

# Respuesta a la Demanda para Smart Home Utilizando Procesos Estocásticos

## Power Scheduling Method for Demand Response based on Home Energy Management System using Stochastic Process

Pablo Moreno<sup>1</sup>, Marcelo García<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, <sup>1,2</sup>Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana  
<sup>1</sup>pmorenof@est.ups.edu.ec, <sup>1,2</sup>egarcia@ups.edu.ec

**Resumen**— El incremento del consumo de energía en los usuarios finales, en especial en los residenciales, implica que el sistema eléctrico crezca a la par, tanto en infraestructura como en potencia instalada, además los precios de la energía varían para poder satisfacer estas necesidades, por lo que el presente trabajo utiliza la metodología de respuesta a la demanda utilizando métodos estocásticos como Markov para poder optimizar el consumo de energía en los usuarios residenciales. Es necesaria la participación de los clientes en el sistema eléctrico, ya que de esta manera se logra verificar la cantidad de carga real que existe en la red en determinado tiempo, y esto ayuda a los sistemas eléctricos a ser más confiables y eficientes, dando garantías a la hora de dar un suministro energético. Además, al optimizar el consumo energético se logra una menor emisión de CO<sub>2</sub> al medio ambiente al depender menos de centrales que utilizan combustibles fósiles, lo cual implica una reducción en la contaminación global, un tema que es de primordial importancia en la actualidad. Aunque existen modelados para la optimización energética, la realidad es que el consumo de una vivienda es mucho más complejo, ya que tiene variables como la ubicación geográfica, la arquitectura, los materiales usados para el diseño, la disposición de las ventanas, el número de ocupantes, el clima, la estación del año. Entonces, al aplicar la respuesta a la demanda en entornos residenciales, es importante tomar en cuenta criterios básicos, como por ejemplo mantener el confort del usuario final ya que de esta manera se logra una participación sostenida de la respuesta de la demanda, al tener participación individual, se requeriría una gran inversión en tecnología de control y comunicación.

**Palabras claves**— Respuesta a la demanda, Automatización, Energía, Generación, Software, Servicio, Eficiencia, Residencial, Carga, Clientes.

**Abstract**— The increase in energy consumption, especially in residential consumers, means that the electrical system should grow at pair, in infrastructure and installed capacity, the energy prices vary to meet these needs, so this paper uses the methodology of demand response using stochastic methods such as Markov, to optimize energy consumption of residential users. It is necessary to involve customers in the electrical system because in this way it can be verified the actual amount of electric charge that exists on the network at a given time, and this helps electrical systems to become more reliable and efficient, providing security when an energy supply is given. In addition, to optimize energy consumption lower CO<sub>2</sub> emissions is achieved for the environment by relying less on plants using fossil fuels, which implies a reduction in global pollution, an issue that is very important today. Although there are models for energy optimization, the reality is that the consumption at home is much more complex because it has variables such as: geographical location, architecture, materials used for the design, arrangement of windows, number of occupants, weather, and season. Therefore, to apply the response to the demand in residential settings, it is important to take into account basic criteria, such as maintaining the comfort of the user and in this way a sustained participation of demand response, having individual participation, it would require a great investment in technology of control and communication.

**Keywords**— Demand response, Automation, Energy, Generation, Software, Service, Efficiency, Residential, Load, Customers.

**Tipo de Artículo:** Original

**Fecha de Recepción:** 1 de febrero de 2016

**Fecha de Aceptación:** 11 de octubre de 2016

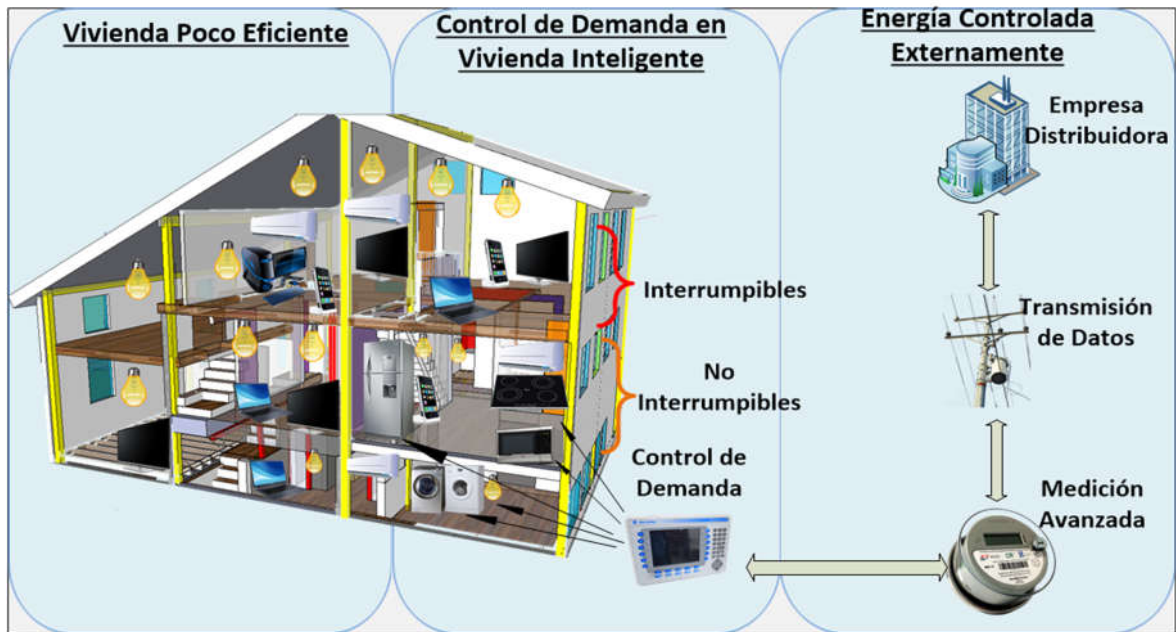


Figura 1. Optimización de una vivienda mediante respuesta a la demanda.

## 1. Introducción

Es muy importante poder optimizar el consumo energético mediante el uso de electrodomésticos eficientes, así se puede controlar la energía consumida y poder programar electrodomésticos para que funcionen en horarios en donde la energía eléctrica cuesta menos, además es necesario tener una red inteligente, es decir una infraestructura de medición avanzada o AMI por sus siglas en inglés[1]. En la figura 1 podemos observar una vivienda poco eficiente, ya que tiene muchos electrodomésticos conectados y funcionando al mismo tiempo, además de tener gran cantidad de iluminación, pero mediante la comunicación bidireccional es posible regular su consumo y hacerla más eficiente, implementando así, respuesta a la demanda.

Un requisito al momento de implementar respuesta a la demanda (RD), o por sus siglas en inglés DR, es usar electrodomésticos inteligentes y redes inteligentes.

La respuesta a la demanda se puede definir de varias formas. La primera puede ser el cambio del uso normal de energía de acuerdo a cambios de precio, también llamado precio sensible de la respuesta de la demanda. La segunda forma puede ser el pago de incentivos para reducir el consumo en momentos en que la energía es más costosa, y una tercera opción puede ser la reducción del consumo cuando se pone en peligro la

confiabilidad del sistema, es decir, respuesta a la demanda controlable[2][3].

En la actualidad es necesario tener una gran cantidad de generación subutilizada, y muchas veces obsoleta para así poder suplir los picos de demanda, y hacer que estos coincidan con la generación[4]. Esta capacidad extra muchas veces puede incluso ser dañina para el medio ambiente, e impulsa el incremento del precio de la electricidad, ya que muchas veces se ingresa, por ejemplo, generación térmica para poder suplir la necesidad energética en horas pico, u horas de mayor consumo[5][6][7].

El objetivo de la respuesta a la demanda es poder hacer a la demanda más flexible, en lugar de adaptar la generación a los cambios de demanda en ciertas horas. La ventaja de esto es poder reducir los requisitos de infraestructura de generación de energía eléctrica[7][8]. Un sistema que tenga respuesta a la demanda tiene como ventajas, aparte de la reducción de contaminación, el desplazamiento del consumo de energía a horarios caracterizados por bajos precios y alta producción de energías renovables[1][9].

Aunque los costos reales de generación, transmisión y distribución de energía pueden variar en el tiempo, los usuarios tienen tarifas basadas en promedios de la electricidad. Ya que los costos pueden variar por varias razones, estos pueden ser, la hora, o el mes, además por el tipo de generación utilizada en cierto período, por lo

general para suplir la demanda en horas pico es utilizada una generación térmica, lo cual es muy costoso debido al uso de combustibles fósiles[10][9].

La importancia de las redes inteligentes es que pueden ser auto-reparables en caso de fallas, se pueden incluir a los clientes en un envío de datos bidireccional, también deben tener resistencia a ataques que pueden venir desde el exterior mediante *software* malicioso. Además se puede ofrecer una gran calidad en la eficiencia del servicio[4][11][12].

Es muy necesaria la participación de los clientes en el sistema eléctrico, ya que de esta manera se logra verificar la cantidad de carga real que existe en la red en determinado tiempo, es decir, esto ayuda a los sistemas eléctricos a ser más confiables y eficientes, dando garantías a la hora de dar un suministro energético, ya que se evitaría, sobrecargas en ciertos sectores en horas pico, lo que puede desencadenar el corte de suministro energético hacia los usuarios[13][14][15]. El problema es lograr modelar de manera eficiente la demanda real en un determinado período, ya que la carga tiene un carácter estocástico, es decir, no se puede determinar su comportamiento real, tan solo se pueden realizar aproximaciones de acuerdo a datos obtenidos con anterioridad, por esta razón es necesaria en una red inteligente, la participación dinámica de los usuarios[16][17].

En el sistema de gestión de demanda residencial es necesaria la coordinación de un grupo de viviendas para gestionar simultáneamente la RD en toda una comunidad[3][4][11]. Muchas veces a los consumidores residenciales no se los considera de los programas de RD debido a su bajo consumo con relación a otros sectores, ya sean comerciales o industriales[18][19]. Una solución a esto puede ser usar un lazo cerrado con los clientes residenciales, es decir, tomar en cuenta un grupo grande de viviendas para monitorear su demanda, de esta manera el consumo energético en conjunto sería comparable a los consumos en sectores más grandes como los industriales y comerciales, y así poderlos incluir en los programas de RD[8][10][20].

Para tener una gestión inteligente de energía, se requieren cambios no solo en la forma de suministrarla sino también en cómo se maneja el mercado energético[9][14][21].

Entonces se puede decir que la respuesta a la demanda RD, se diseña para fomentar el consumo

energético cuando la energía renovable está disponible en respuesta al mercado energético, aplicando así, incentivos económicos[20][22].

**Tabla 1.** Variables

Q	Número de servidores.
q	Datos entrantes al servidor de respuesta a la demanda que están en cola.
Nq	Número total de AMIS conectados a un servidor.
S	Sensores de control de consumo en viviendas.
$C_t^q$	Señales de precio transmitidas a servidores.
As	Respuesta total de demanda.
LS	Valor máximo que se puede variar el consumo en un equipo eléctrico.
$a_t^{qns}$	Retroalimentación de datos.
$\lambda_t^{qns}$	Tasa de llegada de datos hacia los servidores.
t	Intervalo de tiempo.
$\rho_t^{qns}(k)$	Coefficiente de correlación entre dos acciones iguales en respuesta a la demanda.
k	Retardo de tiempo entre acciones de respuesta a la demanda.
$\rho_t^{n_1n_2}$	Coefficiente de correlación entre dos viviendas distintas.
$n_1, n_n$	Número de viviendas en un sistema con respuesta a la demanda.
$\Omega t$	Estados de señales de tiempo.
$\pi_t^{qns}(\omega_t^{qns})$	Distribución en estado estacionario.

## 2. Respuesta a la demanda en el sector residencial

Las actividades de los usuarios residenciales pueden programarse por intervalos de tiempo preferidos por el cliente[6][23]. Algunas de estas tareas pueden ser no interrumpibles, como por ejemplo los frigoríficos, otras pueden ser interrumpibles, de acuerdo a la hora y al precio de la energía, por ejemplo televisores, equipos de sonido, ciertos tomacorrientes de acuerdo a la carga conectada, e iluminación[1][24].

Existen estudios sobre la respuesta a la demanda en el sector residencial, y se ha llegado a concluir que tan solo en los equipos de calefacción se tiene un 6% de la demanda total[2][20][22]. Como se había mencionado con anterioridad, la respuesta a la demanda requiere una

gran coordinación de un número predeterminado de hogares, esto es necesario para mejorar la fiabilidad y confiabilidad del sistema[3][4][10].

Al poder mover la demanda de horas pico hacia horas en donde existe menor precio y uso de energías renovables, como energía solar y eólica, aparte de dar un beneficio económico a los clientes, se reducirán las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente debido a que ya no sería necesario utilizar centrales térmicas para abastecer la demanda, o se utilizaría una menor cantidad de ellas[25][26][27].

Para tener una comunicación bidireccional entre los consumidores y las empresas de distribución, es necesario implementar redes inteligentes AMI, y medidores inteligentes, para realizar mediciones inteligentes o *smart metering*[5][22][28][29].

Mediante AMI la empresa de distribución intercambia datos con los consumidores, y viceversa, razón por la cual el sistema de intercambio de información debe ser adecuada y sustentable a lo largo del tiempo[36]. En la figura 2 se observa la arquitectura de un AMI, en donde los usuarios están conectados entre sí y al proveedor, con una comunicación de dos vías.

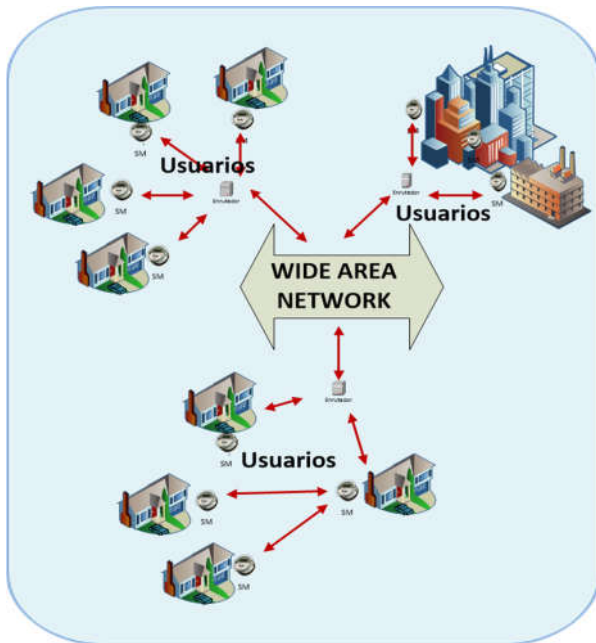


Figura 2. Arquitectura de infraestructura de medición avanzada.

El problema en este aspecto es lograr controlar la carga dentro de las viviendas, ya que no se puede cortar el suministro a un consumidor, por esta razón, se

necesita aparte de todo lo mencionado con anterioridad, una casa inteligente o un *Smart home*[30][31]. Una casa inteligente se refiere a una edificación equipada con inteligencia integrada, y una tecnología de telecomunicación, de tal forma que permita una respuesta a estímulos enviados desde el exterior de la misma[32][33]. También se tiene automatización en el hogar, de tal forma que se pueda gestionar el consumo de energía manteniendo los niveles adecuados de comodidad de los clientes[9][34]. En este aspecto, se toman en cuenta los tipos de carga utilizados en la vivienda, muchos de estos equipos deben estar en funcionamiento continuo, lo que significa que se requiere una cantidad de energía en un determinado período, pero también existen equipos a los que podremos reprogramar debido a su flexibilidad de uso en consumo energético, y de esta manera optimizar el consumo[11][22][35].

Para tener una comunicación a gran escala es necesaria la implementación de redes inteligentes o *Smart Grids*, lo que permitirá tener comunicación entre diversos puntos de la red, de esta manera, y mediante *software* especializado, la red podrá tomar decisiones automáticamente, de acuerdo a lo programado por el centro de control[37][38][39]. Otro punto importante al momento de implementar AMI, es que en paralelo a estos sistemas eléctricos debe haber elementos de *hardware*, *software* y telecomunicaciones, para así poder monitorear, controlar y administrar la red eléctrica, donde se pueden encontrar, controles automáticos de generación o AGC por sus siglas en inglés, *Energy Management System* EMS o sistema de gestión de energía. También se requieren sistemas como:

a) **Sistema de Información Geográfica (GIS):** Este es el punto de partida para implementar una red eléctrica usando AMI, ya que un GIS es un sistema que proporciona capacidades avanzadas de almacenamiento, manejo y despliegue de datos localizados geográficamente. Un GIS es un sistema o un conjunto de herramientas que relacionan diferentes componentes, esto permite organizar, manipular y analizar grandes cantidades de información para así poderla incorporar a varios procesos.

b) **Herramientas informáticas de una red eléctrica sobre un GIS:** Mediante estos sistemas podremos tener un sistema ágil y seguro, ya que obtiene todos los datos necesarios de una red eléctrica, ya sea tipo de

alimentadores, seccionadores, transformadores, equipos de medición, capacitores, restauradores, equipos de comunicación, entre otros. Es una base de datos con modelos estandarizados de elementos aplicables a un sistema eléctrico. También tiene un módulo para importar datos de un Sistema de Administración de la Distribución DMS. Mediante todas estas herramientas mencionadas anteriormente, se logra hacer respuesta a la demanda a los clientes que se encuentran dentro de los programas, a cambio de una compensación. Esto hará que la carga de la red en horario pico se alivie, evitando sobrecargas. La respuesta a la demanda se conseguirá variando cargas en las viviendas siempre y cuando no afecte la comodidad de los residentes, caso contrario muy pocos clientes querrán someterse a los planes de DR.

c) **Sistema de Control Supervisorio y Adquisición de datos (SCADA):** Mediante este sistema es posible obtener información en tiempo real de redes eléctricas, para así poder controlarlas y monitorearlas. Un sistema SCADA permite supervisar, controlar y adquirir datos, mediante un software instalado en ordenadores y así supervisar procesos a distancia.

d) **OMS *Outage Management System*:** Esta aplicación funciona sobre la estructura de un SCADA, y mediante esta se controlan todos los interruptores de la red de distribución, esto permite localizar que interruptor debe funcionar en caso de que haya fallas en el sistema, calcula un estimado del tiempo de interrupción entre otros.

e) **DMS *Distribution Management System*:** Es un sistema de administración de distribución eléctrica que visualiza el sistema en tiempo real y ayuda a controlarlo y monitorearlo al apoyarse en módulos para planeación, operación y optimización de estas redes.

f) **MDMS *Metering Data Management System*:** El MDMS es el corazón de un sistema AMI, este se ocupa de los datos que ingresan en la base de datos del centro de operaciones, para procesarlos y almacenarlos de manera adecuada. Esto hace que todos los datos se encuentren en la misma dirección, lo que facilita al momento de buscarlos y recuperar estos datos. El MDMS incluye diferentes herramientas de análisis, de esta manera se puede gestionar, interactuar y operar de manera óptima con los datos obtenidos. Sin embargo, MDMS tiene ciertos problemas de escalabilidad, como la comunicación de datos, procesamiento de datos, y el uso de recursos de comunicación.

g) **Comunicación de datos:** Con el incremento en la carga, la cantidad de información también se

incrementará, esto puede causar cuellos de botella en las zonas cercanas a la zona de congestión, esto podría provocar problemas ya que podría haber un retraso en la comunicación, y pérdida de datos.

h) **Procesamiento de datos:** Al incrementar la carga de información, no será posible para un solo MDMS, poder procesar toda la información

i) **Uso de recursos de comunicación:** La distancia entre el sistema MDMS centralizado y los concentradores de datos puede ser muy alta, y es necesario que toda la información de los medidores inteligentes viaje esta distancia hasta el sistema de gestión de datos, sin embargo, estos datos no son necesarios a diario para y por esta razón hay pérdidas en los recursos de comunicación importantes.

## 2.1 Arquitectura MDMS distribuida

En una arquitectura MDMS distribuida, cada MDMS recoge los datos de los concentradores bajo su territorio, para procesar estos datos y almacenarlos, en este caso el centro de operaciones requiere solo una fracción de la información obtenida. Esto ahorra una gran cantidad de ancho de banda, y al dividir el trabajo de un MDMS centralizado con los MDMS distribuido, la posibilidad de cuello de botella de los datos se elimina o se reduce.

Este sistema ayuda a la planeación y gestión de medidores inteligentes, mejora la medición del consumo del cliente, y da la posibilidad de la conexión y desconexión remota de usuarios[40][41][18].

En la figura 3 se puede ver un sistema MDMS distribuido, y como estos se conectan a un servidor principal.

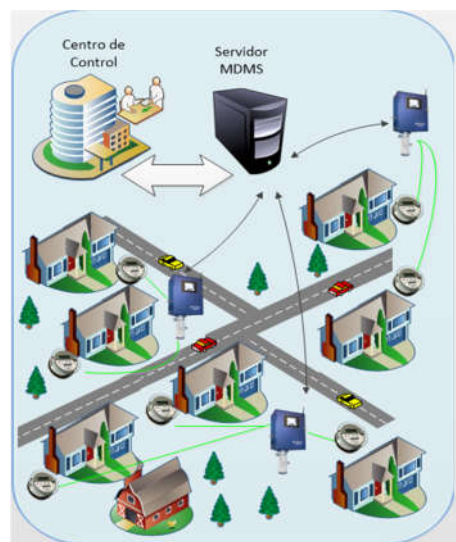


Figura 3. Arquitectura de MDMS distribuida.

Toda esta infraestructura es necesaria para el correcto funcionamiento de AMI, y es de primordial importancia que cada uno de estos elementos funcione correctamente ya que mediante estos sistemas, y al ser implementados en zonas rurales en el que el acceso puede resultar difícil, se podrá reducir drásticamente las pérdidas ya sea por falta de lecturas de medidores, o por robo de energía, y da una gran facilidad a las empresas distribuidoras de desconectar a los usuarios de zonas remotas ante la falta de pago.

Otro reto al desarrollar los sistemas de RD, es la dificultad al momento de modelar, y estimar el consumo energético de una vivienda en condiciones climáticas variables[17]. Aunque existen modelados para la optimización energética, la realidad es que el consumo de una vivienda es mucho más complejo, ya que tiene variables como la ubicación geográfica, la arquitectura, los materiales usados para el diseño, la disposición de las ventanas, el número de ocupantes, el clima, la estación del año[34][42].

Entonces, al aplicar la respuesta a la demanda en entornos residenciales, es importante tomar en cuenta criterios básicos, como por ejemplo mantener el confort del usuario final ya que de esta manera se logra una participación sostenida de la respuesta de la demanda, al tener participación individual, se requeriría una gran inversión en tecnología de control y comunicación[8][42][43].

## 2.2 Smart Home

Mediante un *Smart Home*, podrá controlar de manera óptima el consumo energético y el consumo de electrodomésticos[18][44][8].

El objetivo de una vivienda inteligente es proporcionar el mayor confort a sus usuarios, proporcionando una mejor calidad de vida, mejorando también la seguridad consiguiendo un mayor número de servicios para sus ocupantes.

El objetivo de un *Smart Home* es que los usuarios puedan controlar la vivienda, también poder controlar todos los electrodomésticos desde un sistema de control, esto también ayudaría a verificar el consumo energético y la potencia consumida por los mismos, y así poderlos controlar de manera más eficiente.

Para poder integrar todos estos componentes se necesita una red avanzada inteligente AMI por sus siglas en inglés.

## 2.3 Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)

El primer inicio en los procesos de automatización del suministro eléctrico fue conocido como AMR, advertía una evolución respecto del contador tradicional analógico a un equipo digital; esta etapa ha comprendido únicamente un proceso de lectura automática del contador eléctrico y evitaba el acceso del personal de lectura de las empresas de distribución; situación social que ha sido comentado en algunos temas relacionados con el impacto laboral con sistemas autómatas. En el proceso e intento de lectura automática del consumo eléctrico se incrementó la necesidad de realizar un proceso de corte y reconexión del suministro eléctrico, pero ya para esta opción se requeriría la inclusión de una tecnología de comunicación bidireccional que provoque el control desde las empresas de distribución sobre el consumidor.

Al disponer de una comunicación en una vía para una lectura automática del suministro se podía añadir la detección de manipulación y los perfiles de carga, pasando previamente por una etapa con una lectura de la demanda diaria, intervalos de horario diarios, notificación de corte, hasta llegar finalmente a integrar un servicio para cortes y reconexiones, con lecturas en determinado tiempo y velocidad, bajo parámetros de consumo en horas pico, programación remota del contador, calidad de energía, interfaz para *HAN –Home Area Network* y la posibilidad de incluir usuarios prepago. En AMI se requiere que la etapa de medición inteligente (*Smart Metering*), se encargue de la recolección de datos de un número considerable de medidores inteligentes (*Smart Meters*), y encuestados bajo cierto intervalos y por un determinado tiempo; así, de acuerdo a proyectos emblemáticos y casos de estudio como los presentados por Oncor-Texas/USA[16] se advierte que se requeriría de una frecuencia de 15 minutos para leer cada *smart meter* [17] a través de Sistemas de Gestión de Datos de Medición (MDMS); estos MDMS serán los encargados de almacenar la información en los centros de control de las empresas de distribución.

## 3. Formulación del problema

Como se mencionó, para poder realizar respuesta a la demanda, se necesita tener una comunicación bidireccional entre la empresa y los clientes, esto para poder enviar los datos de los precios en tiempo real,

distribuidos mediante un sistema de medición avanzada AMI.

Cada subestación está representada mediante servidores, en donde entran las señales de respuesta a la demanda, formando colas en los servidores, lo cual puede representar una pérdida de información debido a los límites de capacidad. Si llamamos  $Q$  al número de servidores, es decir al número de colas de datos en la red. Para cada cola de datos representado mediante  $q$  en  $\{1, \dots, Q\}$ , se tiene  $N_q$  como el total de AMIs conectados al servidor  $q$ . Para poder censar los electrodomésticos en una vivienda, se debe suponer que en cada AMI de los hogares se encuentran sensores  $S$ , con cada sensor  $s=1, \dots, S$ , de esta manera se vigila los aparatos con consumos considerables de electricidad y poder controlarlos en caso de necesitar respuesta a la demanda, por ejemplo electrodomésticos como, secadoras de ropa, equipos de aire acondicionado, refrigeradoras, entre otros.

Para poder optimizar el consumo se deben tomar diferentes períodos en donde la señal del precio  $C_t^q$  se transmitirá hacia los servidores  $q$ , los cuales se encuentran por toda la red AMI. Una vez enviados a estos precios los consumidores cambiarán su consumo dando lugar así a una respuesta a la demanda basado en los precios enviados en ese momento  $A_s = \{-L_s, \dots, -1, 0, 1, \dots, L_s\}$ , este proceso se repetirá en cada sensor  $s$ , así,  $L_s$  representa el valor máximo en que la carga puede variar en el sensor  $s$ , 0 significa que no existe ningún cambio en el estado de funcionamiento de los electrodomésticos, y el signo negativo es lo que se quiere lograr, ya que representa una disminución en el consumo energético de los electrodomésticos censados. Para representar en el sistema la realimentación se usa  $a_t^{qns} \in A_s$  y  $\lambda_t^{qns}$ , y la tasa de llegada hacia los servidores enviados desde el sensor  $s$  en el hogar  $n$ , en un intervalo de tiempo  $t$ . El coeficiente de correlación entre dos acciones iguales en respuesta a la demanda se define como,  $\rho_t^{qns}(k)$ , pero con retardos de tiempo  $k$  entre las acciones. El coeficiente de correlación entre dos viviendas distintas  $n_1$  y  $n_2$  que se encuentran en el mismo servidor se define como  $\rho_t^{n_1 n_2}$ . Se puede considerar que el costo de producción y las señales de precio pueden estar correlacionadas entre sí, aunque se encuentren en diferentes servidores. Las señales de

respuesta a la demanda de las colas  $q_1$  y  $q_2$  también pueden tener correlación mediante el coeficiente  $\rho_t^{q_1 q_2}$ .

De esta manera se puede ver cómo se puede distribuir señales de manera bidireccional en un nivel superior, sin embargo, se debe entender como es el comportamiento de los clientes.

### 3.1 Modelo de Cadenas de Markov para respuesta a la demanda de los consumidores

Se toman en cuenta dos tipos de comportamientos para esta sección, el primer tipo de comportamiento demuestra poca elasticidad hacia las señales de incentivos exteriores, pero es más sensible a la hora del día, es decir tiene un comportamiento específico en ciertas horas a lo largo de días similares, un ejemplo de esto es la iluminación que en días similares su comportamiento será igual, y por esta razón el incentivo externo no tendrá efecto en este apartado en específico, o será casi despreciable, al menos cuando la variación de precios es moderada.

Como se puede ver este tipo de comportamiento a largo plazo es estable, por esta razón se puede establecer una cadena de Markov que tenga solo dos estados, en cada tiempo  $t$  para un número determinado de días. En este caso el estado de tiempo  $\Omega_t$  tiene dos estados, un inelástico representado por 0 y un estado elástico representado por 1, de tal forma que,  $\Omega_t = \{0, 1\}$ . La naturaleza estable de este tipo de comportamiento se modela mediante la distribución en estado estacionario  $\pi_t^{qns}(\omega_t^{qns})$ .

Lo siguiente que se debe hacer es modelar la respuesta dinámica de la demanda a la variación del precio de la electricidad sobre la hora del día, aquí se introduce otra cadena de Markov, en donde su estado se compone de la elasticidad, esta puede ser elástica o inelástica y también del precio de la electricidad u otros factores, de esta forma se modela el comportamiento dinámico de respuesta a la demanda mediante las probabilidades de transición de la siguiente forma:

$$P(\omega_{t+1}^{qns} = i | \omega_t^{qns} = j, c_t^q, c_{t+1}^q), \forall i, j \in \Omega_t \quad (1)$$

Se debe tomar en cuenta que para que haya una mayor probabilidad de transición se debe escribir entre  $(\omega_t^{qns}, c_t^q)$  y  $(\omega_{t+1}^{qns}, c_{t+1}^q)$ . Sin embargo, lo que se quiere es la dependencia probabilística del siguiente estado de elasticidad, con relación al estado anterior en

base a la elasticidad del período actual y el precio, la ecuación 1 es la cantidad a estimar.

Se relacionan las dos cadenas de Markov mediante la ecuación: Para  $i, j \in \{0,1\}$

$$= \sum_{j \in \Omega_t, c_t^q \in C_t^q} \pi_{t+1}^{qns}(\omega_{t+1}^{qns}=i) P(\omega_{t+1}^{qns} = i | \omega_t^{qns} = j, c_t^q, c_{t+1}^q) x P(c_t^q) \quad (2)$$

En este caso se asume que el proceso de precio es independiente a la elasticidad del consumidor, esto debido a que el impacto de un solo usuario en el sistema es mínimo en relación a la dinámica del mercado.

Como se mencionó anteriormente, para las Cadenas de Markov, se utilizan dos tipos de datos, uno relacionado el tiempo del día  $t, t+1, t+2$ , y otro en relación a los días similares. La primera cadena de Markov utiliza los días similares, modelando de esta forma el comportamiento del consumo mediante los componentes de estado estable a largo plazo, aquí se utiliza la ecuación 1.

La segunda cadena de Markov ya toma en cuenta también el tiempo del día, es decir relaciona el tiempo del día con los días iguales, y para representar estas dos dimensiones se utiliza la ecuación 2.

Generando el pseudocódigo de cadenas de Markov para este problema queda de la siguiente manera:

### ALGORITMO

#### Algoritmo de Cadenas de Markov

```

Algoritmo Markov
Inicializo  $\omega$  y  $c$ 
Inicializo  $Q(1 : Ls, 1 : Nq) = 0$ 
Inicializo  $P(1 : Ls, 1 : Nq) = 1/M$ 
Inicializo  $A(l_s) = 1$  para todo  $l=1:L$ 
for todo intervalo  $i \in I$ 
  for  $n = 1:N$ 
    for  $l=1:L$ 
      Selecciona  $a'$  basado en  $P$ 
      Calculo usando (1)
      Encuentra  $a^*$  usando (2)
      Actualiza  $Q_n(s_l, a)$  usando (1)
      Actualiza  $P_n(s_l, a)$  usando (2)
    end for
  Guarda  $P(s, a)$  y  $Q(s, a)$  para todos los valores de  $s$  y  $a$ .
end for
end for
    
```

En el algoritmo debemos inicializar los valores del número de servidores utilizados, además es necesario especificar para cada estado todas las probabilidades condicionales desde el valor uno a  $L_s$  el cual representa el valor máximo de carga que puede variar un equipo eléctrico, y se inicializa  $A$  que es el cambio en la demanda de los usuarios. Tanto para el número de servidores como para la probabilidad se debe especificar el número de AMIs que se tienen en el sistema.  $N$  es el número de estados en donde la probabilidad va variando en cada uno de ellos. Una vez que se realiza esto, se comienza a realizar las iteraciones en donde se irá encontrando el valor de  $a$  que es el consumo de los usuarios, y  $s$  que es el sensor en donde se ha realizado el cambio del consumo, estos valores se almacenan en  $P$  y  $Q$  para así obtener el resultado más óptimo.

### 4. Simulación y Resultados

Al tener los incentivos de precio, la demanda variará su comportamiento de acuerdo a la hora del día y el precio energético en un momento determinado, es decir se dejarán de utilizar los electrodomésticos que hayan sido considerados como no indispensables o se reducirá su consumo de acuerdo a lo diseñado, ya que como se mencionó anteriormente habrá equipos que puedan llegar a una potencia mínima.

En la figura 4 se puede ver la curva de demanda diaria antes de realizar el control con respuesta a la demanda.

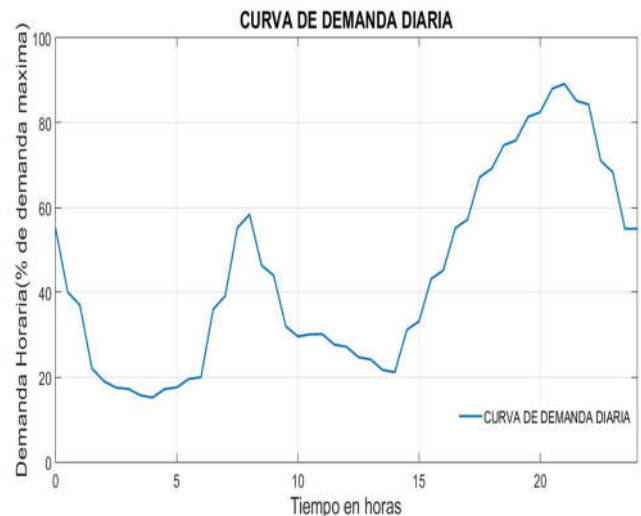


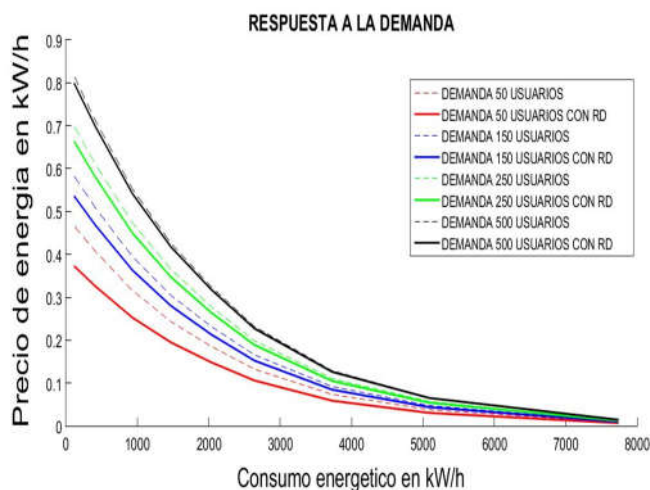
Figura 4. Curva de la demanda diaria.

Para el ejemplo se han tomado 4 casos diferentes de estudio, el primer caso con cincuenta usuarios, el segundo caso con 150 usuarios, el tercer caso con 250



usuarios y el cuarto caso con 500. Podemos verificar que el comportamiento es diferente dependiendo del número de usuarios.

En la figura 5 podemos verificar que de acuerdo al costo de la energía variará el consumo energético de un vecindario, se tiene con línea punteada el comportamiento original, y con línea continua el comportamiento de la demanda una vez optimizado.



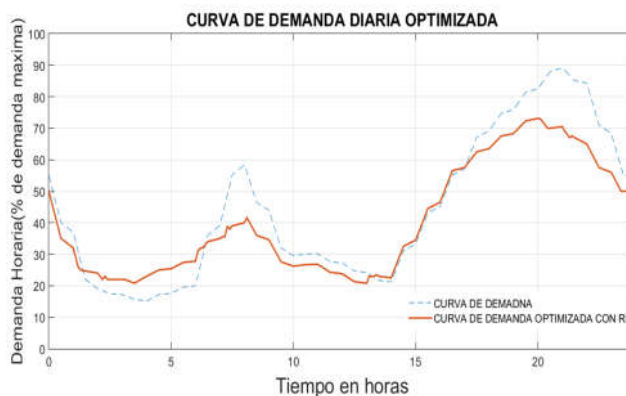
**Figura 5.** Respuesta del consumo eléctrico con relación al precio.

Podemos ver que a medida que el precio disminuye el consumo energético de un electrodoméstico aumentará hasta su máximo posible.

De esta forma el consumo energético general se verá optimizado ya que se realizará la respuesta a la demanda, y así en períodos de hora pico lo que se modificará será la demanda y no se aumentará la generación.

En cada caso se puede apreciar un comportamiento diferente en el consumo energético, la optimización variará de un grupo de usuarios a otro, en el caso de cincuenta usuarios se logró una optimización del 20%, para el caso de 150 usuarios se logró una optimización del 8%, para el tercer caso con 250 usuarios se logró una optimización del 5%, y para el último caso con 500 usuarios se logró una optimización del 2%.

En la figura 6 se puede ver como se modifica la curva de demanda diaria, llegando a un punto de optimización de tal manera que no afecte al usuario.



**Figura 6.** Cambio de curva diaria optimizada.

Como podemos verificar en la gráfica, eleva el consumo de ciertos equipos en determinadas horas de acuerdo al precio que haya sido establecido en cierto momento, pero al final la curva es optimizada de tal forma que el consumo en general se ve reducido, sobre todo en el horario de la tarde, de esta manera podemos establecer que la regulación de la demanda se ha efectuado de manera óptima, se obtuvo un valor medio de 44.17 en el caso de la curva sin optimización, y un valor medio de 40.38 en la curva optimizada, lo que nos da un ahorro energético del 9% al utilizar la optimización mediante respuesta a la demanda.

Como ventaja al usar este modelo de Markov, es que se combina el comportamiento de los ocupantes y modelos de cargas residenciales, tomando en cuenta también datos ambientales, para así producir las predicciones de demanda residencial con un determinado período. En los estudios de RD por lo general no se toma en cuenta el comportamiento de los usuarios y sus necesidades, sin embargo estas no pueden ser subestimadas, mediante estos modelos matemáticos los investigadores pueden predecir mejor como los ocupantes de las viviendas interactúan en grandes cargas residenciales, también pueden ayudar de mejor manera a los planificadores e investigadores a decidir cuál es el mejor incentivo para los clientes en los programas de respuesta a la demanda para tener un mayor impacto.

## 5. Conclusiones

Realizar respuesta a la demanda es necesario, ya que de esta manera se minimizarán las inversiones en construcción de centrales para abastecer la demanda pico, así se logrará reducir el consumo energético en estos períodos, y lo que se busca es poder mover estos consumos a diferentes horarios, esto es de gran ventaja

tanto para usuarios como para empresas distribuidoras. Para los usuarios debido a que tendrán un consumo más optimizado, esto debido al control externo realizado, lo cual se traducirá en ahorros económicos debido a los incentivos proporcionados. Y para las empresas distribuidoras es ventajoso, ya que podrán implementar sistemas más seguros y confiables, reduciendo las grandes inversiones en generadoras eléctricas y líneas de transmisión.

Sin embargo, aún es muy complicado poder implementar este método, debido a que se deben implementar redes AMI y medidores inteligentes a todas las viviendas, ya que sólo mediante una comunicación bidireccional se logrará hacer este control, de esta manera se pueden tener las estimaciones de consumo de los usuarios.

Se puede verificar que, al aplicar respuesta a la demanda, el consumo bajará en ciertas horas, y subirá en momentos más oportunos debido al tipo de generación utilizada, ya que, al utilizar generación renovable, la contaminación también se reducirá, lo cual es algo que preocupa a nivel mundial.

Se puede ver en las figuras las variaciones de consumo que existen, al controlar electrodomésticos que no son muy importantes como por ejemplo televisores, equipos de sonido, consolas de videojuegos, y manteniendo encendidos equipos que son básicos para la comodidad del usuario como por ejemplo refrigeradoras, equipos de calefacción para la vivienda o calentadores de agua.

Como podemos ver si bien es cierto que es de gran ventaja, aún falta muchos pasos a implementar en un sistema eléctrico para poderlo aplicar a gran escala, sin embargo al hacerlo sus beneficios superarán cualquier costo de inversión, ya que incluso el medioambiente se verá menos afectado, ya que no será necesaria la construcción de más centrales de generación, en la misma proporción a las que se hace hoy en día, la economía de los usuarios será cuidada y la eficiencia y confiabilidad de los sistemas eléctricos aumentará.

## 6. Referencias

- [1] S. Li and D. Zhang, "Developing smart and real-time demand response mechanism for residential energy consumers," in *2014 Clemson University Power Systems Conference*, 2014, pp. 1–5.
- [2] M. Muratori and G. Rizzoni, "Residential Demand Response: Dynamic Energy Management and Time-Varying Electricity Pricing," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–10, 2015.
- [3] N. Neyestani, M. Y. Damavandi, M. Shafie-khah, J. P. S. Catalao, and G. Chicco, "Uncertainty characterization of carrier-based demand response in smart multi-energy systems," in *2015*

*IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 2015, pp. 366–371.

[4] Y. Ozturk, P. Jha, S. Kumar, and G. Lee, "A personalized home energy management system for residential demand response," in *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2013, pp. 1241–1246.

[5] W. Shi, N. Li, X. Xie, C.-C. Chu, and R. Gadh, "Optimal Residential Demand Response in Distribution Networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 7, pp. 1441–1450, Jul. 2014.

[6] D. Han and J. Lim, "Smart home energy management system using IEEE 802.15.4 and zigbee," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 56, no. 3, pp. 1403–1410, Aug. 2010.

[7] S. Ghaemi and S. Schneider, "Potential analysis of residential Demand Response using GridLAB-D," in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013, pp. 8039–8045.

[8] V. Zois, M. Frincu, and V. Prasanna, "Integrated platform for automated sustainable demand response in smart grids," in *2014 IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems (IWIES)*, 2014, pp. 64–69.

[9] S. H. Hong, Y.-C. Li, J. H. Park, and B. Zhao, "Experimental implementation of demand response service for residential buildings," in *2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2014, pp. 277–282.

[10] P. M. Purohit and H. S. Pandya, "Demand Response Program for consumer interactive distribution system," in *2015 International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*, 2015, pp. 1–5.

[11] Li Zhang, Jianguo Zhao, Xueshan Han, and Lin Niu, "Day-ahead Generation Scheduling with Demand Response," in *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, 2005, pp. 1–4.

[12] P. B. Luh, L. D. Michel, and P. Friedland, "Load forecasting and demand response," in *IEEE PES General Meeting*, 2010, pp. 1–3.

[13] S. Annala, S. Viljainen, and J. Tuunanen, "Demand response from residential customers' perspective," in *2012 9th International Conference on the European Energy Market*, 2012, pp. 1–7.

[14] W. Jewell, "The Effects of Residential Energy Efficiency on Electric Demand Response Programs," in *2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2014, pp. 2363–2372.

[15] N. Baghina, I. Lampropoulos, B. Asare-Bediako, W. L. Kling, and P. F. Ribeiro, "Predictive control of a domestic freezer for real-time demand response applications," in *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, 2012, pp. 1–8.

[16] M. Kim, J. Choi, and J. Yoon, "Development of the Big Data Management System on National Virtual Power Plant," in *2015 10th International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC)*, 2015, pp. 100–107.

[17] Z. Wang and R. Paranjape, "Agent-based simulation of home energy management system in residential demand response," in *2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2014, pp. 1–6.

- [18] Z. Wang, R. Paranjape, A. Sadanand, and Z. Chen, "Residential demand response: An overview of recent simulation and modeling applications," in *2013 26th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2013, pp. 1–6.
- [19] C.-S. Choi, J. Han, W.-K. Park, Y.-K. Jeong, and I.-W. Lee, "Proactive energy management system architecture interworking with Smart Grid," in *2011 IEEE 15th International Symposium on Consumer Electronics (ISCE)*, 2011, pp. 621–624.
- [20] M. R. Narimani, J.-Y. Joo, and M. L. Crow, "The effect of demand response on distribution system operation," in *2015 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, 2015, pp. 1–6.
- [21] V. J. Martínez and H. Rudnick, "Design of Demand Response programs in emerging countries," in *2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2012, pp. 1–6.
- [22] L. Gkatzikis, I. Koutsopoulos, and T. Salonidis, "The Role of Aggregators in Smart Grid Demand Response Markets," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 7, pp. 1247–1257, Jul. 2013.
- [23] L. Jidong, Z. Zehui, Z. Li, and H. Xueshan, "Evaluating short term benefits of demand response," in *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 2011, pp. 1211–1215.
- [24] H. Johal, K. Anaparthi, and J. Black, "Demand response as a strategy to support grid operation in different time scales," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 1461–1467.
- [25] M. Muratori and G. Rizzoni, "Residential Demand Response: Dynamic Energy Management and Time-Varying Electricity Pricing," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 1108–1117, Mar. 2016.
- [26] Y. Ozturk, P. Jha, S. Kumar, and G. Lee, "A personalized home energy management system for residential demand response," in *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2013, pp. 1241–1246.
- [27] Hyung-Geun Kwag and Jin-O Kim, "Modeling demand resources for ISO's demand response scheduling," in *2011 IEEE Trondheim PowerTech*, 2011, pp. 1–6.
- [28] S. A. Raziei and H. Mohscnian-Had, "Optimal demand response capacity of automatic lighting control," in *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2013, pp. 1–6.
- [29] A. Safdarian, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Lehtonen, "A Distributed Algorithm for Managing Residential Demand Response in Smart Grids," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2385–2393, Nov. 2014.
- [30] P. M. Purohit and H. S. Pandya, "Demand Response Program for consumer interactive distribution system," in *2015 International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*, 2015, pp. 1–5.
- [31] Q. Zhou, W. Guan, and W. Sun, "Impact of demand response contracts on load forecasting in a smart grid environment," in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1–4.
- [32] M. Strobbe, K. Vanthournout, T. Verschuere, W. Cardinaels, and C. Develder, "Large-scale residential demand response ICT architecture," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*, 2014, pp. 1–6.
- [33] Z. Wang, R. Paranjape, A. Sadanand, and Z. Chen, "Residential demand response: An overview of recent simulation and modeling applications," in *2013 26th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, 2013, pp. 1–6.
- [34] B. Dupont, J. Tant, and R. Belmans, "Automated residential demand response based on dynamic pricing," in *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, 2012, pp. 1–7.
- [35] F. Y. Xu, X. Wang, L. L. Lai, and C. S. Lai, "Agent-Based Modeling and Neural Network for Residential Customer Demand Response," in *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2013, pp. 1312–1316.
- [36] E. Inga and R. Hincapié, "Optimal Deployment of Cellular Networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid," *Commun. Comput. (COLCOM), 2014 IEEE Colomb. Conf.*, 2014.
- [37] P. Ravindran, K. R. Das, and A. S. Mohan, "Flexible demand response in smart grid based Automatic Generation Control," in *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)*, 2014, pp. 1–6.
- [38] A. Sinha, S. Neogi, R. N. Lahiri, S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and N. Chakraborty, "Smart grid initiative for power distribution utility in India," in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, pp. 1–8.
- [39] M. H. Albadi and E. F. El-Saadany, "Demand Response in Electricity Markets: An Overview," in *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, pp. 1–5.
- [40] N. H. Tran, C. T. Do, S. Ren, Z. Han, and C. S. Hong, "Incentive Mechanisms for Economic and Emergency Demand Responses of Colocation Datacenters," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 12, pp. 2892–2905, Dec. 2015.
- [41] J. C. Van Gorp, "Maximizing energy savings with enterprise energy management systems," in *Conference Record of 2004 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (IEEE Cat. No.04CH37523)*, 2004, pp. 175–181.
- [42] Z. Zhao, G. Verbic, and F. Fiorito, "Model analysis of a residential building for demand response," in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1–6.
- [43] M. H. Javidi, "An efficient home energy management system for automated residential demand response," in *2013 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2013, pp. 307–312.
- [44] N. Yu, T. Wei, and Q. Zhu, "From passive demand response to proactive demand participation," in *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2015, pp. 1300–1306.