

GESTIÓN ENERGÉTICA MEDIANTE PROCESOS ESTOCÁSTICOS PARA LA RESPUESTA A LA DEMANDA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA:
GESTIÓN ENERGÉTICA MEDIANTE PROCESOS ESTOCÁSTICOS PARA LA RESPUESTA A
LA DEMANDA

AUTOR:
Pablo Alejandro Moreno Falcony

TUTOR:
Edwin Marcelo García Torres

Quito, enero 2017

Pablo Alejandro Moreno Falcony

**GESTIÓN ENERGÉTICA MEDIANTE PROCESOS ESTOCÁSTICOS PARA LA
RESPUESTA A LA DEMANDA**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2017

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



Pablo Moreno (Y^o1987-M^o11). Nació en Quito, Ecuador. Bachiller Técnico Industrial con especialización en Electricidad en el Instituto Tecnológico Superior Central Técnico, Ecuador 2006. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo consiste en realizar gestión energética en un Sistema de Distribución Eléctrico, utilizando respuesta a la demanda, generación distribuida y precios escalonados.

pmorenof@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Marcelo García (Y^o1978 -SM10). Nació en Quito Ecuador. Graduado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana y Master en Gestión de Energía de la Universidad Técnica de Cotopaxi en 2016. Actualmente se encuentra cursando su doctorado en Ingeniería con la Universidad Pontificia Bolivariana- Medellín Colombia. Su trabajo de investigación se enfoca en: Respuesta a la Demanda, sistemas de automatización Scada, microgrids, sistemas de energía renovable, generación distribuida y Smart grid. Es profesor de la Universidad Politécnica Salesiana-Ecuador en Ingeniería Eléctrica. Actualmente es miembro de Girei Research Group.

egarcia@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2017 Universidad Politécnica Salesiana

Quito – Ecuador

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Edwin Marcelo García Torres, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Gestión energética mediante procesos estocásticos para la respuesta a la demanda*, realizado por Pablo Alejandro Moreno Falcony, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, enero 2017



.....

Edwin Marcelo García Torres

Cédula de identidad: 1803087400

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Pablo Alejandro Moreno Falcony, con documento de identificación N° 1722418306, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “Gestión energética mediante procesos estocásticos para la respuesta a la demanda”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



.....
Nombre: Pablo Moreno

Cédula: 1722418306

Fecha: 09/01/17

Contenido

Índice de figuras	2
1 Resumen	3
2 Introducción.....	4
3 Desarrollo	8
3.1 Definición del problema.....	9
3.2 Generación Distribuida.....	9
3.3 Gestión de Energía	13
3.4 Despacho Económico	15
4 Modelo matemático	16
5 Resultados	19
6 Conclusiones	21
7 Referencias	22
8 Matriz de Estado del Arte.....	26

Índice de figuras

Figura 1. Consumo energético de diferentes tipos de usuarios	6
Figura 2. Gestión energética utilizando RD y generación distribuida	7
Figura 3 . Tipos de generación distribuida.....	11
Figura 4. Generación diaria de plantas fotovoltaicas	12
Figura 5. Curva de potencia del generador eólico.....	12
Figura 6. Generación diaria de plantas eólicas.....	12
Figura 7. Precios escalonados	17
Figura 8. Curva de demanda diaria sin GD y sin RD.....	19
Figura 9 Curva de demanda diaria con GD sin RD	19
Figura 10. Curva de demanda diaria sin GD y sin RD vs con GD sin RD	20
Figura 11. Curva de demanda diaria sin GD con RD	20
Figura 12. Curva de demanda diaria con GD y RD	20
Figura 13. Curva de demanda diaria sin GD y con RD vs con GD con RD.....	21
Figura 14. Curva de demanda diaria sin RD vs con RD.....	21

GESTIÓN ENERGÉTICA MEDIANTE PROCESOS ESTOCÁSTICOS PARA LA RESPUESTA A LA DEMANDA

1 Resumen

El aumento de la población y el desarrollo industrial, han obligado a que exista una mayor demanda energética, esto obliga a las empresas generadoras a aumentar su infraestructura de producción de energía, lo cual es muy costoso, por esta razón se busca implementar políticas de respuesta a la demanda (RD), incluyendo generación distribuida (GD), así se logrará un consumo energético más eficiente, ya que se podrán trasladar cargas no representativas de horarios pico de consumo, a otros periodos de tiempo.

Además, se puede implementar sistemas de gestión energética (GE), es decir, adoptar políticas en donde se haga una planificación de consumo óptimo y esta sea aplicada a la industria o al sistema eléctrico en general, esta política ayudaría a la empresa a que mejore su competitividad, ya que los gastos por consumo energético se reducirían, al tener equipos más eficientes. Se debe considerar que mejorar la tecnología en equipos no es suficiente para tener eficiencia energética, esto debe ir acompañado de un óptimo uso de recurso energéticos y su utilización de forma hábil y precisa.

Para resolver el problema de consumo energético se ha utilizado procesos estocásticos, en donde se hace una optimización de consumo mediante RD, luego mediante un despacho económico se encontrará el menor costo de generación, utilizando generadores más económicos y menos contaminantes, ya que se dejará de lado parte de la generación térmica, reduciendo así los

costos de producción eléctrica y además se contribuye a la disminución de la contaminación ambiental generando menos emisiones de CO₂.

Palabras Clave: Generación Distribuida, Respuesta a la demanda, Gestión Energética, Despacho económico, Confiabilidad, Energía eléctrica, Generadores Eléctricos.

Abstract

Population increase and industrial development have forced a greater energy demand, this forces the generating companies to increase their infrastructure of energy production, which is very expensive; for this reason, is sought to implement Demand Response Policies, including Distributed Generation, on this way, consumption will be achieved more efficient, like transferring non-representative loads of peak hours to other time periods.

Also, it's possible to implement Energy Management Systems, in other words, adopt policies where is necessary to plan an optimal consumption and applying to general or industrial electrical system. These policies will help to energy company improving its competitiveness, it includes reduction of energy consumption using more efficient equipment. It should be considered that improving equipment technology is not enough in fact to have energy efficiency, this should be accompanied by an optimal use of energy resources and their optimal use with skillful and precise ways.

To solve the problem of energy consumption, it has been used stochastic

processes, where an optimization of consumption is done through Demand Response Policies, then, through economic dispatch, it's possible to find the lowest generation cost, using cheaper and less polluting generators, since it will be left aside part of thermal generation, reducing the costs of electrical production and also contributing to the reduction of environmental pollution with less CO2 emissions.

Keywords: Distributed Generation, Demand Response, Energy Management, Economic Dispatch, Reliability, Electricity, Power generators.

2 Introducción

La respuesta a la demanda (RD), es el cambio en el consumo de energía eléctrica del usuario final, con respecto a las variaciones de precio o incentivos. Los costos de generación, transmisión y distribución de energía varían con el tiempo, sin embargo, en algunos países pagan el costo promedio de electricidad, y en otros países pagan el valor subsidiado. En algunos casos estos costos de electricidad pueden variar en función a la hora, el mes, o la estación del año[1]. Para implementar RD, es muy necesario implementar redes inteligentes, ya que una RD efectiva, solo se la puede lograr mediante la tecnología de las comunicaciones[2]. Las características más importantes de una red inteligente, es la comunicación bidireccional entre el cliente y la empresa, el monitoreo continuo de la potencia consumida en la distribución, resistir a ataques externos en su software, mejorar la calidad de energía entregada al usuario final, y tener una mayor eficiencia operativa en el sistema eléctrico [2][1]. En un sistema eléctrico, lo que se busca es el intercambio de energía desde el lado de generación hacia el lado de la demanda

de manera óptima, de aquí que se ha llegado a la conclusión que es mucho más eficiente reducir y controlar la demanda de energía eléctrica que construir más plantas generadoras de energía, esta reducción de consumo se la puede lograr mediante cargas inteligentes[3][4].

Lo que se busca mediante RD es eliminar los picos de consumo, desplazando parte de la carga a otros periodos de tiempo, y mejorar los esquemas de control de la demanda, desplazando cargas no típicas de consumo como lavadoras y secadoras, o cargas no representativas, de esta manera se afectara en menor grado la comodidad de los usuarios finales [2][4]. Además de mejorar la eficiencia y estabilidad de los sistemas de transmisión, también se busca utilizar la RD para la incorporación de energía renovable[5]. La ventaja de implementar RD es que la demanda puede hacerse más flexible, reduciendo cargas no representativas en horas pico, en lugar de adaptar o aumentar la generación de electricidad, para reducir los requisitos de infraestructura de generación de energía eléctrica [6]. La respuesta a la demanda se puede lograr de dos formas, una mediante el control directo de la empresa de distribución hacia el cliente, y otra mediante la participación voluntaria del cliente[4][7]. Además de cargas inteligentes en el sistema eléctrico, es necesaria una infraestructura de medición avanzada o AMI por sus siglas en inglés[8][9].

La RD forma parte del mercado energético, debido a que se logra una integración activa tanto de sectores residenciales, rurales, industriales y comerciales[10][11]. Al momento de implementar este sistema de participación dinámica, es necesario considerar ciertos

temas. En primer lugar, se debe tener en cuenta el tipo de carga que se puede desplazar, y el horario a la que puede ser trasladadas permitiendo así un control de cargas flexibles. En segundo lugar, implementar un mercado eléctrico en distribución con la participación de agentes privados (usuarios industriales, comerciales, residenciales) mediante la implementación de generación distribuida logrando un sistema robusto reduciendo perdidas al menor costo posible[12][13]. Como se mencionó, es necesaria la implementación de una red inteligente, de aquí que la participación de los clientes sea fundamental, ya que de esta forma se puede modelar la curva de demanda de una red eléctrica de manera uniforme en un periodo diario de tiempo, así se ayuda a un suministro confiable de energía[5][7][12]. Lo que se busca mediante la implementación de redes inteligentes es modernizar el sistema de suministro eléctrico, ya que de esta forma se puede supervisar, proteger y optimizar automáticamente los elementos interconectados, desde la generación, hasta la distribución, además de supervisar a los usuarios industriales, comerciales y residenciales, es decir, se pueden supervisar sus cargas, sean estas, termostatos, vehículos eléctricos, electrodomésticos, entre otras. Por esta razón es necesaria la implementación software informático y tecnología de comunicaciones en el sector eléctrico[4][14][15].

En la tabla.1 se puede ver un ejemplo de varias cargas desconectables y no desconectables que se pueden tener en un sistema eléctrico.

TABLA1.
DE CARGAS ELÉCTRICAS

DESCONECTABLES	NO DESCONECTABLES
➤ Equipos de entretenimiento	➤ Bombas de agua o de presión

➤ Sistemas de Iluminación	➤ constante
➤ Cargadores eléctricos	➤ Equipos calefactores
➤ Duchas	➤ Cocinas de inducción
➤ Cafeteras	➤ Equipos médicos
➤ Lavadoras de platos	➤ Motores eléctricos de producción industrial
➤ Lavadoras de ropa	➤ Frigoríficos
➤ Planchas	➤ Refrigeradores
➤ Televisión	

Si se desea implementar redes inteligentes en un sistema eléctrico, es necesario integrar varios componentes nuevos al sistema eléctrico antiguo, estos componentes son: Medidores inteligentes, sistemas de gestión de los datos obtenidos de los medidores, redes de comunicación en el campo, sistemas de comunicación integrados, sistemas informáticos de procesamiento de datos, sistemas de seguridad de datos, respuesta a la demanda, generación distribuida[10][14]. La respuesta a la demanda se la puede realizar mediante dos opciones, la primera es basada a precios, y la segunda es basada en incentivos, estas opciones son ofrecidas a clientes residenciales, comerciales e industriales[16][17]. En la RD se debe tomar en cuenta aspectos como: el periodo de consumo energético (PCE), es decir, el cambio del precio unitario de energía en diferentes periodos de tiempo durante un día; el precio en tiempo real (PTR), que es la variación del precio de la energía hora tras hora; el precio pico, que es la combinación de PCE y PTR, el precio pico aumenta si el consumo energético es mayor o el suministro eléctrico es limitado[18][19]; y el control de carga directo en donde se puede controlar las cargas por ejemplo aire acondicionado o calentadores de agua de manera remota[20].

En áreas residenciales, la RD está asociada a una vivienda inteligente, a sistemas de gestión de energía, control

de cargas inteligentes, y medidores inteligentes[2][1][20].

Para que la RD sea eficiente, se debe lograr que la participación de los clientes en el sistema eléctrico sea óptima, de esta manera se podrá determinar la cantidad de carga real que existe en la red en un periodo de tiempo, es decir, implementar una comunicación bidireccional entre las empresas distribuidoras y los clientes, al conocer el consumo exacto de energía, se evitarán sobrecargas al sistema, lo que puede producir cortes en el suministro energético al usuario final. Al reducir estos problemas, se logrará que el sistema eléctrico sea eficiente y confiable [7][21][22]. Modelar la demanda energética de los usuarios es muy complejo, ya que ésta es de carácter estocástico, es decir no se puede predecir su comportamiento en tiempo real, esto es debido a que cada usuario tiene un comportamiento diferente, por ejemplo, en el caso de usuarios residenciales, el comportamiento para lavar ropa, cocinar, bañarse, difiere uno del otro, además factores como las condiciones meteorológicas afectan el comportamiento de los usuarios, y por lo tanto su consumo energético, la variación de temperatura es uno de los factores que afectan directamente el consumo energético, ya que puede promover la utilización de aparatos de aire acondicionado en días calurosos, o calefactores en días fríos[4].

Un problema en RD es que a los usuarios residenciales no se los toma en cuenta para los proyectos, ya que, en comparación con clientes industriales y comerciales, su consumo es muy bajo de forma individual, una solución que se ha encontrado para este problema es tomar un conjunto grande de viviendas y hacer un lazo cerrado para que el consumo sea

representativo en el sistema, y así incluirlos en los sistemas de RD, de esta forma, los usuarios residenciales llegan a tener una mayor influencia que usuarios industriales y comerciales debido a que su consumo como conjunto es mayor[9].

El consumo de los usuarios residenciales es el mayor en el sistema eléctrico con un 35% de la capacidad total, le siguen los usuarios industriales con un 31%, los usuarios comerciales con un 20%, otros consumos 9%, y alumbrado público con 5%.

En la figura 1 se puede observar la distribución de cada usuario en el sistema eléctrico de acuerdo a la cantidad de consumo[17][18].

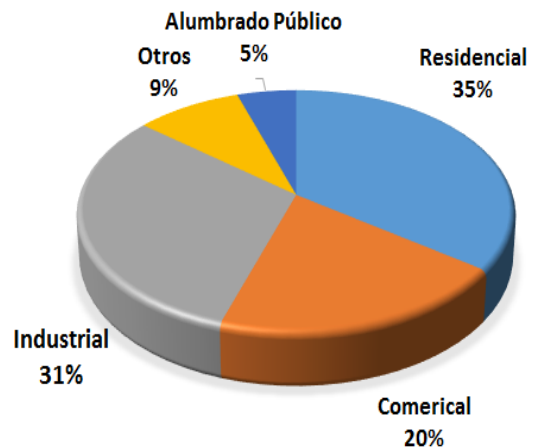


Figura 1. Consumo energético de diferentes tipos de usuarios

La hora del día también afecta en la curva de la demanda, ya que el consumo energético no es el mismo en la madrugada que en la tarde, además, al modelar la demanda durante toda la semana, se puede ver que no es la misma curva de un día con relación a otro[9].

Los fines de semana y los días festivos, también modifican el comportamiento de la curva de demanda, ya que en estos

casos el consumo, por ejemplo, en el área residencial se modifica ya que las personas pasan más tiempo en su hogar y su consumo aumenta[19]. La época del año también afecta el consumo energético, debido a los diferentes comportamientos de climatización artificial que se usan tanto en verano como en invierno, todos estos y otros factores aumentan la dificultad para poder modelar de manera óptima la demanda, por esta razón solo se puede realizar aproximaciones mediante datos obtenidos con anterioridad, y mediante la participación dinámica de los usuarios se podrá realizar una mejor aproximación de este modelado[15]. En la figura 2 se puede ver como los sistemas de generación energética, generación distribuida, y la demanda residencial, comercial e industrial pueden tener una comunicación bidireccional con la empresa distribuidora, para así poder realizar una gestión energética óptima.

La gestión energética permite reducir el consumo de energía, y así reducir los costos de producción, logrando una mayor productividad, de esta manera la empresa logra beneficiarse, ya que logran un consumo de energía racional, reduciendo así los costos de energía asociados, además se logra una contribución positiva con el medio ambiente ya que se puede contribuir a la mitigación de gases de efecto invernadero y se reduce el agotamiento de fuentes de energía no renovables. En los últimos años se ha hecho un gran esfuerzo para definir prácticas más efectivas que aumente el rendimiento de los proyectos de gestión [23][24].

Mediante la gestión energética se logra reducir la cantidad de energía consumida manteniendo niveles de confort en viviendas y oficinas y manteniendo los niveles de producción en las industrias, entonces, se puede decir que la gestión energética es útil ya que mediante esta se puede reducir la contaminación esto es debido a que se dejaría de lado la producción energética mediante combustibles fósiles, dando paso a la implementación de energías renovables y limpias, como la solar y eólica, además, la dependencia de energía del exterior se reduciría al hacer que el consumo energético sea óptimo[18][25][26].

Para modelar la respuesta a la demanda se utilizará procesos estocásticos, mediante estos procesos se puede modelar sistemas que varían en el tiempo o en el espacio de manera aleatoria. En este método se utilizan sucesiones o una colección de variables aleatorias, así se puede verificar como esta variable evoluciona a lo largo del tiempo[27][28].

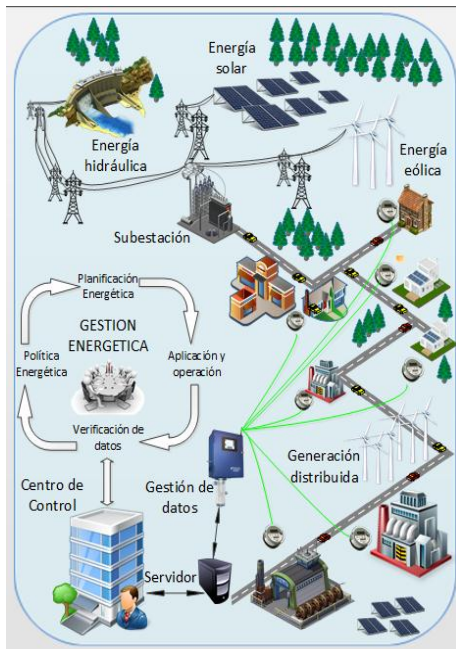


Figura 2. Gestión energética utilizando RD y generación distribuida

3 Desarrollo

El objetivo de crear respuesta a la demanda es poder minimizar el consumo energético, y así aprovechar al máximo los recursos energéticos que se tienen, de este modo se puede obtener un generador virtual.

Las plantas eléctricas virtuales tienen como objetivo maximizar el uso de los recursos de generación eléctrica, y reducir los costos de generación modificando las curvas de demanda mediante RD, reduciendo de esta forma, la carga máxima en horas pico de consumo. La manera de reducir la curva de carga, es modificando el consumo de aparatos eléctricos de calefacción, lavadoras, secadoras, y equipos eléctricos no representativos, de esta manera se creará un valle de consumo eléctrico, y es en donde se podría trasladar las cargas que representan un consumo, esto se logrará mediante RD. Se presentan limitaciones para lograr esto, por ejemplo, el monitoreo en tiempo real del sistema para poder usar tarifas diferenciales, y así, que sea el mismo cliente el que se vea motivado a hacer las modificaciones en su consumo energético.

Lo que se desea al implementar generación virtual mediante RD es que exista un aporte de energía en horas pico, para que este aporte energético sea óptimo es necesario analizar los distintos tipos de usuarios y su comportamiento en cuanto al consumo energético. Con los usuarios residenciales, se puede ver que su consumo es parecido para las diferentes cargas, sin embargo, para los usuarios comerciales, es más complejo ya que se ha determinado que la misma carga puede diferir de un usuario comercial a otro, por esta razón, en este caso se podría implementar una planta de

generación virtual, en usuarios comerciales que tengan el mismo tipo de consumo, por ejemplo, hoteles y restaurantes, ya que este tipo de comercio tienen cargas parecidas.

En cuanto al sector industrial, el análisis que se realiza es en forma individual debido a su gran consumo energético, el cual es utilizado para producción de vapor y generación de fuerza.

Para el sector residencial, el análisis se podría hacer de acuerdo al tipo de estatus de la población, ya que el consumo de la clase alta no será el mismo que en la clase baja, por lo que se puede decir que RD se puede implementar en usuarios de estatus medio, y alto. Al implementar precios escalonados los usuarios que tienen mayor poder económico reducirán sus consumos ya que mientras más energía consuman, más deberán pagar por la energía, así, se logrará que los usuarios tengan mayor conciencia de su consumo energético[29]. Por esta razón es necesario determinar las cargas y el tipo de usuarios antes de poder implementar generadores virtuales.

Para poder implementar plantas virtuales, primero se debe determinar las cargas eléctricas que se pueden sustituir por otro tipo de energía, por ejemplo, energía solar, en estos tres sectores eléctricos, entonces se pueden considerar en el sector residencial las duchas eléctricas, mientras que en el sector comercial e industrial se pueden sustituir los calentadores de agua. De esta forma crearíamos un valle de consumo para una planta virtual, que en el sector residencial se podría usar en aires acondicionados, refrigeradoras y cocinas, en el sector comercial se puede usar en controles de iluminación y en sector industrial se puede usar para aire acondicionado.

Entonces se puede ver de acuerdo al análisis anterior que hay una mayor facilidad de hacer RD e implementar generadores virtuales en el sector residencial debido a la uniformidad de cargas.

La ventaja de implementar generadores virtuales, es que se elimina las pérdidas por transmisión, ya que estas se implementan en el lugar mismo de consumo. Además, las plantas virtuales de generación tienen una gran flexibilidad para el control de carga, por lo que puede aumentar la confiabilidad en el sistema, ya que puede tomar medidas en tiempo real de sistema en caso de falla y así evitar un colapso completo de todo el sistema.

3.1 Definición del problema

El problema planteado en el presente artículo es generar un despacho económico óptimo, para solucionarlo se ha tomado en cuenta generación distribuida, lo cual ayudaría a que se disminuya los costos elevados de energía por el uso de generación más costosa, además se plantea el uso de respuesta a la demanda, para que el sistema sea más confiable y no existan fallas por sobrecargas que podrían desencadenar en cortes energéticos, una vez implementado GD y RD al sistema se realizará un despacho económico para así determinar que generadores deben operar en el sistema para que este sea más económico.

3.2 Generación Distribuida

A la producción de electricidad en pequeña escala en el punto de consumo del usuario final se le conoce como generación distribuida (GD). En GD, se puede utilizar energía renovable como solar y eólica, y no renovable, como la utilización de combustibles fósiles. La

ventaja de generar electricidad cerca de los puntos de consumo es que mejora la eficiencia del sistema, ya que no hay pérdidas por distribución y además mejora el perfil de tensión, también podría reducir las congestiones en la red aumentando la confiabilidad del sistema en general, pero para que la GD tenga efectos positivos en la red, se debe hacer un estudio y planear en donde sería la mejor ubicación de una planta de este tipo, caso contrario podría ocasionar efectos negativos en la red, como por ejemplo sobretensiones en el sistema, de aquí la necesidad de hacer un profundo análisis antes de implementar una planta para GD[30].

Se pueden utilizar varios métodos para determinar el mejor lugar para implementar GD, entre ellos se pueden mencionar métodos heurísticos, metaheurísticos. La GD tiene como características que es de naturaleza intrínseca, y además tiene múltiples nodos locales, por esta razón se ha llegado a determinar que el mejor método para determinar la ubicación de GD es el método metaheurísticos[31][32].

En este caso se toma a una central hidroeléctrica que se encuentra cerca de la carga como generación distribuida, por lo cual se debe tomar en cuenta diferentes aspectos para su funcionamiento, por ejemplo, el emplazamiento, la presión de agua, las turbinas y la potencia de las mismas.

Para modelar GD se debe tomar en cuenta aspectos como la presión del agua en el sistema de tuberías, la cual viene dada por una ecuación diferencial de movimiento para un flujo transitorio

$$\frac{\partial H}{\partial X} + \frac{1}{gA} * \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{2gDA^2} = 0 \quad (1)$$

Donde:

H es la presión del agua en metros;

X es el desplazamiento en metros;
 Q es el flujo en metros cúbicos por segundo;
 g es la aceleración de la gravedad;
 A es el área de sección transversal;
 t es el tiempo en segundos;
 f es el coeficiente de fricción;
 D es el diámetro del tubo.

Una vez derivado, la tasa de flujo de agua y la presión de entrada aguas arriba y salida aguas abajo del tubo está dada por la siguiente expresión.

$$Z_c = \frac{aQ_r}{gAH_r} + \frac{faQ_r^2}{2gA^2H_r s} \quad (2)$$

Donde:

S es el operador de Laplace;
 Q es el flujo en metros cúbicos por segundo;
 H_r es la presión del agua;
 A es el área de sección transversal;
 t es el tiempo en segundos;
 f es el coeficiente de fricción;

La expresión utilizada para una tubería tomando en cuenta el golpe de ariete y las pérdidas hidráulicas está definida por:

$$\frac{h}{q} = -2 \left(\frac{T_w}{T_r} + \frac{H_f a}{Ls} \right) \tanh \left(\frac{T_r s}{2} + \frac{T_r H_s}{2T_w} \right) \quad (3)$$

Donde:

h es la presión relativa de agua en por unidad;
 q es la desviación relativa de la velocidad del flujo;
 T_w es la inercia de agua en segundos;
 T_r es la entrada de agua en segundos;
 H_f son las pérdidas hidráulicas;
 L distancia de entrada de agua en metros;

La inercia del agua esta expresada por la siguiente formula.

$$T_w = \frac{LQ_r}{gAH_r} \quad (4)$$

También es necesario modelar el túnel para la entrada de agua, por lo tanto, la función de transferencia entre la entrada de agua y la presión de salida esta descrita por la siguiente expresión.

$$\frac{h}{q} = -T_w s - H_f \quad (5)$$

Lo siguiente que se debe tomar en cuenta, ya que es el corazón de una central hidroeléctrica es la turbina hidráulica, para el caso se ha tomado en cuenta una turbina Francis para una central de pasada, ya que tiene un gran rango de utilización en cuanto a las alturas de caída de agua a las que puede funcionar.

$$m_t = e_x x + e_y y + e_h h_t \quad (6)$$

$$q_t = e_{qx} x + e_{qy} y + e_{qh} h_t \quad (7)$$

Donde:

M_t es el torque relativo de la turbina;
 Q_t es el flujo relativo de la turbina;
 H_t es la presión relativa del agua;
 X es la velocidad relativa de la turbina;
 y es el recorrido relativo de la compuerta;

También se debe tomar en cuenta las potencias máximas y mínimas para la generación eléctrica mediante GD, estas pueden ir desde 1kW, y se ha mencionado que podrían llegar hasta 100MW, limitando a 10MW en caso de generación mediante energía renovable. Tomando en cuenta estos rangos de generación, la GD se puede dividir en cuatro:

1. Micro generación: Se considera a aquella que tiene una generación menor a 5kW.

2. Mini generación: Aquella que va desde 5kW a 5MW.
3. Generación Media: Aquella que va desde 5MW a 50 MW
4. Gran Generación: Aquella que va desde 50MW a 100MW

En la figura 3 se puede ver los diferentes tipos de generación distribuida que se tienen en el sistema eléctrico

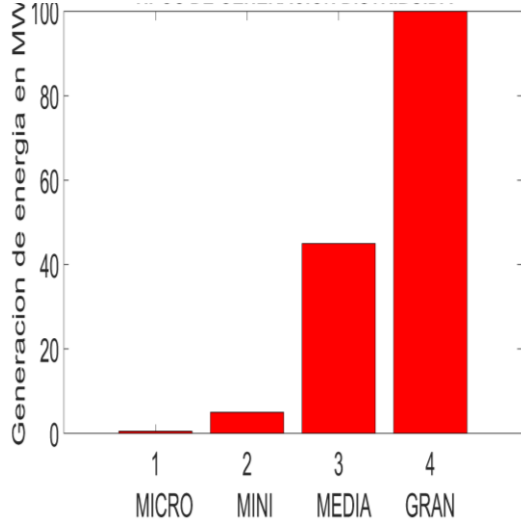


Figura 3 . Tipos de generación distribuida

Al determinar el rango de generación que se desea, se puede modelar centrales eólicas y fotovoltaicas, y así determinar el número de aerogeneradores o paneles que se pueden requerir. En este caso, se requiere que sea de gran generación, es decir de 100MW.

Para la generación fotovoltaica, se toma como variable aleatoria la irradiancia del sol sobre los paneles fotovoltaicos, y así determinar la curva de generación de este tipo de centrales para un día.

En este caso se ha tomado un panel cuya potencia máxima es de 300Wp cuya área es de 1.94m²; al determinar que se desea una potencia de 100MW, la potencia del inversor debe ser 20% mayor, por lo tanto, se toma un inversor de 120MW.

El modelo fotovoltaico para el comportamiento del panel, se representa por la siguiente ecuación:

$$P_{PV} = P_{SCT} * \frac{G_{ING}}{G_{STC}} \quad (8)$$

Donde:

P_{PV} Potencia generada por el panel fotovoltaico;

P_{SCT} potencia del panel en condiciones estándar;

G_{ING} valor de radiación instantánea;

G_{STC} valor de radiación en condiciones estándar;

Se debe modelar el inversor para la central fotovoltaica; es importante determinar la eficiencia del inversor, la cual se representa por la siguiente expresión.

$$\eta_{INV} = \frac{\frac{P_{PV}}{P_{NOM}}}{\frac{P_{PV}}{P_{NOM}} + (M_0 + M_1 * \frac{P_{PV}}{P_{NOM}})} \quad (9)$$

Donde:

η_{INV} Eficiencia del inversor;

P_{PV} Potencia generada por el panel fotovoltaico;

M_0 coeficiente con valor de 0.0039;

M_1 coeficiente con valor de 0.0023;

Con las ecuaciones mencionadas anteriormente se puede determinar la potencia máxima, media y mínima; para así determinar la potencia de generación; para el despacho económico se utilizará la potencia media, ya que este es el promedio de generación diario de la central.

En la figura 4, se puede observar el comportamiento de una central fotovoltaica.

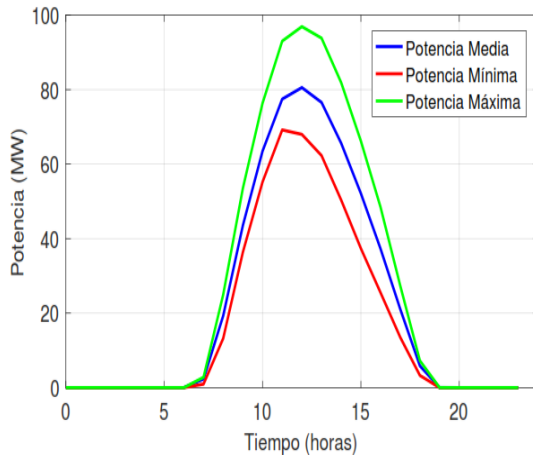


Figura 4. Generación diaria de plantas fotovoltaicas

Se ha determinado que para alcanzar la producción de 100MW, tomando en cuenta que la potencia de los paneles es de 300Wp; la cantidad de paneles necesarios es de 333333, con un área de 6.4667 km².

Para abaratar aún más los costos de generación, se modelará generación eólica para ingresarla como GD.

Se consideró generadores eólicos con una potencia de 1.5MW, cuya curva de funcionamiento está descrita en la figura 5.

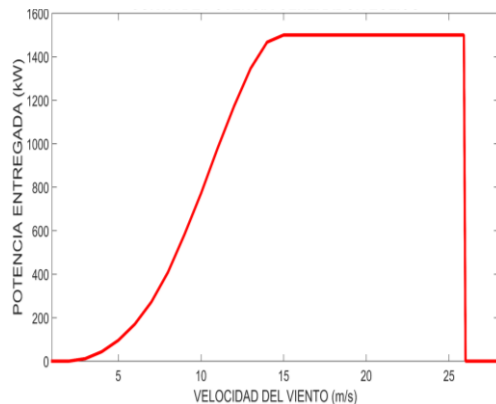


Figura 5. Curva de potencia del generador eólico.

Una vez que se determina en generador que se va a usar, se especifica la potencia del inversor, para este caso se ha tomado un inversor de 1.8MW; luego

se debe calcular la potencia de la central con la siguiente ecuación.

$$\eta_{INV} = \frac{P_{EOL}}{P_{NOM}} \quad (10)$$

$$= \frac{P_{EOL}}{P_{NOM} + (M_0 + M_1 * \frac{P_{PV}}{P_{NOM}})}$$

Donde:

η_{INV} Eficiencia del inversor;

P_{EOL} Potencia generada por el generador eólico;

M_0 coeficiente con valor de 0.0039;

M_1 coeficiente con valor de 0.0023;

Mediante esta ecuación, y con datos de la velocidad del viento en el emplazamiento respectivo donde se construirá la central, se obtienen los datos de potencia mínima, media y máxima de la central, estos datos se representan en la figura 6.

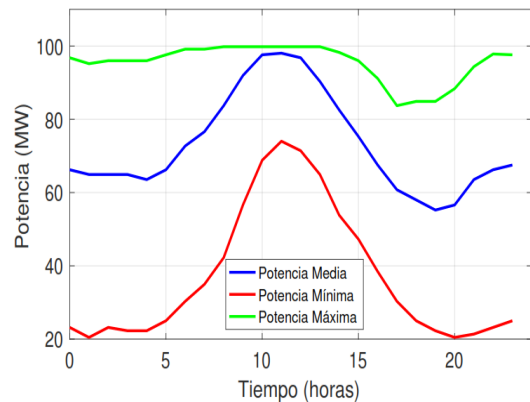


Figura 6. Generación diaria de plantas eólicas.

Al igual que en fotovoltaico, se usarán los datos de potencia media para poder hacer el despacho económico. En este caso, son necesarios 67 aerogeneradores para cumplir con la demanda de potencia.

Las aplicaciones de GD van desde generación base y punta, también se utilizaría para mejorar la calidad del suministro, como respaldo y soporte a la red de transmisión y distribución[32].

Existen dos tipos de GD, y estos son, generación distribuida incrustada, y

generación distribuida no despachada centralmente. La GD incrustada, es utilizada solamente en una red de distribución local, y la potencia de este tipo de GD se considera instalaciones menores a 50MW. La GD no despachada centralmente es aquella que no está sometida a control de ningún tipo ni se la despacha, y se la considera a aquella que tiene potencias menores o iguales de 10MW.

La GD se la puede utilizar para varias aplicaciones, por ejemplo;

- **Generación básica:** Se suele utilizar para suplir parte de la energía necesaria o para aumentar el nivel de tensión en el sistema eléctrico, de esta manera se ayuda a reducir las pérdidas y la calidad de energía eléctrica mejora.
- **Demanda en horas punta:** Ayuda a la producción de energía en horas pico de consumo, ya que el costo de la energía aumenta o disminuye acorde a la cantidad de consumo en un periodo de tiempo, debido a que en horas pico se pueden llegar a necesitar plantas que utilizan combustibles fósiles para suplir la cantidad de energía necesario, mediante GD se puede suplir estos picos con plantas cercanas a las zonas industriales
- **Reserva:** Se puede utilizar como reservas para suplir de energía a cargas especiales, sean estas industrias u hospitales en caso de que existan cortes de suministro eléctrico.
- **Zonas aisladas:** Se pueden utilizar para suplir de energía eléctrica a zonas aisladas o de difícil acceso a donde no llegan las redes de transmisión.

Al utilizar GD también se debe considerar que tipo de energía se produce, y el tiempo de duración del suministro, por ejemplo, las turbinas de gas, pueden dar un suministro eléctrico prolongado, suministran P y Q al sistema eléctrico, mientras que sistemas como eólicos o fotovoltaicos, dependen del clima, su periodo de suministro puede ser mediano o corto[33][34].

Por lo tanto, se puede determinar que la GD tiene el potencial de dar muchos beneficios al sistema eléctrico, estos son; reducción de pérdidas de transmisión y distribución, mejora la calidad de energía siempre y cuando este colocado de manera óptima, puede ayudar en horas pico de demanda, puede aportar a que el sistema eléctrico sea más estable y también puede ayudar de manera económica, ya que podría reducir la cantidad de infraestructura eléctrica necesaria[33].

3.3 Gestión de Energía

Una de las características de los sistemas eléctricos actuales es que se ven afectados por los cambios de precios tanto de combustibles como de demanda de energía, esto se ve afectado directamente debido a crisis o a fenómenos causados por el ser humano o por la naturaleza en diferentes partes del mundo, por esta razón es de vital importancia tener políticas de gestión energética (GE), ya que al implementar estos sistemas de gestión se puede ver varios beneficios, por ejemplo, seguridad energética, es decir, el sistema se vuelve más confiable ya que no existen sobrecargas, lo que lo hace estable, además no existe la necesidad de importar energía por lo que el sistema se vuelve auto sustentable, e incluso al tener reservas energéticas, se puede exportar en el mercado eléctrico

lo cual vuelve a un sistema más competitivo en la región al lograr que sus costos de producción de energía sean más bajos; además al implementar sistemas de gestión energética se puede aportar a un problema que hoy en día se lo toma muy en serio, el cambio climático; con sistemas de GE, reduciendo la contaminación ambiental por generación de electricidad, lo cual también mejorará la salud pública, por esta razón se puede decir que el uso eficiente de energía eléctrica es un asunto de interés social y público, ya que se debe ofrecer un abastecimiento energético pleno y oportuno.

Utilizar de manera eficaz la energía significa realizar procesos o actividades de manera óptima, con la menor cantidad de energía posible, aumentando la productividad en una empresa.

La GE da beneficios económicos a los usuarios, ya que se reduce el consumo excesivo de energía eléctrica, esto se logra con medidas como, reemplazar equipos que no son eficientes en el consumo, implementando sistemas de iluminación óptimos, reemplazo de motores eléctricos por motores más eficientes, con arrancadores suaves, reemplazando los arrancadores estrella triángulo, sin embargo, la eficiencia energética no se consigue solamente teniendo la mejor tecnología en equipos, sino también de saber emplear los recursos energéticos disponibles de forma hábil y precisa, por esta razón es necesario el desarrollo de procesos de gestión energética. Estos procesos o programas de gestión energética no se los puede hacer de forma empírica, se debe utilizar procedimientos técnicamente fundamentados, es decir, se debe sustentar mediante estudios, en los cuales se pueden realizar diagnósticos energéticos para identificando el lugar adecuado en donde se deba implementar

los sistemas de gestión de energía, de esta forma, se tiene un plan de ahorro energético, pero además se tiene un sistema de gestión de energía, lo cual garantiza que este plan sea renovado cada vez que sea necesario, e involucrando a trabajadores y directivos por igual, modificando su forma de trabajar para llegar a objetivos en conjunto en torno a la eficiencia energética[35][36].

Al tratar de implementar sistemas de gestión de energía, existen varios errores que se pueden cometer, por ejemplo, se pueden atacar los efectos de no tener GE, mas no las causas, se puede tener esfuerzos aislados sin mejorar todo el sistema en general, al solucionar algún problema se le puede considerar como una solución definitiva, y no se detectan de manera eficiente los potenciales de ahorro[31].

Al hablar de gestión energética en viviendas, comercios e industrias se busca básicamente cumplir dos objetivos que son: aumentar la eficiencia durante procesos de transformación energética de formas menos aprovechables, a formas más aprovechables de acuerdo al tipo de industria o comercio; aumentar la eficiencia durante la utilización de energía disminuyendo equipos que pueden estar siendo utilizados de manera ineficiente o innecesaria. Una vez que se tienen establecidas las tareas necesarias para implementar GE, se necesitan definir los pasos necesarios para lograr dichos objetivos, entre ellos se puede mencionar, por ejemplo, un adecuado diseño arquitectónico para aprovechar al máximo la energía reduciendo la utilización innecesaria de iluminación artificial, determinar las cargas que pueden ser desplazadas a otros horarios, además se debe cumplir las instrucciones de los fabricantes de

instalación y funcionamiento para que los equipos operen de manera eficiente[36][37].

Un Sistema de GE se compone de una estructura organizacional, procedimientos, procesos, y recursos necesarios para su implementación. Por lo tanto, administrar energía significa tener la capacidad de identificar y evaluar técnica y económicamente las oportunidades de conservar energía manteniendo los procesos, implementando así un sistema de gestión energética.

3.4 Despacho Económico

El despacho económico consiste en satisfacer a la demanda de la manera más económica posible, sin embargo, es un proceso complejo ya que se deben respetar aspectos técnicos para que exista seguridad en el sistema energético[38].

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) son operados de tal forma que se pueda minimizar al máximo los costos de generación, esto se consigue al realizar estudios para determinar los sitios de construcción óptimos tanto de las centrales de generación como de los sistemas de transmisión, antes de que el sistema entre en funcionamiento, encontrando un punto en donde el sistema se optimiza hasta lograr la operación con el costo mínimo de despacho. Los SEP's no tienen el mismo comportamiento uno con relación a otro, esto hace que el proceso para buscar el óptimo sea iterativo, es decir se debe repetir el proceso de cálculo hasta llegar al resultado deseado [39][40]. Para poder resolver este tipo de problemas se debe hacer modelados de las curvas de entrada y salida de las unidades térmicas, que son las que son más costosas en generación de energía

eléctrica, estas curvas son complejas ya que dependen de condiciones ambientales y de parámetros termodinámicos, el costo de estas unidades está representados por la siguiente ecuación:

$$C(P_{Gi}) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (11)$$

Donde:

P_{Gi} es la salida del generador i en MW o en p.u;

a_i, b_i, c_i son coeficientes constantes;

El despacho económico (DE) se lo puede analizar de dos formas, sin pérdidas y con pérdidas; el despacho económico sin pérdidas, es un caso simplificado, con este estudio se puede tener una primera aproximación para la solución iterativa al considerar el sistema con pérdidas. Matemáticamente se representa el DE sin pérdidas de la siguiente manera[41].

$$\min F = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) \quad (12)$$

$$\text{sujeto a } (P_D - \sum_{i=1}^n (P_{Gi})) = 0 \quad (13)$$

Donde:

P_{Gi} es la salida del generador i en MW o en p.u;

P_D es la potencia demandada;

Sin embargo, en un SEP, siempre hay pérdidas, lo cual complica el problema anterior, en donde se debe aumentar las pérdidas, algunas veces se lo hace de manera exacta y otras de manera aproximada, su representación matemática se representa de la siguiente manera[42]:

$$\min F = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) \quad (14)$$

$$\text{sujeto a } (P_D + P_L - \sum_{i=1}^n P_{Gi}) = 0 \quad (15)$$

P_{Gi} es la salida del generador i en MW o en p.u;

P_D es la potencia demandada;

P_L la pérdida en la línea;

Una vez que se tiene definido el problema de DE, se debe cumplir con las ecuaciones de balances nodales, y esto se logra ingresándolas como restricciones, los balances para potencia activa (P) y potencia reactiva (Q), se representa de la siguiente forma:

$$P_i + jQ_i = E_i \sum_{k=i}^n Y_{ik} E_k \quad (16)$$

Al expandir la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} P_i + jQ_i &= \sum_{k=i}^n |E_i| |E_k| (G_{ik} - jB_{ik}) e^{j(\theta_i - \theta_k)} \quad (17) \\ &= \sum_{k=i}^n |E_i| |E_k| (G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + jB_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)) \\ &+ j(|E_i| |E_k| (G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k))) \quad (18) \end{aligned}$$

Donde:

θ_i, θ_k Son los ángulos de los nodos i y k respectivamente.

$|E_i| |E_k|$ Son respectivamente las magnitudes de los voltajes nodales.

$G_{ik} + jB_{ik} Y_{ik}$ es el ik término en la matriz Y_{bus} de admitancias del sistema de potencia.

4 Modelo matemático

Para realizar respuesta a la demanda se ha utilizado el modelo de precios escalonados, es decir, el precio de la electricidad aumenta conforme el consumo energético es mayor como se puede verificar en la tabla 2, por esta

razón el consumidor cambia su comportamiento en el uso de energía.

CONSUMO DE ENERGIA EN KW/h	COSTO DE ENERGIA EN US
• 0-25	• 0.068
• 26-75	• 0.071
• 76-125	• 0.08
• 126-175	• 0.09
• 176-225	• 0.1
• 226-275	• 0.2
• 276-325	• 0.4
• 326-n	• 0.5-n

Algoritmo para RD mediante precios escalonados

1. Inicio Del algoritmo RD

2. Declaración.

Energía Consumida, Tarifa Energética.

3. Asignación.

Llamada de variables desde tabla RD.

4. Proceso

EConsumida=Pelectrodomésticos+Potencia Iluminación

TarifaE=Buscar precio en tabla de acuerdo a la Econsumida

5. Visualizar.

Entrega costos de Consumo

6. Fin. Programa RD

Terminar

Como se puede verificar, a medida que los usuarios consumen más energía, deberán pagar más por sus consumos, por lo tanto, los usuarios cambian su comportamiento.

Los usuarios pueden modificar su consumo de tres formas:

- Reduciendo su consumo: El usuario reduce su consumo en periodos en que el costo energético es mayor, desconectando cargas no representativas.
- Desplazando el consumo: El usuario traslada ciertas cargas a

periodos de tiempo en donde el costo energético es menor, por lo tanto, no necesita desconectar sus cargas.

- Generación en sitio: El usuario, principalmente industrial, puede optar por colocar generación distribuida, así en los periodos en donde el precio de energía es mayor, usaría generación propia, evitando el consumo energético de la red.

En la figura 7 se puede verificar el comportamiento del precio de la energía a medida que el consumo energético por parte de los usuarios aumenta.

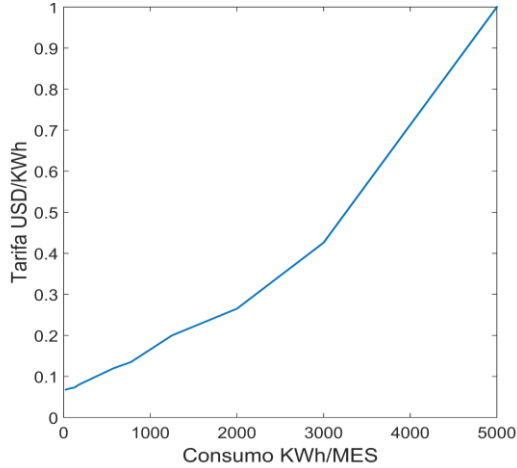


Figura 7. Precios escalonados

Una vez que los usuarios realizan estos cambios, la demanda se reduce en un 10%, por lo que al realizar un despacho económico se notará que el uso de las centrales térmicas ya no será necesario. Al realizar el despacho económico el objetivo es reducir los costos de generación, minimizando los costos variables de producción energética en función de la potencia, manteniendo el estándar de estabilidad y calidad energética. La ecuación que lo define es la siguiente.

$$FO = \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J CV_c * p_{c,p} * U_{c,p} \quad (19)$$

Donde:

- p es el periodo de tiempo en un día;
- c es el número total de unidades de generación que se despachan en un día;
- CV_c ; es el costo variable de la central;
- $P_{c,p}$ Producción energética de la central c en un periodo p ;
- $U_{c,p}$ Variable binaria que toma el valor de 1 si la central está en funcionamiento o de 0 si no está funcionando;

Se debe considerar que en el sistema debe haber varias restricciones para que funcione de manera adecuada, una de ellas es la potencia que se entrega al sistema, esta potencia debe ser igual a la que entregan las unidades de generación, caso contrario habrá variaciones de frecuencia, provocando fallas en el sistema, por eso debe existir un balance entre la entrada y la salida, esta restricción debe cumplirse durante todo el periodo de generación, está definida por la siguiente ecuación.

$$\sum_{c=1}^c C_{c,p} = D_p ; \forall P \quad (20)$$

Donde:

- c es el número total de unidades de generación que se despachan en un día;
- D_p potencia entregada en un instante P ;

Al hacer el despacho, se debe tomar en cuenta las restricciones mecánicas que puede tener cada unidad de generación, es decir, la cantidad mínima que pueden entregar y la cantidad máxima de energía para no sobrecargarlas, esta restricción está definida por.

$$P_{c_{min}} * v_{c,p} \leq p_{c,p} \leq P_{c_{max}} * v_{c,p}; \forall c, p \quad (21)$$

Donde:

P_{cmin} es la potencia mínima entregada por el generador;

P_{cmax} es la potencia máxima entregada por el generador;

$P_{c,p}$ es la producción energética de la centra c en un periodo p;

Se debe considerar que una unidad generadora, una vez puesta en marcha debe tener un tiempo mínimo de operación, es decir, no se la puede desconectar si no se ha cumplido este periodo de tiempo.

$$U_{c,A} \geq U_{c,p} - U_{c,p-1}; \quad (22)$$

$$\forall p = 2 \dots T - 1; A$$

$$= p + 1 \dots \min(t, p + Tup - 1)$$

Donde:

$U_{c,p}$ Variable binaria que toma el valor de 1 si la central está en funcionamiento o de 0 si no está funcionado;

Tup es el tiempo mínimo de operación.

Cuando la unidad generadora sale de funcionamiento después de su periodo mínimo de operación, se debe tomar en cuenta el menor tiempo que el generador debe estar fuera de funcionamiento, es decir, una vez que deja de funcionar, no se la puede ingresar al sistema de manera inmediata, esta restricción está dada mediante la siguiente ecuación.

$$U_{c,p} \leq 1 + U_{c,p} - U_{c,p-1}; \quad (23)$$

$$\forall p = 2 \dots T - 1; A = p + 1 \dots \min(T, p + Tdown - 1)$$

Donde:

$U_{c,p}$ Variable binaria que toma el valor de 1 si la central está en funcionamiento o de 0 si no está funcionado;

$Tdown$ es el tiempo mínimo que la planta debe permanecer fuera de operación.

La capacidad de absorción de cargas está limitada de manera mecánica, es decir, una unidad generadora puede llegar a un máximo o aun mínimo de carga que puede entregar, estas ecuaciones están definidas de la siguiente forma.

$$p_{cp+1} - p_{c,p} \leq S_c; \quad \forall j, p \quad (24)$$

$$= 0 \dots p - 1$$

$$p_{c,p} - p_{c,p+1} \leq T_c; \quad \forall c, p \quad (25)$$

$$= 0 \dots p - 1$$

Donde:

$P_{c,p}$ Potencia entregada por la generadora c en el periodo de tiempo p;

S_c Rampa máxima de subida de la central c;

T_c Rampa máxima de bajada de la central c;

Una vez que una unidad térmica entra en funcionamiento, existe un tiempo máximo en que la central debe estar en funcionamiento, y está representada mediante la siguiente restricción.

$$\sum_{p=0}^{\min(T-p, Tmu(c)+1)} U_{c,p+A} \leq Tmu(j); \quad (26)$$

$$c \in MUC; p = 2 \dots T - 1;$$

Donde:

$U_{c,p}$ Variable binaria que toma el valor de 1 si la central está en funcionamiento o de 0 si no está funcionado;

$Tmu(c)$ Tiempo máximo de operación de la central c.

En un sistema interconectado, existen las centrales térmicas cuyas restricciones están descritas, sin embargo, al hacer el despacho económico, lo que se busca es que la generación sea más económica, esto se consigue mediante centrales hidroeléctricas, por lo que se le deben

tener una cuota mínima de generación para que se cumpla el objetivo, además se debe considerar la producción de energía de las unidades generadoras y la potencia de las unidades hidráulicas que trabajan como slack, varían en el periodo p , estas restricciones están dadas por las siguientes ecuaciones.

$$\sum_{p=1}^p P_{c,p} \leq \vartheta_{h-energ} \quad (27)$$

$$P_{c,p} \geq P_{min_c}; \quad (28)$$

$$P_{c,p} \leq P_{max_c} \quad (29)$$

$\forall c \in \text{Generador Hidro}$

Donde:

$P_{c,p}$ Potencia entregada por la generadora c en el periodo de tiempo p ;

ϑ_h Cuota energética de la unidad generadora.

5 Resultados

Se han generado cuatro casos, el primer caso usa generadores térmicos (Diésel, gas, fuel oil, residuo) y generadores hidráulicos, no se consideran pequeños. Un total de 138 unidades de generación. En el primer escenario se incluye una cuota promedio de generación, equivalente a 833 MW durante 24h, La cuota energética únicamente proviene de las centrales que poseen embalse, la energía equivalente a 833 MW durante un día asciende a 20000 MWh.

La curva de demanda sin la optimización del sistema asciende a 2488 MW, por lo que se utilizarán estos datos para verificar el costo variable de generación.

En la figura 8 podemos ver la curva de demanda diaria, en donde se refleja la cantidad de generación entregada por cada tipo de central; las centrales hidroeléctricas aportan 41% de energía, gas con el 14%, residuo con 22%, fuel oil con 17% y diésel con 6%.

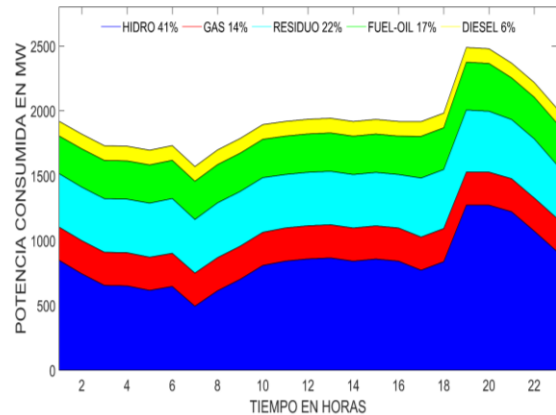


Figura 8. Curva de demanda diaria sin GD y sin RD

En el segundo escenario, se han utilizado generación distribuida en el sistema, para lo cual han entrado pequeños generadores hidráulicos y plantas de generación fotovoltaicas y eólicas para suplir la demanda y reducir el uso de generadores térmicos.

En la figura 9 se puede ver la nueva curva de demanda.

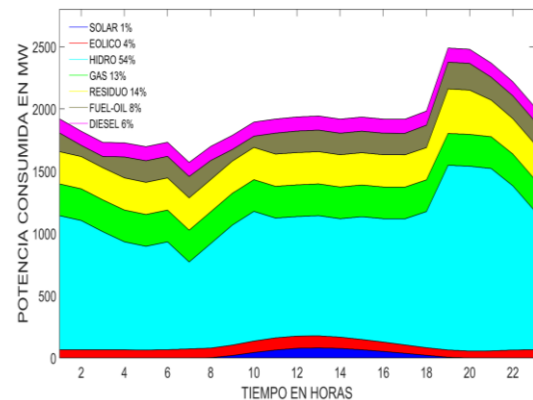


Figura 9 Curva de demanda diaria con GD sin RD

Como se puede verificar en el gráfico, la demanda de generadores térmicos se redujo, aumentando el uso de generación hidráulica e implementando generación fotovoltaica y eólica gracias a la generación distribuida, en cuanto a generación solar se entrega 1%, generación eólica 4%, hidroeléctrica entrega una cuota energética del 54%,

mientras que generación mediante gas tiene un 13%, residuo 14%, fuel-oíl 8% y diésel 6% al implementar GD.

Se puede ver que ha aumentado el uso de generación hidroeléctrica en un 13%, mientras que el uso de generadores de gas se redujo 1%, generadores de residuo se redujo 8%, generadores de fuel oíl se redujo 9%, estas reducciones se dan gracias a GD y la implementación de generadores eólicos y fotovoltaicos.

En la figura 10 se ve la diferencia de generación con GD y sin DG.

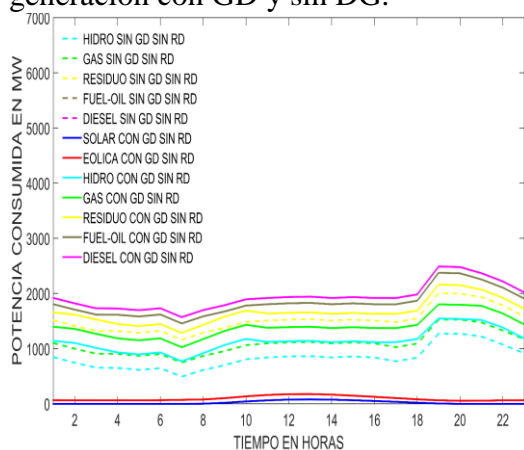


Figura 10. Curva de demanda diaria sin GD y sin RD vs con GD sin RD

En el gráfico verificamos que, al implementar generación distribuida, la generación hidroeléctrica toma un 32% más de carga, mientras que generación con gas disminuye 7%, la generación por residuo disminuye un 36% al igual que la generación con fuel-oíl que se reduce un 53%

En los gráficos se ve una reducción del uso de generadores térmicos, sin embargo, el comportamiento de los usuarios se mantiene, por lo que el pico de consumo no ha reducido en las horas pico, para lo cual se implementó un tercer caso, en el que mediante RD se ha reducido el pico de consumo en un 10%, trasladando esta energía a otros sectores.

En la figura 11 podemos verificar el cambio de la curva de demanda al implementar RD, dejando de lado GD, es decir, con 138 generadores, no se consideran los generadores hidráulicos pequeños, las centrales hidroeléctricas aportan 43% de energía, gas con el 13%, residuo con 22%, fuel oíl con 16% y diésel con 6%.

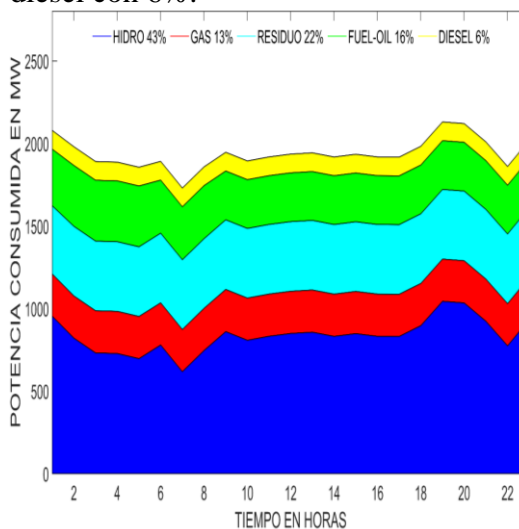


Figura 11. Curva de demanda diaria sin GD con RD

Se observa que la RD ha ayudado a que la generación hidroeléctrica tenga mayor participación en el sistema, disminuyendo el uso de generación térmica.

En la figura 12 se puede ver el comportamiento del sistema.

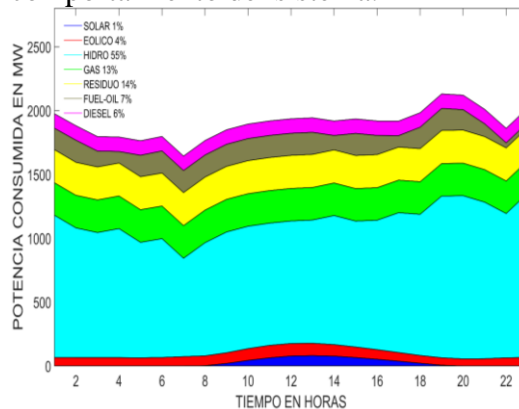


Figura 12. Curva de demanda diaria con GD y RD

El uso de generación hidroeléctrica tiene un mayor impacto en el sistema eléctrico, en la figura 13 se puede verificar la diferencia entre generación con RD sin GD y con GD.

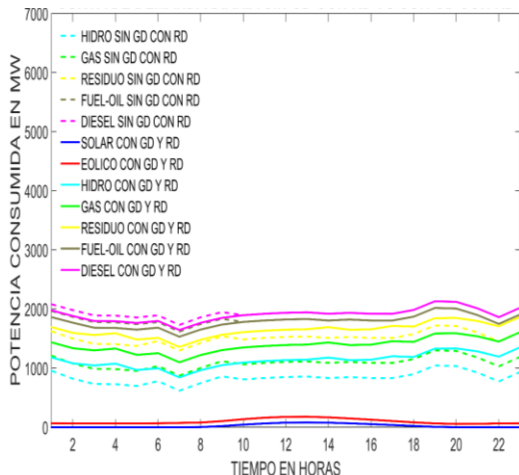


Figura 13. Curva de demanda diaria sin GD y con RD vs con GD con RD

En las figuras, hay una optimización en el uso de energía hidráulica.

En la figura 14 se puede ver el sistema sin optimización, es decir con GD y sin RD versus el sistema con GD y RD.

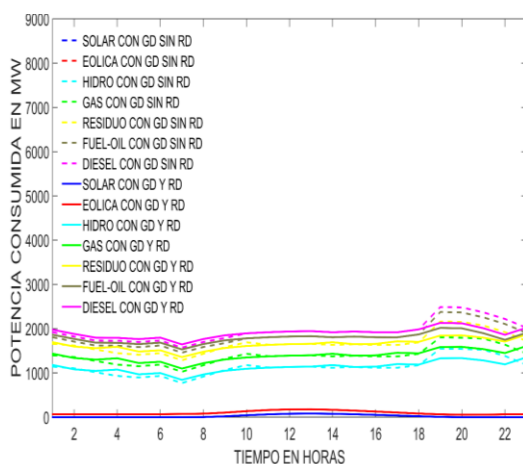


Figura 14. Curva de demanda diaria sin RD vs con RD

Como se puede apreciar en el gráfico los picos de consumo se han logrado reducir gracias a la RD, por lo que el sistema

utiliza más generación hidroeléctrica que termoeléctrica.

Al lograr esta optimización, el despacho económico del sistema también reduce su costo; en el primer caso se tiene un costo de generación diaria de \$1'116.981,93; mientras que para el segundo caso se tiene un costo de generación diaria de \$804.033,51, lo que significa un ahorro diario de \$312.948,42; tan solo al implementar GD. Al implementar RD en el caso 3 sin GD, el costo de generación en el sistema es de \$1'109.628.01, al implementar RD con GD, el costo de generación es de \$756.784,23, es decir, el sistema optimizado mediante RD y GD tiene un ahorro de costos de generación de \$352.843,78 diarios. Anualmente se obtendrá un ahorro en generación de \$128'787.977,9, lo cual demuestra que mediante políticas de RD y GD se logra economizar en un 32% el costo de producción energética entre el caso 1 y caso 4. Sin embargo, en un sistema donde ya se tenga implementado GD el costo de generación diaria es de \$904.288,68, lo que implica que al introducir RD se obtendrá un ahorro de producción energética del 6%. Además, se debe tomar en cuenta que, al eliminar los picos de consumo, se evitan las sobrecargas del sistema, por lo que se obtiene un sistema más confiable y más económico.

6 Conclusiones

- Al implementar GD el despacho económico se optimizó haciendo que el costo generación eléctrica disminuya, sin embargo, en el primer caso no se consideró RD, por lo que el problema no se había solucionado en su totalidad, es decir, el despacho aún era muy costoso, en el caso

4, al implementar GD y RD, se pudo observar que el problema fue resuelto, logrando que el despacho económico se optimizara, al utilizar generación más económica.

- Al realizar una política de RD mediante precios escalonados, se nota una reducción del consumo energético, ya sea por la desconexión de cargas, o por el uso de equipos eléctricos más eficientes.
- Aunque la reducción de consumo es muy importante en el SEP, es muy importante tomar en cuenta que mediante GD se reducen tanto los costos de construcción para edificar centrales nuevas y también el aumento de capacidad de centrales ya existentes, y se logra una reducción de pérdidas de energía en transmisión ya que la producción energética se encuentra junto a la demanda.
- Se debe tomar en cuenta los aspectos de planificación al momento de hacer un despacho económico, ya que se debe considerar aspectos como los tiempos mínimos y máximos de operación de las unidades térmicas y las cuotas de generación hidráulica. Considerando todos estos aspectos, se logrará que el sistema sea confiable, eficiente y económico para satisfacer la demanda diaria de manera óptima, operando dentro de los estándares de voltaje y frecuencia establecidos. Además, es se ve que al utilizar GD y respuesta a la demanda, el sistema se optimiza de tal manera que puede representar grandes beneficios técnicos y económicos a las empresas generadoras.

7 Referencias

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] P. Moreno and M. García, "Respuesta a la Demanda para Smart Home Utilizando Procesos Estocásticos," *I+D Tecnológico*, vol. 12, no. 2, pp. 7–17, 2016.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] A. Gabriel and E. M. Garcia, "Respuesta de la demanda eléctrica basado en el modelo Markoviano," Universidad Politecnica Salesiana, 2016.
- [9] E. M. García, A. Águila, I. Isaac, J. W. González, and G. López, "Analysis of Voltage Profile to determine Energy Demand using Monte Carlos algorithms and Markov Chains (MCMC)," in *51st International Universities' Power Engineering Conference*, 2016, no. Mcmc.
- [10] V. J. Martinez 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.
- [11] E. M. Garcia and I. Isaac, "Demand response systems for integrating energy storage batteries for residential users," in *Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), IEEE*, 2016.
- [12] 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.
- [13] E. M. García, "Diagn{ó}stico de la demanda de consumo de energ{í}a el{é}ctrica en un smart home, enfocado en el sector residencial de quito, durante el año 2015, barri{ó} la kennedy. Caracterizaci{ó}n y optimizaci{ó}n del consumo de energ{í}a el{é}ctrica," Universidad T{é}cnica de Cotopaxi, Latacunga, 2016.
- [14] 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.
- [15] E. Inga, D. Carrión, A. Aguila, E. M. García, and R. Hincapié, "Minimal Deployment and Routing Geographic of PMUs on Electrical Power System based on MST Algorithm," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 5, pp. 2264–2270, 2016.
- [16] B. Luis and E. M. Garcia, "MODELO MULTI OBJETIVO DE PLANIFICACI{Ó}N DE TRANSMISI{Ó}N BAJO INCERTIDUMBRE BASADO EN UNA {Ó}PTIMA RESPUESTA DE LA DEMANDA," *Tesis*, pp. 1–22, 2016.
- [17] B. Oña and E. M. Garcia, "Uso eficiente del consumo de energ{í}a el{é}ctrica residencial basado en el m{é}todo Montecarlo," Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [18] M. Ortiz and E. M. Garcia, "Pron{ó}stico de la demanda eléctrica residencial basado en el modelo de regresi{ó}n adaptativa multivariante spline

- (MARS),” Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [19] M. Simbaña and E. M. Garcia, “Optimizaci{ó}n mediante el m{é}todo de Montecarlo de la demanda el{é}ctrica residencial,” Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] D. Tasinchana and E. M. Garcia, “Predicci{ó}n con series de tiempo para la optimizaci{ó}n de la demanda el{é}ctrica residencial,” Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [23] Y. Li *et al.*, “Study and application of microgrid energy management system based on the four-dimensional energy management space,” in *2014 International Conference on Power System Technology*, 2014, pp. 3084–3089.
- [24] 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.
- [25] S. D. Smitha, J. S. Savier, and F. Mary Chacko, “Intelligent control system for efficient energy management in commercial buildings,” in *2013 Annual International Conference on Emerging Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy*, 2013, pp. 1–6.
- [26] S. Liu, B. Dong, and Y. Sun, “Control Conference (CCC), 2013 32nd Chinese,” *Control Conference (CCC), 2013 32nd Chinese*. pp. 8066–8069, 2013.
- [27] C.-S. Chang, X. Chao, M. Pinedo, and J. G. Shanthikumar, “Stochastic convexity for multidimensional processes and its applications,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 36, no. 12, pp. 1347–1355, 1991.
- [28] R. W. Dijkerman and R. R. Mazumdar, “Wavelet representations of stochastic processes and multiresolution stochastic models,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 42, no. 7, pp. 1640–1652, Jul. 1994.
- [29] V. Orejuela, D. Arias, and A. Aguila, “Response of Residential Electricity Demand Against Price Signals in Ecuador,” 2015.
- [30] M. B. Jannat and A. S. Savić, “Optimal capacitor placement in distribution networks regarding uncertainty in active power load and distributed generation units production,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 12, pp. 3060–3067, Sep. 2016.
- [31] 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.
- [32] H. Xiaojing, W. Lei, J. Ning, J. Honggang, and Y. Na, “Load forecasting techniques for networks with distributed generation (DG) sources,” in *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, 2016, pp. 6232–6237.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Labib, M. Billah, M. R. Islam, and G. M. S. M. Rana, “Design and construction of smart load management system: An effective approach to manage consumer loads during power shortage,” in *2015 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*, 2015, pp. 1–4.
- [36] Y.-J. Lee and E.-K. Kim, “Smart device based power generation facility management system in smart grid,” in *2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2015, pp. 526–532.
- [37] W. Tushar, J. A. Zhang, C. Yuen, D. Smith, and N. U. Hassan, “Management of Renewable Energy for A Shared Facility Controller in Smart Grid,” *IEEE Access*, pp. 1–1, 2016.
- [38] S. R. Espinosa Gualotuña, “Análisis de la restricción de emisiones de dióxido de carbono en el despacho óptimo de las unidades térmicas del parque generador ecuatoriano,” 2015.
- [39] H. Ding, Y. Li, S. Yang, J. Yao, D. Zeng, and K. Wang, “Stochastic security-constrained economic dispatch for random responsive price-elastic load and wind power,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 7, pp. 936–943, Aug. 2016.
- [40] Y. Ji, T. Zheng, and L. Tong, “Stochastic Interchange Scheduling in the Real-Time Electricity Market,” *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1–1, 2016.
- [41] A. W. Bizuayehu, A. A. Sanchez de la Nieta, J. Contreras, and J. P. S. Catalao, “Impacts of Stochastic Wind Power and Storage Participation on Economic Dispatch in Distribution Systems,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 1336–1345, Jul. 2016.
- [42] F. Bahlke, Y. Liu, and M. Pesamento, “Stochastic load scheduling for risk-limiting economic dispatch in smart microgrids,” in *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2016, pp. 2479–2483.