de las redes eléctricas y no solo como una forma de generar electricidad a gran escala sino también a través de soluciones distribuidas fuera de la red como los sistemas solares domésticos que se han empezado a distribuir en África Occidental y el Sudeste Asiático [92]. De acuerdo con [93] se estima que en el año 2017 habían 89 millones de personas en los países en vías de desarrollo que tenían uno o más productos de iluminación solar, y que uno de cada tres hogares sin conexión a la red dependerá de soluciones fotovoltaicas sin conexión a la red en el año 2021. Un ejemplo bastante relevante sobre la influencia de las energías renovables en este tipo de programas de GDE es el implementado por IDCOL en Bangladesh en el año 2017 donde se instaló 4.1 millones de sistemas solares domésticos en las regiones sin conexión a la red del país [94] ahorrando así el consumo de 1.14 millones de toneladas de queroseno valorado en \$411 millones de dólares estadounidenses.

Por otro lado, el **almacenamiento energético** se erige como una herramienta adicional para acoplar la oferta y la demanda en redes, más aún si estas tienen un gran aporte de fuentes de energía renovable. Estos dispositivos pueden ayudar a conseguir la flexibilidad en el sistema a través de la absorción de energía cuando el suministro es abundante y liberándola cuando es escaso, lo cual podría ser usado formidablemente para aplanar la forma de curva de carga de la red. La potencia de salida varía en función de la aplicación que se desee flexibilizar. En el caso de la regulación de la frecuencia o del voltaje se requiere una potencia elevada durante un periodo relativamente corto de tiempo (segundos o minutos), pero para aplicaciones como la gestión de la demanda se requieren periodos de descarga mucho más largos (horas) [95]. De acuerdo a [96] el almacenamiento energético aplicado en los programas de RD es una actividad central en la política de democracia energética dentro de la productividad de los recursos energéticos de un sistema, y juega un rol trascendental como parte de un sistema basado en un concentrador de recursos energéticos que incluye infraestructura eléctrica, de calor, de gas y de agua; que es la versión de la GDE pero la variable a optimizar en cada caso es la energía térmica, el GLP y el suministro de agua potable respectivamente.

El desarrollo de los **vehículos eléctricos** (VE) como estrategia para reducir la emisión de GEI, y el consumo de combustibles de origen fósil, es sin dudas un programa de sustitución del recurso energético primario donde se elimina el uso de carburantes y se implanta el uso de energía eléctrica a través del almacenamiento de la misma en baterías. De acuerdo con [97], el 28% de los GEI y el 71% de los combustibles de origen fósil son aportados por la industria del transporte. En los últimos años los VE han tomado relevancia en la gestión energética debido a que, dado que poseen una batería interna que se carga y descarga en función de diferentes señales, podrían ser utilizados como un generador eléctrico en los puntos donde la red necesite. A este tipo de tecnología se la denomina como V2G (*Vehicle to Grid*) [98].

4.2.2 Los retos de los programas de SREP

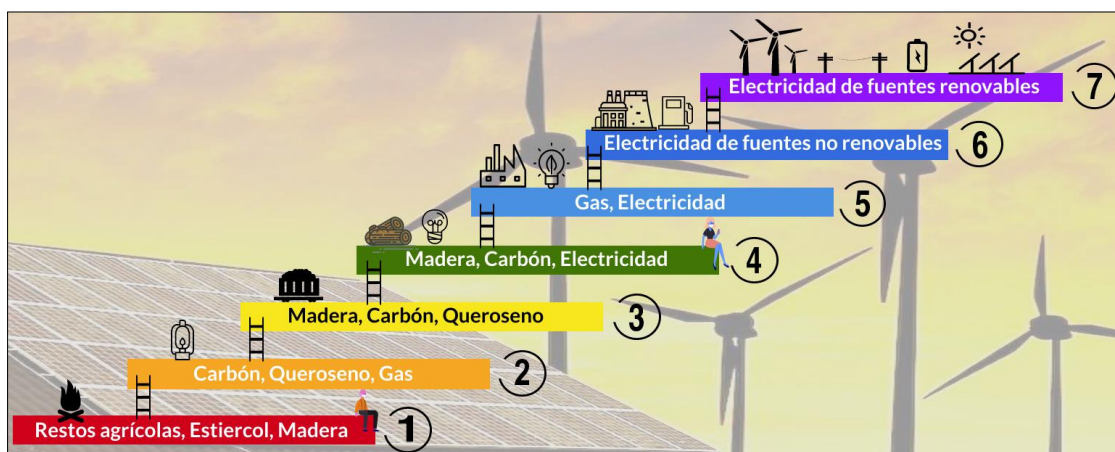


Figura 4-5.- Apilamiento energético.

El principal reto de este tipo de programas es el apilamiento energético. Al contrario de la idea hipotética sobre la escalera energética, que parte de la idea de que tanto los vectores energéticos tradicionales como los modernos están disponibles y de que los usuarios optarán por cambiar a la siguiente mejor fuente energética en cuanto esté disponible y puedan permitírsela, varios estudios como [[99], [100]] han demostrado que tanto los asentamientos urbanos como rurales siguen trayectorias de transición energética compleja y tienden a

depender de más de una fuente de energía a medida que aumentan sus ingresos. Estas prácticas se esquematizan en la figura 4-5.

A priori podría parecer que una mayor gama de fuentes energéticas implica que los usuarios están mejor abastecidos, sin embargo la realidad indica lo contrario. En muchos países en vías de desarrollo los vectores energéticos incluyen subsidios, de tal forma que estos puedan ser universalmente distribuidos y adquiridos por los ciudadanos, los cuales son patrocinados por el Estado. Más allá de las bondades o detrimentos que los subsidios generen, y de acuerdo a lo establecido en los ODS, subsidiar el uso de combustibles pertenecientes a la base de la pirámide energética equivale a perpetuar el uso de fuentes energéticas contaminantes y así, promover el aumento de la emisión de GEI. Según [101], en el transcurso de la última década el gobierno ecuatoriano gastó hasta el 7% de su presupuesto anual en el subsidio de vectores energéticos como gasolina, diésel, electricidad y gas licuado de petróleo, si bien dichos subsidios podrían ser mejor distribuidos con la implementación de planes de sustitución del recurso energético primario. La implementación de este tipo de programas de sustitución envuelve otro tipo de fenómenos económico-sociales que no pueden ser tomados a la ligera, ya que las repercusiones negativas de dichas reformas a los subsidios y podrían generar resistencia en la ciudadanía, en algunos casos hasta con disturbios violentos [102].

Al igual que los planes de CE, este tipo de programas van más allá que solamente un procedimiento operacional, una forma de tarifación o un descuento por el uso correcto de la energía. La implementación de programas de SREP es un complejo proceso que requiere la intervención del Gobierno, la colaboración de las múltiples partes interesadas y una sólida política energética para incorporar las tradiciones socioculturales de la sociedad a los planes y así, ofrecer flexibilidad para alcanzar el doble objetivo de acceso universal a la electricidad y la descarbonización de los sistemas energéticos [103]. Vencer el apilamiento energético es un reto de este tipo de programas. En la figura 4-6 se muestran los diferentes retos que este tipo de programas tienen que solventar en la actualidad.

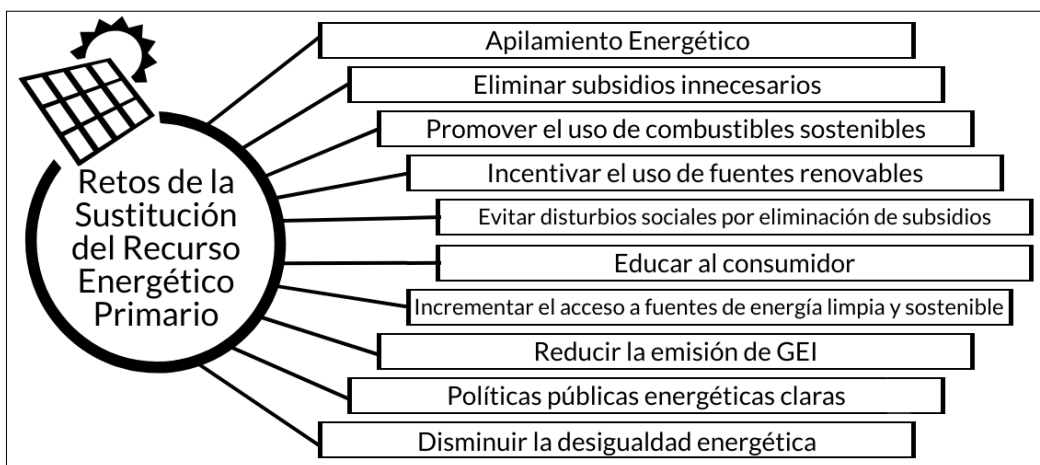


Figura 4-6.- Retos de los programas de Sustitución del Recurso Energético Primario.

4.2.3 Casos de aplicación de programas de SREP

Tal y como se vislumbra la situación energética mundial, se prevé que a futuro la electricidad producida por fuentes renovables sea la forma más utilizada para satisfacer las necesidades de energía eléctrica de la población. Hasta entonces, los países han desarrollado estrategias que permitan un consumo energético sostenible y que tengan un menor impacto sobre el medio ambiente. De las estrategias implementadas podemos citar las siguientes como ejemplos de programas de SREP que han sido exitosos, y algunos que podrían serlo en caso de ser aplicados:

- En el año 2007 el gobierno indonesio elaboró un plan cuyo objetivo era cambiar el queroseno por el GLP. El queroseno había sido utilizado en su gran mayoría en los hogares para la elaboración de los alimentos. De acuerdo con [104], para el año 2012 dicho programa tenía 42 millones de usuarios inscritos abarcando casi el 70% de la población indonesia. Dentro de los beneficios obtenidos se cita: la reducción en la mortalidad infantil, reducción de las enfermedades respiratorias de los integrantes del hogar, un ahorro de 2.900 millones de dólares debido a la eliminación del subsidio al queroseno, alivió la pobreza energética extrema de la región, se redujo la emisión de GEI, entre

otros. Un estudio realizado [105] indicó que adicionalmente se produjo un apilamiento de combustibles especialmente en zonas urbanas, suburbanas y en los hogares con mayores ingresos.

- Motivado por el sexagésimo aniversario de Corea del Sur en el año 2008, el Presidente de la República estableció una nueva cosmovisión para el desarrollo del país llamada “Baja emisión, crecimiento verde” la cual pretendía *generar riqueza y bienestar, incrementar el empleo y, reducir la pobreza y la desigualdad social* a través del desarrollo sostenible de la economía del país. La industria del carbón en Corea registró un fuerte descenso desde su máximo de 27 millones de toneladas en 1986 hasta aproximadamente 3 millones de toneladas en el 2007 debido a las mejoras tecnológicas e iniciativas administrativas del Gobierno. Dos millones de toneladas del total aún se utilizan para la fabricación de briquetas de antracita, combustible doméstico tradicional en los grupos sociales de bajos ingresos económicos, las cuales son subsidiadas y entregadas a los ciudadanos a través de un programa de cupones [106]. A pesar que al Gobierno Coreano le queda mucho camino por recorrer hasta descarbonizar su economía, los pasos que han dado en la dirección ecológica y sostenible auguran una pronta independencia de los combustibles primitivos, como el carbón. De acuerdo con [107] la concentración de monóxido de carbono (CO) entre las principales ciudades coreanas durante el periodo 1989-2013 ha disminuido significativamente después del año 2000 debido a la estricta aplicación de la normativa gubernamental sobre la sustitución del recurso energético primario.
- La industria representa el 40% de la demanda mundial de energía y a su vez genera el 23% de las emisiones de GEI mundiales [108]. Es importante modernizar los procesos industriales y que estos hagan uso de portadores energéticos avanzados, primordialmente la electricidad, aunque la electrificación industrial es contraproducente para la mitigación del cambio climático si está no es suministrada por fuentes de energía renovables [109]. Uno de los principales retos en el cambio de portadores energéticos primarios es el costo que ello implicaría. En [108] se realizó un estudio donde se evaluó la inversión en el cambio de combustible en las transiciones energéticas a largo plazo en el sector industrial de la India y se obtuvo que las inversiones a largo plazo podrían motivar la absorción de 25 [PJ] de gas natural y evitar la emisión de 1715 [KT] de CO₂ en la industria siderúrgica en Maharashtra durante los próximos 30 años.
- Durante los últimos años se han realizado varios estudios sobre la viabilidad de los vehículos eléctricos para reducir la emisión de GEI. De acuerdo con [110], para reducir la emisión de GEI en el sector transporte es necesario que la energía que supe de carga a las baterías de los vehículos sea producida con vectores energéticos limpios caso contrario, las plantas de energía necesitarán mayor cantidad de combustibles de origen fósil para energizar a toda la flota de vehículos eléctricos. Además, el cambio a la movilidad eléctrica debe incluir dentro de sus planes de desarrollo la uniformización de los modelos de vehículos, la evolución de la red de carga, el aumento de la capacidad de producción de energía y las estrategias de reciclaje de baterías.

4.3 Situación Actual de la Respuesta de la demanda

Si bien la GDE es el tema central de discusión en esta investigación, la RD es el programa que actualmente ha generado mayor interés debido a que podría esculpir segundo a segundo la forma de la curva de carga al gusto de la ESEE. De acuerdo con [42], dadas las restricciones de los programas y los objetivos que se definieron en apartados anteriores, la GDE se convierte en un típico problema de optimización. Y si la GDE es una forma de optimizar el consumo eléctrico porque mejora la eficiencia de la red, optimizar la RD mediante algoritmos matemáticos es como optimizar lo que ya se está optimizando. Es por ello que en la actualidad el tema de mayor interés es ese, el desarrollo de algoritmos de control confiables que permitan la implantación general de los programas de RD. La optimización de los programas de respuesta de la demanda a través de algoritmos computacionales para su aplicación en los distintos segmentos de mercado ha sido definida como **Respuesta de Demanda Automática (RDA)**.

Así mismo, las tecnologías digitales han avanzado a pasos agigantados creando diversas formas para la sincronización en tiempo real y la monitorización del sistema eléctrico vía modelos virtuales que resultan de la información recogida y almacenada del cliente. Este tipo de tecnología se denomina **Gemelo Digital (GD)**. De acuerdo con [111], este tipo de tecnología permitiría una mejor comprensión del comportamiento

del consumidor con la finalidad de especular su patrón de consumo de energía, y así lograr la reducción de su demanda. La implementación de GD tiene un inmenso potencial para mejorar los programas de GDE de los consumidores. Por otro lado, con el incremento de la GD entre los clientes, los consumidores de electricidad son al mismo tiempo productores de la misma, a este tipo de clientes son denominados como **prosumidores**.

Otro concepto que surge de la modernización de las redes de distribución es el de **Plantas Eléctricas Virtuales**, conocidas como *Virtual Power Plants (VPP)*. En [112] las define como “una central eléctrica automatizada avanzada que combina varios generadores distribuidos, unidades de almacenamiento en baterías y prosumidores con una capacidad de respuesta a la demanda, formando así una central eléctrica excepcional”. En [113] se implementó un método para analizar la viabilidad del uso de una VPP en el distrito japonés de Higashida y sus efectos en el lado de la oferta y en el lado de la demanda, y en una de sus conclusiones se obtuvo que la capacidad total de la VPP es de 22.382 [kW], y que el potencial de reducción de picos puede alcanzar el 40,1%, demostrando que el uso de VPP podría ser beneficioso para los programas de GDE.

El modelo conceptual de la GDE propuesto está conformado por actores y aplicaciones. Las aplicaciones son de carácter constante en el tiempo pero los actores dependen del estado tecnológico y social en el que se encuentra la humanidad. En la actualidad se atraviesa una era donde los equipos electrónicos y las redes de comunicación dictaminan el tono en el que la tecnología, y todos los que dependen de ella, avanzan. Dado que el *hardware* de la GDE viene dado por la arquitectura de los actores del modelo, se pretende exponer el estado actual de la RD a través de su clasificación, de la siguiente manera:

4.3.1 Sistema de control

4.3.1.1 Dispositivos inteligentes para la gestión de carga

El desarrollo de tecnológico actual a guiado a las distintas instalaciones eléctricas hacia la automatización. En el caso residencial, el uso de electrodomésticos inteligentes solo bajo el paradigma de poder encenderlos y apagarlos a gusto y deseo del cliente, sin ninguna estrategia de RD detrás, no cuenta como gestión energética. Para que esta pueda darse es necesario que haya un “ente” rector que determine cuando los equipos pueden usarse, ya sea de forma manual o automática, esto se debe a que el principio fundamental de la GDE es reducir los picos de la curva de carga, y la RD está suscrita a los mismos principios. Pero si todos estos electrodomésticos pueden comunicarse de forma inalámbrica con el contador inteligente y participar en la reducción del consumo de energía, adaptándose automáticamente a los cambios en la disponibilidad de energía y a la tarifa dinámica, entonces ahí sí se puede decir que hay una gestión energética en el lado de la demanda. Para este fin, varias empresas que comercializan automatismos han creado productos como interruptores de carga y termostatos inteligentes.



Figura 4-7.- Interruptor de control de carga marca Eaton modelo LCR-6000.

Los **interruptores de control de carga** son un componente integral dentro de los programas de RD. Se

instalan en el lado del cliente y se utilizan para el control remoto de cargas específicas de uso final, como compresores de aire acondicionado, calentadores de agua o motores. Están conectados con la empresa de servicios públicos mediante sistemas de comunicación. En la figura 4-8 se muestra un interruptor de control de carga marca Eaton modelo LCR-6000, especialmente usado en la gestión cíclica de acondicionadores de aire residenciales. De acuerdo con [42], este tipo de dispositivos fueron los primeros en desarrollarse y llevan utilizándose desde los 70's. Algunos no necesitan de una red de comunicación bidireccional con la ESEE o un medidor inteligente ya que funcionan mediante señales de comunicación tipo PLC, cuya señal de control viaja por la misma línea de distribución.

En la figura 4-8 se muestra un **termostato inteligente** del fabricante estadounidense Emerson, cuya línea Sensi está provista de conexión inalámbrica. Además posee un modo que permite la gestión de carga a través de un agregador de carga. En [114], se realiza un estudio sobre la implicación de los termostatos inteligentes en la gestión de energía residencial a través de un algoritmo de optimización basado en MILP. Dicho algoritmo proporciona una respuesta óptima a la respuesta de la demanda y al autoconsumo fotovoltaico, obteniendo como resultado la disminución de precios por consumo de electricidad cuyo valor varía del 53,2% a 13,5% diario.



Figura 4-8.- Termostato inteligente marca Emerson modelo Sensi ST55.

4.3.1.2 Algoritmos para el modelado y optimización del problema

De acuerdo a la información recopilada en el transcurso de esta investigación, el primer artículo sobre el uso de algoritmos para resolver de forma óptima los programas de la RD data del año 1996. Su análisis se centra en el desarrollo de un acuerdo de precios personalizado a través del diseño de una estructura de tarifas eléctricas dinámicas en el que ambas partes, cliente y proveedor, obtengan el máximo de beneficio en su aplicación, y todo esto enmarcado dentro de los programas de RD [115]. En la actualidad hay muchas técnicas y algoritmos que buscan resolver de una manera óptima el problema que representa la implementación de los programas de RD en el sistema eléctrico. Algunos representan soluciones viables y de implementación real en el sistema, mientras que otros no son aplicables en la realidad práctica ya que el sistema eléctrico posee muchas más variables independientes que el modelo no toma en consideración.

Con la finalidad de entender mejor el estado actual de este fenómeno, se realizó la búsqueda aleatoria y el análisis de una treintena de documentos científicos cuyo tema central es la solución óptima a los modelos de los programas de RD [[63], [116]- [145]]. De ellos se obtuvo información concerniente a: año de emisión, función objetivo a optimizar, método de modelado del problema y algoritmo de optimización, escala de tiempo del problema, nivel de aplicación del problema, presencia de GD y AE, software de modelado utilizado, logros alcanzados y limitaciones del modelo. Toda esta información se presenta a continuación.

- a) Con respecto al año de emisión de los artículos, dieciocho de ellos fueron publicados entre el año 2019 y 2021; de los restantes, 7 fueron publicados entre el año 2018 y 2016, y cinco en el periodo comprendido entre 2015 y 2012. En la figura 4-9 se indica mediante un gráfico de barras la cantidad de publicaciones analizadas de acuerdo al año de publicación de los artículos seleccionados.

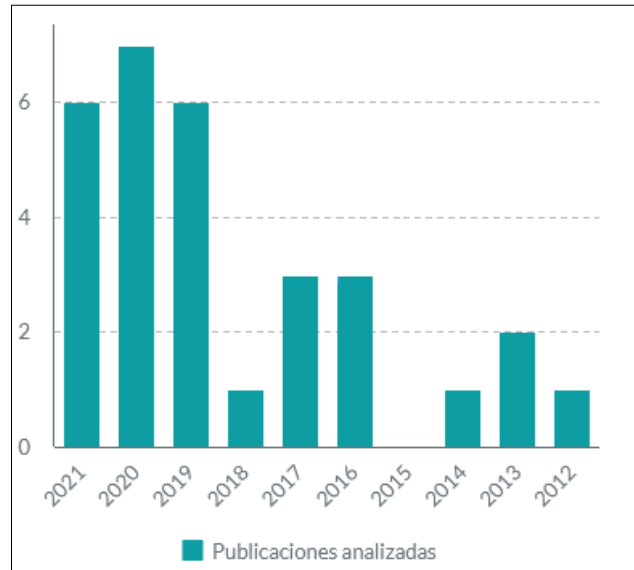


Figura 4-9.- Cantidad de publicaciones analizadas de acuerdo al año de su publicación.

- b) Con respecto a la función objetivo a optimizar, se obtuvo un total de 18 objetivos diferentes a minimizar siendo los más populares: minimización de costes del cliente (14), minimización del factor de cresta (PAR) (13), minimización de incomodidad en el cliente (11) y minimización de los costes operativos (7). Entre otros objetivos se puede citar: maximización del beneficio de la ESEE (2), minimización de las pérdidas del sistema (2), minimización de la emisión de GEI, minimización del combustible utilizado en la generación (1), maximización de la respuesta de la demanda (1), minimización del coste de la reserva giratoria, entre otros. Tal como se muestra en la figura 4-10.

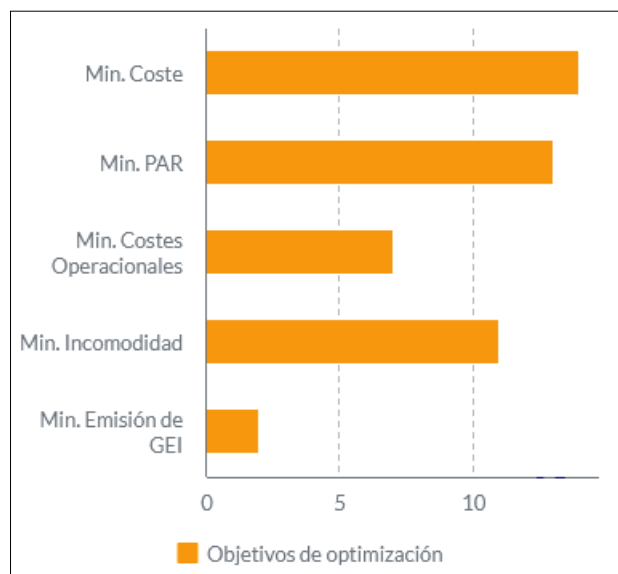


Figura 4-10.- Objetivos de optimización a los modelos de RD analizados.

Además se pudo observar que siete publicaciones consideraban la optimización simultánea de los costes del cliente y del PAR, otros siete artículos consideraban la optimización simultánea de los costes y de la incomodidad del cliente, y en dos artículos se considera la optimización simultánea de los costes y de la incomodidad del cliente, y del PAR.

- c) Con respecto a las herramientas utilizadas para modelado del problema y su respectivo algoritmo de optimización, el análisis reveló que el método más utilizado se fundamenta en algoritmos basados en Inteligencia Artificial (IA) (11). En la figura 4-10 se muestra un cuadro resumen de los métodos utilizados para modelar y optimizar los programas de RD. Además, en varias publicaciones se observó que a pesar de modelar el problema con un método no basado en técnicas de IA, se decidía resolverlo con ayuda de algoritmos basados en IA. Así: En [116] se utiliza un modelo del problema

basado en la teoría de juegos del tipo no cooperativo para ser resuelto mediante un algoritmo genético (AG) de ordenación no dominante, en [120] se utiliza un modelo del problema basado en una simulación de Monte-Carlo para ser resuelto mediante un algoritmo de optimización de la polilla, en [125] se utiliza un modelo del problema basado en teoría de juegos para ser resuelto mediante un algoritmo de enseñanza y aprendizaje, entre otros.

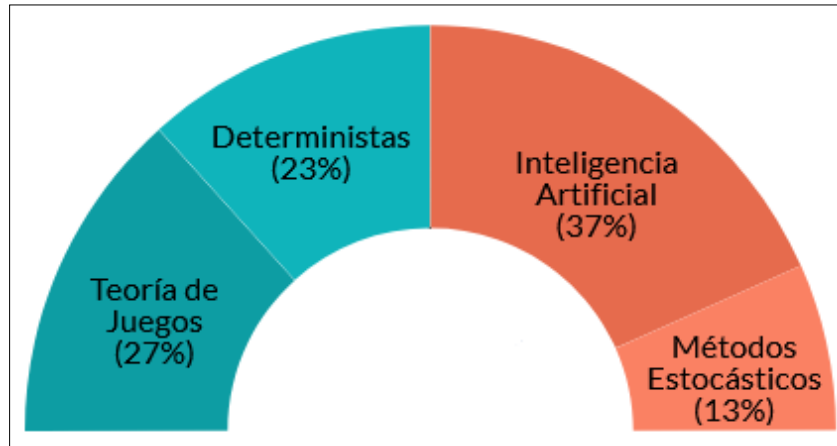


Figura 4-11.- Métodos utilizados para plantear el modelo óptimo de la RD.

El análisis puso de manifiesto lo siguiente:

- Se utiliza un número amplio y diverso de técnicas de IA; y al parecer, algunas técnicas son más adecuadas que otras para tareas específicas. De acuerdo con [36], se ha demostrado que los algoritmos de redes neuronales (ANN), que suelen utilizarse para la aproximación de funciones multivariables y la regresión, se emplean ampliamente para la previsión de cargas y precios a corto plazo, utilizando el aprendizaje supervisado para lograr una predicción precisa de hasta el 98%. En cambio, y de acuerdo con [63], los algoritmos de aprendizaje de refuerzo (RL) se suelen emplear para captar la retroalimentación humana, lo que los hace adecuados para las tareas de control de los dispositivos de gestión de energía del hogar (HEMS) que integran una solución de RD. Por otro lado, los algoritmos de aprendizaje no supervisado se utilizan sobre todo para agrupar clientes cuando no hay un conocimiento previo de las categorías de los mismos, lo que ocurre sobre todo en las tareas de agrupación de clientes de RD a nivel de agregadores. Por último, una vez que los clientes de RD han sido categorizados y se ha previsto su consumo, los agregadores programan la activación de los participantes de RD y planifican sus recompensas y penalizaciones.
- Por otro lado, los modelos basados en teoría de juegos para resolver el problema que se genera entre la interacción de clientes y ESEE ha despertado la curiosidad científica [144], debido a que engloba a los distintos integrantes del modelo entre sí en lugar de tratarlos individualmente, y esta interacción cooperativa o no cooperativa saca lo mejor de este modelo; además la función de costo a minimizar puede construirse como un juego diferencial [143]. Por ejemplo, en [121] se aproxima el modelo de acuerdo a un juego doble nivel donde se ajusta a la ESEE como un juego no cooperativo y a los clientes como un juego evolutivo; esa mezcla de algoritmos se debe a que los modelos basados en teoría de juegos no convergen rápidamente con un gran número de participantes pero la respuesta se mejora considerablemente cuando se hibrida con un algoritmos de IA.
- Adicionalmente, los modelos basados en teorías deterministas se utilizan mayoritariamente para optimizar la RD en clientes individuales debido a su rápida convergencia pero, y de acuerdo con [139], estas técnicas de programación no pueden manejar un gran número de dispositivos de control que tengan diferentes patrones de cálculo y heurística, por lo que los relega a un segundo plano como herramienta de optimización.
- Finalmente, los modelos estocásticos son los menos utilizados debido a su débil grado de convergencia en este tipo de circunstancias aunque abordan muy bien la naturaleza aleatoria

de la generación renovable, los precios del mercado y la demanda de la carga. En los últimos años se ha abordado modelos estocásticos con optimizadores robustos basados en IA que han mejorado sustancialmente la respuesta del algoritmo, más siguen siendo una opción deficiente comparada con la emergente tecnología basada en IA.

- d) Con respecto a la escala de tiempo en la que se desarrollan los programas, en el 66,66% de los documentos no se aclara un sistema en específico más sí se especifica que se deben a un sistema de precios dinámico. En el 33,33% restante los modelos presentan dos tipos de señales de precios: en tiempo real (20%) y con un día de antelación (13,33%). Además, no hay una correlación entre escala de tiempo y modelo utilizado para optimizar el problema ya que para cada escala de tiempo se puede ver el aporte de todos los modelos considerados en este estudio.
- e) Con respecto al nivel de aplicación de los programas de RD y su relación con la metodología usada, el análisis muestra que para la aplicación del control automático de la RD en usuarios individuales y para un grupo de usuarios se ha utilizado mayoritariamente modelos basados en teoría de juegos, mientras que para una red de usuarios los algoritmos más utilizados son los que se basan en IA. Finalmente se registra que la única estrategia utilizada para modelar los efectos de la RD y el mercado es el método de IA. En la figura 4-11 se indica el aporte de cada modelo según el nivel de aplicación de programas de RD en la red eléctrica.

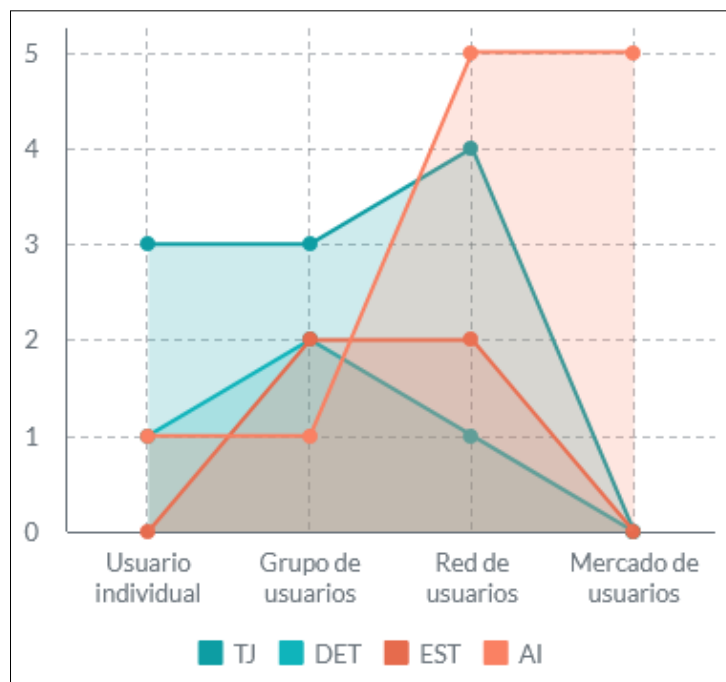


Figura 4-11.- Modelos utilizados de acuerdo al nivel de aplicación de los programas de RD.

- f) Con respecto a la inclusión de GD y AE dentro de los programas de RD, el análisis realizado no es concluyente ya que se aprecia que el 40% de los artículos analizados incluye a la GD y a cualquier forma de AE, mientras que el 43,3% no los incluye. Del porcentaje restante, el 10% solamente incluye la GD en su algoritmo y el 6,7% sólo incluye el AE. De todos modos, y dadas las explicaciones de los capítulos anteriores, el desarrollo de los programas de RD está estrechamente ligado con la GD y el AE ya que maximizan sus beneficios entre sí, por lo que seguir investigando en algoritmos que no incluyan estos temas es improcedente. En la actualidad se puede apreciar como la mayoría de los objetivos de investigación sí incluyen a la GD y al AE, tal como se aprecia en la figura 4-12 (Para obviar los años de donde no se tiene información, se los relleno la tabla con la información del año que lo precede hasta encontrar un valor válido diferente de cero).

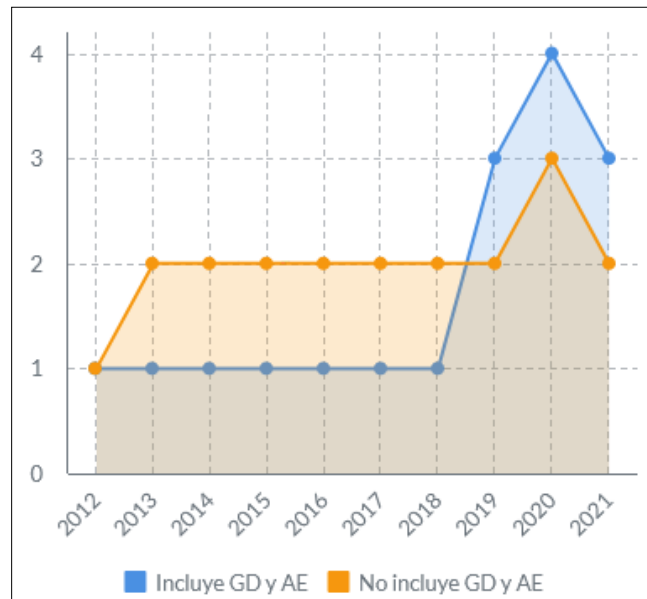


Figura 4-12.- Presencia de la GD y del AE en los algoritmos de RD.

- g) Con respecto al software utilizado para el desarrollo de los modelos, el análisis realizado determinó que el 43,3% de los artículos utilizan MATLAB como herramienta de cálculo, mientras que el otro 43,3% no lo especifica en sus escritos. Otros programas usados son: LINGO (3,4%), CPLEX (3,4%) y GAMS (6,6%).
- h) Con respecto a los logros alcanzados mediante el modelado (ver figura 4-13) y solución óptima de los programas de RD implantados en el/los clientes, en general todos documentos llegan a cumplir el objetivo que se plantean desde un principio. En general los logros obtenidos se clasifican en seis categorías que son:

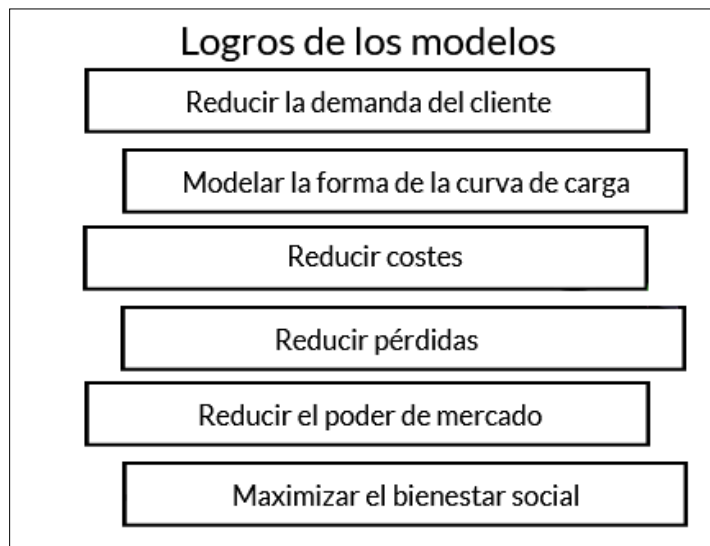


Figura 4-13.- Logros obtenidos de la aplicación de los modelos analizados.

- i) Para finalizar, con respecto a las limitaciones del modelo y la solución óptima de los programas de RD implantados en el/los cliente/s, en general todos documentos recaen en la misma limitación y es que no se incluyen en todos las mismas variables a controlar, los objetivos a optimizar no son los mismos, algunos buscan minimizar el PAR y los costes, pero dejan a un lado el bienestar social; otros toman en cuenta la reducción del combustible que se utiliza para generación pero no reducen la demanda, o algoritmos que no incluyen la GD o el AE. In saecula saeculorum, no hay una forma estándar que permita definir mejor el camino a seguir con respecto de que optimizar. La figura 4-14 resume estas limitaciones e incluye otras también identificadas.

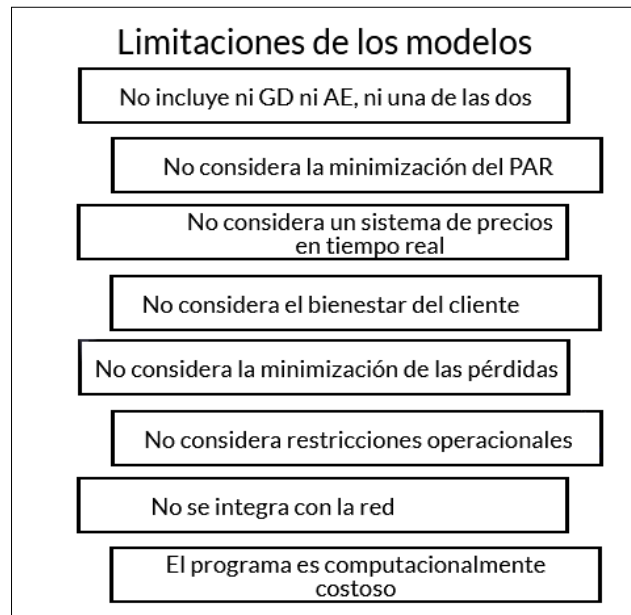


Figura 4-14.- Limitaciones obtenidas de la aplicación de los modelos analizados.

Como punto final, se señala que en todos los documentos analizados, los algoritmos han sido desarrollados en el ámbito investigativo sin embargo no han sido aplicados en sistemas reales.

4.3.2 Sistema de comunicación

4.3.2.1 Sistemas por cable

De acuerdo con [146], en Estados Unidos se implementaron 70 proyectos para modernizar la red eléctrica a través del desarrollo de redes de comunicación, de los cuales se detalla lo siguiente:

- La Junta de Energía Eléctrica (EPB) de Chattanooga aplicó a sus 175,116 clientes una red de comunicación, basada solamente en **fibra óptica**, que permite la comunicación bidireccional y la transferencia de datos entre los usuarios y la ESEE. El costo promedio por medidor fue de \$1,023 dólares estadounidenses.
- El distrito de servicios públicos del pueblo de Lincoln Central aplicó a sus 38,620 clientes un sistema de comunicación combinado de **malla de radiofrecuencia** y cable de **fibra óptica**, el cual conecta el despliegue de los contadores inteligentes en todo el sistema. Adicionalmente, se desplegó fibra adicional para conectar todas las subestaciones al centro de control. El costo promedio por medidor es de \$422 dólares estadounidenses.
- La corporación eléctrica de los tres Estados aplicó a sus 17,802 clientes un sistema de comunicaciones basado en **PLC** y el backhaul de **fibra óptica**. El costo promedio por medidor se ubica en los \$159 dólares estadounidenses.
- La central eléctrica de Maine (CMP) aplicó a sus 622,380 clientes un sistema de comunicación híbrido entre redes malladas inalámbricas de radiofrecuencia utilizando una combinación de conmutación de etiquetas multiprotocolo (MPLS), **DSL** y Backhaul celular entre los contadores inteligentes y los sistemas de back office de la central. El costo medio por medidor es de \$290 dólares estadounidenses.

4.3.2.2 Sistemas Inalámbricos

De acuerdo con [146], en Estados Unidos se implementaron 70 proyectos para modernizar la red eléctrica a través del desarrollo de redes de comunicación, de los cuales se detalla lo siguiente:

- La Empresa de Servicios Públicos *Centerpoint Energy* aplicó a sus 2'320,256 clientes una red de comunicación basada en una combinación de ondas de radio, microondas y fibra óptica. El uso de

amplificadores de señal celular, *WiMax* de 3.650 [MHz], señales de radio de 900 [MHz] y repetidoras de señal eliminaron la necesidad de servicios satelitales más costos. El costo promedio por medidor fue de \$241 dólares estadounidenses.

- La Empresa de Servicios Eléctricos POTOMAC (PEPCO) aplicó a sus 277,222 clientes una red de comunicación mallada inalámbrica a través de la red celular. El costo promedio por medidor fue de \$258 dólares estadounidenses.
- La cooperativa eléctrica Talquin (TEC) aplicó a sus 56,000 clientes una red de comunicación mallada inalámbrica a través de microondas. El costo promedio por medidor fue de \$277 dólares estadounidenses.
- La Empresa de Servicios Públicos BURBANK (BWP) aplicó a sus 51,928 clientes una red de comunicación de dos tipos: una red de fibra óptica para supervisar y controlar el sistema de distribución eléctrica, y una red de radiofrecuencia de malla Wi-Fi para transmitir la información desde los contadores inteligentes. El costo promedio por medidor fue de \$570 dólares estadounidenses.

4.3.3 Sistema de monitorización

4.3.3.1 Infraestructura de medición avanzada (AMI)

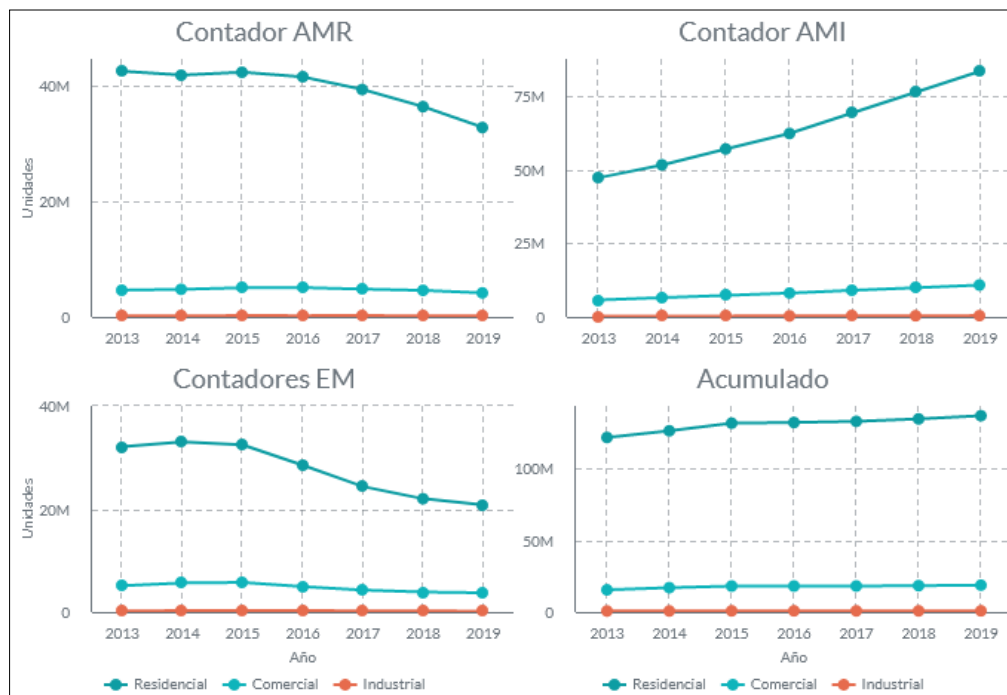


Figura 4-15.- Penetración de contadores por el tipo de tecnología.

En Estados Unidos se ha implantado una campaña agresiva en la instalación de sistemas de medición inteligente entre sus abonados, los cuales reemplazan el sistema AMR y el sistema estándar con contador electromecánico. Para el año 2019 el 31.23% de los abonados contaba ya con un sistema AMI mientras que en el año 2010 solamente el 14.11% lo tenía. En la figura 4-15 se muestra la evolución histórica de los tipos de tecnología para la medición del consumo de electricidad en los diferentes tipos de cliente, se ve claramente cómo se ha optado por implementar sistemas tipo AMI en los clientes residenciales puesto que estos son aproximadamente el 75% de los clientes enrolados en panes de GDE.

En la actualidad, los sistemas AMI se encuentran ampliamente aceptados y la gran mayoría de países se han puesto objetivos a corto plazo para el despliegue de estas tecnologías. La UE mediante la Directiva 2009/72/CE exige a los estados miembros proceder con la instalación de al menos el 80% de contadores inteligentes en su territorio para el año 2020. De acuerdo a FUSEAM, países como Dinamarca, Estonia, Finlandia, Italia, España y Suecia han culminado con las labores de instalaciones de los contadores

inteligentes en la totalidad de los puntos de medición.

4.3.3.2 Sistema de Gestión de Energía

El SGE es el núcleo principal de los edificios inteligentes, sea este una residencia, un edificio, un conjunto de oficinas o una fábrica; la gestión energética en los usuarios finales inicia aquí. Si bien esta gestión puede tener dos paradigmas diferentes, uno a través de la domótica y otro a través de la GDE, siendo la principal diferencia entre ambos que la GDE obedece a un conjunto de reglas que buscan la disminución de la demanda total y la domótica se escapa a dicha filosofía.

De acuerdo con [147] del DOE de Estados Unidos, hay un conjunto de especificaciones que los SGE deben cumplir para ser considerados como gestores energéticos, y estas son:

- **Supervisión y control de dispositivos.-** Estos sistemas deben estar en la capacidad de supervisar y controlar los diferentes dispositivos de un emplazamiento. La información de los dispositivos puede estar disponible para el usuario a través de una interfaz web o una aplicación para el teléfono o Tablet. En su forma más simple, el control de los dispositivos debe estar disponible para operarse manualmente. Si el sistema de gestión admite la programación inteligente, el control puede ser automático. Además, el control de los dispositivos puede ser remoto o local.
- **Comunicación sin interrupciones entre los dispositivos.-** Estos sistemas son los encargados de proporcionar comunicación a los demás equipos sin importar el protocolo de comunicación de estos, o el tipo de tecnología utilizada sea este: Wi-Fi, ZigBee, Z-Wave, etc.
- **Respuesta de la demanda.-** Es un requisito básico que este sistema sea capaz de recibir señales de RD. Para un mejor apoyo de esta, es necesario disponer de la información de múltiples hogares en una comunidad, y el sistema debe ser capaz de utilizar un método de optimización para responder inteligentemente a las señales de RD y asignar los recursos a los hogares de manera eficiente.
- **Inteligencia.-** La mayoría de los usuarios no tienen ninguna comprensión de su uso de la electricidad, por lo que no pueden tomar las decisiones adecuadas para reducir el consumo. Sería beneficioso que el SGE proporcionara información al usuario y realizara algunos ajustes automáticos si el usuario lo permite previamente. Para lograr el objetivo de ahorro energético, es necesario incorporar a los sistemas algoritmos inteligentes de programación y optimización.
- **Gestión de datos.-** La información relativa al uso de la energía puede proporcionarse en diferentes granularidades desde una amplia variedad de dispositivos, especialmente desde el AMI. Los SGE deben ser capaces de manejar cantidades muy grandes de datos de manera eficiente.
- **Seguridad y privacidad.-** Los SGE transportan mucha información sobre los patrones de uso de energía y los horarios diarios de los residentes. Toda esta información debe estar encriptada y ser segura.

En la actualidad hay dos tipos de SGE disponibles, estos son:

- **SGE de código abierto.-** Estos sistemas pueden estar a disposición de muchos usuarios con a un coste mínimo. Además, los distintos proveedores pueden desarrollar sus interfaces para que sus dispositivos sean compatibles con el sistema. Otros desarrolladores e investigadores también pueden añadir diferentes funcionalidades al SGE. Uno de los inconvenientes es que pueden resultar difíciles de implantar y utilizar para un usuario sin conocimientos técnicos. Entre los principales se encuentran: BEMOSS, WattDepot, Home Assitant, Honda's Smart home, Neurio Home Energy Monitor, Wink Hub 2, EmonCMS, OGEMA, Open Energy Monitor, entre otros.
- **SGE de usuario.-** Estos sistemas son los que están disponibles en el mercado y han sido desarrollados con fines comerciales ya sea por terceras partes o por investigadores. Las ventajas de estos sistemas es que son mucho más amigables con el cliente, fáciles de instalar y proveen de seguridad informática básica al cliente. Entre los principales se encuentran: PERSON, EnergySniffer, VerifiScope, HandyFeedback, NOBEL, ALIS, GoogleHome, DreamWatts, Apple HomeKit, Samsung's SmartThings Hub, Amazon Echo, entre otros.

4.4 Beneficios de la GDE y su aporte en la agenda sostenible 2030

Durante el transcurso de la investigación se han analizado los diferentes alcances que tiene la GDE en la operación de la red eléctrica. Partiendo desde la reducción de la demanda eléctrica, se ha creado una retícula que muestra los distintos campos de acción de esta teoría energética y sus posibles beneficios técnicos, sociales, ambientales, entre otros. Dado el compromiso de la comunidad internacional en la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) propuestos por la ONU, es interés del autor mostrar los beneficios que la aplicación de los programas de la GDE aportan a consolidación de los ODS en la sociedad, cuyo aporte se describe a continuación.

4.4.1 Objetivo 3 sobre salud y bienestar

La GDE aporta al desarrollo del objetivo 3 de la siguiente forma [148]:

- Los programas de SREP permitirían la eliminación del uso de combustibles de origen fósil y así, mejorar la salud de los clientes residenciales. El uso de vectores energéticos contaminantes (leña, carbón, queroseno, entre otros) genera un impacto negativo en la salud debido al monóxido de carbono (CO) que emiten en su combustión. De acuerdo con [149], niveles moderados el CO pueden causar dolores de cabeza, mareos, confusión mental, náusea o desmayos; pero puede causar la muerte si estos niveles, aunque moderados, se respiran durante mucho tiempo. En cambio, bajos niveles el CO pueden causar falta de aliento, náusea y mareos ligeros, y puede afectar la salud después de un tiempo.
- Los programas de SREP permitirían la eliminación del uso de combustibles de origen fósil y así, promover un mejor desarrollo en la etapa infantil de los seres humanos. En [[105], [104]-[106]] se citan los riesgos que producen las bajas concentraciones de gases producidos por la quema de combustibles fósiles en la salud humana, entre ellos se distingue: incremento de la mortalidad infantil con efectos concentrados en el periodo perinatal, reducción de la masa corporal en neonatos, entre otros.

4.4.2 Objetivo 7 sobre energía asequible y no contaminante

La GDE aporta al desarrollo del objetivo 7 de la siguiente forma [150]:

- La implementación de planes de CE permite reducir la demanda, razón por la cual la curva de carga también se deprime. Esto implica que algunas centrales con costos de producción altos dejarían de operar reduciendo el costo general de producir energía eléctrica.
- Al usar de una forma eficiente los recursos se está incentivando a la sostenibilidad ya que menos recursos han sido gastados.
- Se disminuiría la emisión de GEI, más aún si las fuentes de generación de energía son renovables.
- La implementación de los programas de RD pueden desplazar la demanda desde los picos hasta los valles de la curva y así mejorar la eficiencia del sistema.

4.4.3 Objetivo 8 sobre trabajo decente y crecimiento económico

La GDE aporta al desarrollo del objetivo 8 de la siguiente forma [151]:

- La aplicación de programas de GDE propiciaría ambientes de productividad más elevados debido a la modernización tecnológica y a la innovación a las que serán sometidas las redes eléctricas, en especial las redes de distribución.
- La implementación de planes de SREP puede alentar a la creación de nuevos puestos de trabajo ya que se requerirá mayor producción de electricidad para satisfacer las necesidades energéticas de las personas al pasar de combustibles menos eficientes a la energía eléctrica.
- La RD promueve un cambio en el mercado de electricidad el cual implementará nuevos actores en la explotación de la red; dichos actores pasarían a fomentar nuevos tipos de negocio en los mercados

eléctricos.

4.4.4 Objetivo 9 sobre industria, innovación e infraestructura

La GDE aporta al desarrollo del objetivo 9 de la siguiente forma [152]:

- La implementación de planes de conservación energética requiere la construcción y el uso sostenible de las distintas infraestructuras, que fomenten el ahorro de sus componentes y de recursos. Este tipo de planes deben ser considerados debido a que es más barato invertir en programas de EE que seguir manteniendo los costos de producir ineficientemente. Además es más rápido diseñar y operar este tipo de programas que la construcción o ampliación del sistema eléctrico.
- Mediante programas de SREP se puede modernizar los procesos industriales para que sean más sostenibles y que sean capaces de manejar los recursos con mejor eficacia.
- La RD plantea algoritmos que pretenden proveer de energía al usuario tomando en cuenta variables como el confort del usuario, energía almacenada, energía generada en tiempo real, precios de la energía en el mercado, curva de demanda, entre otros; todo esto con la finalidad de optimizar el consumo del usuario final ya sea a nivel residencial, comercial o industrial.

4.4.5 Objetivo 10 sobre reducción de las desigualdades

La GDE aporta al desarrollo del objetivo 10 de la siguiente forma [153]:

- El acceso a los vectores energéticos no es universal ni gratuito, este está sujeto a un costo monetario. La hipótesis de escalera energética establece que: a mayor poder adquisitivo, mayor y mejor será el consumo energético de determinado cliente. Por consiguiente, el acceso a vectores energéticos depende de la cantidad de poder adquisitivo que se disponga. Clientes con mayor poder adquisitivo gozarán de un mejor acceso a fuentes energéticas mientras que clientes con menor poder adquisitivo accederán al que puedan costearse. Sí que la GDE permite abaratar los costos de la electricidad, sobre todo en los periodos de demanda pico, entonces los clientes con menor poder adquisitivo tendrán acceso a tarifas de electricidad más barata, y esto reduciría la desigualdad en el acceso a este tipo de fuente de energía.
- Los programas de GDE podrían reducir las desigualdades que se crean en los mercados eléctricos a través de la disminución de la volatilidad de los precios del mercado [153].

4.4.6 Objetivo 11 sobre ciudades sostenibles

La GDE aporta al desarrollo del objetivo 11 de la siguiente forma [154]:

- Permite la integración de tecnologías como GD y AE en el cliente, de forma que este pueda ser autosuficiente eléctricamente hablando.
- Los programas de CE reducen el consumo de energía eléctrica.
- Los programas de SREP promueven el uso de VE como una forma de transporte seguro, asequible, accesible y sostenible. Como efecto colateral de este cambio, se mejora la calidad del aire.
- La RD es una herramienta útil para controlar y reducir la demanda pico de las ciudades, esto aplazaría las inversiones para aumentar el tamaño de la red.

4.4.7 Objetivo 12 sobre producción y consumo responsable

La GDE aporta al desarrollo del objetivo 12 de la siguiente forma:

- La implementación de planes de conservación energética, por definición, garantiza modalidades de consumo energético sostenibles y eficientes que mitiguen el sobre consumo de recursos naturales.
- El cambio de combustible primario, la electrificación industrial y, la captura y almacenamiento de dióxido de carbono proporcionan una mejor solución para mitigar las emisiones de GEL.

- La RD optimiza la demanda, por ende alienta a un consumo responsable de la electricidad de acuerdo a las configuraciones del sistema eléctrico.

Adicionalmente, la GDE engloba otros beneficios que no pueden ser abarcados dentro de los ODS. En la figura 2-16 se muestra un resumen de los beneficios de la GDE.

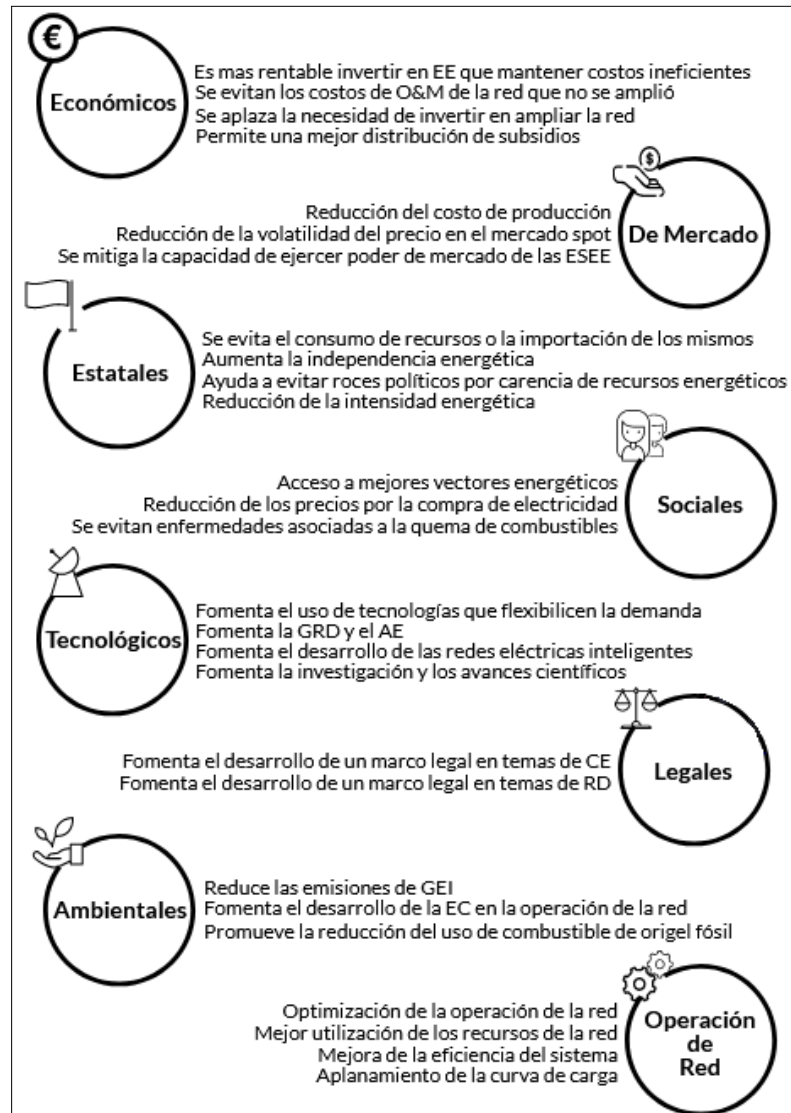


Figura 2-16.- Beneficios de la GDE.

5 CASOS DE APLICACIÓN

“El pueblo unido jamás será vencido.”

- Sergio Ortega, compositor y pianista chileno -

Aplicar los programas de Gestión de la Energía Eléctrica desde el lado de la Demanda es la respuesta que muchos países han decidido implementar en sus estructuras eléctricas. Estados Unidos es de los primeros países en haber apostado en materia de GDE con su Ley de Conservación Energética de 1978. En este capítulo se pretende mostrar las bondades de la aplicación de los programas de la GDE como instrumento para reducir la demanda y los picos de demanda, para ello se ahondarán las causas de este fenómeno. Para estudiar la demanda se ha recurrido a los datos estadísticos provistos por ENERDATA, publicados en su anuario estadístico energético del año 2021 [155]. En la figura 5-1 se muestra una comparativa de la producción energética mundial desde 1990 hasta el 2020 tanto por país como por región.

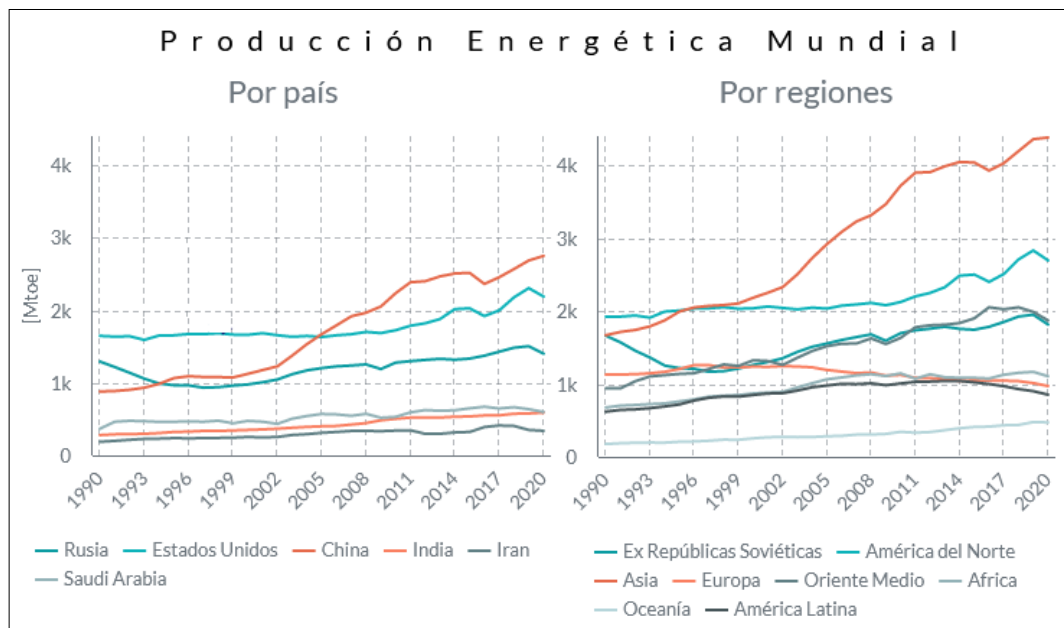


Figura 5-1.- Producción energética mundial desde 1990 hasta 2020.

A nivel global, los picos de producción/consumo energético se registraron en el año 2019. El suministro fue de 14,685 millones de toneladas equivalentes de petróleo ([Mtoe]) mientras que el consumo fue de 14,407 [Mtoe]. Para ese mismo año, China fue el mayor productor (2,286 [Mtoe]) y consumidor (3,309 [Mtoe]) de vectores energéticos. Asimismo, Asia fue la región que más recursos produjo (4,358 [Mtoe]) y también la que más consumió (5,983 [Mtoe]).

Además, la segunda región que más produce es América del Norte, seguido de Oriente Medio y las Ex Repúblicas Soviéticas. Por otra parte, la segunda región que más consume es también América del Norte, seguido de Europa y las Ex Repúblicas Soviéticas. En la figura 5-2 se muestra una comparativa del consumo energético mundial desde el año 1990 hasta el año 2020 tanto por país como por región.

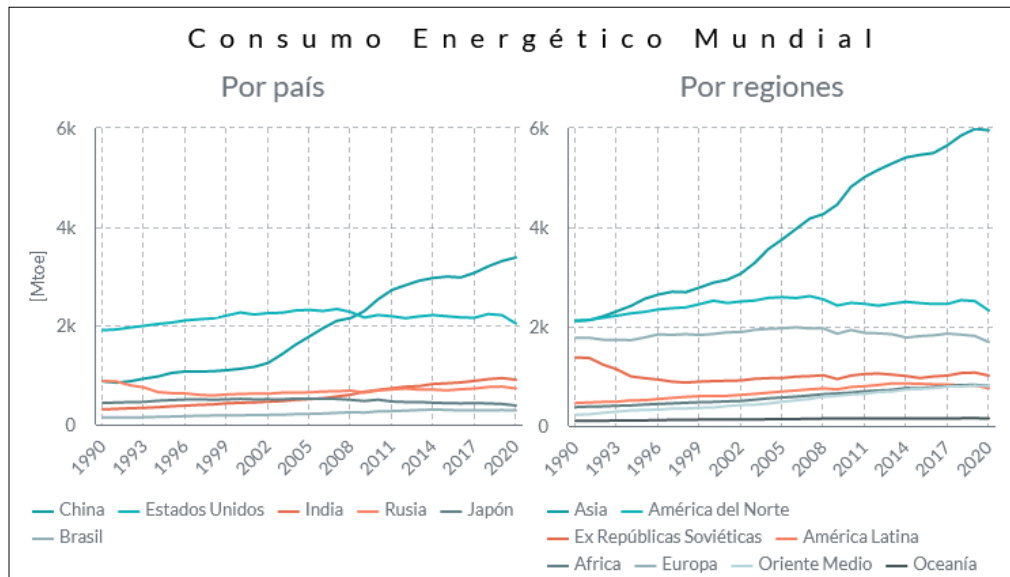


Figura 5-2.- Consumo energético mundial desde 1990 hasta 2020.

Analizando los datos sobre producción y consumo energético se puede concluir que:

- Europa, Asia y América del Norte consumen más recursos energéticos de los que producen, denotando así la dependencia de estas regiones a vectores energéticos importados, especialmente Asia y Europa.
- El gran consumo asiático subyace en el hecho que esta alberga a tres de los cinco mayores consumidores energéticos, dos de ellos corresponden a economías que se encuentran en pleno desarrollo.
- El consumo energético en Asia viene marcado con el consumo energético chino, así como en América del Norte por Estados Unidos y en las Ex Repúblicas Soviéticas por Rusia.
- Los principales productores energéticos mundiales son Medio Oriente y las Ex Repúblicas Soviéticas.
- La diferencia entre producción y consumo de los recursos energéticos en Asia es de 1,625 [Mtoe] y en Europa es de 799 [Mtoe] de acuerdo a los datos del año 2019.

En la figura 5-3 se muestra los niveles de producción y consumo de los recursos energéticos de las diferentes regiones analizadas.

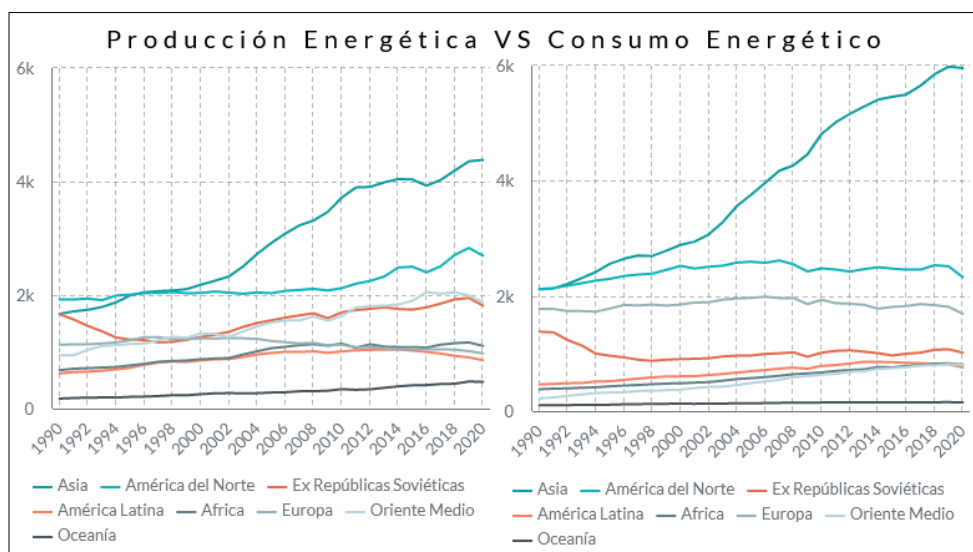


Figura 5-3.- Diferencia entre Producción y Consumo energético mundial desde 1990 hasta 2020.

En el año 2019 se destinó el 16.33% los recursos energéticos mundiales a la producción de electricidad.

A nivel global, los picos de producción/consumo de electricidad se registraron en el año 2019. La producción fue de 27,063 [TW-h] mientras que el consumo fue de 23,430 [TW-h]. Para ese mismo año, China fue el mayor productor (7,519 [TW-h] y consumidor (6,539 [TW-h]) de energía eléctrica. Asimismo, Asia fue la región que más electricidad produjo (12,697 [TW-h]) y también la que más consumió (10,904 [TW-h]). En la figura 5-4 se muestra una comparativa de la producción de electricidad mundial desde el año 1990 hasta el año 2020 tanto por país como por región.

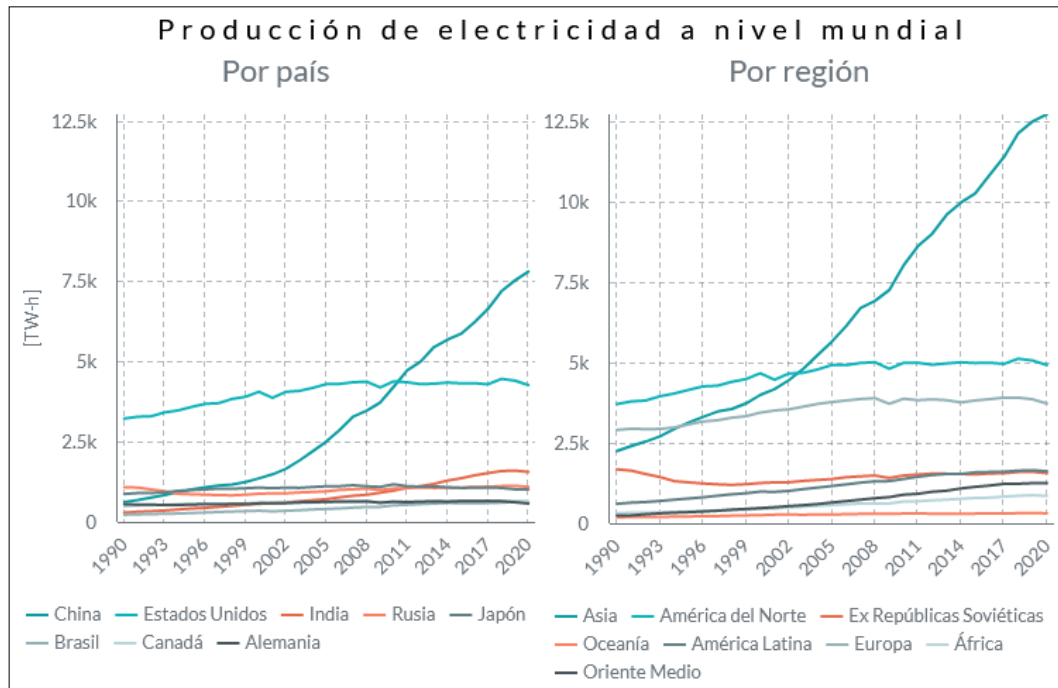


Figura 5-4.- Producción de electricidad a nivel mundial desde el año 1990 hasta el 2020.

Además, la segunda región que más produce/consume es América del Norte, seguido de Europa, América Latina y las Ex Repúblicas Soviéticas. En la figura 5-5 se muestra una comparativa del consumo de electricidad a nivel mundial desde el año 1990 hasta el año 2020 tanto por país como por región.

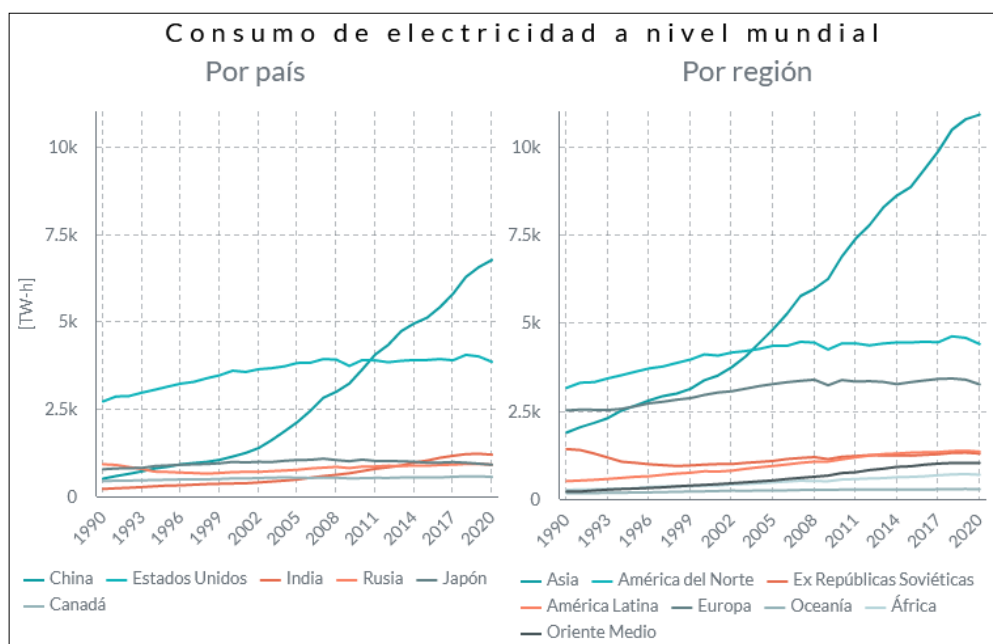


Figura 5-5.- Consumo de electricidad a nivel mundial desde el año 1990 hasta el 2020.

Analizando los datos sobre producción y consumo de electricidad se puede concluir que:

- En temas de producción/consumo de electricidad los países son medianamente auto-solventes. Los principales productores son los principales consumidores.
- La principal región en producción/consumo de electricidad es Asia. Su consumo pasó de 3,336 [TW-h] en el 2000 a 10,904 [TW-h] en el 2020, esto se debe a su densidad poblacional y a lo emergente de sus economías, especialmente la china.
- El consumo de electricidad en Asia viene marcado con el consumo energético chino, así como en América del Norte por Estados Unidos y en las Ex Repúblicas Soviéticas por Rusia.
- Tanto América del Norte y Europa son la segunda y tercera región en producir/consumir electricidad, lo cual va ligado al desarrollo de sus economías.
- Desde el 2015 el ranking de producción/consumo de electricidad viene dado de la siguiente forma: China, Estados Unidos, India, Rusia, Japón y Canadá.

En la figura 5-6 se muestra los niveles de producción y consumo eléctrico de las diferentes regiones analizadas.

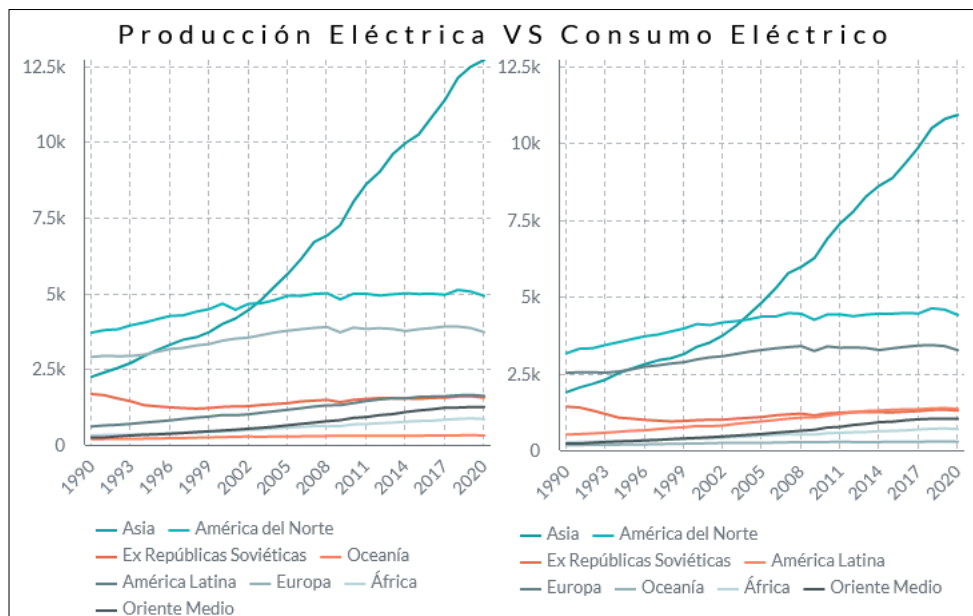


Figura 5-6.- Diferencia entre Producción y Consumo de electricidad mundial desde 1990 hasta 2020.

Los gruesos números que deja la explotación a la red eléctrica muestran una diferencia pendiente entre los valores de producción y consumo. Esta diferencia se pierde en la red debido a diversos fenómenos ampliamente conocidos y combatidos. Para el año 2020 las pérdidas globales en la red ascendían a la cifra de 3,730 [TW-h], que representan el 13,9% del total producido. Podrían ser comparables con el consumo eléctrico de todo el continente europeo, o con el consumo conjunto de Oriente Medio, África, Oceanía y América Latina, una cantidad nada desdeñable.

Estados Unidos ha sido, desde que se tienen registros, el país que más recursos energéticos y electricidad ha consumido a nivel global (111,204 [TW-h] desde 1990 hasta el 2020). No es sorprendente por tanto que ellos sean los pioneros en el desarrollo de programas de GDE, ni tampoco que el principal consumidor energético en la actualidad, China, le esté siguiendo los pasos. Dado que uno de los objetivos de la GDE es mejorar la eficiencia de la red, una forma de poder cuantificarla es a través del coeficiente de **Intensidad Energética** (IE). Este determina que cantidad de recursos energéticos necesita un país para generar producto interno bruto (PIB). A menor recurso energético para producir una unidad de PIB menor será el coeficiente de IE y por lo tanto, mayor será la eficiencia energética de dicho país. En la actualidad, la media global para el año 2020 de la IE fue de 0.114 [kCO₂/\$15p]. En la figura 5-7 se muestra la evolución de la IE desde el año 1990 hasta el 2020 (las unidades están en [CO₂/\$15p]), en el gráfico de la izquierda se muestra la evolución por países

mientras que en el de la derecha por regiones.

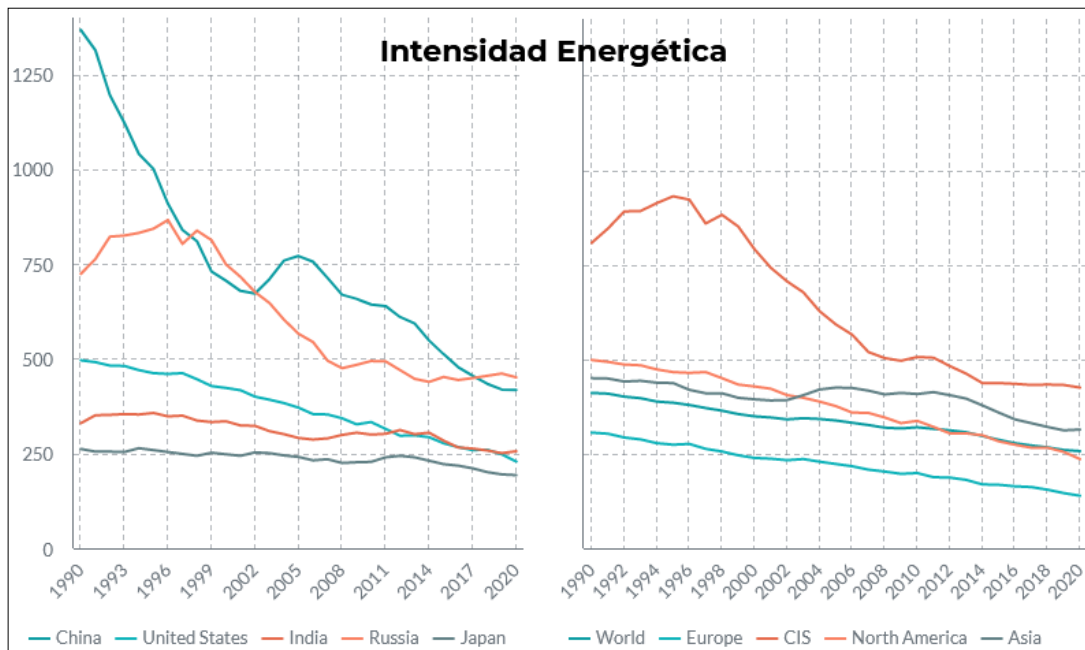


Figura 5-7.- Evolución de la Intensidad Energética desde 1990 hasta 2020.

Es coherente que los países que más electricidad consumen sean los que más interesados estén en reducirla, más aún si dicha electricidad es producida con vectores costosos y contaminantes como el diésel, o con vectores brutalmente contaminantes como el carbón. También es coherente que el gobierno europeo promulgue una ley que guíe sus economías a la descarbonización siendo esta región la que principalmente carece de vectores energéticos no renovables y depende de materias primas importadas para su desarrollo económico. Es coherente que regiones como África y América Latina (AL) no hayan avanzado en el desarrollo de programas de RD debido que tienen otras prioridades energéticas y sociales.

Basado en este análisis, y a sabiendas del desarrollo en temas de GDE de los países, se ha escogido a Estados Unidos, China y a los países de la Unión Europea para analizar sus propuestas en temas de GDE.

5.1 Estados Unidos (USA)

5.1.1 Situación energética actual

De acuerdo a los datos recogidos en el año 2019 [155], analizando los 10 países que más consumen energía eléctrica, se detalla a continuación las características generales que describen al sector eléctrico estadounidense:

- Es el segundo país que más recursos energéticos consume (2,214 [Mtoe]) representando el 15.69% de la cuota global aunque posee el 4.29% [156] de la población mundial.
- Es el segundo país que más electricidad produce (4,401 [TW-h]), el 16.26% de la cuota mundial, y consume (3,996 [TW-h]).
- Las pérdidas eléctricas fueron aproximadamente 405 [TW-h], estas representan el 9.2% de su producción. En perspectiva general son solamente superados por el 8% de Japón.
- Es el noveno país con mayor consumo de energía eléctrica per cápita en el mundo, este valor bordea los 12,175.5 [kW-h].
- Es el segundo mayor emisor de CO₂, solo después de China, con 4,933 toneladas métricas de CO₂ [MtCO₂].

Para un país con un consumo de electricidad mayor que el consumo de América Latina, África, Oceanía,

Oriente medio y ex Repúblicas Soviéticas, cualquier disminución en la demanda representa un ahorro muy importante.

La generación eléctrica en Estados Unidos depende principalmente de los siguientes vectores energéticos[156]:

- Carbón (27%)
- GLP (35%)
- Nuclear (19%)
- Fuentes renovables (17%)
- Derivados de petróleo (1.2%)

En la gráfica 5-8 se muestra la evolución de la producción de energía eléctrica desde el año 1950 hasta el año 2020.

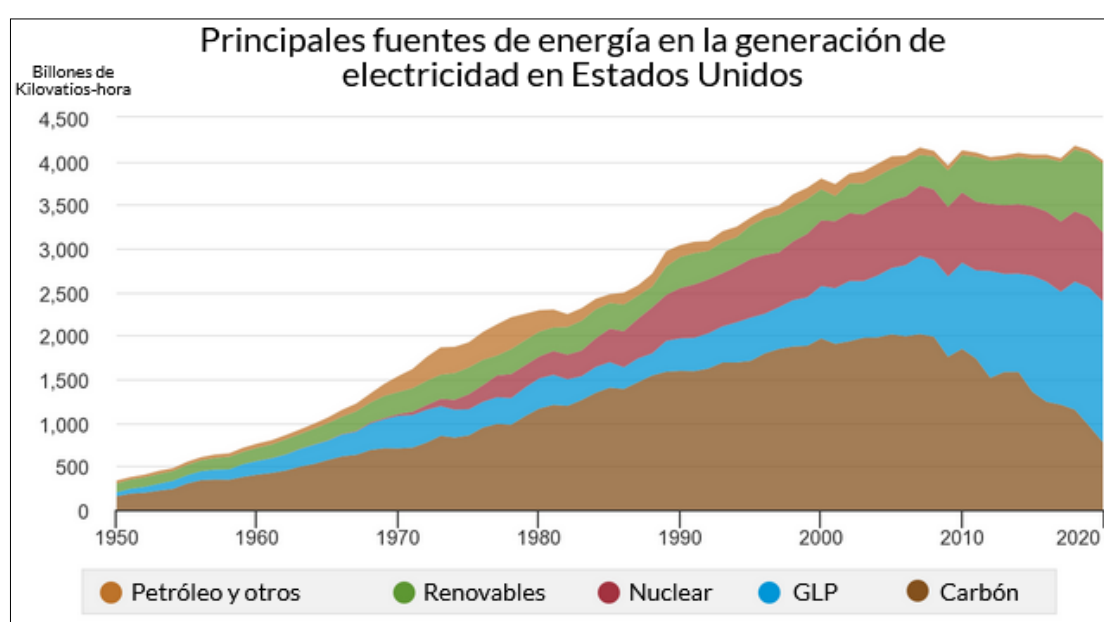


Figura 5-8.- Principales fuentes de energía en la producción de electricidad en USA.

Fuente: U.S. energy information administration, monthly energy review, table 7.2a, January 2021

De acuerdo con [157], casi todos los hogares de Estados Unidos utilizan la electricidad de alguna manera, alrededor del 21% de los hogares de todo el país utilizan la electricidad para todas sus necesidades energéticas, incluyendo la preparación de alimentos, la calefacción, la refrigeración y el calentamiento del agua. Por otro lado, el consumo de electricidad en USA suele ser menor los fines de semana y los días festivos que entre semana, debido a que muchas oficinas comerciales están cerradas y se necesita menos electricidad para la iluminación, refrigeración, ventilación y equipos informáticos.

La industria eléctrica clasifica los periodos de consumo en dos categorías:

- **Horas punta.-** Se sitúan entre las 7:00 de la mañana hasta las 11:00 de la noche en días laborables.
- **Horas valle.-** Se sitúan entre las 11:00 de la noche y las 7:00 de la mañana en días laborables, y todo el día los sábados, domingos y festivos.

El consumo de electricidad suele ser cíclico cada día, con la demanda más baja alrededor de las 5:00 de la mañana y la más alta en algún momento del día (dependiendo de la estación), antes de volver a bajar durante las últimas horas de la tarde. Esta variación de la demanda de electricidad sigue los patrones diarios de uso de energía por parte de los hogares y las empresas, pero depende especialmente de factores relacionados con el clima. El nivel y la forma general de la curva de carga total varía de un año a otro, y las formas típicas de carga varían según las regiones debido a las diferencias en los patrones climáticos y los tipos de equipos eléctricos en uso.

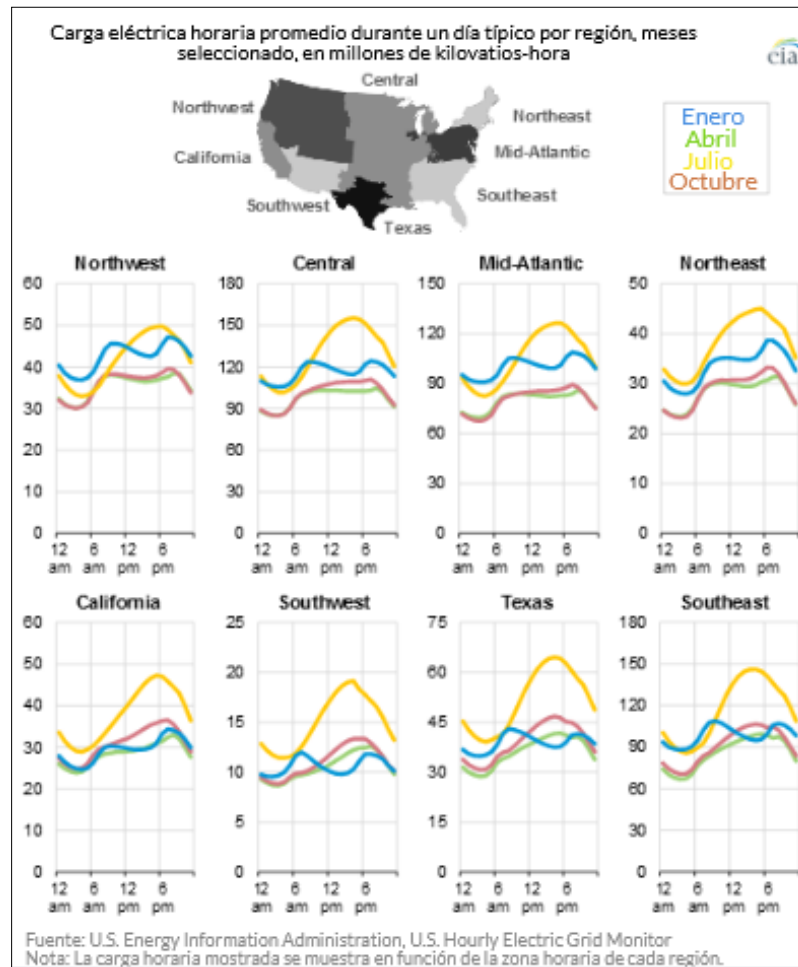


Figura 5-9.- Carga horaria promedio durante un día típico por región.

En la figura 5-9 se muestra la carga horaria promedio durante un día típico por región en determinado mes de una estación. Durante el **invierno**, el ciclo diario de la carga eléctrica total de USA suele tener un pico matutino y otro vespertino ya que alrededor de un tercio de los hogares estadounidenses dependen principalmente de hornos eléctricos o bombas de calor. Durante las horas de la mañana, el consumo de electricidad aumenta a medida que la gente enciende las luces, sube los termostatos y utiliza el agua caliente para prepararse para el día y cuando abren los negocios y las oficinas. La carga de electricidad vuelve a aumentar en las tardes de invierno cuando la gente vuelve a casa y empieza a calentar sus hogares y a cocinar sus comidas. En pleno **verano**, el aire acondicionado representa una gran parte del consumo de electricidad residencial (87%) y comercial. El ciclo de carga diario de USA en verano tiene un rango mucho más amplio que en invierno debido al uso generalizado del aire acondicionado. El consumo de electricidad en verano aumenta rápidamente a lo largo del día junto con la temperatura, alcanzando su máximo alrededor de las 17:00 o 18:00 horas.

5.1.2 Política Energética en temas de Respuesta de la Demanda

Tal como se determinó en apartados anteriores, los programas de GDE solamente pueden establecerse como tal bajo un marco legal y jurídico que los garantice, y que además facilite su implantación dentro de la arquitectura de la operación de los sistemas eléctricos. La política energética estadounidense sobre la GDE ha tenido varios hitos, los cuales se presentan a continuación:

- En el año 1975 se emite la *Energy Policy Conservation Act*, dando origen a la Ley de Conservación Energética.
- El 4 de agosto de 1977, mediante el Organization Act, se crea el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos.

- c) En el año 1992 se emite la Energy Policy Act (EPA), como un alcance a la ley emitida en el año de 1975, donde se establece una serie de programas de eficiencia energética, y se incluyen incentivos para el ahorro energético en edificios (especialmente los gubernamentales). Además se autoriza la creación de normas para mejorar la eficiencia en los electrodomésticos.
- d) En el año 1992, el EPRI emite una serie de estudios relacionados con la GDE como:
- Guía para la implementación de la GDE [65].
 - Principios y prácticas recomendadas para la GDE [158].
 - Automatización de la distribución y demostración de la gestión de la demanda eléctrica en el sistema eléctrico de los Estados del norte [159].
 - Glosario de la GDE [19].
- e) En el año 2005 se emite la Energy Policy Act como una enmienda a la ley emitida en el año 1992. En esta ley se busca combatir con los problemas energéticos del país a través del fomento a la reducción del consumo energético, por ejemplo: se plantea la reducción del 20% de la demanda energética para el año 2015 comparado con la demanda del 2003. En esta ley se solicita al DOE “*estudiar e informar sobre los beneficios que la RD brinda, la fijación de precios basado en el tiempo y otras formas de RD como decisión política*”. Además, en la sección 1252 sobre *smart metering* se detallan todos los requerimientos tecnológicos y gubernamentales que permitan el funcionamiento de la RD en la operación de la red eléctrica estadounidense [160].
- f) En el año 2006, el DOE emite un reporte al congreso de los USA sobre los beneficios de la RD en los mercados eléctricos [161] y recomienda “*la aplicación agresiva de programas de RDBP para clientes minoristas, pero dado que este tipo de programas no pueden aplicarse inmediatamente debido a que necesitan primero mejorar los sistemas de medición y tarificación, se recomienda también que se fomente el desarrollo de programas de RDBI que ayudan a mejorar la eficiencia y la fiabilidad del sistema hasta que se puedan implementar nuevas estrategias de tarificación*”.
- g) En el año 2009, en plena recesión de la economía estadounidense, el presidente Barak Obama emite la famosa ley de recuperación llamada *American Recovery and Reinvestment Act*, cuyo objetivo principal era salvaguardar el empleo de los ciudadanos y crear nuevas plazas lo más pronto posible, para ello se inyectaría en la economía \$787 billones de dólares estadounidenses de los cuales se destinarían \$21.5 billones para la mejora en la infraestructura energética y \$27.2 billones en temas relacionados con eficiencia energética e investigación en energías renovables. \$2.4 billones de dólares estadounidenses se destinaron solamente en proyectos que permitan reducir el uso de energía [162].

5.1.3 Programas aplicados

El Gobierno estadounidense dejó el camino preparado para la implantación de los programas de GDE a través de un marco legal claro, normativas basadas en investigación científica y el financiamiento que requiere modernizar las redes eléctricas. Tal como se cita en la EPA del año 2005 “*es política de Estados Unidos fomentar la fijación de precios basada en el tiempo y otras formas de respuesta de la demanda, mediante las cuales se proporciona a los clientes de electricidad señales de precios de la electricidad y la posibilidad de beneficiarse respondiendo a ellas*” [160]. De acuerdo a datos del año 2017, en USA habían 424 ESEE aproximadamente, cada una con distintos programas de RD, en total manejan 8’287,180 abonados en programas dirigidos para usuarios residenciales, 1’084,392 abonados en programas dirigidos para usuarios comerciales, 68,630 abonados en programas dirigidos a usuarios industriales y 3 abonados en programas dirigidos a usuarios del transporte, en total los programas de RD manejaban un total de 9’440,205 abonados.

En la actualidad, la ESEE *Southern California EDISON* provee de una variedad de programas de RD a sus clientes residenciales y comerciales e industriales. Esta empresa opera en el sur del estado de California y provee de energía a 15 millones de personas aproximadamente.

Para **clientes residenciales** ofrece los siguientes de programas:

- **Smart Energy Program.-** Es un programa administrado mediante un agregador de carga (puede ser EnergyHub o Resideo), el cual se encarga de controlar los termostatos inteligentes que el usuario tenga instalado en su residencia. La idea principal es controlar la temperatura del equipo acondicionador de aire en un rango de cuatro grados. Los incentivos son: \$75 dólares estadounidenses por enrolarse y hasta \$40 dólares anuales por participar en programas de control de carga. Los eventos se convocan en cualquier momento, previa notificación al usuario, pero no pueden exceder 4 [h] en un solo día, o se pueden convocar varios eventos en un mismo día pero no se pueden superar las 4 [h] entre la totalidad de los eventos diarios.
- **Summer Discount Plan.-** Es un programa administrado directamente por la ESEE, y la tarea es controlar el termostato inteligente de equipos de aire acondicionado centralizado en los meses de verano. Se puede escoger 4 planes de incentivos los cuales van desde los \$45 hasta los \$180 dólares estadounidenses, los precios dependen del tiempo y la circunstancia del control directo del equipo. Incentivos de \$45 dólares implica un control cíclico de 15 [min] cada hora durante un máximo de seis horas, mientras que el incentivo de \$180 dólares incluye la desconexión total del equipo durante un tiempo de 6 [h] continuadas.
- **Tarifas por tiempo de uso.-** Se ofrecen tres tipos de TTU para elección del cliente; además cada tarifa tiene unos costos para la época de verano (de junio a septiembre) y otros para la época de invierno (octubre a mayo). Las tarifas son: TOU-D-4-9PM, TOU-D-5-8PM y TOU-D-PRIME.

- **Las tarifas TOU-D-4-9PM**

Las tarifas de verano consisten en dos niveles de precios detallados a continuación:

- La tarifa alta (entresemana) va de 4 PM a 9 PM a un costo de \$0.44 dólares.
- La tarifa valle (entresemana/fin de semana) de 9 PM a 4 PM a un costo de \$0.27 dólares.
- La tarifa alta (fin de semana) va de 4 PM a 9 PM a un costo de \$0.36 dólares.

Las tarifas de invierno consisten en tres niveles de precios, no hay distinción entre semana y fines de semana. Se detallan a continuación:

- La tarifa valle va de 8 AM a 4PM a un costo de \$0.26 dólares.
- La tarifa pico va de 4 PM a 9 PM a un costo de \$0.38 dólares.
- La tarifa rampa va de 9 PM a 8 AM a un costo de \$0.29 dólares.

- **Las tarifas TOU-D-5-8PM**

Las tarifas de verano consisten en dos niveles de precios detallados a continuación:

- La tarifa alta (entresemana) va de 5 PM a 8 PM a un costo de \$0.55 dólares.
- La tarifa valle (entresemana/fin de semana) de 8 PM a 5 PM a un costo de \$0.27 dólares.
- La tarifa alta (fin de semana) va de 4 PM a 9 PM a un costo de \$0.41 dólares.

Las tarifas de invierno consisten en tres niveles de precios, no hay distinción entre semana y fines de semana. Se detallan a continuación:

- La tarifa valle va de 8 AM a 5 PM a un costo de \$0.26 dólares.
- La tarifa pico va de 5 PM a 8 PM a un costo de \$0.45 dólares.
- La tarifa rampa va de 8 PM a 8 AM a un costo de \$0.29 dólares.

- **Las tarifas TOU-D-PRIME**

Las tarifas de verano consisten en dos niveles de precios detallados a continuación:

- La tarifa alta (entresemana) va de 4 PM a 9 PM a un costo de \$0.45 dólares.

- La tarifa valle (entresemana/fin de semana) de 8 PM a 5 PM a un costo de \$0.18 dólares.
- La tarifa alta (fin de semana) va de 4 PM a 9 PM a un costo de \$0.33 dólares.

Las tarifas de invierno consisten en dos niveles de precios, no hay distinción entre semana y fines de semana. Se detallan a continuación:

- La tarifa alta va de 4 PM a 9 PM a un costo de \$0.42 dólares.
- La tarifa valle va de 9 PM a 4 PM a un costo de \$0.417 dólares.

Para **clientes comerciales e industriales** se ofrecen los siguientes tipos de programas:

- **Programa de interrupción de carga en la agricultura y equipos de bombeo.-** Este tipo de programas se utilizan para aliviar la red en situaciones de sobrecarga. La ESEE transmite una señal al control del equipo a interrumpir y se cortará automáticamente el flujo de electricidad hasta que la demanda crítica haya cesado. Para acceder a este programa es necesario tener un tipo de tarificación acorde a usuarios de este tipo de servicios y tener una demanda de al menos 37 [kW]. El número de periodos de interrupción no puede exceder la cantidad de uno por día, cuatro al mes y veinticinco al año, además la duración de cada periodo no puede exceder 6 [h] o 40 [h] al mes, y/o 150 [h] al año.
- **Programas de Respuesta de la Demanda Automática.-** Este tipo de planes permiten el ahorro de energía eléctrica a través de la reducción automática de la cantidad de electricidad que una empresa consume durante un evento de RD, así se optimiza su participación en la RD y los posibles incentivos que esta posee. Para acceder a este programa es necesario reunir una serie de requisitos que incluye una específica demanda instalada, haber estado enrolado en otros programas de RD previamente y tener instalado un sistema de medición inteligente.
- **Programas de licitación de capacidad.-** Este programa permite al cliente obtener incentivos por aceptar reducir su consumo de electricidad durante los eventos de este tipo de programas y así, aliviar la tensión en la red cuando esta se encuentra sobrecargada. El cliente puede seleccionar con que tiempo de anticipación requiere ser notificado sean las opciones: un día antes del evento o el día del evento, el periodo máximo donde un cliente puede participar en este tipo de programas es de 30 [h] en un mes. Es necesario que el cliente posea un sistema de medición inteligente que registre su consumo en intervalos, como mínimo, de 15 [min].
- **Programas de Precio de Pico Crítico.-** Este es un tipo de programa basado en precio el cual proporciona cuatro meses de créditos en la factura de verano a cambio de pagar precios más altos de electricidad durante 12 a 15 eventos anuales. Cuando se convocan, los eventos son de 4 PM a 9 PM en días laborables no festivos, y suelen ocurrir en los días más calurosos del verano.
- **Programa de emergencia de reducción de carga.-** Este tipo de programa basado en incentivos pretende reducir el consumo de electricidad de una empresa entre las 4 PM y las 9 PM de cualquier día de la semana, incluidos festivos, entre el 1 de mayo y el 31 de octubre, para esto es necesario que el cliente tenga una demanda instalada mayor de 200 [kW] y que oferte una reducción de al menos el 50% de su ofrecimiento. Este tipo de programas pueden ser notificados el día anterior o el mismo día del evento, y en caso de emergencia se notifican el mismo día. Los participantes pueden ganar 1 dólar por [kW-h] o 1,000 dólares por [MW-h] reducido durante un evento para reducciones que van del 50% al 200% de su ofrecimiento.
- **Tarifas en tiempo real.-** Este es un tipo de programa basado en precio el cual proporciona flexibilidad al cliente para que gestione su carga de acuerdo al pronóstico de precios de la energía eléctrica a lo largo del día. Estos programas se basan en la temporada y en la temperatura del día anterior. Hay siete programas de precios diferentes: tres programas de precios diferentes durante la temporada de verano, dos durante la temporada de invierno y dos que se aplican durante todos los fines de semana del año. Para participar en el programa, es necesario instalar un contador de intervalos que mida el consumo de electricidad en incrementos de 15 minutos.
- **Programa de emergencia del estado de California.-** Este es un programa establecido por el Gobernador de California en el cual se proporcionan pagos de incentivos de \$2 dólares por [kW-h] a

los grandes usuarios de electricidad por su reducción de carga lograda a través de la reducción del uso y/o el uso de generación de respaldo durante un evento de emergencia.

Además de los programas mencionados, las ESEE ofrecen la libertad para que los clientes contraten programas de empresas externas y así, obtener la mayor cantidad de beneficios posible. Hay más de 23 empresas que brindan servicios como operador de servicios; entre ellas se puede citar a AutoGrid, una empresa que provee servicios de agregador de demanda a través del control de termostatos inteligentes, baterías, vehículos eléctricos y cualquier otro dispositivo inteligente.

El servicio de esta ESEE sobre sus programas de GDE no termina ahí, también incluye un centro de educación energética el cual ofrece una amplia gama de recursos que le permitan al cliente aprender a tomar mejores decisiones energéticas para su hogar o negocio. Ofrecen además exposiciones interactivas, consultas técnicas, clases, talleres y eventos.

De acuerdo a [163], hay otras ESEE que han implementado programas de RD, por ejemplo:

- *Oklahoma Gas & Electric* ha implementado programas de RD basados tanto en incentivos como en precio, el programa de incentivos es un control de carga directo que controla termostatos inteligentes de 28,668 clientes, el programa de basado en precios ofrece tres variedades distintas de tarifas de las cuales: 38,997 usuarios se han registrado a TTU, 1,536 usuarios se han registrado en TPC y 37,461 usuarios se han registrado en tarifas pico variables (TPV).
- *Potomac Electric Power Company (PEPCO)* ha implementado programas de RD basados en incentivos a través de programas de control directo de carga con 16,010 abonados inscritos.
- *Tri-State Electric Membership Corporation* ha implementado un novedoso sistema de tarifas con método prepagó en 100 usuarios.

5.1.4 Resultados

De acuerdo con el reporte de energía eléctrica anual del año 2019 [164] emitido por el *U.S. Energy Information Administration*, dependiente del DOE, en el capítulo 10 se muestran los valores estadísticos obtenidos desde el año 2013 hasta el año 2019 de los programas de GDE, los cuales se muestran a continuación:

5.1.4.1 Resultados sobre Conservación Energética

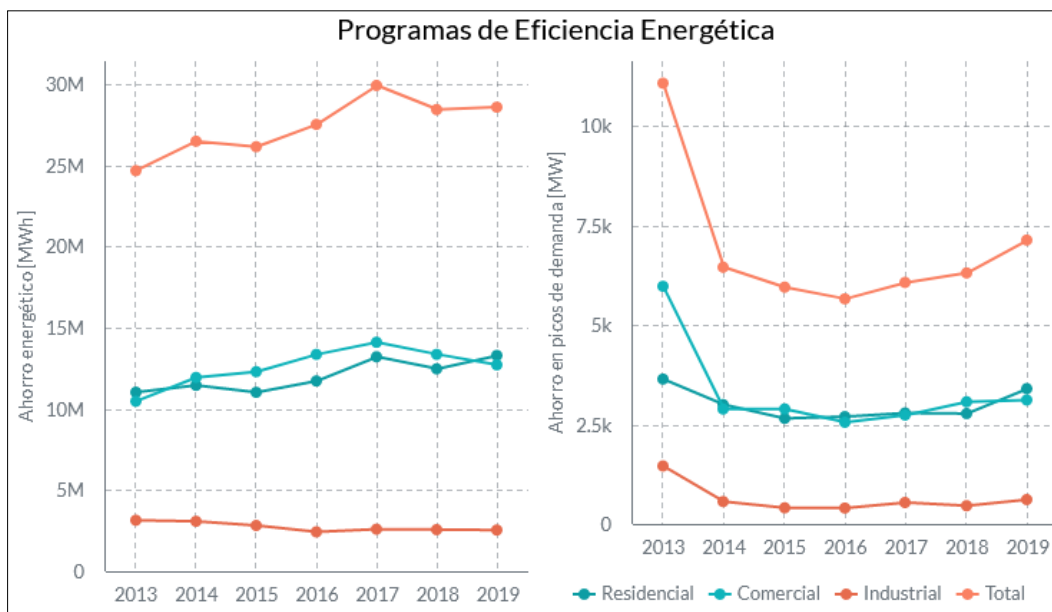


Figura 5-10.- Ahorro energético y disminución del pico de demanda anual de los programas de CE.

Los programas de CE, en especial la estrategia de EE, han permitido un ahorro energético de 191.63 [TW-h] y una disminución del pico de demanda de 6.95 [GW] desde el año 2013 hasta el año 2019. Para el año 2019

los valores obtenidos fueron los siguientes:

- El ahorro energético fue de 28.56 [TW-h], el 0.62% de la energía total consumida.
- La disminución del pico de demanda fue de 7,135 [MW], el 0.68% de la demanda pico total.

En la figura 5-10 se muestra la evolución del ahorro energético (izquierda) y la disminución del pico de demanda (derecha) desde el año 2013 hasta el año 2019 como resultado de la aplicación de programas de conservación energética.

5.1.4.2 Sobre Sustitución del recurso energético

En el reporte antes citado, en la tabla 4.12, se indica la capacidad de cambio de combustible para los generadores que operan con líquidos de petróleo como combustible principal. Para el año 2019 habían 30,015.4 [MW] instalados en plantas generadoras que utilizaban derivados del petróleo para operar, de las cuales 5,103.0 [MW] podrían ser cambiados para operar con GLP. Por el contrario, hay un total de 476,567.4 [MW] instalados que operan con GLP de los cuales 132,800.1 [MW] podrían ser operados con derivados del petróleo de ser necesario.

5.1.4.3 Sobre Respuesta de la demanda

Para el año 2019, el 7.06% de los abonados en los USA estaba inscrito en algún programa de RD, ya sea basado en precios o en incentivos. Los clientes se dividen de la siguiente forma:

- Los clientes residenciales registran un total de 10'447,335 de inscritos
- Los clientes comerciales registran un total de 306,832 inscritos.
- Los clientes industriales registran un total de 52,841 inscritos.
- En total se registraron aproximadamente 10'932,845.

En la figura 5-11 se muestra una gráfica con el aporte de cada tipo de usuario en la inscripción a programas de RD.

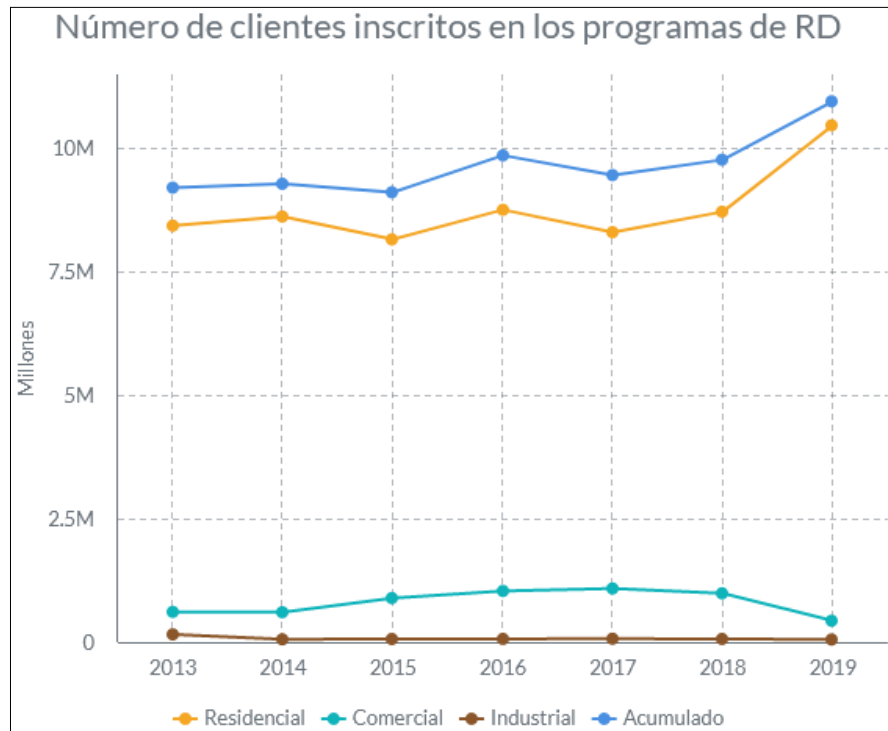


Figura 5-11.- Clientes inscritos en programas de RD.

Los programas de RD han permitido un ahorro energético de 9.62 [TW-h] y una disminución del pico de demanda de 85.54 [GW] desde el año 2013 hasta el año 2019. Para el año 2019 los valores obtenidos fueron

los siguientes:

- El ahorro energético fue de 1.46 [TW-h], el 0.034% de la energía total consumida.
- La disminución del pico de demanda fue de 11,334 [MW], el 1.03% de la demanda pico total.

En la figura 5-12 se muestra el ahorro energético, desde el año 2013 hasta el año 2019, resultado de la aplicación de programas de RD. El mayor ahorro viene dado por los clientes residenciales, los cuales aportan con el 73.53% del ahorro energético total del programa.

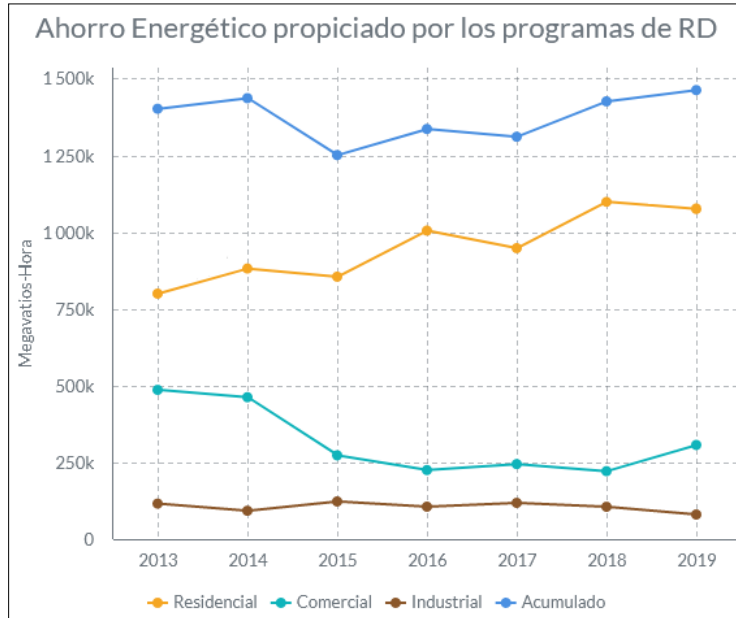


Figura 5-12.- Ahorro energético debido a los programas de RD.

Donde los programas de RD tienen un gran impacto es en la reducción del pico de demanda, con solo el 7.06% de abonados registrados se provoca una disminución media del 1.13% del pico de demanda. Para el año 2019 la reducción del pico de demanda fue de 11,334 [MW] aunque el potencial de ahorro era de 31,020 [MW]. A pesar que los clientes residenciales tienen el mayor grupo de abonados registrados en los programas de RD, el principal cliente que permite la reducción del pico de la demanda es el industrial con 5,505 [MW] seguido por el residencial con 3,426 [MW], y muy de cerca por el cliente comercial con 2,403 [MW]. Esto se muestra en la figura 5-13.

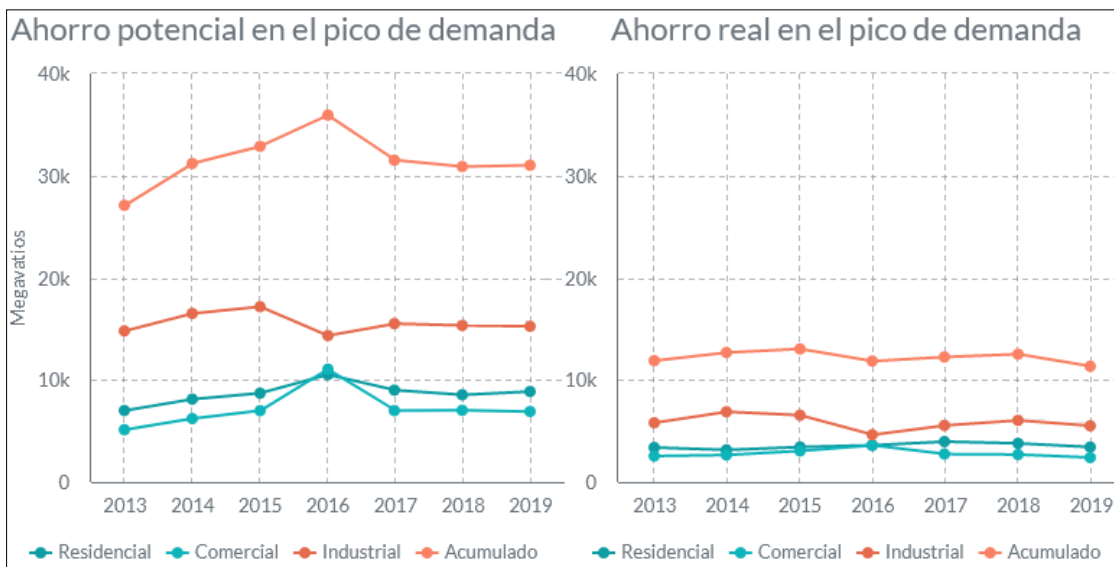


Figura 5-13.- Ahorro del pico de demanda debido a los programas de RD.

5.1.4.4 Sobre la Gestión de la Demanda

Los efectos de la gestión de la demanda eléctrica pueden cuantificarse como la confluencia de los efectos de los programas individuales. De acuerdo a la información mostrada, para el año 2019 la reducción energética por la aplicación de programas de GDE se desglosa de la siguiente manera:

- 28.56 [TW-h] por la aplicación de programas de CE.
- 1.46 [TW-h] por la aplicación de programas de RD.

En total, la reducción es de 30.02 [TW-h], el 0.76% del consumo de electricidad total, esta cifra es mayor a la energía que países como Ecuador consumieron en el mismo año (25.31 [TW-h]). En la gráfica 5-14 se muestra el aporte, tanto de los programas de CE y de RD a la disminución de consumo energético, en el cual se puede apreciar que **el principal componente que origina el ahorro energético es el programa de CE.**

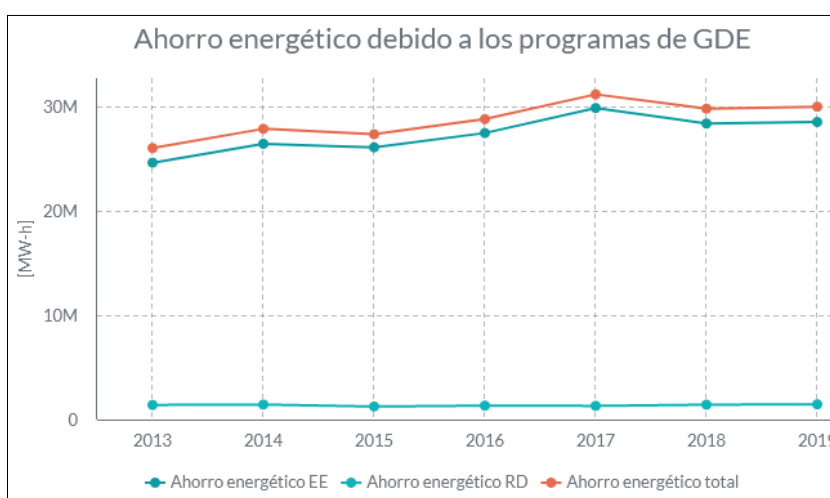


Figura 5-14.- Ahorro energético mediante los programas de GDE.

De acuerdo a la información mostrada, para el año 2019 la reducción del pico de demanda por la aplicación de programas de GDE se desglosa de la siguiente manera:

- 7,135 [MW] por la aplicación de programas de CE.
- 11,374 [MW] por la aplicación de programas de RD.

En total, la reducción es de 18,469 [MW], el 1.78% de la demanda pico total. En la gráfica 5-15 se muestra el aporte, tanto de los programas de CE y de RD, a la disminución del pico de demanda. Se puede apreciar que **el principal componente que origina dicha disminución es el programa de RD.** Se prevé que una vez que la eficiencia energética de los equipos y sistemas mejore, el aporte de este tipo de programas a la reducción del pico de demanda será ínfimo.

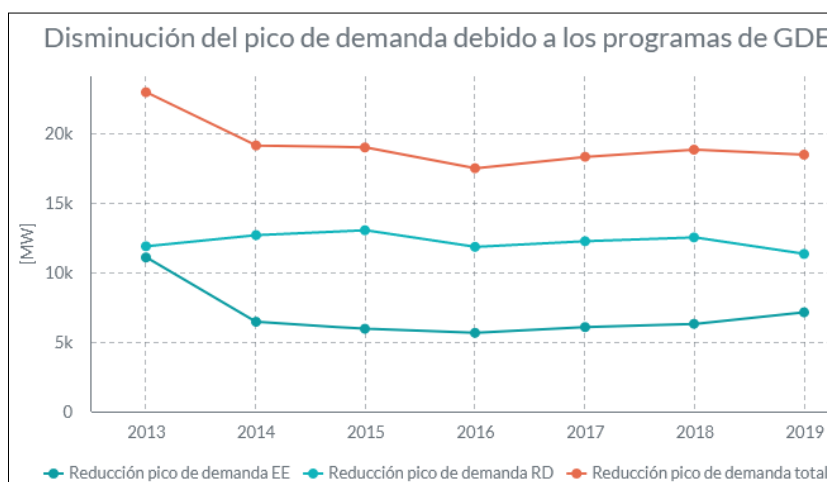


Figura 5-15.- Disminución del pico de demanda mediante los programas de GDE.

5.2 China (CHN)

5.2.1 Situación Energética Actual

De acuerdo a los datos recogidos en el año 2020 [155], analizando los 10 países que más consumen energía eléctrica, se detalla a continuación las características generales que describen al sector eléctrico chino:

- Desde el 2008 es el país que más recursos energéticos consume (3,381 [Mtoe]) representando el 23.87% de la cuota global. Posee el 17.97% [156] de la población mundial. China ha multiplicado su consumo energético por 3.8 desde el año 1990.
- Es el primer país que más electricidad produce (7,798 [TW-h]), el 28.98% de la cuota mundial, y consume (6,752 [TW-h]).
- Las pérdidas eléctricas rozaron los 1.029 [TW-h], las cuales representan el 13.20% de su producción, y en perspectiva general son inferiores a la media mundial (13.9%) pero superiores a la media de los países OECD (11.2%) o G7 (10.9%).
- De los países con las economías más grandes, es uno de los que registra el menor consumo de energía per cápita (3 900 [kW-h]), es similar al de otros países como Chile, Lituania o Polonia, se espera que China siga incrementando su consumo energético cuyo pico será aproximadamente en el año 2035 [165].
- Es el principal emisor de CO₂ con 9,717 toneladas métricas de CO₂ [MtCO₂], las cuales mantienen un ritmo creciente a través de los años.

El excesivo consumo energético de China se debe al crecimiento de su economía, reducir el consumo de combustibles para favorecer la reducción de las emisiones de GEI traería consecuencias económicas y una desaceleración de su mercado, por esta razón es que para el país con el mayor consumo energético del mundo, el ahorro del mismo debería ser un tema primordial para su consolidación como una potencia económica mundial.

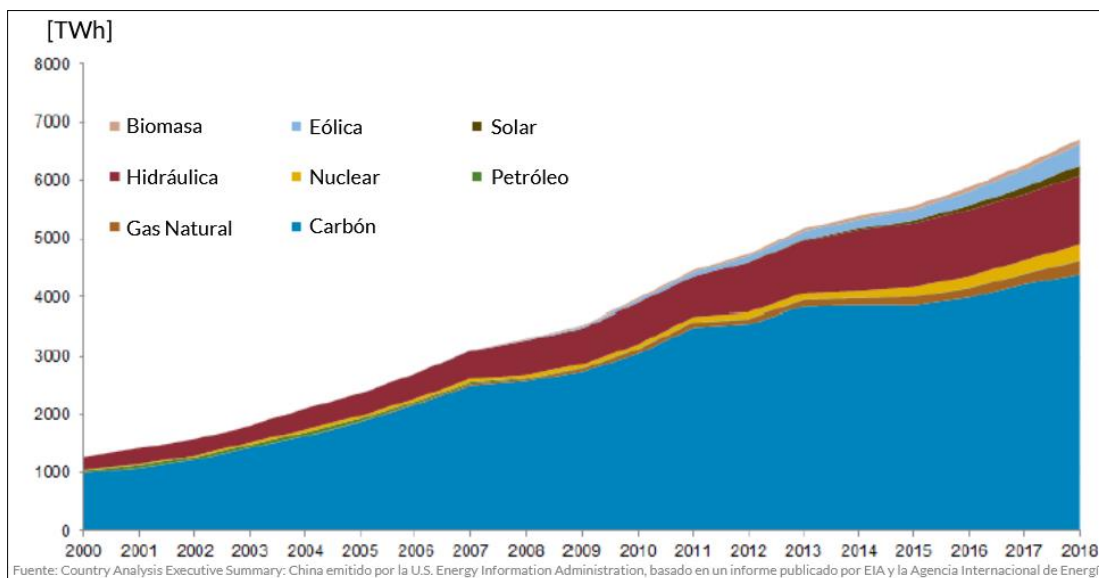


Figura 5-16.- Generación de electricidad en China por tipo de recurso energético.

Fuente: (Country Analysis Executive Summary: China, U.S. Energy Information Administration)

La generación eléctrica en China depende principalmente de los siguientes vectores energéticos [166]:

- Carbón (69%)
- Energía Hidráulica (17%)
- Nuclear (4%)

- Fuentes renovables (9%)
- GLP y Derivados de petróleo (0.3%)

Por otro lado, China tiene muchos problemas medioambientales debido al uso ampliado e intensivo del carbón como combustible principal, razón por la cual se está fomentando la inversión en energías renovables y en infraestructura de transporte sustentable a través de incentivos financieros.

Adicionalmente, y de acuerdo con [167], China tiene previsto apostar por una mayor generación de electricidad a partir de fuentes renovables y de gas natural para sustituir parte de la base de la generación a base de carbón, además China es uno de los pocos países que está apostando por producción de electricidad mediante fuentes nucleares, y se prevé la implementación de otros 11 [MW] en los próximos años. En la figura 5-16 se muestra la evolución del uso de los recursos energéticos para la generación de electricidad desde el año 2000 hasta el 2018, de acuerdo a lo indicado en [167].

5.2.2 Legislación en temas de GDE

China es el país más grande y poblado del mundo, y suplir de energía a sus habitantes no es tarea fácil, ni lo es tampoco el ordenamiento de su sistema energético. A inicios de los años noventa se definió claramente la problemática que su Gobierno buscaba solucionar mediante un marco legal sólido. Dicha problemática se lista a continuación:

- El crecimiento en el consumo energético y las limitaciones de suplir dicho crecimiento con los recursos nacionales.
- El uso ineficiente de la energía, el consumo energético por unidad del PIB sigue siendo mucho más alto que la media mundial, casi el doble, y triplica al valor medio de los países de la OECD.
- Impactos perjudiciales para el medio ambiente y la salud asociados a la utilización del carbón como vehículo energético principal.
- Afianzar la seguridad energética en el país, la cual se pone en riesgo al no ser capaces de suplir sus necesidades energéticas y tener que hacerlo mediante la importación de vehículos energéticos, en el año 2017 China importó el 20% del petróleo que consume.
- Retraso en la adopción de un marco legal que regule las actividades energéticas antes de que estas generen más problemas económicos, ambientales y sociales.

Como solución a sus problemáticas energéticas particulares, China organizó su marco legal energético en cinco leyes que procuran, no solo el ordenamiento energético del país, sino promover el crecimiento de la nación en temas energéticos de acuerdo a la realidad global. En la figura 5-17 se detallan cada una de las leyes chinas existentes en materia energética.

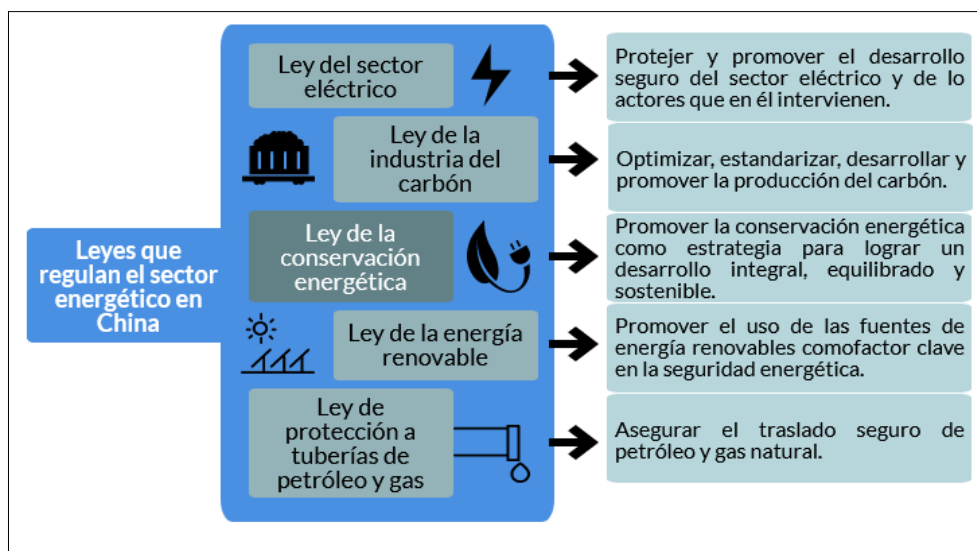


Figura 5-17.- Las cinco leyes energéticas que regulan el sector eléctrico en China.

La política energética del país asiático ha sido influenciada por el panorama energético global que en las últimas dos décadas ha cambiado de dirección hacia la descarbonización y la apuesta por las fuentes renovables antes que los combustibles de origen fósil. Estos cambios presentan oportunidades para que China desarrolle un sistema energético asequible, limpio, bajo en emisiones de carbono, eficiente y optimizado. En octubre del año 2012, el actual presidente de la República Popular de China, Xi Jinping, emite la estrategia con la cual China abordaría su política energética llamada “Cuatro revoluciones, una cooperación”, esta se centra en los siguientes ejes:

- Suprimir el consumo irracional de fuentes energéticas, la revolución del consumo energético.
- Establecer una diversidad en la oferta de fuentes energéticas, la revolución del suministro energético.
- Impulsar la modernización industrial a través de la eficiencia energética, la revolución de tecnología energética.
- Aceleración del sector energético, la revolución del sistema energético.

Todas estas cuatro revoluciones están enmarcadas en acuerdos que permitan el reforzamiento de la cooperación internacional para lograr la seguridad energética en condiciones abiertas de mercado.

5.2.2.1 Ley sobre la Conservación Energética

Esta ley establece el marco legal que promueve en los ciudadanos el ahorro energético, la mejora de la eficiencia energética, la protección del medio ambiente y promueve el desarrollo económico y social de una forma equilibrada, integral y sostenible. Fue emitida el 01 de enero de 1998, y ha sido reformada en dos ocasiones, en el año 2007 y 2016.

De acuerdo con el Capítulo V sobre Medidas de Incentivo, en el Artículo 66 [168] se establece que el Estado aplica políticas de precios como: fijación de precios por tiempo de uso, la fijación de precios por temporada de uso y el cargo por electricidad interrumpible; de forma que favorezcan al ahorro de energía y así, orientar a las unidades de consumo energético y a los particulares a conservar la energía. Además, *“El Estado utiliza políticas fiscales, tributarias y de precios para apoyar y promover medidas de conservación de la energía como la gestión de la demanda de energía, la gestión contractual de la energía y los acuerdos voluntarios para la conservación de la energía”*.

Por otro lado, y de acuerdo con el 13ro Plan Quinquenal para el desarrollo económico y social de la República Popular de China (2016-2020) [169], en la sección tercera sobre Sistemas de Energía Inteligente establece que *“Nos adaptaremos al desarrollo de la energía distribuida y a la diversidad de demanda de los usuarios, mejoraremos la gestión de la demanda de energía eléctrica, aceleraremos el desarrollo de redes eléctricas inteligentes, y haremos que las redes eléctricas de generación y de demanda de energía se adapten mutuamente”*.

5.2.3 Implantación de los programas

El Marco Legal implementado por el Gobierno ha dejado las puertas abiertas para la implantación de programas de GDE, es por eso que China está habilitando y aprovechando gradualmente las oportunidades de dichos programas en su sector eléctrico. De acuerdo con [170], el 01 de enero del 2011 se emitió un documento llamado *Medidas para la Administración de la Demanda de Energía Eléctrica* donde se designa a la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma (CNDR) como responsable de llevar a cabo el desarrollo de los programas piloto de GDE en la nación.

De acuerdo con [171], en China se han aplicado los siguientes programas:

- **Interrupción de carga.-** El piloto de este tipo de programa se implementó en cuatro ciudades: Jiangsu, Beijing, Foshan y Shangai. Los distintos requerimientos se notificaban a los usuarios por medio de una aplicación móvil especializada, la plataforma *WeChat* y el dispositivo de mensajería. La respuesta del compromiso de su participación al programa se recibía de la misma forma.
 - En Jiangsu la notificación es, o un día antes o en tiempo real, y se remunera al cliente con 15,48 [\$/kW-h] por la interrupción.

- En Foshan la notificación es, o tres días antes o un día antes o cuatro horas antes, se remunera al cliente con 20,13 [\$/kW-h] por la interrupción.
- En Beijing la notificación es, o un día antes o cuatro horas antes o 30 minutos antes, y se remunera al cliente con 12,39 [\$/kW-h], 15,48 [\$/kW-h] y 18,58 [\$/kW-h] respectivamente por la interrupción.
- No se tiene registro de cómo eran aplicados estos programas en Shanghai.
- **Tarifas por tiempo de uso para clientes industriales y comerciales obligatorias.-** Este tipo de programa piloto se implementó casi en la totalidad del territorio y consistía en una de estas tres formas:
 - **Precio pico.-** Rodeaba valores entre 2-5 veces el precio fuera de pico.
 - **Precio estacional.**
 - **Precio diferenciado.-** En este caso tenemos: de 07:00 a 10:00, de 15:00 a 18:00 y 21:00 a 23:00 el precio es de 0,098 [\$/kW-h] caso contrario el precio es 0,054 [\$/kW-h].
- **Tarifas por tiempo de uso + Tarifas por bloque inclinado para clientes residenciales.-** Este tipo de programa piloto se implementó a nivel nacional. Por ejemplo los residentes de Shanghai, en el primer nivel de consumo (los primeros 3120 [kW-h] consumidos en un año), tenían dos tipos de tarifas:
 - Tarifa día de 06:00 a 22:00 en 0,096 [\$/kW-h].
 - Tarifa noche de 22:00 a 06:00 era de 0,048 [\$/kW-h].
- **Control directo de carga.-** Este tipo de programa piloto está disponibles en las ciudades de Jiangsu y Shanghai. Los distintos requerimientos se notificaban a los usuarios por medio de una aplicación móvil especializada, la plataforma *WeChat* y el dispositivo de mensajería. La reducción de la carga se lleva a cabo mediante dispositivos de control automatizados. La compensación se realiza con las mismas tarifas del programa de interrupción de carga.

5.2.4 Resultados

Los programas piloto implementados en las diferentes ciudades aún no han arrojado resultados que permitan su comparación. De acuerdo con [172], durante el plan piloto de RD implementado en Shanghai, se preguntó a los gestores de los edificios que respondieran un cuestionario sobre su experiencia con los programas de RD implementados, dicha información se presenta a continuación:

1. **¿Hay más potencial de RD cuando la norma de subvención es de 0.31 [\$/kW-h]?** El 89% de los participantes dijo NO y el 11% de los participantes dijo SI.
2. **¿Hay más potencial de RD cuando la norma de subvención es de 0.93 [\$/kW-h]?** El 61% de los participantes dijo NO y el 39% de los participantes dijo SI.
3. **Si el precio de la electricidad se incrementa en diez veces a su precio habitual durante los picos de demanda, ¿Actuarían los ocupantes del departamento?** El 61% de los participantes dijo que tomaría medidas apropiadas y el 39% dijo que no le importaba.
4. **¿Conocen el procedimiento de la RD?** El 88% de los participantes dijo SI y el 12% de los participantes dijo NO.
5. **¿Cuál es el objetivo de participar en los programas de RD?** El 67% de los participantes dijo que les interesa construir un edificio ecológico y así subir la popularidad del mismo, el 22% de los participantes dijo que la subvención y el ahorro son las principales razones, el 11% de los participantes dicen que es para mantener una relación cordial con el ejecutor de RD.
6. **¿Cuál es su opinión de la RD automática en edificios?** El 39% de los participantes está de acuerdo, el 61% de los participantes se encuentra preocupado de que el sistema automático no sea confiable y esperan que la operación manual siga siendo una opción de RD.
7. **¿Cuál es el potencial de una RD rápida (inferior a 0.5 [h])?** El 39% de los participantes dijo que

su RD potencial sería de 100 [kW], el 39% de los participantes dijo que su RD potencial sería de 200-300 [kW], 22% de los participantes dijo que su RD potencial sería de 500 [kW].

8. **¿Cuál es tu método de notificación preferido de alertas de RD?** La mayoría de los participantes prefiere e-mail y teléfono móvil.
9. **¿Compraría una cuota de reducción de demanda a otras empresas durante las horas de máxima carga?** El 44% de los participantes dijo que SI, el 33% de los participantes dijo que NO, el 17% de los participantes dijo que depende del precio.
10. **¿Estarías dispuesto a participar en todos los eventos de RD y reducir 300 [kW] de julio a septiembre si el subsidio total es de 77.36 [\$]?** El 22% de los participantes dijo que SI, el 61% de los participantes dijo que NO, el 17% de los participantes no se encontraba seguro.
11. **¿Cuáles son las opiniones de los ocupantes?** El 67% de los participantes dice: Estable y si anomalías, el 28% de los participantes dice: El confort se ve ligeramente afectado, el 5% de los participantes dice: Recibió quejas de los usuarios.

El aporte de la encuesta anterior es fundamental para la mejora de los programas de RD, y hacerlos de consumo popular y masivo. Según los resultados obtenidos se puede concluir que:

- Los usuarios están preocupados por construir un edificio ecológico y que esto repercuta en la popularidad del mismo.
- El poco interés de los usuarios a los programas de RD se debe a la baja subvención del servicio.
- Con un precio de 0.93 [\$/kW-h] se podría estimular a que más usuarios se registren en los programas de RD.

De acuerdo con [170], las disposiciones de estos indicadores cuantitativos aumentaron en gran medida la operatividad de las *Medidas para la Administración del Lado de la Demanda de Energía Eléctrica* y permitieron un rápido desarrollo hasta el punto de que la electricidad acumulada ahorrada durante cuatro años, de 2012 a 2016, fue de 55,3 [GW-h] y el ahorro de capacidad eléctrica fue de 12,68 [GW].

5.3 Unión Europea (UE)

5.3.1 Situación Energética Actual

En este apartado se observará a los países que conforman la UE como un solo país. De acuerdo a los datos obtenidos en [155], y luego analizar los 10 países que más energía consumieron en el año 2019, se detalla a continuación las características generales que describen al sector energético europeo:

- Es el tercer mayor consumidor energético del mundo (1,405 [Mtoe]) pero solamente produjo el 35.82% (607 [Mtoe]) del total recursos energéticos consumidos.
- Como bloque la UE se posiciona como el tercer mayor consumidor de electricidad del mundo (2,562 [TW-h]). Dado que la UE está conformada por un grupo de naciones, los cinco mayores consumidores son:
 - Alemania con 512 [TW-h].
 - Francia con 444 [TW-h].
 - Italia con 302 [TW-h].
 - España con 242 [TW-h].
 - Polonia con 145 [TW-h].
- Las pérdidas eléctricas fueron aproximadamente 357.6 [TW-h], estas representan el 12.25% de su producción. En perspectiva general son inferiores a la media mundial (13.9%) pero superiores a la media de los países OECD (11.2%) o G7 (10.9%).
- El consumo de energía eléctrica per cápita bordea los 6,022[kW-h], más que la media mundial

(3,132 [kW-h]) e inferior a la media de los países OCDE (7,750 [kW-h]).

- Las emisiones de CO₂ son de 2,470 toneladas métricas de CO₂ [MtCO₂], solo son superados por USA y CHN.

Bajo este cuadro energético, es entendible que la UE esté abocada a la producción de energías renovables que desplacen la dependencia vectores energéticos importados.

La generación eléctrica en la UE depende principalmente de los siguientes vectores energéticos [173]:

- Combustibles de origen fósil – 43.9%
 - Gas natural – 20.3%
 - Carbón – 21.7%
 - Petróleo – 1.9%
- Energía nuclear – 25.4%
- Fuentes renovables – 30.4%
 - Eólica – 11.1%
 - Hidráulica – 9.2%
 - Biocombustibles – 6.4%
 - Solar – 3.7%

De acuerdo con [173], el sistema eléctrico de la UE se va a caracterizar por una mayor proporción de energías renovables, de hecho se espera que la eólica se convierta en la mayor fuente de energía en los próximos años. La necesidad de flexibilidad del sistema eléctrico aumentará rápidamente en la próxima década, pero el desarrollo de fuentes de flexibilidad, como las interconexiones, la RD y el almacenamiento de energía es más lento que el desarrollo de las renovables. Es necesario que las políticas energéticas europeas avancen en función de brindar la flexibilidad que la red va a requerir durante la transición energética que implica la descarbonización de la economía.

5.3.2 Política Energética en temas de GDE

A diferencia de Estados Unidos o China que han fundamentado su política energética en sólidas leyes sobre Conservación Energética, la Comunidad Europea no desarrollo una política energética hasta el 2015 con la llamada Unión de la Energía. Hasta entonces se ha elaborado varios planes de acción pero no leyes claras. Entre los inicios de conformar una ley sobre conservación energética se pueden citar las siguientes:

En la **Directiva 89/364/CEE** del Consejo se establece un programa de acción comunitario con la finalidad de mejorar la eficiencia del uso de la electricidad.

En la **Directiva 91/565/CEE** del Consejo se promociona el programa SAVE (*Specific Actions for Vigorous Energy Efficiency*), en cuyo anexo se cita, en el numeral 1, a la gestión de la demanda como proyecto piloto a desarrollar en función de lograr una mejor eficiencia energética en el sistema.

En la **Directiva 93/76/CEE** del Consejo sobre la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficacia energética, se pretende mejorar la eficiencia energética en los edificios y así, disminuir el consumo energético de los mismos ya que representan aproximadamente el 40% de consumo final de energía.

En la **Directiva 96/92/CE** del Parlamento Europeo sobre las normas comunes para el mercado interior de electricidad, se definen las normas relativas a la organización y el funcionamiento del sector de la electricidad, el acceso al mercado, entre otros, sin tomar en cuenta la gestión de la red eléctrica desde el lado de la demanda o cosa parecida.

En la **Directiva 02/91/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo sobre el rendimiento energético en edificios, la cual está alineada con la directiva 93/76/CEE, se promueve la mejora de la eficiencia energética en los edificios, teniendo en cuenta la condiciones climáticas tanto exteriores como interiores. Además, y dado que esta directiva fue emitida luego de la firma del Protocolo de Kioto, en ella se incluyen como

justificantes de esta medida la consolidación de los objetivos firmados en dicho Protocolo.

En la **Directiva 2003/54/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo sobre las normas comunes para el mercado interior de la electricidad, se deroga la directiva 96/92/CE y define a la EE y a la GDE como una alternativa para reducir el consumo energético y así, combatir el cambio climático. Además, se delega a los Estados miembros tomar las medidas oportunas para su aplicación. En el artículo 14 sobre las *Funciones de los gestores de redes de distribución* se determina que *“A la hora de planificar el desarrollo de la red de distribución, el gestor de la misma examinará las medidas de eficiencia energética y gestión de la demanda o de generación distribuida que puedan suplir la necesidad de incrementar o sustituir la capacidad eléctrica”*. Finalmente, se determina que las autoridades reguladoras nacionales son las que determinan las tarifas en función de lo propuesto por los gestores de la red de transporte y distribución.

En la **Directiva 2009/72/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo sobre las normas comunes para el mercado interior de la electricidad, se deroga la directiva 2003/54/CE mas no se modifica la forma en la que se trataba el tema de la GDE.

En la **Directiva 2010/31/UE** del Parlamento Europeo y del Consejo se enmienda la directiva 02/91/CE sobre la mejora de la eficiencia energética en los edificios.

En la **Directiva 2012/27/UE** del Parlamento Europeo y del Consejo sobre las normas de eficiencia energética, se establece un marco común de medidas para el fomento de la eficiencia energética dentro de la Unión a fin de eliminar barreras en el mercado de energía y a superar deficiencias del mercado que obstaculizan la eficiencia en el abastecimiento y el consumo de energía. En el artículo 15 sobre la transformación, transporte y distribución de energía, en el numeral cuatro, se conmina a los Estados miembros a asegurar que *“se suprimen aquellos incentivos en las tarifas de transporte y distribución que menoscaban la eficiencia global (incluida la eficiencia energética) de la generación, transporte, distribución y suministro de electricidad o que puedan obstaculizar la participación en la respuesta de la demanda, en los mercados de equilibrados y en la contratación de servicios auxiliares”*.

El 25 de febrero del 2015 la Comisión Europea emite un comunicado con el fin de impulsar la propuesta sobre la Unión de la Energía, cuya estrategia tiene cinco dimensiones estrechamente relacionadas entre sí y que se refuerzan mutuamente, las cuales son:

- Seguridad energética, solidaridad y confianza,
- Un mercado europeo de la energía plenamente integrado,
- Eficiencia energética como contribución a la modernización de la demanda,
- Descarbonización de la economía,
- Investigación, innovación y competitividad.

De acuerdo con [174], la integración de los mercados de producción de electricidad renovable exige mercados flexibles, tanto del lado de la oferta como del lado de la demanda, por tanto las redes de electricidad deben evolucionar de forma significativa. Es necesario ampliar las posibilidades de la producción distribuida y la gestión de la demanda, incluidos los mercados intra-diarios, para desarrollar nuevas conexiones de alta tensión a larga distancia (superredes) y nuevas tecnologías de almacenamiento.

En el **Reglamento (UE) 2017/2195** de la Comisión donde se establece una directriz sobre el balance eléctrico, donde se establecen principios comunes para la contratación y la liquidación de reservas para la contención de la frecuencia, reservas para la recuperación de la frecuencia y reservas de sustitución; en la cual se solicita se facilite la participación de la RD, incluyendo la agregación y el almacenamiento de energía, todo enmarcado en los mercados de los servicios auxiliares.

En la **Directiva 2018/844** del Parlamento Europeo y del Consejo se modifica la Directiva 2010/31 /UE y la Directiva 2012/27/UE en el cual se incluye la idea de Sistema de automatización y control de edificios (BIS), el cual deberá incluir todos los programas informáticos y servicios de ingeniería que puedan apoyar el funcionamiento eficiente energéticamente, económico y seguro de las instalaciones técnicas de un edificio mediante controles automatizados.

En el **Reglamento (UE) 2019/943** del Parlamento Europeo y Consejo, del 05 de junio del 2019, en

referencia al mercado interior de la electricidad, se establecen varios lineamientos sobre la GDE y sus programas, específicamente se señala a la Respuesta de la demanda como una herramienta primordial en la determinación de los precios de la electricidad.

A finales del 2019 se viabilizó la llamada Unión de la Energía y con ello se solidifica a la GDE como estrategia para contener el aumento de la demanda y reducir la ineficiencia del sistema energético y eléctrico. A pesar de las reformas al marco legal de la Comunidad, se necesita mayor compromiso de las partes involucradas para desarrollar programas pilotos como en China, o programas reales como en Estados Unidos.

De acuerdo con [175], la estrategia de **Alemania** para alcanzar los objetivos de su *Energiewende*, plasmada en el Concepto Energético de 2010, puede clasificarse a grandes rasgos como la reducción del consumo de energía y el aumento de la cuota de renovables. En el sector de la electricidad, esto incluye la eliminación progresiva de otras formas de generación, la reducción de la demanda global de electricidad a través de medidas de eficiencia y gestión de la demanda, y el aumento de la cantidad de generación de energía a partir de fuentes renovables como la eólica y la solar. En el sector de los mercados, los agentes son libres de decidir qué opciones de flexibilidad utilizar (por ejemplo, almacenamiento, centrales de gas, gestión de la demanda), en el marco de un enfoque impulsado por el mercado que pretende mantener bajo el coste global del suministro de electricidad y fomentar la innovación.

De acuerdo con [176], **Luxemburgo** tiene planes de investigar el impacto de un plan de tarifas por tiempo de uso una vez que se termine de implementar el sistema AMI. De acuerdo con [177], **Austria** tiene vista la GDE como una solución para la flexibilización del mercado, y como una solución para reducir los altos niveles de consumo que mantiene tanto de petróleo como de gas natural. Por otro lado, **Lituania** ni siquiera ha considerado la implementación de planes de GDE [178].

De acuerdo con [179], en **Italia** para mantener una adecuación suficiente del sistema, el Ministerio de Economía y Hacienda ha recibido instrucciones, a través de la ley presupuestaria de 2014, de introducir un sistema de capacidad destinado a remunerar la generación flexible. Un decreto ministerial de 30 de junio de 2014 describe los requisitos del nuevo mecanismo de capacidad; la adecuación del sistema se medirá teniendo en cuenta i) la capacidad de interconexión de la red y transfronteriza, ii) la gestión activa de la demanda, iii) la contribución de la generación distribuida.

De acuerdo con [180], en **Francia** se lleva implementando un sistema diferenciado de tarificación por tiempo de uso de electricidad desde el año 1982, mas no es hasta el 17 de agosto del 2015 mediante la ley de transición energética para el crecimiento verde se establece un marco jurídico con el objetivo de hacer frente al cambio climático y reforzar la independencia y seguridad energética. Los cinco principales principios de actuación de la transición energética francesa son:

- Promover la gestión de la demanda y el compromiso de los consumidores, la eficiencia energética y un menor uso de la energía, especialmente en los edificios;
- Colaborar conjuntamente con los ciudadanos, las empresas y los territorios y las autoridades locales;
- Garantizar la transparencia y la información sobre el coste y los precios de la energía;
- Desarrollar la investigación y la innovación en materia de energía (movilidad con bajas emisiones de carbono, energías marinas y almacenamiento de energía); y
- Diversificar la combinación energética, limitando aún más el uso de combustibles fósiles, diversificando la generación de electricidad y aumentando la proporción de energías renovables.

De acuerdo con [181], en **España** el Gobierno también está elaborando una estrategia nacional para el almacenamiento energético, y en 2020 ya publicó una nueva normativa para apoyar la integración de las tecnologías de almacenamiento en los sistemas eléctricos. Del mismo modo, también está pendiente una normativa para aumentar el papel que desempeñará la gestión de la demanda, incluso mediante la promoción de los servicios de agregación.

Tal como se puede ver, la GDE no alcanzó el mismo interés o éxito en Europa que en USA, y de acuerdo con [182], esto se debe posiblemente a la falta de un equivalente europeo a la Ley de Conservación Energética estadounidense del año 78. En la actualidad incluso China ha desarrollado una Ley de

Conservación Energética que le ha brindado un mayor desarrollo en temas de GDE que la Unión, lo cual deja en evidencia que la falta de políticas energéticas claras solo atrasada el desarrollo sostenible de los pueblos, y más aún a la tercera región que más recursos energéticos consume en el planeta. Resulta contradictorio que la Unión, con su acuerdo por la descarbonización de su economía sea la que menos avanzada está en temas de GDE. La pregunta sería ¿Por qué? La liberalización del mercado se define como la transformación de la producción y la distribución monopolísticas de propiedad pública en mercados privatizados, con varias empresas en “competencia” [183]. De acuerdo a [184], esta política condujo a un mercado basado en la cantidad de electricidad vendida y, por tanto, muchas ESEE percibieron que la conservación energética estaba reñida con la rentabilidad de sus negocios.

5.3.3 Programas Aplicados

Al investigar sobre la aplicación de programas de RD en los mercados eléctricos de los países europeos, la principal frase que reluce es “estudio del potencial de la aplicación de” más no hay información verás que valide la aplicación de estos programas. La excepción es Francia, que en la actualidad es el único país de la Unión que ha aplicado programas de RD en todos los segmentos del mercado. De acuerdo con [185], y aunque los reguladores y los operadores de redes comprenden la importancia de la GDE como nueva fuente de flexibilidad, esta sigue estando sorprendentemente poco desarrollada en Europa.

5.3.3.1 Alemania

A pesar de la gran literatura sobre los potenciales de la GDE en el país Teutón, y de las pruebas realizadas por la DENA (Agencia energética alemana) en los estados de *Bavaria* y *Baden-Wurtemberg* [186], los TSO alemanes han implementado planes de RDBI de mercado como el programa de servicios auxiliares, donde se remunera la generación y los activos agrupados por estar disponibles durante una determinada ventana, y un pago de energía si la planta es llamada durante ese tiempo. Sin embargo, el tamaño mínimo de las ofertas para las reservas secundarias y terciarias es de 5 [MW], frente a los 0,1 [MW] de Estados Unidos o 1 [MW] de Bélgica, lo que impide la participación de los pequeños proveedores de GDE.

5.3.3.2 Bélgica

Como sus homólogos europeos, el TSO belga ha implementado planes de RDBI de mercado de servicios auxiliares. De acuerdo con [185], los grandes usuarios de la red o los agregadores pueden participar en la reserva primaria y la reserva terciaria a través de licitaciones organizadas por el TSO. Mientras que las centrales eléctricas tradicionales de gas solían ser la principal fuente de suministro de reserva primaria de alta reactividad, ahora el consumo agregado de los grandes industriales ofrece una alternativa a la generación convencional. El proveedor es remunerado por la capacidad puesta a disposición, mientras que no hay remuneración por activación. La capacidad actual de GDE solicitada por Elia en Bélgica asciende a 850 [MW], aproximadamente el 6% de la generación instalada. Como resultado, Bélgica se sitúa ahora entre los primeros países de Europa en términos de servicios auxiliares abiertos a la respuesta a la demanda.

5.3.3.3 Francia

De acuerdo con [187], la TSO francesa aplica tres mecanismos de respuesta de la demanda, los cuales son: Mecanismo de equilibrio, Mecanismo de “Notificación de intercambio de bloques de la RD” (NEBEF) y Mecanismo de capacidad.

Desde 2003, los grandes clientes industriales han estado participando en el mecanismo de equilibrio, y a partir de 2007, se llevaron a cabo los primeros pilotos para introducir la carga residencial agregada en el mecanismo. En 2014, por primera vez un consumidor industrial aportó su reducción de energía como Reserva Primaria (Reserva de contención de frecuencia). Este programa, junto con la Reserva Secundaria (Reserva de restauración de frecuencia), es accesible a la participación de la carga desde el 1 de julio de 2014.

El mecanismo NEBEF, que permite ofertar la carga a reducir como energía directamente en el mercado mayorista de electricidad, se introdujo en diciembre de 2013. El volumen activado durante la fase de experimentación fue de 310 [MW-h] en 2014. Desde entonces, la participación ha sido de 1.522 [MW-h] en

el 2015 y 10.313 [MW-h] en el 2016.

El Mecanismo de Capacidad, que comenzó en enero de 2017, está abierto a la Respuesta a la Demanda y se basa en un "mercado descentralizado"; donde los participantes del mercado contratan directamente entre ellos. La subasta EPEX donde se venden los certificados de capacidad está centralizada y es anónima.

Además, el mecanismo de equilibrio y los servicios auxiliares están abiertos a la respuesta a la demanda agregada. Las cargas también pueden participar en el mercado del día siguiente y, desde enero de 2017, en el mercado intradiario a través del NEBEF. La respuesta a la demanda también está permitida en el mecanismo de capacidad. El TSO francés ha ajustado los requisitos de los programas para adaptarse mejor a las capacidades de la demanda. En 2013 se reguló la relación entre los agregadores y los minoristas/representantes de la demanda y se estableció un marco normalizado.

Por otro lado, y de acuerdo a [188], los agentes del mercado pueden utilizar la RD para optimizar sus propias carteras o para vender energía directamente a otros usuarios o la TSO francesa. Hay dos categorías principales de respuesta a la demanda que contribuyen al equilibrio entre la oferta y la demanda: **La respuesta a la demanda industrial**, cuando se reduce el consumo en uno o varios centros industriales (ya sea por el cierre de los procesos o por el cambio al consumo propio). Este tipo de respuesta a la demanda puede ser propuesto directamente por el usuario industrial o a través de un agregador o proveedor, y **La Respuesta a la demanda distribuida**, o la agregación a través de un agregador o proveedor de acciones individuales de respuesta a la demanda que implican volúmenes más pequeños, todas realizadas al mismo tiempo por clientes residenciales o profesionales.

5.3.3.4 Italia

Como sus homólogos europeos, el TSO italiano ha implementado planes de RDBI de mercado como el programa de servicios auxiliares. De acuerdo con [185], en la actualidad un número limitado de productos de equilibrio está diseñado para aceptar la flexibilidad de los proveedores de GDE. El programa de contratos interrumpibles gestionado por TERNA es el único mecanismo que permite a los participantes en el mercado de mercado para monetizar su flexibilidad, con un recorte de carga mínimo de 1[MW] y sin permitir la agregación.

5.3.3.5 España

A partir del 1 de junio del 2021 se introduce automáticamente la discriminación horaria en el sistema de tarificación para clientes de mercados minoristas, mientras que los consumidores en el mercado libre podrán estudiar si se acogen a este tipo de tarifas. De acuerdo a la Comisión Nacional de Mercados y Competencias (CNMC) se pretende “incentivar un consumo eficiente de electricidad y que el consumidor tenga un papel relevante en la descarbonización” [189]. En España se distinguen tres periodos de tarificación:

- Horas valle que van desde las 00:00 [h] hasta las 08:00 [h]
- Horas llano que van desde las 08:00 [h] hasta las 10:00 [h], desde las 14:00 [h] hasta las 18:00 [h] y desde las 22:00 [h] hasta las 00:00 [h].
- Horas punta que van desde las 10:00 [h] hasta las 14:00 [h] y desde las 18:00 [h] hasta las 22:00 [h].

Por otro lado, de acuerdo con [190] hay varias aplicaciones móviles donde se puede consultar en tiempo real los precios de la electricidad y así, aprovechar los beneficios de tarificación con discriminación horaria. En las app se puede destacar:

- RedOS, que es la aplicación del TSO español, REE.
- (Ahorra en luz. Precio luz hora), es una aplicación está dirigida para usuarios de plataformas Android.
- Precio luz España, es una aplicación dirigida para usuarios de plataformas iOS.

5.3.4 Resultados

Dado que Francia es el país que más ampliamente ha aplicado programas de RDBI para mercados, es en

este que se basa el análisis de resultados ya que es la única TSO que ha mostrado los resultados obtenidos de los programas de RD de servicios auxiliares en sus informes anuales.

5.3.4.1 Francia

De acuerdo al informe anual del año 2019 de la TSO francesa RTE, el volumen medio de respuesta a la demanda ofrecido en el mecanismo de equilibrio fue de 878 [MW], superior a la media de 2018 (727 [MW]). Se activó un total de 7,6 [GW-h] de respuesta a la demanda, por debajo de los 22,3 [GW-h] de 2018. El hecho es que la mayor parte de la respuesta a la demanda tiene un valor de capacidad, lo que significa que como un precio alto y se activa en tiempo real por RTE en momentos de estrés significativo en el sistema de energía, especialmente durante las olas de frío. En 2019, hubo menos casos en los que el precio de las últimas ofertas activadas en el mecanismo de equilibrio igualó o superó el alto precio de la capacidad de respuesta a la demanda ofrecida. Los volúmenes de respuesta a la demanda seleccionados a través del mecanismo NEBEF alcanzaron 22,2 [GW-h] en 2019, en línea con 2018. La respuesta a la demanda distribuida representó la mayor parte de los volúmenes intercambiados a través del NEBEF. Los casos de activación de volúmenes significativos de respuesta a la demanda se concentraron en el último trimestre. En el caso del mecanismo de capacidad, las entidades certificadas y su tecnología se definen a nivel de emplazamiento. Pueden ser capacidades de generación o de respuesta a la demanda. Los volúmenes certificados suman 90,5 [GW] para 2019 y 86,6 [GW] para 2020, el 2.6% y 2.1% de la demanda total respectivamente.

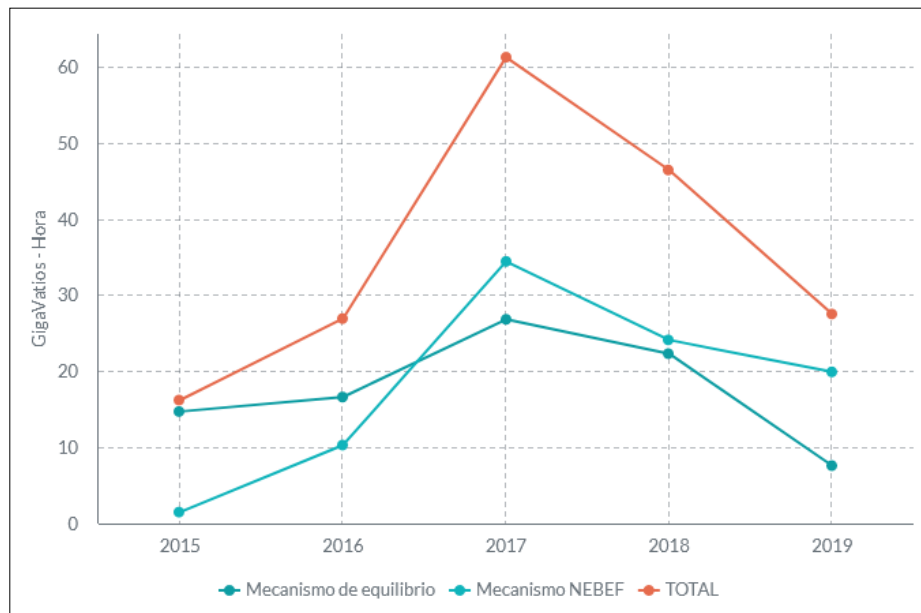


Figura 5-18.- Resultados de la aplicación de programas RD en los mercados franceses.

6 PERSPECTIVAS A FUTURO

“Hay que luchar por todos equitativamente, bonitamente, honradamente y racionalmente.”

- Tránsito Amaguaña, activista indígena ecuatoriana -

En el libro *Alicia en el País de las Maravillas* del escritor inglés Lewis Carrol, se describe una situación entre Alicia y el gato *Cheshire* que se relata a continuación:

*Menino de Cheshire, –empezó a decir Alicia tímidamente–
¿Podrías decirme, por favor, qué camino debo seguir para salir de aquí?*

*–Esto depende en gran parte del sitio al que quieras llegar–
dijo el Gato.*

–No me importa el sitio... –dijo Alicia.

–Entonces tampoco importa mucho el camino que tomes– dijo el Gato.

–... siempre que llegue a alguna parte –añadió Alicia como explicación.

–¡Oh, siempre llegarás a alguna parte –aseguró el Gato–, si caminas lo suficiente!

Aplicando dicha metáfora en la situación energética actual se podría decir que la senda del desarrollo nos ha llevado a alguna parte, sin duda, más también nos ha acarreado un problema que pone en riesgo la estabilidad entre el medio ambiente, el ser humano y el emplazamiento donde nos encontramos.

Los ODS de la ONU son la dirección que necesitamos para guiar el desarrollo energético de una forma que no implique ninguna alteración entre los participantes de nuestro ecosistema, y es que a futuro lo que principalmente debe solidificarse es el marco legal energético, no sólo el de cada país, el de cada región, sino también el de todo el globo. De acuerdo con [191], existen siete principios que deben ser tomados en cuenta al elaborar leyes energéticas, y estos son:

- La soberanía nacional de los recursos.
- El acceso a servicios energéticos modernos.
- La justicia energética.
- El uso prudente, racional y sostenible de los recursos naturales.
- La protección del medio ambiente, la salud humana y la lucha contra el cambio climático.
- La seguridad y la fiabilidad de la energía.
- La resiliencia.

Y esto es justamente lo que se ha intentado desarrollar desde el año 1978 con la emisión de la PURPA estadounidense, y en el año 1997 con la firma del Protocolo de Kioto y su posterior ratificación en 2015 con el Tratado de París, y en el año 1998 cuando China emitió su ley de conservación energética, y en el año 2019 cuando la Comisión Europea estableció su objetivo, para el año 2050, de ser el primer continente cuya economía no dependa de combustibles de origen fósil. El futuro es eso, son leyes, son reglamentos, son planes

estratégicos, son un conjunto de marcos legales que nos permitan avanzar en dirección de la sostenibilidad de los pueblos y en la consolidación de redes eléctricas inteligentes cuya operación se base en criterios seguros, fiables, resistentes, accesibles en condiciones asequibles y con una distribución justa de los costes entre sus usuarios, y que sea adecuada para la integración de fuentes de energía limpias [192], y todo esto se puede alcanzar mediante la gestión de la demanda eléctrica.

Claramente falta mucho por recorrer en la senda de la descarbonización, de la implantación de mecanismos de economía circular en los procesos energéticos y de la electrificación de los servicios, pero ningún marco legal ni reglamentación o directorio surtirá efecto si no aprendemos a vivir en comunidad, si no aprendemos a convivir, sino aprendemos del buen vivir, o como decían las civilizaciones ancestrales andinas, *Sumak Kawsay* [193], ya que solo el aporte de todos, en grupo, nos permitiría salir del apuro ambiental en el que estamos.

Y es que la GDE es el *Sumak Kawsay* del consumo de electricidad, es el aprender a consumir bien y racionalmente los recursos eléctricos, es una herramienta que, utilizada en conjunto, puede lograr grandes objetivos como la reducción del consumo energético neto o la disminución la huella de carbono que dejamos en el proceso de aprovechamiento de los vectores energéticos o la consolidación de redes eléctricas inteligentes al servicio de la comunidad, una comunidad que debería estar a la misma altura que sus redes eléctricas, inteligentes.

6.1 La red eléctrica inteligente

Dentro de la bastedad de conceptos sobre **redes eléctricas inteligentes** (REI) que se presenta en [194], se ha seleccionado el concepto utilizado por la Comunidad Europea, el cual define a las REI como “*una red eléctrica que puede integrar de manera rentable el comportamiento y las acciones de todos los usuarios conectados a ella, incluidos los generadores, los consumidores y prosumidores, con el fin de garantizar un sistema eléctrico económicamente eficiente y sostenible con bajas pérdidas y altos niveles de calidad, seguridad de suministro y seguridad*”. Además, según la UE, la REI debe cumplir con seis rasgos decisivos en la red, los cuales se citan a continuación:

- Superar los límites del desarrollo de la gestión distribuida y el almacenamiento energético.
- Garantizar la interoperabilidad y la seguridad del suministro.
- Proporcionar la accesibilidad de todos los usuarios a un mercado liberalizado.
- Reducir el impacto de las consecuencias medioambientales de la producción y el suministro de la electricidad.
- Permitir la participación de la demanda
- Atraer el interés de los consumidores.

Por otro lado, y de acuerdo con [36], hay dos objetivos principales de la REI en lo que respecta a la gestión de la energía, y son: la capacidad de almacenamiento de energía y la producción mediante energías renovables. Su importancia radica en que pueden desempeñar un papel importante en la gestión de picos de demanda.

6.1.1 Componentes

De acuerdo con [195], los componentes principales de una REI son: subestaciones eléctricas, generadores eléctricos, líneas de transporte y distribución, controladores, nodos colectores, medidores inteligentes y el sistema de control de la red de transporte y distribución. Por otro lado, en [196] se determina que los componentes de la REI son: aparatos inteligentes, vehículos eléctricos, contadores inteligentes, subestación inteligente, generación distribuida, unidades de medida de fasores, comunicaciones integradas y sistemas de detección y medición. Se ha tomado en cuenta estas dos definiciones ya que en conjunto expresan de una forma completa la bastedad de los componentes que las integran.

Adicionalmente, el DOE de USA ha determinado las seis funcionalidades prioritarias [197] de la red inteligente, las cuales son:

- Infraestructura de medición avanzada

- Respuesta de la demanda
- Vehículos eléctricos
- Conocimiento de la situación en una zona amplia
- Recursos energéticos distribuidos y almacenamiento
- Gestión de red de distribución

Queda claro que, la GDE es un factor clave en la consolidación de las REI, así como la GD, el AE y la tecnología V2G, a la que se le puede agregar las tecnologías *Customer-to-Grid* (C2G) y *Building-to-Grid* (B2G), que básicamente pretenden funcionar como piezas adicionales de GD o AE, dependiendo del tipo de tecnología que va a brindar energía a la red.

6.1.2 Los agregadores de servicios

La RD no solo trae consigo una prometedora mejora en la eficiencia de la red eléctrica, sino que para que dicho objetivo se pueda cumplir es necesario ordenar a los clientes mediante agregadores, la nueva figura que surge como operador de un sector de la red eléctrica. De acuerdo con [198], los **agregadores** se definen como “*mediadores entre los consumidores finales de electricidad que ofrecen una respuesta a la demanda, y otros actores del mercado energético que explotan su respuesta a la demanda*”. Los agregadores son organizaciones de carácter privado que intermedian entre los clientes y los proveedores de electricidad, con el objetivo de mantener la estabilidad de la red basándose en una estrategia rentable mediante la negociación de la compra de servicios de generación eléctrica y el seguimiento de los patrones de los clientes. El rendimiento de la aplicación de esta estrategia de basa en el número de consumidores que aplican a los diferentes programas de RD y que son supervisados por el agregador.

Las principales actividades de los agregadores incluyen:

- La comunicación y el registro de los consumidores que quieren inscribirse en programas de RD
- El análisis del consumo de electricidad de los clientes y la estimación de su ahorro potencial.
- La medición y el envío en tiempo real del consumo de electricidad a las ESEE.
- El cálculo de la participación de los consumidores en los programas de RD.

De acuerdo con [199], y en función de los recursos que se optimizan, existen diferentes tipos de agregadores de recursos que son:

- **Los agregadores de demanda** tienen la función de integrar los recursos de todos los clientes finales y gestionar la flexibilidad de la demanda.
- **Los agregadores de carga** gestionan la flexibilidad de la carga de todos los clientes finales.
- **Los agregadores de producción** concentran pequeños generadores de clientes finales como una central eléctrica virtual. Estos consumidores finales activos se conocen como prosumidores. Pueden cambiar su producción de energía a petición de una señal externa.

Por otro lado, debido a su flexibilidad, los agregadores pueden diferenciarse en:

- **Los agregadores que consumen recursos** acumulan diferentes cargas con diferentes posibilidades de ser transferidas o reducidas, lo que define su flexibilidad. Debido a su flexibilidad, estas cargas pueden utilizarse para promover servicios auxiliares, como el control de la frecuencia o la tensión o el respaldo.
- **Los agregadores como productores de recursos**, se centran en las fuentes de energía renovables (por ejemplo, la energía fotovoltaica o eólica) o incluso en las unidades de generación tradicionales (por ejemplo, pequeñas centrales hidroeléctricas o generación combinada de calor y electricidad) que están cerradas a los consumidores finales. Éstas podrían desempeñar el papel de proveedores de energía de emergencia para casos de alta demanda punta.
- **Los agregadores con recursos bidireccionales** tienen dispositivos de almacenamiento de energía

estáticos (por ejemplo, baterías eléctricas) y dinámicos (por ejemplo, vehículos eléctricos), que pueden transferirse fácilmente en el tiempo y el espacio y utilizarse para aumentar la flexibilidad y la estabilidad de un sistema energético.

6.1.3 La Inteligencia Artificial en las REI

La implementación de sistemas de medición avanzados para medir el consumo de los clientes ha traído muchos beneficios para las partes involucradas, pero uno de sus aportes más significativos es la información que se provee minuto a minuto, con un medidor que registre cuatro medidas por hora en un año habría registrado 35,040 valores, y la información es poder. La pregunta es ¿Qué hacer con tanta información? De acuerdo con [63], los enfoques de IA se han identificado como una herramienta clave para abordar estos retos en los sistemas de energía.

La IA es un ámbito multidisciplinar que emplea técnicas y conocimientos de diversos campos, como la informática, la neurociencia, la economía, la teoría de la información, la estadística, la psicología, la teoría del control y la optimización. El término inteligencia artificial se refiere al estudio y diseño de entidades inteligentes llamados agentes, estos agentes inteligentes son sistemas que observan su entorno y actúan para alcanzar objetivos. En [63] se hace una presentación bastante clara sobre el aporte de la tecnología basada en IA en los programas de Respuesta de la demanda; dicho gráfico se presenta en la figura 6-1.

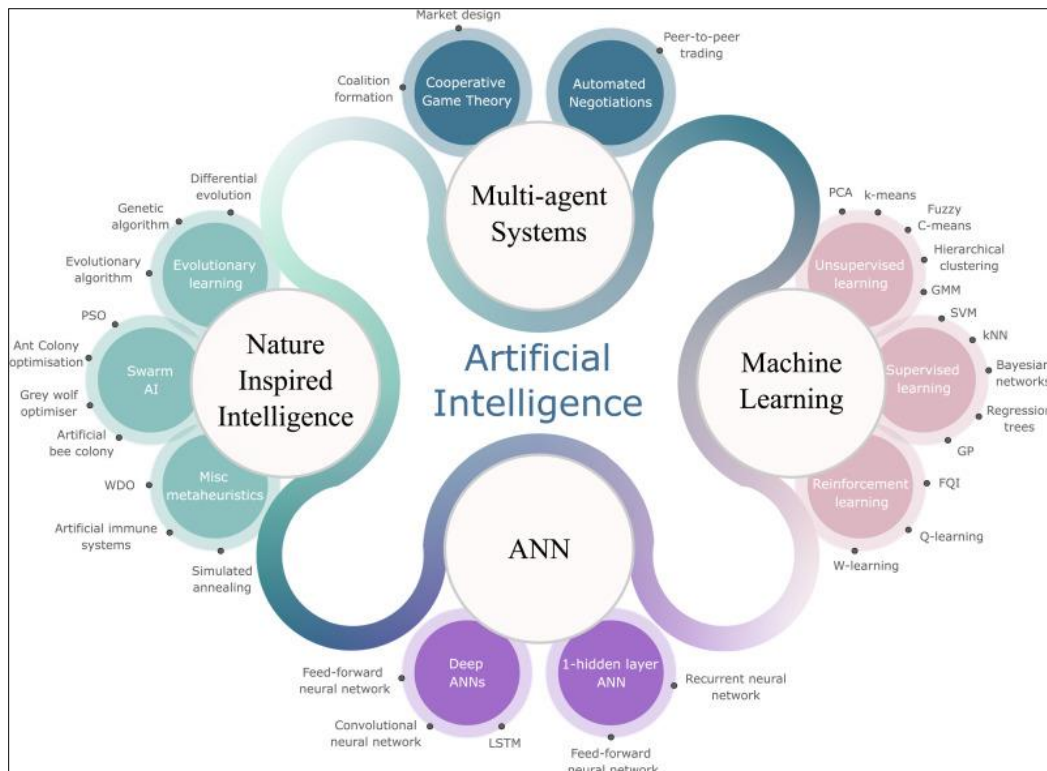


Figura 6-1.- Grupos de enfoques de IA utilizados para la RD.

Una de las metodologías más utilizadas en IA es el aprendizaje automático o *Machine Learning* (ML), que permiten analizar la gran cantidad de datos que se crea continuamente producto de la medición de la demanda consumida de uno, y de miles de usuarios. Este grupo de técnicas engloba métodos que pueden identificar patrones en los datos de forma automática, y luego utilizar estos patrones para predecir, y técnicas para realizar otras formas de toma de decisiones en un entorno incierto. El aprendizaje automático es un dominio multidisciplinar que extrae conceptos de varios dominios, principalmente de la informática, la estadística, las matemáticas y la ingeniería. Los principales tipos de aprendizaje automático son: el aprendizaje supervisado, el aprendizaje no supervisado y el aprendizaje por refuerzo. En la gráfica 6-2 se muestra la proporción de métodos de IA que, según [63], se utiliza en el estudio de la RD.

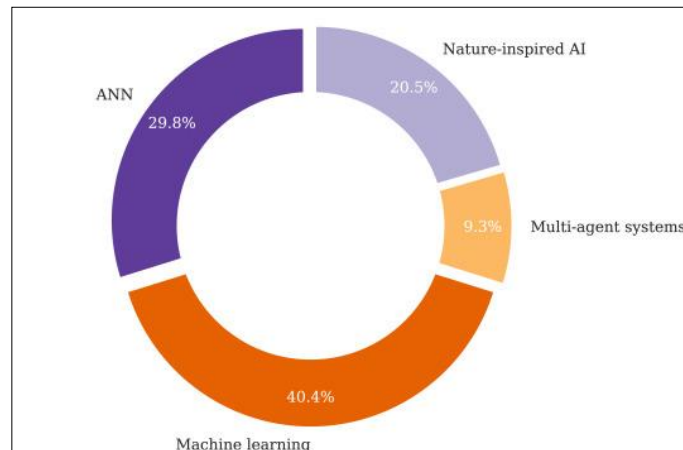


Figura 6-2.- Proporción de literatura revisada que utiliza técnicas de IA con fines de RD.

La IA puede utilizarse para prever la demanda y la generación de energía, optimizar el mantenimiento y el uso de los activos energéticos, comprender mejor los patrones de uso de la energía, así como proporcionar una mayor estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico. La IA también puede aliviar la carga de los humanos asistiendo y automatizando parcialmente la toma de decisiones, así como automatizando la programación y el control de la multitud de dispositivos utilizados.

6.2 Problemas y desafíos de la GDE

De acuerdo con [161], para alcanzar los beneficios que proveen los programas de RD es necesario que las agencias estatales, regionales, las ESEE tanto públicas o privadas se comprometan en viabilizar las estructuras necesarias para su implantación. A continuación se presentan las distintas recomendaciones realizadas por los diferentes autores para mejorar el desarrollo de los programas de GDE.

a) Fomentar la respuesta de la demanda basada en el precio

Hola Los precios de la electricidad al por menor, vinculados a costes de suministro, son uno de los principales mecanismos para lograr la RD. En prácticamente la totalidad de países no se aplican tarifas dinámicas a los usuarios con la excepción de USA. En el año 2017 solamente el 5.80% [200] de los abonados inscritos en programas de RD lo estaban en planes de precios dinámicos. Las recomendaciones son las siguientes:

- Para **grandes clientes** se recomienda el uso de TTR ya que estas indexan los precios horarios a los mercados diarios apoyando así a la RD y al desarrollo del mercado minorista al dar a los clientes más información y certeza sobre las consecuencias financieras de su respuesta. En los Estados donde se permite la competencia minorista las ESEE deben considerar la adopción de este tipo de tarifas como opción de servicio por defecto. En los Estados donde no se permite la competencia minorista las ESEE deben considerar la posibilidad de ofrecer este tipo de tarifas como un servicio opcional. Además, es fundamental que las autoridades proporcionen educación, divulgación y asistencia técnica a los clientes para maximizar la eficacia de las TTR.
- Para **clientes de medianas y pequeñas empresas**, debido a la diversidad de sus negocios y tipos de edificios, hace difícil el diseño de enfoques de precios que puedan provocar una RD predecible y rentable en las diversas circunstancias de los clientes. Hay pruebas que determinan que las TTR podrían ser adecuadas para empresas medianas y que las TTC pueden ser eficaces en empresas medianas y pequeñas. Pueden esgrimirse argumentos políticos o comerciales para ofrecer TTR o TTC como tarifa estándar o como servicio por defecto, razón por la cual se requiere que las autoridades reguladoras y las ESEE realicen un análisis de estos dos tipos de tarifas en clientes de empresas medianas y pequeñas, con la finalidad de hacer una mejor segmentación que permita la aplicación de este tipo de programas a los clientes.
- Para **clientes residenciales** se han llevado a cabo proyectos piloto donde las TTC a gran escala han obtenido resultados alentadores, si bien las autoridades reguladoras y las ESEE deberían

considerar la posibilidad de realizar un análisis del caso de negocio de este tipo de tarifas para clientes residenciales. Además, y debido a la carencia de información sobre los aparatos y equipos que consumen electricidad en este tipo de clientes, las ESEE deberían investigar la rentabilidad de ofrecer asistencia técnica y/o financiera a este tipo de clientes de tal forma que puedan formar parte activamente en programas de precios dinámicos como TTC o TTU.

b) Mejora de la respuesta de la demanda basada en incentivos

La experiencia ha demostrado que la eficacia de este tipo de programas depende de la forma en la que estos son diseñados y luego en cómo son ofrecidos a los clientes. En la actualidad, Estados Unidos lidera en la aplicación de programas de control directo de carga de los equipos residenciales y comerciales pequeños, y ha demostrado su eficacia en proporcionar una respuesta rentable a la demanda, razón por la cual se recomienda su mantenimiento y/o ampliación de su uso al resto de clientes que aún no se acogen a programas de RDBI que son aproximadamente el 93% de abonados. Adicionalmente, se conmina al resto de países que incluyan los programas clásicos de la RDBI dentro del repertorio de servicios que se ofrece al cliente.

Por otro lado, es necesario replantear la gestión de carga de tal forma que esta se adapte a las nuevas estructuras del mercado, tal como han empezado a hacer los europeos en sus clientes industriales, si bien se necesita ir más allá y agregar pagos al rendimiento real, mejoras de las tecnologías de control, mejorar las comunicaciones del sistema o la capacidad de supervisión del mismo, de tal forma que todos los usuarios puedan participar en los mercados mayoristas de electricidad.

c) Reforzar el análisis y la valoración de la respuesta de la demanda

Se recomienda la estandarización de la información sobre los costes y beneficios de la RD, y sobre los métodos de valoración de la misma, con la finalidad de establecer los niveles adecuados donde este tipo de programas generan beneficios. Una infraestructura analítica más sólida para la RD ayudará a las ESEE, a los clientes, a los proveedores minoristas y a las agencias estatales, regionales y federales a evaluar adecuadamente las capacidades de RD, los casos de negocio y los planes de recurso.

Dentro de las actividades necesarias a tener en cuenta se encuentran las siguientes:

- Desarrollar métodos estandarizados para evaluar el potencial y el rendimiento de la RD e identificar las pruebas adecuadas para los programas y circunstancias previsibles;
- Aclarar las diferentes categorías de beneficios de la RD, desarrollando métodos para cuantificar aquellos beneficios que pueden ser cuantificados e índices cualitativos o de clasificación para aquellos que son difíciles de cuantificar;
- Desarrollar métodos para estimar el impacto de la RD en los costes de la electricidad al por mayor y en la fiabilidad, y los beneficios y ahorros que se trasladan a los clientes minoristas, aclarando así el vínculo que la RD proporciona entre los mercados mayoristas y minoristas;
- Documentar el impacto de la RDBP sobre los precios y costes del mercado eléctrico mayorista, basándose en los resultados reales de los programas de respuesta a la demanda; y
- Establecer una base de datos de los programas de RD existentes para (1) documentar un historial de rendimiento del programa con respecto a la protección de la fiabilidad, (2) obtener información sobre los factores que influyen en el rendimiento, y (3) identificar las formas de utilizar la respuesta a la demanda más eficazmente para hacer frente a los desafíos de fiabilidad.

d) Adopción de tecnologías de apoyo

Las tecnologías de apoyo más importantes para el desarrollo de los programas de RD son:

- Sistemas avanzados de medición, sobre todo para los clientes del mercado masivo.
- Controles avanzados de la calefacción, ventilación e iluminación.
- Los electrodomésticos inteligentes y los termostatos inteligentes.

- Los dispositivos de generación de energía renovable distribuida, como las turbinas y micro turbinas avanzadas. Las matrices fotovoltaicas y los sistemas de cogeneración de calor y electricidad a pequeña escala.
- Los motores de alta eficiencia.
- El almacenamiento de energía térmica y eléctrica.
- Los equipos de calefacción y refrigeración activados térmicamente.

Además, es necesario evaluar los diseños avanzados para integrar y configurar estos dispositivos para aplicaciones en "todo el edificio" o en varios edificios, en particular los que pueden optimizarse en cuanto a rendimiento energético, económico y medioambiental. Entre ellos se encuentran los sistemas de automatización de edificios y conceptos como los *Zero-Energy Building*, *GridWise TM* e *Intelligrid*.

e) Integrar la respuesta de la demanda en la planificación de recursos

La adecuación de los recursos eléctricos es primordial para garantizar un funcionamiento fiable, seguro y asequible del mercado eléctrico. Es conveniente que las entidades regionales, las autoridades reguladoras estatales y las ESEE se pregunten cuánta RD se necesita para garantizar la adecuación de los recursos, dadas las estructuras del mercado y las condiciones del sistema. Varios estudios concluyen que incluso en niveles bajos de RD es posible mejorar la adecuación de los recursos y la eficiencia de las operaciones de mercado. Sin embargo, estos estudios no abordan ni proporcionan métodos para establecer niveles óptimos u objetivos de RD en entornos de mercado específicos.

En los mercados mayoristas en los que las ESEE administran los mercados spot organizados, la atención principal se centra en los impactos y beneficios de la RD a corto plazo. Debería dedicarse un mayor esfuerzo a caracterizar los impactos y beneficios potenciales a largo plazo. En ausencia de mercados a plazo para la RD, y el potencial de un flujo de beneficios, el valor de la RD dependerá principalmente de las condiciones actuales del mercado.

f) Instaurar un marco legal para la aplicación de los programas de GDE

Tanto en USA como en CHN ha definido leyes específicas (Ley de la Conservación Energética) que contienen disposiciones para que las distintas agencias estatales fomenten la GDE y la RD mediante el intercambio de información, la asistencia técnica y las actividades de desarrollo y transferencia de tecnología. Tanto en USA como en UE se ha observado el fomento en el uso creciente de la RD en los mercados mayoristas los cuales han sido guiados por el Gobierno y las TSO, en donde se han abordado la integración y el uso de la RD en regiones con mercados organizados y el impacto potencial de la RD en el poder de mercado de los proveedores.

Los Gobiernos, en la medida de lo posible, deberían seguir proporcionando asistencia técnica sobre la RD a las partes interesadas en la aplicación de estos programas, de tal forma que se mejore el intercambio de información, y que puedan identificarse y debatirse las lecciones aprendidas, las mejores prácticas, las nuevas tecnologías, los obstáculos y las formas de mitigarlos.

g) Mercado eléctrico no liberalizado

Para el caso específico de CHN, y para todos los países cuya estructura eléctrica se asemeja a un monopolio, la ausencia de mercado impide reflejar la situación de los precios y la demanda en tiempo real; por lo tanto, es imposible medir el valor de los recursos de la demanda. De hecho, la capacidad eléctrica en la hora punta de la red es un recurso considerablemente escaso, y los clientes potenciales no son conscientes de su importancia; en consecuencia, estos usuarios potenciales no estarán dispuestos a proporcionar la capacidad flexible necesaria para participar en proyectos de RD. Además, la aplicación de un precio minorista dinámico de la electricidad, que es el componente más importante para regular la demanda de los usuarios y orientar eficazmente el uso racional de la electricidad, se ha visto obstaculizada por el mercado eléctrico no liberalizado de China. En realidad, la aplicación de programas de GDE es la excusa más importante que un país puede tener para liberalizar su mercado y así regular sus precios.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

“Uno no es lo que es por lo que escribe, sino por lo que ha leído.”

- Jorge Icaza, novelista ecuatoriano -

7.1 Conclusiones

De acuerdo a lo establecido en los objetivos, se concluye lo siguiente:

- La disminución de la demanda que se origina en los periodos de crisis energética ha servido para validar la teoría de que la demanda tiene un comportamiento flexible. En consecuencia, es posible flexibilizar la demanda sí y solo si el cliente percibe un beneficio al disminuir su consumo energético, los beneficios económicos, ya sean en efectivo o como reducción del costo en la planilla, motivan al cliente a que cambie sus hábitos y disminuya su consumo de electricidad.
- El objetivo de la GDE es mejorar la eficiencia del sistema eléctrico mediante la modificación de la forma de la curva de carga. El término “gestión de la demanda eléctrica” no es un sinónimo del término “respuesta de la demanda”: la segunda es subordinada de la primera. La GDE está basada en estrategias de conservación energética y para su aplicación se divide en tres programas: Conservación energética, Sustitución del recurso energético primario y Respuesta de la demanda. Los dos primeros programas tienen un comportamiento estático a través del tiempo ya que su aplicación realiza cambios permanentes en la red que no requieren monitorización o control. Por otro lado los programas de RD son dinámicos en el tiempo y requieren de un control continuo para su óptimo desarrollo.
- El cliente es el protagonista de la GDE y es necesario que los distintos actores que explotan de la red lo involucren en todo el proceso. Si los programas no son viables para el cliente este no se inscribirá en ellos, por lo tanto no tendrán ninguna efectividad en la disminución de la demanda programada. La forma más clara de volver a los programas de GDE atractivos para el cliente es a través de la reducción del costo para el cliente.
- La implementación de la GDE requiere de un sistema de medición sofisticado, provisto de IED's y redes de comunicación, que usualmente recibe el nombre de AMI. Este sistema de medición provee al cliente de toda la información concerniente a su consumo energético, lo cual representa un avance en materia de derechos del consumidor, ya que antes el cliente no tenía forma de saber su consumo hasta que llegaba la factura de la electricidad. Ahora este tendría el poder de saber cuánto está consumiendo minuto a minuto.
- Al promover la mejora del parámetro de eficiencia de la red, y a contribuir en gran forma a la reducción de las pérdidas, la GDE propone una metodología de gestión que aplica el concepto de economía circular en el mercado y en la red eléctrica. Este giro en la gestión energética permitirá que esta avance de acuerdo a los objetivos de desarrollo sostenible planteado por la ONU.
- La implementación de la GDE ayudaría a consolidar la tecnología necesaria para construir los edificios cuyo balance energético es cero, o cercano a cero. Inclusive si el edificio funciona como una isla eléctrica, los programas de GDE balancearían los pronósticos de demanda con los pronósticos de energía generada para que no se demande más energía de la que se puede generar.
- En USA se han desarrollado los programas de RDBI clásicos debido a la falta de herramientas

tecnológicas para desarrollar los programas de RDBI de mercados, mientras que en la UE han priorizado la aplicación de programas de RDBI de mercados, específicamente el programa de servicios auxiliares, a pesar de las limitantes tecnológicas que pueda tener la red en temas de medición inteligente.

- Tanto Estados Unidos como China han basado su desarrollo en temas energéticos en una ley clara centrada sobre la conservación energética, y tiene sentido que estos países prioricen el ahorro al consumo en temas energéticos ya que son los principales consumidores de vectores energéticos a nivel mundial.
- De los datos presentados en los reportes anuales sobre GDE en USA, se puede obtener que los programas de CE aportan a la reducción del consumo energético total y los programas de RD aportan a la disminución del pico de demanda.
- La Unión Europea, como bloque, es el tercer mayor consumidor de recursos energéticos y de electricidad del globo, e importa más del 60% de los vectores energéticos que consume. Adicionalmente, esta región ha vetado la construcción de nuevas centrales nucleares y a su vez, plantea la descarbonización progresiva de su economía para el año 2050. A corto plazo, la UE dista mucho de ser independiente energéticamente hablando. Dentro de la unión hay un país que marca la diferencia en temas de independencia energética debido a su gran producción de energía nuclear, Francia y su desarrollo energético parece haber tenido más planificación energética que sus homólogos europeos.
- Debido a la amplitud del concepto de la GDE, una visión integral de la misma incluye la consolidación de políticas energéticas públicas que prioricen el ahorro antes que al consumo. Basar el desarrollo energético de los países en leyes que prioricen el ahorro, o principios de Economía Circular, suena coherente con los tiempos que corren.
- La GDE es un componente principal en el desarrollo de las redes eléctricas inteligentes debido a que integra todas las tecnologías que brindan flexibilidad a la demanda.
- Los objetivos de la GDE van encaminados a lo descrito por la ONU para construir ciudades sostenibles.
- De los 30 estudios analizados sobre la RDA, ni uno solo ha sido implementado en algún programa piloto de RD.

7.2 Recomendaciones

- Al momento de analizar las diferentes estrategias implementadas en los algoritmos de respuesta de la demanda automática, se encontró que cada investigación giraba en torno a objetivos de optimización diferentes, lo que no permite establecer a ciencia cierta las bondades de cada algoritmo para cada situación. Sería adecuado establecer un banco de pruebas piloto que permita, basado en él, el desarrollo de los diferentes algoritmos basados en las características presentadas en el modelo conceptual.
- Dado que el cliente es el principal actor del modelo conceptual, estudiarlo más a fondo permitiría crear mejores programas y garantizar su éxito de implementación. Inclusive, se podrían implementar estrategias Lean para desarrollar el estudio del cliente y sus hábitos de consumo energético. Sería novedoso utilizar los datos de consumo, de una muestra relevante, originados desde los sistemas AMI para que sean analizados mediante IA. Adicionalmente se podría realizar entrevistas con los clientes para poder saber de primera mano sus hábitos de consumo.
- Dado que el futuro plantea el desarrollo de los edificios con balance energético cero, o cercano a cero, sería útil desarrollar algoritmos que permitan el control energético de dichos edificios. Elaborar algoritmos de pronóstico de generación renovable para cuantificar la energía que se podrá consumir por hora. A su vez, elaborar algoritmos de pronóstico de demanda que utilicen estrategias de gestión de demanda para que se adapten a la generación disponible, dejando un margen para el

almacenamiento de la misma.

- De acuerdo a ciertos artículos investigados, el cliente muestra reticencia a las ESEE debido a que sienten que el servicio que se adquiere es demasiado costoso. Estas interacciones entre proveedores y clientes no ayuda en el momento de plantear un cambio como la GDE. Sería interesante consolidar la opinión pública sobre las operadoras de distribución, comercializadoras, operadoras de transporte y calidad de servicio prestado, a través de encuestas encaminadas a obtener opiniones sobre confianza en los proveedores de electricidad y deseos de optar por planes de gestión de la demanda que les permitan reducir sus tarifas eléctricas.
-

REFERENCIAS

- [1] BBC News, “Cómo era el Sahara antes de convertirse en uno de los mayores desiertos del planeta - BBC News Mundo,” *Noticias*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-39307995>.
- [2] BP, “Statistical Review of World Energy 2020,” 2020. [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>.
- [3] A. González, “Las crisis energética y económica a partir de 1973.,” *Centro de Publicaciones. Ministerio de Trabajo y Seguridad Social*. p. pp.129 y 132, 1974, [Online]. Available: <http://www.ub.edu/ciudadania/hipertexto/bienestar/trabajos/9798/2/21.htm>.
- [4] U.S. Congress, “United States Code (Fully Amended) Title 42 . The Public Health and Welfare Chapter 91 . National Energy Conservation Policy Subchapter III . Federal Energy Initiative Part B . Federal Energy Management,” 1994.
- [5] D. Gómez Jiménez and J. Sanz Oliva, “La política energética en Estados Unidos en la actualidad,” *Boletín Económico ICE*, no. 3110, 2019, doi: 10.32796/bice.2019.3110.6790.
- [6] N. Unidas, “Protocolo de Kyoto de la convención marco de las NU sobre el cambio climático,” 1998. doi: 10.1145/115790.115803.
- [7] FIBK, “A más consumo energético, ¿más desarrollo económico?,” 2019. <https://www.fundacionbankinter.org/noticias/a-mas-consumo-energetico-mas-desarrollo-economico/>.
- [8] P. Cotarelo and et all., “Definiendo la soberanía energética,” *Ecologista*, vol. 81, p. 51, 2014, [Online]. Available: http://www.odg.cat/sites/default/files/soberania_energetica-1.pdf.
- [9] E. overshoot Day, “El día de sobregiro ecológico de la tierra será el 29 de julio.,” 2021. <https://www.overshootday.org/newsroom/press-release-june-2021-spanish/>.
- [10] A. & Á. Hidalgo, “Sumak Kawsay,” 2014.
- [11] O. . M. A.A. SALLAM, *Electric Distribution Systems*. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2011.
- [12] E. G. (Scientific-Atlanta), “Load Management DSM: Past, Present and Future.,” *COMSOC Conf. J.*, pp. A1–A12, 1995, doi: 10.1016/s0360-3199(98)00076-7.
- [13] S. Rahman, S. Member, and S. Member, “An Efficient Load Model for Analyzing Demand Side Management Impacts,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 3, pp. 1219–1226, 1993.
- [14] M. E. Whiteman, “Applications of distribution automation and demand side management in AMR systems,” *IEE Conf. Publ.*, no. 426, pp. 1–5, 1996, doi: 10.1049/cp:19960466.
- [15] H. A. Gabbar, *Energy Conservation in Residential, Commercial, and Industrial Facilities*. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2017.
- [16] L. Woolner and T. Hannon, “Demand Side Management - Latest development in tele-technology,” *Distribution*, no. 426, pp. 3–5, 1996.
- [17] C. W. (Chairman D. suncommittee of the P. S. E. C. Ceilings, “IEEE PES DEMAND-SIDE MANAGEMENT SUBCOMMITTEE,” 1986.
- [18] H. Nilsson, “The many faces of demand-side management,” pp. 207–210, 1994.
- [19] EPRI, “Demand-Side Management Glossary,” p. 77, 1992.
- [20] P. Palensky and D. Dietrich, “Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 7, no. 3, pp. 381–388, 2011, doi: 10.1109/TII.2011.2158841.
- [21] A. Kubule, K. Ločmelis, and D. Blumberga, “Analysis of the results of national energy audit program in Latvia,” *Energy*, vol. 202, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117679.

- [22] S. Darby, “The effectiveness of feedback on energy consumption,” *Enviromental Chang. Inst. from Oxford Univ.*, 2006, doi: 10.1051/orthodfr/2015025.
- [23] J. Brühl, G. Smith, and M. Visser, “Simple is good: Redesigning utility bills to reduce complexity and increase understanding,” *Util. Policy*, vol. 60, no. August, p. 100934, 2019, doi: 10.1016/j.jup.2019.100934.
- [24] M. Goic, A. Rojas, and I. Saavedra, “The Effectiveness of Triggered Email Marketing in Addressing Browse Abandonments,” *J. Interact. Mark.*, vol. 55, pp. 118–145, 2021, doi: 10.1016/j.intmar.2021.02.002.
- [25] P. Pezzini, O. Gomis-Bellmunt, and A. Sudri-Andreu, “Optimization techniques to improve energy efficiency in power systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 4, pp. 2028–2041, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.01.009.
- [26] S. Medved, S. Domjan, and C. Arkar, “Contribution of energy storage to the transition from net zero to zero energy buildings,” *Energy Build.*, vol. 236, 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110751.
- [27] R. Figaj and M. Żołądek, “Experimental and numerical analysis of hybrid solar heating and cooling system for a residential user,” *Renew. Energy*, vol. 172, pp. 955–967, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.03.091.
- [28] D. F. de Souza, P. P. F. da Silva, L. F. A. Fontenele, G. D. Barbosa, and M. de Oliveira Jesus, “Efficiency, quality, and environmental impacts: A comparative study of residential artificial lighting,” *Energy Reports*, vol. 5, pp. 409–424, 2019, doi: 10.1016/j.egy.2019.03.009.
- [29] C. B. A. Almeida, S. Greenberg, “Demand-Side Mangament opportunities through the use of energy-efficient motor systems,” *Ieee Trans. power Syst. vol. 5, no. 3 , august 1990*, vol. 5, no. 3, pp. 125–130, 1990.
- [30] M. Legrand, L. M. Rodríguez-Antón, C. Martínez-Arevalo, and F. Gutiérrez-Martín, “Integration of liquid air energy storage into the spanish power grid,” *Energy*, vol. 187, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.115965.
- [31] Alice Grundy, “Construction of 250MWh liquid air ‘CRYOBattery’ has begun in UK,” *Energy Storage News*, 2020. <https://www.energy-storage.news/news/construction-of-250mwh-liquid-air-cryobattery-has-begun-in-uk>.
- [32] B. Van Der Kroon, R. Brouwer, and P. J. H. Van Beukering, “The energy ladder: Theoretical myth or empirical truth? Results from a meta-analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 20, pp. 504–513, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.045.
- [33] R. H. Hosier and J. Dowd, “Household fuel choice in Zimbabwe. An empirical test of the energy ladder hypothesis,” *Resour. Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 347–361, 1987, doi: 10.1016/0165-0572(87)90003-X.
- [34] M. Davis, “Rural household energy consumption: The effects of access to electricity - Evidence from South Africa,” *Energy Policy*, vol. 26, no. 3, pp. 207–217, 1998, doi: 10.1016/s0301-4215(97)00100-6.
- [35] C. W. Gellings, “Demand-Side Load Management,” *IEEE Spectr.*, vol. 18, no. 12, pp. 49–52, 1981.
- [36] A. Raza, A. Mahmood, A. Safdar, and Z. A. Khan, “Load forecasting , dynamic pricing and DSM in smart grid : A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 1311–1322, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.117.
- [37] M. H. Albadi, S. Member, and S. Member, “Demand Response in Electricity Markets : An Overview,” pp. 2–6, 2007.
- [38] S. Zhou, “The effect of smart meter penetration on dynamic electricity pricing : Evidence from the United States,” *Electr. J.*, vol. 34, no. 3, p. 106919, 2021, doi: 10.1016/j.tej.2021.106919.
- [39] M. Sheha, K. Mohammadi, and K. Powell, “Techno-economic analysis of the impact of dynamic electricity prices on solar penetration in a smart grid environment with distributed energy storage,” *Appl. Energy*, vol. 282, no. PA, p. 116168, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116168.

- [40] C. P. Faria *et al.*, “Production scheduling scheduling considering considering dynamic dynamic Production scheduling dynamic electricity price in considering scheduling considering dynamic electricity in energy-efficient factories factories electricity price in energy-efficient,” *IFAC Pap.*, vol. 53, no. 2, pp. 12584–12589, 2020, doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1823.
- [41] C. Zhou, B. G. Stewart, and D. M. Hepburn, “Demand Response for Optimisation of Power Systems Demand Due to EV Charging Load,” pp. 4–7, 2012.
- [42] S. Sharda, M. Singh, and K. Sharma, “Demand side management through load shifting in IoT based HEMS: Overview, challenges and opportunities,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 65, no. March 2020, p. 102517, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102517.
- [43] L. Zhao, Z. Yang, and W. Lee, “The Impact of Time-of-Use (TOU) Rate Structure on Consumption Patterns of the Residential Customers,” vol. 53, no. 6, pp. 5130–5138, 2017.
- [44] P. Bertoldi, P. Zancanella, and B. Boza-Kiss, “Demand Response status in EU Member States,” 2016. doi: 10.2790/962868.
- [45] J. E. Flory and J. H. Chamberlin, “REFLECTING CUSTOMER NEEDS IN DEMAND SIDE MANAGEMENT PLANNING,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 00, no. 8, pp. 2105–2111, 1985.
- [46] S. Zheng, Y. Sun, B. Li, B. Qi, X. Zhang, and F. Li, “Incentive-based integrated demand response for multiple energy carriers under complex uncertainties and double coupling effects,” *Appl. Energy*, vol. 283, no. June 2020, p. 116254, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116254.
- [47] P. Khajavi, “The Role of Incentive Based Demand Response Programs in Smart Grid,” pp. 26–29, 2011.
- [48] R. Yu, W. Yang, and S. Rahardja, “Optimal Real-Time Price Based on a Statistical Demand Elasticity Model of Electricity,” pp. 90–95, 2021.
- [49] R. Alasseri, A. Tripathi, T. J. Rao, and K. J. Sreekanth, “A review on implementation strategies for demand side management (DSM) in Kuwait through incentive-based demand response programs,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. February, pp. 617–635, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.023.
- [50] R. M. Delgado, “Demand-Side Management Alternatives,” *Proc. IEEE*, vol. 73, no. 10, pp. 1471–1488, 1985, doi: 10.1109/PROC.1985.13319.
- [51] N. S. Publication, “NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 1.0,” *Smart Grid Cybersecurity Guidel. Interoperability Stand. (with DVD)*, pp. 19–133, 2012.
- [52] P. Siano, “Demand response and smart grids - A survey,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 461–478, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.10.022.
- [53] M. Behrangrad, “A review of demand side management business models in the electricity market,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 270–283, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.03.033.
- [54] U. Bhushan *et al.*, “Factors Influencing Purchase of Smart Appliances in Smart Homes.,” *J. Accounting-bus. Manag.*, vol. 24, no. 1, pp. 21–42, 2017.
- [55] V. Delgado-gomes, A. Gonc, M. Sanduleac, and C. Outline, *Smart Meters and Advanced Metering Infrastructure*. 2019.
- [56] Y. Energy, “Smart VS AMR Meters: What Is The Difference?,” *Guides*, 2019. <https://www.yuenergy.co.uk/news/smart-vs-amr-meters-what-is-the-difference>.
- [57] B. Asare-Bediako, W. L. Kling, and P. F. Ribeiro, “Home energy management systems: Evolution, trends and frameworks,” *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, 2012, doi: 10.1109/UPEC.2012.6398441.
- [58] PA Consulting Group, “Residential Smart Energy Monitoring Pilot Final Report,” p. 50, 2010.
- [59] R. Adeva, “Tecnologías inalámbricas: diferencias y usos de WiFi, Bluetooth, Zigbee y Z-Wave,” *Tecnología*, 2021. <https://www.adslzone.net/reportajes/tecnologia/estandares-conexion-inalambrica/>.

- [60] H. Hui, Y. Ding, Q. Shi, F. Li, Y. Song, and J. Yan, “5G network-based Internet of Things for demand response in smart grid: A survey on application potential,” *Appl. Energy*, vol. 257, no. August 2019, p. 113972, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113972.
- [61] D. Noguét, C. Minatec, and S. Coordi-, “IEEE 1900.6: Spectrum Sensing Interfaces and Data Structures for Dynamic Spectrum Access and Other Advanced Radio Communication Systems Standard: Technical Aspects and Future Outlook,” no. December, pp. 118–127, 2011.
- [62] A. Barbato and A. Capone, “Optimization models and methods for demand-side management of residential users: A survey,” *Energies*, vol. 7, no. 9, pp. 5787–5824, 2014, doi: 10.3390/en7095787.
- [63] I. Antonopoulos *et al.*, “Artificial intelligence and machine learning approaches to energy demand-side response: A systematic review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 130, no. June, p. 109899, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109899.
- [64] G. Pretticco and A. Vitiello, *Distribution System Operators’ Observatory 2020*. 2020.
- [65] Electric Power Research Institute (EPRI), “Demand Side Management Implementation Guidelines,” 1992.
- [66] H. Zhao, G. Liu, H. Jia, Z. Yang, and S. Fan, “Optimal dispatching of distributed generation based on demand response programs,” *IET Conf. Publ.*, vol. 2013, no. 623 CP, pp. 1–4, 2013, doi: 10.1049/cp.2013.1799.
- [67] H. Chahkandi Nejad, S. Tavakoli, N. Ghadimi, S. Korjani, S. Nojavan, and H. Pashaei-Didani, “Reliability based optimal allocation of distributed generations in transmission systems under demand response program,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 176, no. August, p. 105952, 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.105952.
- [68] Y. Wang *et al.*, “Energy management of smart micro-grid with response loads and distributed generation considering demand response,” *J. Clean. Prod.*, vol. 197, pp. 1069–1083, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.271.
- [69] Y. Yoldaş, A. Önen, S. M. Muyeen, A. V. Vasilakos, and İ. Alan, “Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, no. January, pp. 205–214, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.064.
- [70] M. Babaei, A. Abazari, M. M. Soleymani, M. Ghafouri, S. M. Muyeen, and M. T. H. Beheshti, “A data-mining based optimal demand response program for smart home with energy storages and electric vehicles,” *J. Energy Storage*, vol. 36, no. November 2020, p. 102407, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102407.
- [71] Q. Meng, Y. Li, X. Ren, C. Xiong, W. Wang, and J. You, “A demand-response method to balance electric power-grids via HVAC systems using active energy-storage: Simulation and on-site experiment,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 762–777, 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.01.083.
- [72] B. S. K. Patnam and N. M. Pindoriya, “Demand response in consumer-Centric electricity market: Mathematical models and optimization problems,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 193, no. June 2020, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106923.
- [73] Q. Wang, C. Zhang, Y. Ding, G. Xydis, J. Wang, and J. Østergaard, “Review of real-time electricity markets for integrating Distributed Energy Resources and Demand Response,” *Appl. Energy*, vol. 138, pp. 695–706, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.048.
- [74] T. Jamasb and M. Pollitt, “Cambridge Working Papers in Economics CWPE 0471 Electricity Market Reform in the European Union: Review of Progress towards CMI Working Paper 66 Cambridge Working Papers in Economics,” *Design*.
- [75] E. Wåktare, K. Kovács, and A. Gee, “The Energy Sector Inquiry: conclusions and way forward,” *Compet. Policy Newsl.*, no. 1, pp. 55–59, 2007.
- [76] N. Fabra and J. Fabra Utray, “Competencia y poder de mercado en los mercados eléctricos,” *Cuad. Económicos ICE*, no. 79, 2010, doi: 10.32796/cice.2010.79.5982.

- [77] K. Gamma, R. Mai, C. Cometta, and M. Loock, “Engaging customers in demand response programs: The role of reward and punishment in customer adoption in Switzerland,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 74, no. January, p. 101927, 2021, doi: 10.1016/j.erss.2021.101927.
- [78] U. Gneezy, S. Meier, and P. Rey-Biel, “When and why incentives (don’t) work to modify behavior,” *J. Econ. Perspect.*, vol. 25, no. 4, pp. 191–210, 2011.
- [79] S. J. Kim and G. B. Giannakis, “An Online Convex Optimization Approach to Real-Time Energy Pricing for Demand Response,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2784–2793, 2017, doi: 10.1109/TSG.2016.2539948.
- [80] N. ONU, “Cambio climático: El ser humano ha calentado el planeta a un nivel nunca visto en los últimos 2000 años.,” *Cambio climático y medio ambiente*, 2021. <https://news.un.org/es/story/2021/08/1495262>.
- [81] N. ONU, “¿Qué es la economía circular y cómo cuida del medio ambiente?,” *Cambio climático y medio ambiente*, 2018. <https://news.un.org/es/interview/2018/12/1447801>.
- [82] Deloitte, “Environmental Research Pool,” 2018.
- [83] DOE, “US Department of Energy: A Common Definition for Zero Energy Buildings,” no. September, p. 22, 2015.
- [84] T. Barker, P. Ekins, and T. Foxon, “The macro-economic rebound effect and the UK economy,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 10, pp. 4935–4946, 2007, doi: 10.1016/j.enpol.2007.04.009.
- [85] B. Lin and X. Liu, “Dilemma between economic development and energy conservation: Energy rebound effect in China,” *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 867–873, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.06.077.
- [86] B. Lin, F. Yang, and X. Liu, “A study of the rebound effect on China’s current energy conservation and emissions reduction: Measures and policy choices,” *Energy*, vol. 58, pp. 330–339, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.06.018.
- [87] M. S. Gorus and M. Aydin, “The relationship between energy consumption, economic growth, and CO2 emission in MENA countries: Causality analysis in the frequency domain,” *Energy*, vol. 168, pp. 815–822, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.11.139.
- [88] C. Europea, “La Comisión aboga por una Europa climáticamente neutra de aquí a 2050,” 2018, vol. IP/18/6543, pp. 1–3.
- [89] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico (MITECO), “Estrategia de descarbonización a largo plazo 2050,” Madrid, 2020.
- [90] Sri Mulyani Indrawati, “Lo que debemos saber acerca de la energía y la pobreza,” *World Bank Blogs*, 2015. <https://blogs.worldbank.org/es/voices/lo-que-debemos-saber-acerca-de-la-energ-y-la-pobreza> (accessed Jul. 10, 2021).
- [91] W. Meadows, C.H; Meadows, D.L; Randers, J; Behrens, *The limits to growth*. 1972.
- [92] World Bank Group, “Off-Grid Solar Market Trends Report 20018 - Executive Summary,” no. January, pp. 1–40, 2018, [Online]. Available: www.ifc.org.
- [93] BNEF, “Q1 2017 Off-Grid and Mini-Grid,” 2017.
- [94] IDCOL, “Annual Report 2017,” 2017. [Online]. Available: [file:///C:/Users/green/Downloads/Yemen HC Annual report 2017.pdf](file:///C:/Users/green/Downloads/Yemen%20HC%20Annual%20report%202017.pdf).
- [95] S. Giarola *et al.*, “The role of energy storage in the uptake of renewable energy: A model comparison approach,” *Energy Policy*, vol. 151, no. January, p. 112159, 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112159.
- [96] S. Dorahaki, A. Abdollahi, M. Rashidinejad, and M. Moghbeli, “The role of energy storage and demand response as energy democracy policies in the energy productivity of hybrid hub system considering social inconvenience cost,” *J. Energy Storage*, vol. 33, no. April 2020, p. 102022, 2021, doi: 10.1016/j.est.2020.102022.

- [97] J. Zhao, X. Xi, Q. Na, S. Wang, S. N. Kadry, and P. M. Kumar, "The technological innovation of hybrid and plug-in electric vehicles for environment carbon pollution control," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 86, no. September 2020, 2021, doi: 10.1016/j.eiar.2020.106506.
- [98] M. Jafari, A. Kavousi-Fard, T. Niknam, and O. Avatefipour, "Stochastic synergies of urban transportation system and smart grid in smart cities considering V2G and V2S concepts," *Energy*, vol. 215, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119054.
- [99] O. R. Masera, B. D. Saatkamp, and D. M. Kammen, "From linear fuel switching to multiple cooking strategies: A critique and alternative to the energy ladder model," *World Dev.*, vol. 28, no. 12, pp. 2083–2103, 2000, doi: 10.1016/S0305-750X(00)00076-0.
- [100] I. Bisaga and P. Parikh, "To climb or not to climb? Investigating energy use behaviour among Solar Home System adopters through energy ladder and social practice lens," *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 44, no. May, pp. 293–303, 2018, doi: 10.1016/j.erss.2018.05.019.
- [101] R. S. A. Schiilb, "La reforma del subsidio energético en Ecuador podría generar beneficios sociales, fiscales y climáticos.," *Hablemos de sostenibilidad y cambio climático*, 2019. <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/la-reforma-del-subsidio-energetico-en-ecuador-podria-generar-beneficios-sociales-fiscales-y-climaticos/>.
- [102] G. R. Timilsina and S. Pargal, "Economics of energy subsidy reforms in Bangladesh," *Energy Policy*, vol. 142, no. February, p. 111539, 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111539.
- [103] P. Yadav, P. J. Davies, and S. Asumadu-Sarkodie, "Fuel choice and tradition: Why fuel stacking and the energy ladder are out of step?," *Sol. Energy*, vol. 214, no. December 2020, pp. 491–501, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2020.11.077.
- [104] Imelda, "Cooking that kills: Cleaner energy access, indoor air pollution, and health," *J. Dev. Econ.*, vol. 147, no. July 2019, p. 102548, 2020, doi: 10.1016/j.jdeveco.2020.102548.
- [105] R. K. Andadari, P. Mulder, and P. Rietveld, "Energy poverty reduction by fuel switching. Impact evaluation of the LPG conversion program in Indonesia," *Energy Policy*, vol. 66, pp. 436–449, 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.11.021.
- [106] H. Park and H. Kwon, "Effects of consumer subsidy on household fuel switching from coal to cleaner fuels : A case study for Anthracites in Korea," *Energy Policy*, vol. 39, no. 3, pp. 1687–1693, 2011, doi: 10.1016/j.enpol.2010.12.044.
- [107] K. Kim, K. Sul, J. E. Szulejko, S. D. Chambers, X. Feng, and M. Lee, "Progress in the reduction of carbon monoxide levels in major urban areas in Korea," *Environ. Pollut.*, vol. 207, pp. 420–428, 2015, doi: 10.1016/j.envpol.2015.09.008.
- [108] D. Moya, S. Budinis, S. Giarola, and A. Hawkes, "Agent-based scenarios comparison for assessing fuel-switching investment in long-term energy transitions of the India's industry sector," *Appl. Energy*, vol. 274, p. 115295, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115295.
- [109] S. Luh, S. Budinis, S. Giarola, T. J. Schmidt, and A. Hawkes, "Long-term development of the industrial sector – Case study about electrification, fuel switching, and CCS in the USA," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 133, p. 106602, 2020, doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.106602.
- [110] C. M. Costa, J. C. Barbosa, H. Castro, and R. Gonçalves, "Electric vehicles : To what extent are environmentally friendly and cost effective ? – Comparative study by european countries," vol. 151, no. August 2020, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111548.
- [111] A. E. Onile, R. Machlev, E. Petlenkov, Y. Levron, and J. Belikov, "Uses of the digital twins concept for energy services, intelligent recommendation systems, and demand side management: A review," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 997–1015, 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.01.090.
- [112] K. Mahmud, B. Khan, J. Ravishankar, A. Ahmadi, and P. Siano, "An internet of energy framework with distributed energy resources, prosumers and small-scale virtual power plants: An overview," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 127, no. June 2019, p. 109840, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109840.

- [113] Y. Wang, W. Gao, F. Qian, and Y. Li, "Evaluation of economic benefits of virtual power plant between demand and plant sides based on cooperative game theory," *Energy Convers. Manag.*, vol. 238, no. April, p. 114180, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114180.
- [114] A. C. Duman, H. S. Erden, Ö. Gönül, and Ö. Güler, "A home energy management system with an integrated smart thermostat for demand response in smart grids," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 65, no. October 2020, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102639.
- [115] J. G. Roos and C. F. Kern, "Modelling customer demand response to dynamic price signals using artificial intelligence," *IEE Conf. Publ.*, no. 426, pp. 213–217, 1996, doi: 10.1049/cp:19960509.
- [116] Q. Lu and Y. Zhang, "Demand response strategy of game between power supply and power consumption under multi-type user mode," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 134, p. 107348, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107348.
- [117] H. R. O. Rocha, I. H. Honorato, R. Fiorotti, W. C. Celeste, L. J. Silvestre, and J. A. L. Silva, "An Artificial Intelligence based scheduling algorithm for demand-side energy management in Smart Homes," *Appl. Energy*, vol. 282, no. PA, p. 116145, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116145.
- [118] I. Ullah and S. Hussain, "Time-constrained nature-inspired optimization algorithms for an efficient energy management system in smart homes and buildings," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 4, pp. 1–25, 2019, doi: 10.3390/app9040792.
- [119] B. N. Alhasnawi, B. H. Jasim, B. E. Sedhom, and J. M. Guerrero, "Consensus Algorithm-based Coalition Game Theory for Demand Management Scheme in Smart Microgrid," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 74, no. January, p. 103248, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.103248.
- [120] R. Seshu Kumar, L. Phani Raghav, D. Koteswara Raju, and A. R. Singh, "Impact of multiple demand side management programs on the optimal operation of grid-connected microgrids," *Appl. Energy*, vol. 301, no. April, p. 117466, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117466.
- [121] B. Chai, J. Chen, S. Member, Z. Yang, Y. Zhang, and S. Member, "Utility Companies : A Two-Level Game Approach," vol. 5, no. 2, pp. 722–731, 2014.
- [122] P. Samadi, H. Mohsenian-Rad, V. W. S. Wong, and R. Schober, "Real-time pricing for demand response based on stochastic approximation," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 789–798, 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2293131.
- [123] V. Pradhan, V. S. K. M. Balijepalli, and S. A. Khaparde, "An effective model for demand response management systems of residential electricity consumers," *IEEE Syst. J.*, vol. 10, no. 2, pp. 434–445, 2016, doi: 10.1109/JSYST.2014.2336894.
- [124] N. Guo, Y. Wang, and G. Yan, "A double-sided non-cooperative game in electricity market with demand response and parameterization of supply functions," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 126, no. PA, p. 106565, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106565.
- [125] A. Goudarzi, Y. Li, S. Fahad, and J. Xiang, "A game theory-based interactive demand response for handling dynamic prices in security-constrained electricity markets," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 72, no. June, p. 103073, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.103073.
- [126] X. Liu, B. Gao, C. Wu, and Y. Tang, "Demand-side management with household plug-in electric vehicles: A Bayesian game-theoretic approach," *IEEE Syst. J.*, vol. 12, no. 3, pp. 2894–2904, 2018, doi: 10.1109/JSYST.2017.2741719.
- [127] M. Shafie-Khah and P. Siano, "A stochastic home energy management system considering satisfaction cost and response fatigue," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 14, no. 2, pp. 629–638, 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2728803.
- [128] H. Dagdougui, A. Ouammi, and L. A. Dessaint, "Peak Load Reduction in a Smart Building Integrating Microgrid and V2B-Based Demand Response Scheme," *IEEE Syst. J.*, vol. 13, no. 3, pp. 3274–3282, 2019, doi: 10.1109/JSYST.2018.2880864.
- [129] P. Singh, S. Dhundhara, Y. P. Verma, and N. Tayal, "Optimal battery utilization for energy management and load scheduling in smart residence under demand response scheme," *Sustain.*

- Energy, Grids Networks*, vol. 26, p. 100432, 2021, doi: 10.1016/j.segan.2021.100432.
- [130] M. Collotta and G. Pau, “An Innovative Approach for Forecasting of Energy Requirements to Improve a Smart Home Management System Based on BLE,” *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 1, no. 1, pp. 112–120, 2017, doi: 10.1109/TGCN.2017.2671407.
- [131] L. Mellouk, M. Boulmalf, A. Aaroud, K. Zine-Dine, and D. Benhaddou, “Genetic Algorithm to Solve Demand Side Management and Economic Dispatch Problem,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 130, pp. 611–618, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.04.111.
- [132] I. Essiet, Y. Sun, and Z. Wang, “Scavenging differential evolution algorithm for smart grid demand side management,” *Procedia Manuf.*, vol. 35, pp. 595–600, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.05.084.
- [133] F. Xu *et al.*, “A micro-market module design for university demand-side management using self-crossover genetic algorithms,” *Appl. Energy*, vol. 252, no. January, p. 113456, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113456.
- [134] R. Morsali, G. S. Thirunavukkarasu, M. Seyedmahmoudian, A. Stojcevski, and R. Kowalczyk, “A relaxed constrained decentralised demand side management system of a community-based residential microgrid with realistic appliance models,” *Appl. Energy*, vol. 277, no. August, p. 115626, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115626.
- [135] H. Shakouri G. and A. Kazemi, “Multi-objective cost-load optimization for demand side management of a residential area in smart grids,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 32, pp. 171–180, 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.03.018.
- [136] M. Latifi, A. Khalili, A. Rastegarnia, S. Zandi, and W. M. Bazzi, “A distributed algorithm for demand-side management: Selling back to the grid,” *Heliyon*, vol. 3, no. 11, 2017, doi: 10.1016/j.heliyon.2017.e00457.
- [137] T. Nadu, “Linear Programming Approach,” 2014.
- [138] H. Jalili and M. P. Moghadam, “Optimal demand response program for active market power reduction,” *2013 21st Iran. Conf. Electr. Eng. ICEE 2013*, pp. 2–6, 2013, doi: 10.1109/IranianCEE.2013.6599764.
- [139] T. Logenthiran, D. Srinivasan, and T. Z. Shun, “Demand side management in smart grid using heuristic optimization,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1244–1252, 2012, doi: 10.1109/TSG.2012.2195686.
- [140] P. Faria, Z. Vale, J. Soares, and J. Ferreira, “Demand response management in power systems using particle swarm optimization,” *IEEE Intell. Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 43–51, 2013, doi: 10.1109/MIS.2011.35.
- [141] N. Pavithra and B. Priya Esther, “Residential demand response using genetic algorithm,” *2017 Innov. Power Adv. Comput. Technol. i-PACT 2017*, vol. 2017-Janua, no. 1, pp. 1–4, 2017, doi: 10.1109/IPACT.2017.8245143.
- [142] A. Al Hadi, C. A. S. Silva, E. Hossain, and R. Chaloo, “Algorithm for demand response to maximize the penetration of renewable energy,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 55279–55288, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2981877.
- [143] M. Wang, H. Xu, S. Yang, L. Yang, R. Duan, and X. Zhou, “Non-cooperative differential game based energy consumption control for dynamic demand response in smart grid,” *China Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 107–114, 2019, doi: 10.23919/JCC.2019.08.010.
- [144] A. H. Mohsenian-Rad, V. W. S. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, and A. Leon-Garcia, “Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 320–331, 2010, doi: 10.1109/TSG.2010.2089069.
- [145] Y. Wang *et al.*, “The optimal emergency demand response (EDR) mechanism for rural power grid considering consumers’ satisfaction,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 118–125, 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.02.014.

- [146] U.S. Department of Energy, “Advanced metering infrastructure and customer systems - Results from the smart grid investment grant program,” 2016.
- [147] D. F. Helia Zandi, Teja Kuruganti, Edward Vineyard, “Home Energy Management Systems: An Overview,” *DOE*, p. Unpublished, 2017.
- [148] ONU, “OBJETIVO 3: Salud y Bienestar,” 2017. [Online]. Available: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/3_Spanish_Why_it_Matters.pdf.
- [149] U. S. Epa and I. Environments, “Proteja su vida y la de su familia: Evite el envenenamiento con monóxido de carbono,” *Environ. Prot.*, 1997.
- [150] ONU, “Objetivo 7: Energía Asequible y no contaminante,” 2017.
- [151] Organizacion de las Naciones Unidas, “Trabajo Decente y crecimiento Económico: Por qué es importante,” *Objet. Desarro. Sosten.*, p. 2, 2017, [Online]. Available: http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/8_Spanish_Why_it_Matters.pdf https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/8_Spanish_Why_it_Matters.pdf.
- [152] ONU, “Industria, innovación e infraestructura,” pp. 40–41, 2020, doi: 10.18356/c70301c4-es.
- [153] ONU, “Objetivo 10. IGUALDAD: POR QUÉ ES IMPORTANTE,” *Onu*, 2015, [Online]. Available: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/10_Spanish_Why_it_Matters.pdf.
- [154] ONU, “Objetivo 11. Ciudades y comunidades sostenibles,” *United Nations*, pp. 1–2, 2015, [Online]. Available: <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-11-sustainable-cities-and-communities.html>.
- [155] ENERDATA, “Anuario estadístico mundial de energía 2021,” 2021. <https://datos.enerdata.net/sources.html>.
- [156] S. . All Data Now, “Datos estadísticos mundiales.” <https://datosmacro.expansion.com/demografia/poblacion>.
- [157] Tyler Hodge, “Hourly electricity consumption varies throughout the day and across seasons.,” *Today in energy*, 2020. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=42915> (accessed Aug. 23, 2021).
- [158] I. Barakat / Chamberlin, “Principles and practice of Demand-Side Management,” Oakland, California, 1992.
- [159] EPRI, “Distribution automation and Demand-Side Management demonstration for Northern States power,” Minneapolis, Minnesota, 1992.
- [160] S. and H. of R. of the U. S. of America, *Energy Policy Act of 2005*, vol. 1, no. Energy Policy. Washington, 2005, p. Public Law 1009-58-aug. 8, 2005.
- [161] U S Department of Energy, “Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them,” *U.S. Dep. Energy*, no. February, p. 122, 2006, [Online]. Available: [file:///C:/Users/SATELLITE/Google Drive/Referencias Doctorado/U.S. Department of Energy \(DOE\) - 2006 - Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them.pdf](file:///C:/Users/SATELLITE/Google Drive/Referencias Doctorado/U.S. Department of Energy (DOE) - 2006 - Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them.pdf).
- [162] U.S. Department of Energy, “Buildings energy databook,” *Energy Effic. Renew. Energy Dep.*, p. 286, 2012, [Online]. Available: <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/DataBooks.aspx>.
- [163] Federal Energy Regulatory Commission, “Demand Response and Advanced Metering 2020 Assessment of,” 2020.
- [164] EIA, “Electric Power Annual 2019,” 2019. [Online]. Available: http://www.eia.doe.gov/ask/electricity_faqs.asp#efficiency.
- [165] C. Economics & Technology Research Institute, “World and China Energy Outlook 2050,” 2018. doi: 10.1787/g2659b7a2e-en.

- [166] A. Hove, W. Qian, K. Zhao, and N. K. Fuerst, “China Energy Transition Status Report 2020,” 2020. [Online]. Available: https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user_upload/china/media_elements/publications/China_Energy_Transition_Status_Report.pdf.
- [167] U.S. EIA, “Country Analysis Executive Summary: China,” 2021. [Online]. Available: https://www.eia.gov/international/content/analysis/countries_long/Congo-Brazzaville/CongoCAXS_2021.pdf.
- [168] Order of the President of the People’s Republic of China, *Energy Conservation Law*, no. 77. 2008, pp. 357–383.
- [169] Compilation and Translation Bureau, *The 13th Five-Year Plan for Economic and Social Development of the People’S Republic of China*. 2016, pp. 97–99.
- [170] International Energy Charter, “China Energy Efficiency Report 2018,” 2018. [Online]. Available: [http://www05.abb.com/global/scot/scot316.nsf/veritydisplay/0a9c91a9a97f3bbdc12579d0004ef177/\\$file/China_Energy_efficiency_Report.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot316.nsf/veritydisplay/0a9c91a9a97f3bbdc12579d0004ef177/$file/China_Energy_efficiency_Report.pdf).
- [171] P. Guo, V. O. K. Li, and J. C. K. Lam, “Smart demand response in China: Challenges and drivers,” *Energy Policy*, vol. 107, no. March, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.04.019.
- [172] Y. Chen, L. Zhang, P. Xu, and A. Di Gangi, “Electricity demand response schemes in China: Pilot study and future outlook,” *Energy*, vol. 224, p. 120042, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120042.
- [173] E. U. 2020 IEA (2020), “European Union 2020: Energy Policy Review,” *IEA energy policy Rep.*, p. 310, 2020, [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/european-union-2020>.
- [174] C. Europea, “Estrategia Marco para una Unión de la Energía resiliente con una política climática prospectiva,” 2015. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:1bd46c90-bdd4-11e4-bbe1-01aa75ed71a1.0011.03/DOC_1&format=PDF.
- [175] IEA, “Energy Policy Review - Germany 2020,” *Ger. 2020*, pp. 1–211, 2020.
- [176] International Energy Agency, “Luxembourg 2020 - Energy Policy Review,” 2020, [Online]. Available: www.iea.org/t&c/.
- [177] IEA, “Austria 2020: Energy Policy Overview,” 2020, [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/austria-2020>.
- [178] IEA, “Japan 2021 - Energy Policy Review,” *Int. Energy Agency*, 2021, [Online]. Available: www.iea.org/t&c/.
- [179] International Energy Agency, “Italy Energy Policy Review 2016,” 2016. doi: 10.1097/00000658-190208000-00001.
- [180] IEA - International Energy Agency, “France 2016,” *Energy policies IEA Ctries.*, p. 207, 2017.
- [181] International Energy Agency, “Energy Policy Review Spain 2021,” 2021, [Online]. Available: www.iea.org/t&c/.
- [182] P. Warren, “A review of demand-side management policy in the UK,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 941–951, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.09.009.
- [183] W. Lise and G. Kruseman, “Long-term price and environmental effects in a liberalised electricity market,” *Energy Econ.*, vol. 30, no. 2, pp. 230–248, 2008, doi: 10.1016/j.eneco.2006.06.005.
- [184] C.-C. Cheng, “Electricity DSM for an Energy Efficient Future in China: Technology options and Policy Priorities,” 2005.
- [185] F. C. Kurt Baes, “Demand Side Management,” *Utilities & Alternative Energy*, 2016. <https://www.adlittle.de/en/insights/viewpoints/demand-side-management>.
- [186] DENA, “Roadmap Demand Side Management. Industrielles Lastmanagement für ein zukunfts- fähiges Energiesystem.” 2016, [Online]. Available: <http://www.dena.de/publikationen/energiesysteme/studie-roadmap-demand-side-management.html>.

- [187] SmartEN, “Explicit Demand Response in Europe Mapping the Markets 2017,” 2017. [Online]. Available: <https://www.smarten.eu/wp-content/uploads/2017/04/SEDC-Explicit-Demand-Response-in-Europe-Mapping-the-Markets-2017.pdf>.
- [188] RTE, “RTE 2019 Electricity Report,” 2019.
- [189] Miguel Ángel Noceda, “Las claves de la nueva factura de la luz que entra en vigor el 1 de junio,” *El país*, 2021. <https://elpais.com/economia/2021-05-24/la-nueva-factura-de-la-luz-abaratará-al-menos-un-34-el-recibo-de-19-millones-de-consumidores.html>.
- [190] I. Rubio, “Tres aplicaciones con información en tiempo real para ahorrar en la nueva factura de la luz,” *El país*, 2021. <https://elpais.com/tecnologia/2021-06-04/tres-aplicaciones-con-informacion-en-tiempo-real-para-ahorrar-con-la-nueva-factura-de-la-luz.html>.
- [191] R. J. Heffron, A. Rønne, J. P. Tomain, A. Bradbrook, and K. Talus, “A treatise for energy law,” *J. World Energy Law Bus.*, vol. 11, no. 1, pp. 34–48, 2018, doi: 10.1093/jwelb/jwx039.
- [192] D. Kuiken and H. F. Más, “Integrating demand side management into EU electricity distribution system operation: A Dutch example,” *Energy Policy*, vol. 129, no. February, pp. 153–160, 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.01.066.
- [193] N. Hidalgo-Capitán, Antonio; Guillén, Alejandro; Deleg, *Antología del pensamiento indigenista ecuatoriano sobre Sumak Kawsay*. 2014.
- [194] C. W. Gellings, “What is the Smart Grid?,” *Smart Grid Plan. Implement.*, no. November 2013, pp. 1–33, 2021, doi: 10.1201/9781003151968-1.
- [195] SMEBOOK, “What are the basic components of Smart Grids?,” *SMEBOOK knowledge base*, 2021. <https://smebook.eu/knowledge-base/smart-grids/what-are-the-basic-components-of-smart-grids/>.
- [196] B. Khan, H. Getachew, and H. H. Alhelou, *Components of the smart-grid system*. INC, 2021.
- [197] U. D. of Energy, “Department of Energy Communications Requirements,” *October*, 2010.
- [198] A. Tantau, A. Puskás-tompos, L. Fratila, and C. Stanciu, “Acceptance of demand response and aggregators as a solution to optimize the relation between energy producers and consumers in order to increase the amount of renewable energy in the grid,” *Energies*, vol. 14, no. 12, 2021, doi: 10.3390/en14123441.
- [199] X. Lu, K. Li, H. Xu, F. Wang, Z. Zhou, and Y. Zhang, “Fundamentals and business model for resource aggregator of demand response in electricity markets,” *Energy*, vol. 204, p. 117885, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117885.
- [200] Federal Energy Regulatory Commission, “Assessment of Demand Response and Advanced Metering 2019,” 2019. [Online]. Available: [http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/12-08-demand-response.pdf%5Cnfile:///C:/Documents and Settings/ab748/My Documents/Smart Metering/California/Demand Response and Advanced Metering.pdf%5Cnhttp://www.cato.org/pubs/regulation/regv29n1/v29n1-3.pdf](http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/12-08-demand-response.pdf%5Cnfile:///C:/Documents%20and%20Settings/ab748/My%20Documents/Smart%20Metering/California/Demand%20Response%20and%20Advanced%20Metering.pdf%5Cnhttp://www.cato.org/pubs/regulation/regv29n1/v29n1-3.pdf).