



Tecnura

ISSN: 0123-921X

tecnura@udistrital.edu.co

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Colombia

CARVAJAL QUINTERO, SANDRA XIMENA; MARÍN JIMÉNEZ, JUAN DAVID  
Impacto de la generación distribuida en el sistema eléctrico de potencia colombiano: un enfoque  
dinámico

Tecnura, vol. 17, núm. 35, enero-marzo, 2013, pp. 77-89

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257025800009>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Impacto de la generación distribuida en el sistema eléctrico de potencia colombiano: un enfoque dinámico

*The impact of distributed generation on the colombian electrical power system: a dynamic-system approach*

**SANDRA XIMENA CARVAJAL QUINTERO**

Ingeniera electricista, magister en Ingeniería eléctrica. Docente de la Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia.

Contacto: [sxcarvajalq@unal.edu.co](mailto:sxcarvajalq@unal.edu.co)

**JUAN DAVID MARÍN JIMÉNEZ**

Ingeniero electricista. Investigador de la Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia. Contacto: [jdmarinj@unal.edu.co](mailto:jdmarinj@unal.edu.co)

Fecha de recepción: 30 de noviembre de 2011

Fecha de aceptación: 16 de octubre de 2012

Clasificación del artículo: Reflexión

Financiamiento: Universidad Nacional de Colombia

**Palabras clave:** economía de escala, generación distribuida, seguridad, sistemas eléctricos de potencia.

**Key words:** economics of scale, distributed generation, security, electrical power system.

## RESUMEN

La Generación Distribuida (GD) surge como una alternativa importante para la prestación del servicio de energía eléctrica, ya que puede aumentar la confiabilidad y seguridad en el suministro a corto, mediano y largo plazo. A pesar de estas ventajas, el marco regulatorio colombiano no contempla la GD como una actividad válida dentro del sistema interconectado y, por consiguiente, no existen políticas para incentivar la inversión en proyectos de generación a pequeña escala.

Este artículo describe aspectos técnicos, económicos y propuestas regulatorias relacionadas con la inclusión de la GD en sistemas de potencia eléctrica. Luego, estos aspectos son vinculados en un modelo mental bajo el concepto de teoría de retroalimentación y relaciones causa-efecto propios de la metodología Dinámica de Sistemas (DS). Este modelo pretende ser el insumo para la creación de un mundo virtual que permita evaluar la pertinencia de varias alternativas regulatorias y poder escoger la que mejor se adapte a las condiciones técnicas, climáticas, económicas y a la

estructura de mercado usada en el sistema interconectado colombiano.

## ABSTRACT

Distributed Generation (DG) has emerged as an important alternative to provide electrical energy since it could increase the reliability and security of electric power supply in the short, medium and long term. Despite these potential advantages, the Colombian regulatory framework does not recognize DG as a valid activity within the country's interconnected system and, as such, no policy exists to encourage investment in small-scale generation projects.

This article first describes the technical and financial aspects of DG, and then analyses regulatory proposals regarding the inclusion of DG in power systems outside Colombia. These aspects are then brought together in a mental model based on the concepts of feedback theories as well as of cause and effect relationships; such concepts are part of the System Dynamics methodology (SD). This model is aimed at creating a virtual world which would allow the usefulness of various regulatory alternatives to be evaluated and thus an appropriate option to be chosen according to the regulation that best fits technical, climatic and economic conditions, and also according to the market structure used in the Colombian interconnected system.

\* \* \*

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el sector eléctrico ha mostrado un interés por la GD debido a diversos factores como: avances en las tecnologías de generación a pequeña escala, la liberación del sector eléctrico y una renovada conciencia ecológica [1]. La GD es la generación y el almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, lo más cercana al centro de carga, con la opción de comprar o vender energía eléctrica con el sistema interconectado o trabajar aisladamente [2].

La importancia de la GD se comenzó a resaltar en los últimos años cuando muchos países liberaron sus mercados eléctricos [2] y comenzaron a incentivar la evolución de nuevas tecnologías de generación [3]. Otro de los factores que ha generado un creciente interés en la GD es la contribución al desarrollo sostenible, ya que esta se asocia comúnmente con la producción de energías limpias [3]. Por otro lado, la GD puede contribuir a la seguridad energética elevando los niveles de confiabilidad del sistema [4]. El aporte que pueda hacer la GD en este punto depende, en

gran parte, de políticas energéticas concebidas para incentivar el uso de energías alternativas a un precio justo para el usuario.

Los cambios regulatorios relacionados con la actividad de generación están inmersos en incertidumbres debidas, principalmente, a la volatilidad en los precios de los combustibles, cambios climáticos y posibles aumentos súbitos de la demanda [5]. Una forma de apoyar las políticas energéticas es a través de estudios que permitan identificar las consecuencias a largo plazo.

El presente estudio busca realizar un análisis de los diferentes factores, problemáticas y beneficios que pueden traer el incentivar la instalación de plantas al sistema interconectado de potencia colombiano. Este análisis se realizó siguiendo los lineamientos de la metodología Dinámica de Sistemas (DS) con el fin de identificar las variables que deben tenerse en cuenta para hacer un modelo de gestión que permita evaluar qué tipo de propuestas en políticas regulatorias serían apropiadas antes de ser implementadas en el mercado eléctrico colombiano.

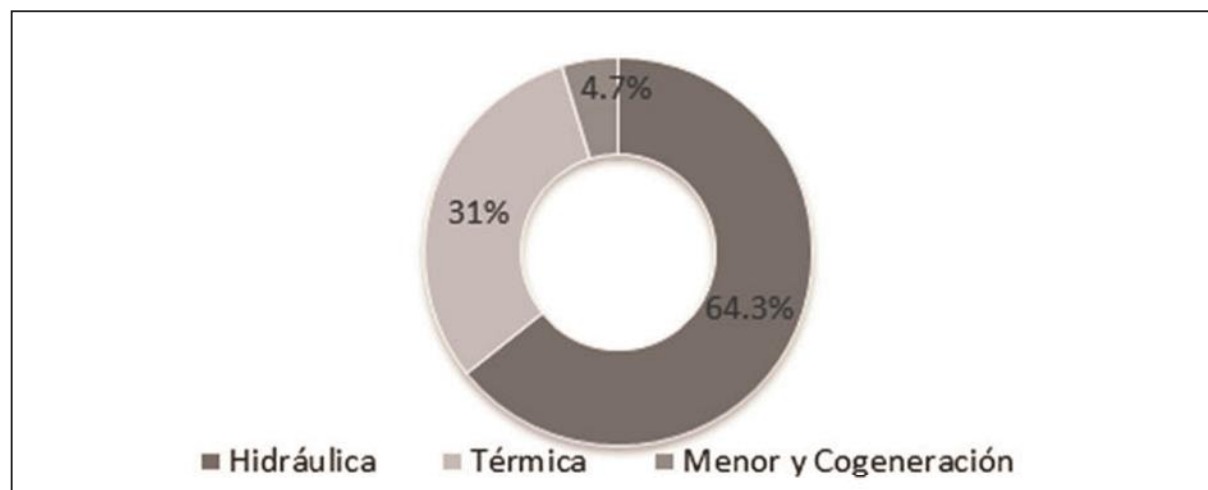
## 2. LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA

La liberalización de los mercados de electricidad se produjo debido a que los monopolios estatales fueron cuestionados por la alta corrupción, la poca actualización y experiencia en el manejo de las actividades del sector eléctrico [5]. La liberalización permitió la participación privada y se siguió un esquema similar al de los países pioneros en ese desarrollo, en especial el del Reino Unido [5]. Esta restructuración se realizó con fundamento en las leyes 142 y 143 de 1994 [6], las cuales definieron el marco regulatorio para establecer los cambios estructurales en todas las actividades que hacen parte de la cadena de suministro de la electricidad.

Las leyes 142 y 143 de 1994 permitieron la sana competencia en las actividades de generación y comercialización. Además, crearon el mercado mayorista de energía eléctrica [6]. Su reglamentación fue desarrollada por la CREG, la cual promulgó las reglamentaciones básicas técnicas como el *Código de Redes*. El Código de Redes es el reglamento actual que rige la expansión, conexión, operación y medida del Sistema Interconectado Nacional (SIN) [7].

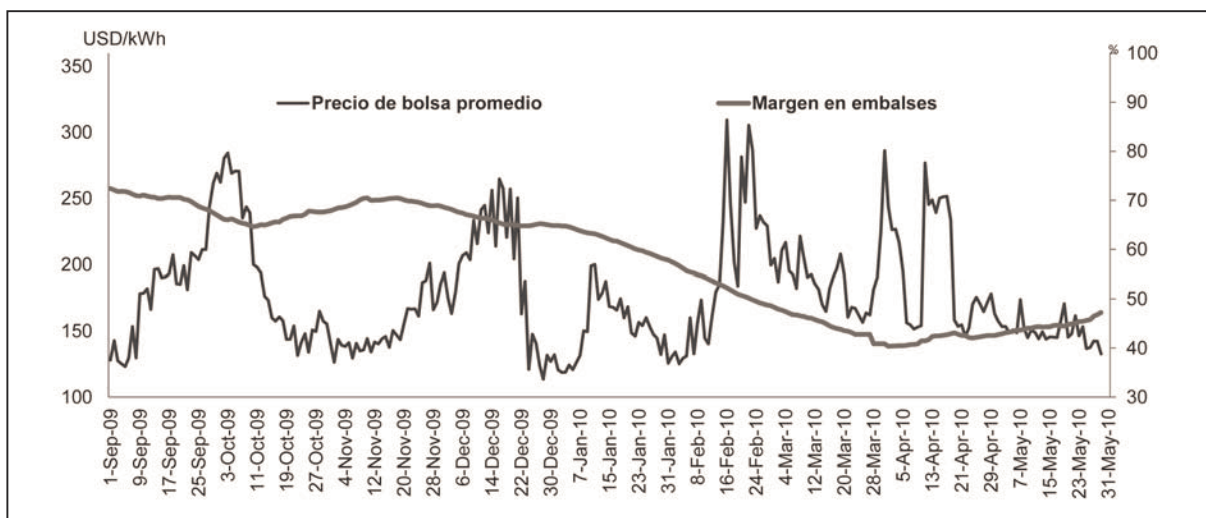
Con la apertura del mercado, ingresaron participantes privados al negocio de la generación de la electricidad, aumentando la capacidad instalada y pasando de una relación hidro-térmica de 79,6 – 20,4% a 64 – 31% [8]. La figura 1 muestra, con mayor detalle, los porcentajes de capacidad de generación actuales en Colombia según la energía primaria utilizada. Las plantas menores son las plantas con una capacidad efectiva de generación menor a 20 MW y son plantas operadas por empresas generadoras, productores marginales o productores independientes de electricidad y que comercializan esta energía con terceros [5]. La categoría de generación con plantas menores y la de auto generador son excluyentes [9].

La generación hidroeléctrica se afecta cuando se presentan periodos de sequía prolongados, puesto que el nivel de los embalses disminuyen y se corre el riesgo de que ocurra un desbalance entre demanda y oferta, que pueda afectar el óptimo funcionamiento del SIN. La figura 2 muestra cómo los precios de la electricidad se aumentaron en Colombia en el año 2009 debido a que el nivel de agua se redujo en los embalses producto de la presencia del fenómeno climático multianual de sequía conocido como el Niño.



**Figura 1.** Porcentajes de capacidad de generación en Colombia.

Fuente: tomada de [8]



**Figura 2.** Comportamiento de precio electricidad y nivel de embalses.

Fuente: tomada de [8]

## 2.1 La GD en Colombia

La GD como actividad no está definida ni reglamentada por ley en Colombia, dado que se prohíbe a las empresas que hagan parte del SIN y tener más de una de las actividades relacionadas con el mismo, con excepción de la comercialización que puede realizarse en forma combinada con generación y distribución [6].

A pesar de esto, la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) cuantifica, con base en una encuesta, que la autoproducción de energía eléctrica en Colombia es de 773MW, de los cuales 417 MW corresponden a autogeneración, 314 MW a cogeneración y 41 MW a respaldo en emergencias [9]. El crecimiento en capacidad por plantas menores fue de 12.3 % y por cogeneración fue de 109.8 % en el 2010 con respecto al año 2009 [8].

La actividad de cogeneración está definida como un proceso de producción combinada de energía eléctrica y energía térmica, que hace parte integrante de una actividad productiva, destinadas ambas al consumo propio o de terceros y destina-

das a procesos industriales o comerciales [6]. Los cogeneradores sí pueden vender los excedentes de energía eléctrica al mercado de energía mayorista, para ello deben registrar ante el Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales (ASIC), una frontera de generación y una frontera de demanda; ambos registros son separados y con medidores independientes que registran generación y consumo [8].

Las actividades de cogeneración y autogeneración utilizan generalmente recursos renovables como: solar, hidroeléctricos a filo de agua, biomasa, solar y eólico. Según estudios de la UPME, Colombia cuenta con un potencial energético solar en promedio multianuales de 4,5kWh/m<sup>2</sup>, la pequeña generación hidroeléctrica el potencial estimado en potencia es de 25.000MW y la energía potencial proveniente de biomasa estimada es de 16.260MWh [10].

## 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El análisis acerca de los elementos necesarios para incentivar el uso de la GD en Colombia, se

realizó utilizando una técnica de investigación llamada Dinámica de Sistemas (DS). La DS es una metodología que permite la construcción de modelos mediante un análisis cuidadoso de los elementos del sistema [11]. Este análisis permite extraer la lógica interna del modelo, y con ello intentar un conocimiento de la evolución a largo plazo del sistema [12].

Los estudios realizados con DS están divididos en dos fases: la primera fase tiene como objetivo básico llegar a comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema [13]. Esto implica aumentar el conocimiento sobre el papel de cada elemento del sistema que hace parte del problema que se desea tratar de solucionar. Luego, la segunda fase, tiene como objetivo proponer varias alternativas de solución y, con ayuda de paquetes computacionales especializados, analizar las bondades de cada propuesta en un entorno de largo plazo [13].

La reflexión realizada en este artículo fue hecha siguiendo todas las actividades de la primera fase. Las actividades realizadas en esta fase son: identificación del problema, definición del sistema y creación del modelo causal. A continuación se explica en qué consistió cada actividad.

### 3.1 Identificación del problema

La actual preocupación por los problemas a causa de los repetidos cambios climáticos [3] y la inestabilidad en los precios de los combustibles fósiles, que afectan la seguridad energética [4], conllevan a la necesidad de hallar soluciones energéticas de desarrollo sostenible que permitan mantener un apropiado margen de reserva para la generación de electricidad.

La Organización para el Desarrollo y Cooperación Económica (OECD), la cual está compuesta por 30 países entre los que se encuentran Japón,

Reino Unido y Estados Unidos, señala como una posible solución para generar electricidad, sin aumentar los gases efecto invernadero, la masificación de plantas distribuidas, especialmente aquellas que utilicen recursos renovables, ya que estas plantas tienen un menor impacto ambiental y pueden ayudar a aumentar y diversificar el portafolio de tecnologías [3].

Los expertos mundiales señalan que la GD es una opción válida para preservar el medio ambiente dado que es una generación a pequeña escala [2] (generalmente menores a 20 MW), la cual se ubica cerca de los centros de consumo (no requiere líneas de transmisión) por lo que se puede utilizar de manera efectiva con recursos renovables [4].

Las leyes colombianas actuales no incentivan el uso de recursos renovables y la GD no es una actividad definida formalmente por la regulación nacional [7]. La instalación masiva de GD sobre la red de Distribución trae incertidumbres a los diversos agentes del mercado que conllevan a problemas técnicos, económicos y regulatorios. A continuación, se analizan cada uno de los problemas mencionados, de manera global, teniendo en cuenta las oportunidades que promete tener la instalación de GD en los sistemas eléctricos de potencia.

#### 3.1.1 GD y aspectos técnicos

La GD trae consigo muchos beneficios para la seguridad energética, dado que puede utilizar tecnologías de energías renovables (RETs \_ Renewable Energy Technologies) [3]. Las RETs mitigan el riesgo de sufrir desbalances entre generación demandada y generada a largo, mediano y corto plazo [4], puesto que apoyan el sistema eléctrico en situaciones inesperadas que ponen en peligro el suministro de energía eléctrica y el buen funcionamiento del mercado.

La GD, por ser conectada cerca de los centros de consumo, no necesita las redes de transmisión y en caso de un evento en que se desconecte, parcial o totalmente, el sistema de interconectado de potencia, la GD puede ser clave para mitigar las consecuencias económicas y sociales que trae consigo un apagón [14]. Además, la GD puede aumentar la seguridad, calidad y confiabilidad a través de la provisión de servicios complementarios como el control de tensión y el arranque autónomo [15] - [16].

A pesar de todos los beneficios anteriores, es importante tener en cuenta que la instalación de GD sobre la red de distribución posee grandes desafíos técnicos que requieren un estudio detallado de la tecnología y la topología de la red, con el fin de evitar problemas relacionados con calidad de la potencia [17], [18], entre los más comunes, están los problemas de armónicos y flickers según el tipo de tecnología y el lugar de ubicación donde se pretenda instalar.

Otro aspecto relevante es la coordinación de protecciones [19] en sistemas interconectados puesto que las protecciones del sistema eléctrico actual fueron diseñadas para una configuración radial y con flujos unidireccionales; al instalar GD en la red eléctrica, hay una pérdida en la coordinación de protecciones, lo que obliga al Operador de Red a realizar reajustes que se deben realizar cuidadosamente.

Aunque la GD puede mitigar los efectos de un apagón por estar más cerca de los centros de consumo. Una mala práctica operativa puede crear problemas de estabilidad del sistema [18], [19], ya que cuando el sistema eléctrico sale de servicio por fallas en la red, pueden presentarse desbalances en potencia activa, reactiva y carga, las cuales pueden ocasionar daño en equipos, pérdidas de elementos del sistema y colapsos por frecuencia y tensión. Estos problemas pueden ser evitados si se estudia el uso de la GD en

una red flexible y de mayor control en tiempo real, como es el caso de las redes inteligentes conocidas internacionalmente como *smartgrids* [20].

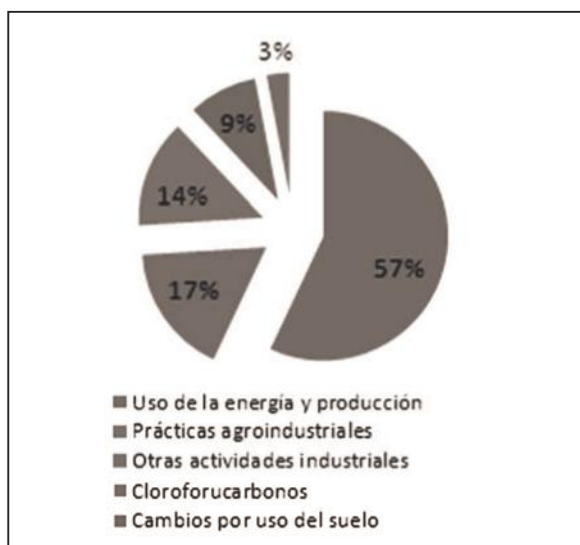
### **3.1.2 Generación Distribuida e Impacto ambiental**

La expansión de generación eléctrica a nivel mundial muestra una tendencia a la búsqueda de proyectos que tengan en cuenta la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ya que el CO<sub>2</sub> representa el 86% del total de partículas aceleradoras del cambio climático [3].

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), la agencia meteorológica de la ONU, indica que el dióxido de carbono, el metano y el óxido nítrico son ahora más prevalentes en la atmósfera que en ninguna otra época desde la revolución industrial.

El reporte de la OMM mide la cantidad total de gases de efecto invernadero en la atmósfera con base en estaciones de monitoreo en más de 50 países. Eso significa que incluye las emisiones naturales y los procesos de absorción, al igual que las emisiones causadas por la actividad humana. El dióxido de carbono, responsable del 80% del efecto de calentamiento global en las últimas dos décadas, subió rápidamente con el uso de combustibles fósiles [21].

Las principales fuentes de CO<sub>2</sub> son: la quema de combustibles fósiles y la deforestación. La figura 3 muestra datos entregados por Iberdrola, una de las cinco principales compañías eléctricas del mundo en el 2010 [21], donde se puede observar que la principal actividad que contribuye con la emisión de CO<sub>2</sub> en este país es la producción de electricidad a través de la quema de combustibles fósiles como el carbón y derivados del petróleo.



**Figura 3.** Actividades que contribuyen con la emisión de CO<sub>2</sub>.

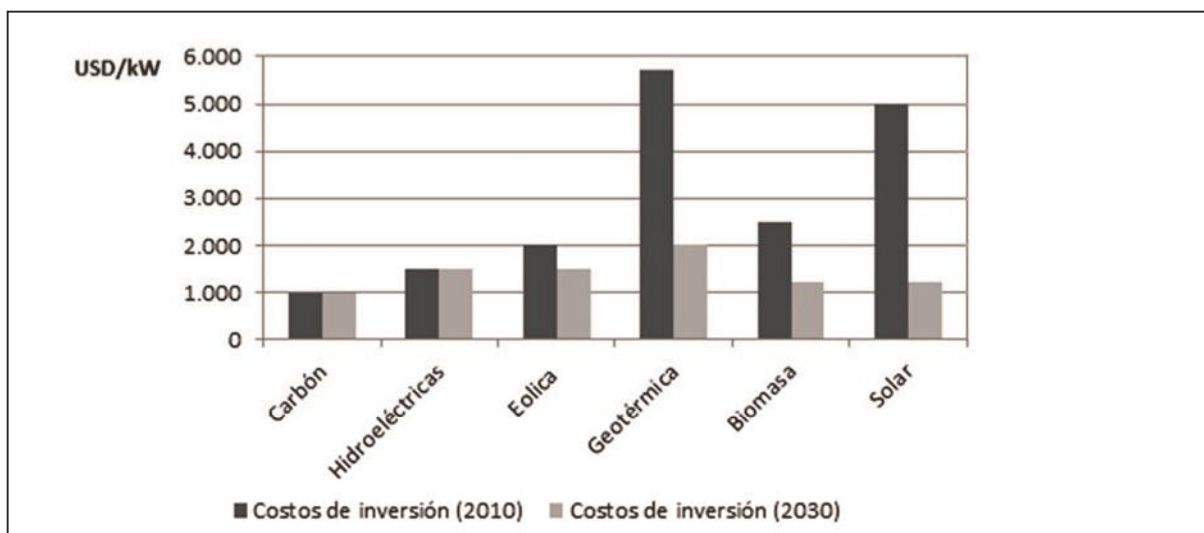
Fuente: tomada de [17]

### 3.1.3 Generación distribuida y necesidad de políticas regulatorias

Las limitaciones detectadas en el desarrollo de la GD aparecen ligadas a factores económicos, ya que las plantas distribuidas son plantas con una

capacidad de generación que no superan los 20 MW, por lo tanto, si no existen incentivos por parte del regulador, es muy difícil que puedan competir con las plantas convencionales donde el costo marginal es muy bajo, característica de las economías con alta rentabilidad debido, entre otras características, a su gran tamaño [4].

La figura 4 muestra los costos promedios de inversión necesarios para generar según el tipo de energía primaria utilizada, en esta grafica se puede observar que, en la actualidad, generar energía con paneles solares tienen un precio mayor al 300% comparado con generar con las grandes centrales térmicas o hidroeléctricas. Sin embargo, las experiencias internacionales muestran que las tecnologías limpias, cuando se implementan, son muy costosas por que la eficiencia en la producción es limitada, por eso necesitan para aumentar la producción, políticas públicas que inviertan en Investigación y Desarrollo (I+D), con el fin de aumentar la producción usando energías limpias y este aumento en la producción hace que se aprenda más de la tecnología [3] por lo que los costos de inversión que se proyectan para el 2030 tienen una reducción de hasta 500% (figura 4).



**Figura 4.** Costos promedios de inversión necesarios para generar según el tipo de energía primaria.

Fuente: tomada de [3]

Los países con mayor éxito en el crecimiento del uso de recursos renovables para la generación de electricidad lo han logrado gracias a la implementación de políticas energéticas que incentivan la generación con recursos renovables [4].

En la actualidad, existen dos formas principales en los países europeos de motivar la utilización de recursos renovables para la generación de energía eléctrica: el primero es conocido como “Feed in tariff” o por sus siglas en inglés como REFIT (Renewable Energy Feed in Tariffs). La segunda forma de promover en el mundo la GD es llamado “Quotasystem” o el sistema de cuota y certificados verdes.

La principal ventaja del REFIT es que hay una menor intervención del regulador, puesto que la energía renovable se vende en el mercado spot a través del operador del mercado, o también se puede vender a través de contratos bilaterales al mismo precio del mercado, más bonos adicionales [22].

Las desventajas del REFIT son los periodos de los contratos bilaterales pues son muy extensos, por lo que, en ocasiones, sistemas con alta ineficiencia acarrearán sobrecostos que van en detrimento de un sistema con economía eficiente y la efectividad de esta estructura remunerativa sólo ha sido comprobada en el uso de la generación eólica, energías como la biomasa, solar geotérmica, entre otras, han experimentado crecimientos mínimos debido a que los esquemas de promoción y los procedimientos administrativos no son atractivos a los inversionistas [23].

Aunque tiene tarifas diferenciales para cada energía alternativa, los generadores de energía renovable han manifestado su inconformismo con este valor, debido a que han demostrado que esta prima no refleja el costo real de administración, operación y mantenimiento de todas las variedades de energías renovables, según los ge-

neradores, esto se debe a la falta de actualización de los costos de funcionamiento de nuevas tecnologías que no incluyen la energía eólica [22].

El sistema de certificados verdes tiene como fortaleza el incentivo a la inversión en RET's, dado que los generadores de energía renovable disponen de dos ingresos: la venta de los certificados verdes y la venta de los kWh. Además, los generadores de energía renovable pueden vender su energía en el mercado de corto plazo [24].

Las debilidades principales están relacionadas con el precio del certificado verde ya existe un solo tipo de certificado verde para todas las variedades de generación renovable, por lo que se presentan problemas para el desarrollo de las tecnologías menos maduras donde los costos de inversión inicial suelen ser más altos. Además, debido a que existen dos tipos diferentes de ingresos para los generadores de energía renovable, los procesos de liquidación son más complejos, por lo que se incrementan los costos de transacción [24].

### 3.2 Definición del sistema

Un sistema es un conjunto de elementos relacionados entre sí, de forma tal que, un cambio en un elemento afecta al conjunto de todos ellos [24]. El sistema debe contener el menor número de variables posibles, relacionadas con el problema a resolver. Los límites claros en un sistema usando DS son fundamentales para que la respuesta del modelo tenga mayor validez [11].

Es importante tener en cuenta que la GD en Colombia se desarrolla dentro de un mercado desregulado en el que fluctúan exigencias técnicas, fenómenos climáticos e intereses económicos. Estos factores crean complejidad para evaluar las características óptimas de cualquier reforma regulatoria.

Los sistemas realizados bajo DS son el insumo para crear laboratorios virtuales para evaluar las consecuencias de implementar ciertas políticas regulatorias antes de ser implementadas en un sistema real [25].

Los distintos elementos o variables que intervienen en el sistema pueden clasificarse en exógenas y endógenas [11]. Las variables exógenas sirven para describir aquellos efectos sobre el sistema que son susceptibles de ser modificados desde el exterior del mismo. Representan el medio en que está inmerso el sistema. Las variables endógenas sirven para caracterizar aquellos elementos cuyos comportamientos están completamente determinados por la estructura del sistema.

La tabla 1 muestra la clasificación de las variables en endógenas y exógenas teniendo en cuenta el análisis descrito en el numeral 3.1.

La separación entre las variables que hacen parte del sistema permite mostrar cuáles van hacer las entradas del modelo (exógenas) y cuáles las salidas del mismo (endógenas).

**Tabla 1.** Clasificación de las variables identificadas en el modelo de incentivar la GD en Colombia.

Variables endógenas	Variables exógenas
Generación Distribuida	Impacto ambiental
Incentivos	Generación convencional
Políticas regulatorias	Capacidad de reserva
Seguridad energética	Demanda atendida
Precio de la electricidad Inversión	RET'S

Fuente: elaboración propia

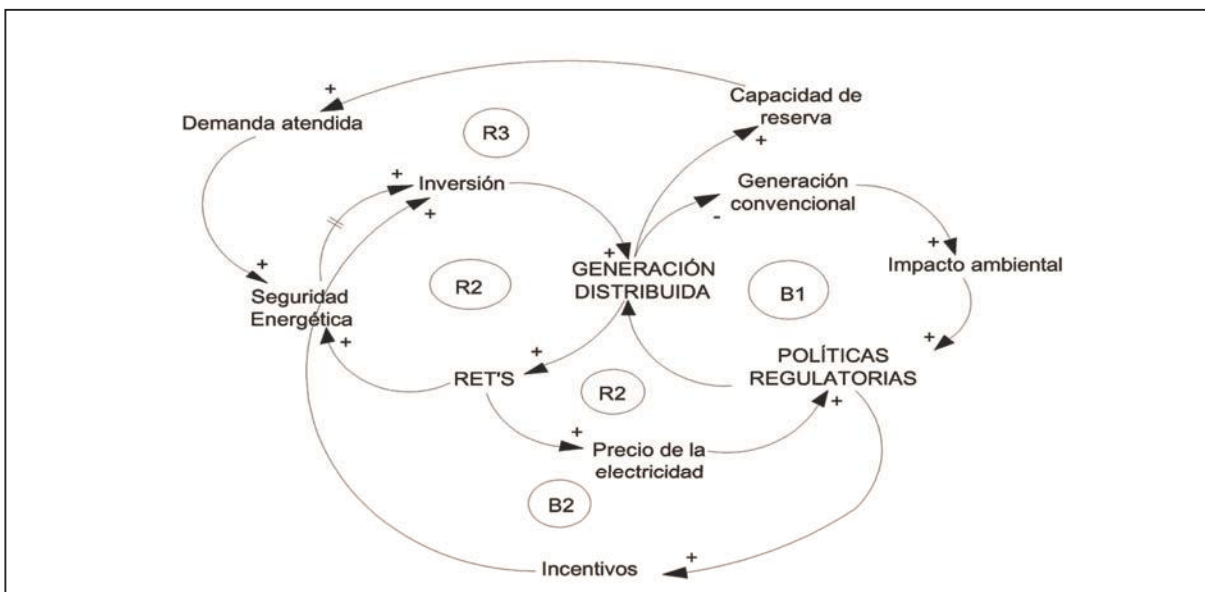
El principal objetivo del modelo es encontrar, bajo diferentes escenarios, los posibles incentivos exitosos que hagan parte de políticas regulatorias claras. Además, las políticas regulatorias en un sistema desregulado deben buscar el equilibrio entre un precio justo para el inversionista en GD y para el usuario, que ve aumentar su confiabilidad y que hace parte de la demanda atendida. La siguiente sección muestra las relaciones causales que dan forma al modelo mental final.

### 3.3 Creación del modelo causal

En esta fase se identifican las relaciones de causalidad que existen entre las variables que forman el sistema [11]. La idea consiste en ilustrar, a través de esquemas causa-efecto, los cambios ocasionados en una variable como efecto de las variaciones producidas en otras variables. Físicamente, un diagrama de influencias es un bosquejo esquemático donde los nombres de los distintos elementos están unidos por flechas [12], las cuales tienen un sentido que indica el tipo de relación, la cual puede ser positiva si las variaciones de los elementos son del mismo sentido y negativa si las variaciones son en sentido contrario.

El problema planteado tiene diversas variables que son tanto cualitativas (impacto ambiental, políticas regulatorias, seguridad energética) como cuantitativas (precio de la electricidad, incentivos monetarios, demanda atendida) y, además, se tienen diversos bucles de retroalimentación debido a que las variables del sistema no son independientes; se puede concluir que el problema tiene las características para ser resuelto a través de la metodología de DS.

El diagrama causal de este estudio está compuesto por cinco bucles principales de realimentación, de los cuales tres son bucles de refuerzo positivo y dos de balance o negativo. La figura 5 muestra el diagrama causal.



**Figura 5.** Diagrama causa-efecto del comportamiento de la GD frente a incentivos regulatorios en los sistemas de energía eléctrica.

**Tabla 2.** Comportamiento dinámico de las variables del modelo mental creado para evaluar políticas regulatorias con el fin de aumentar el uso de GD en Colombia.

Generación Convencional	Las políticas de expansión energética empezaron a contemplar el impacto ambiental, a raíz de que países como EEUU y Japón mostraban que el 40 % de la contaminación ambiental se generaba a raíz de la <b>Generación Convencional</b> de electricidad [21].
Impacto Ambiental	Los proyectos de GD suelen tener un bajo impacto ambiental, con la implementación de una PCH de 400KW se obtuvo una reducción de GEI de 607,4tCO2/año [24].
RET'S	Con la vinculación de las RET's además de disminuir la polución, se puede aumentar la seguridad energética del sistema ya que estas tecnologías están listas para competir con la generación de energía convencional bajo el inconveniente del precio de operación de la energía convencional comparada con las tecnologías de energía renovables [20].
Seguridad energética	La vinculación de las RET's permite aumentar la seguridad energética del sistema a largo plazo con el aumento de la capacidad en generación y a corto plazo con la provisión de servicios de soporte técnico a la red.
Políticas Regulatorias	El esfuerzo del gobierno como ente regulador está en la implementación de políticas, que permitan incentivar la inversión privada y de esta manera quitar barreras para el uso de tecnologías "limpias" [3]. Las políticas regulatorias deben influir directamente en el precio de la electricidad y los incentivos.
Precio de la Electricidad	Las plantas de GD, generalmente son plantas con una capacidad de generación que no superan los 20 MW de generación, por lo tanto el precio de la electricidad es más costoso debido a las economías de escala.
Incentivos	Son fundamentales para el crecimiento de la GD en Colombia. El desafío está en encontrar la mejor manera de motivar y aumentar los agentes generadores distribuidos sin que el usuario final tenga que pagar excesivos costos por este concepto.
Inversión	Al implementar incentivos exitosos que sean producto de políticas regulatorias claras y congruentes con el mercado colombiano. Aumentará gradualmente los agentes generadores que usen plantas distribuidas con RETs.

Fuente: elaboración propia

La tabla 2 muestra la disección conceptual de cada una de las partes que conforma el modelo causal de la figura 5.

#### 4. CONCLUSIONES

La actual preocupación debido al cambio climático, el calentamiento global y la emisión de CO<sub>2</sub> ocasionados por la generación de electricidad, conllevan a buscar alternativas que permitan que se genere electricidad con un mínimo impacto ambiental y con unas emisiones de CO<sub>2</sub> bajas.

La generación de electricidad en Colombia ha disminuido la dependencia a grandes proyectos hidroeléctricos, situación positiva, dado que en periodos de sequía, los precios de la electricidad se aumentan considerablemente. Sin embargo, se ha aumentado la generación con combustibles fósiles, situación negativa porque este tipo de generación, además de afectarse por la volatilidad en los precios de combustible, presenta altos niveles de contaminación ambiental.

La GD aparece como una opción viable para generar energía eléctrica utilizando recursos renovables de forma eficiente, confiable y de calidad. La GD presenta tendencias mundiales para la vinculación al sistema de distribución, en Europa se ha mostrado un gran crecimiento en los últimos años gracias a políticas de regulación e incentivos estatales.

La regulación colombiana no contempla la GD como una actividad presente en la cadena de suministro, debido a que el Código de Redes está vigente desde el año 1998, cuando, a nivel mundial, la generación centralizada era la mejor forma de generar electricidad, sin embargo, este paradigma ha cambiado gracias al desarrollo de equipos y programas de nueva generación en GD, que ofrecen máxima garantía, mínimo mantenimiento y muy bajas emisiones.

Para desarrollar la GD, especialmente utilizando RET's, se requieren incentivos regulatorios. Los incentivos se pueden dar por mecanismos de precio o de cantidad. Las experiencias de los países europeos muestran fortalezas y debilidades en cada mecanismo, por lo que no existe una verdad absoluta sobre el mejor de ellos, todo depende de las características técnicas, económicas políticas, ambientales y sociales del sistema de potencia donde va a ser implementado.

La simulación de las diferentes alternativas con datos propios del sistema eléctrico de potencia colombiano puede permitir crear alternativas de experimentación antes de ser implementadas en el mundo real. La DS es una metodología de investigación basada en la simulación, que permite crear modelos de gestión en los que se puede básicamente establecer qué alternativa es mejor que otra en un entorno específico.

En esta investigación se encuentran las relaciones existentes entre las diferentes variables del sistema dinámico planteado, el éxito del modelo final dependerá de contar, en su momento, con datos reales que permitan un mayor acercamiento desde el modelo al mundo real.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el semillero adscrito al grupo de investigación GRED y P de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, llamado: "Modelo causal o mental de un mercado de energía eléctrica bajo escenarios técnicos, económicos y regulatorios". Los autores agradecen a cada uno de los integrantes del semillero y a la Dirección de Investigación de Manizales (DIMA) por su colaboración y respaldo en este proceso.

## Referencias

- [1] S. Stoft, "Power system economics: Designing markets for electricity", *IEEE Wiley Interscience*, 2002.
- [2] T. Ackermann, G. Andersson and L. Soder, "Distributed generation: a definition, En: *Electric Power System Research*", 71, pp.119 – 128, 2004.
- [3] International Energy Agency, *Contribution of renewables to energy security*, IEA, Paris, 2007.
- [4] International Energy Agency, *Security of supply in electricity markets: Evidence and policy issues*, IEA, Paris, 2002.
- [5] I. Dyner, C. Franco y S. Arango, *El mercado mayorista de electricidad Colombiano*, Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [6] Congreso de la República de Colombia, *Ley 143 de 1994-Ley eléctrica*, Bogotá, 1994.
- [7] CREG, *Resolución CREG 025 de 1995*, "Código de Redes, Código de Planeamiento de la Expansión del Sistema de Transmisión Nacional", 1995.
- [8] XM\_ Expertos en Mercados, *Informe de Operación del Sistema y Administración del Mercado*, 2010.
- [9] H. Rodríguez, *La Generación Distribuida y su Posible Integración al Sistema Interconectado Nacional*, [Taller sobre Generación Distribuida], CREG, 2009.
- [10] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA - UPME, *Plan de Expansión de Referencia: Generación- Transmisión 2008-2022*.
- [11] J. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw Hill, 2000.
- [12] J. García, *Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas*, Barcelona, 2003.
- [13] T. Yi and G. Xiao. "Applying system dynamics to analyze the impact of incentive factors allocation on construction cost and risk", *IEEE*, 71, p.680, 2008.
- [14] M. Adibi, "Power system restoration\_ Methodologies & Implementation strategies", *IEEE press series on power engineering*, 2000.
- [15] F. Viawan and D. Karlsson, "Coordinated Voltage and Reactive Power Control in the Presence of Distributed Generation", *Power and Energy Society General Meeting. Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp 1-6.
- [16] Z. M. Yasin and T. K. Abdul, "Service Restoration in Distribution Network with Distributed Generation", in *Student Conference on Research and Development*, Selangor, Malaysia, Jun. 2006.
- [17] G. Li, Z. Zhang, X. Li, S. Wang and M. Zhou, "A Methodology for Power Quality Evaluation in Distribution Network with Distributed Generation", in *Critical Infrastructure, 2010 5th International Conference*, Beijing, China, Nov. 2010.
- [18] A. Bracale, P. Caramia, G. Carpinelli, A. Russo and P. Verde, "Site and System Indices for Power-Quality Characterization of Distribution Networks With Distributed Generation" *IEEE Transactions on Power*

- Delivery*, Vol. 26, No. 3, pp. 1304-1316, Jul. 2011.
- [19] P. P. Barker and R. W. de Mello, "Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems", in *Power Engineering Society Summer Meeting*, Schenectady, NY, Jul. 2000.
- [20] F. P. Sioshansi, *Integrating Renewable, Distributed, & Efficient Energy*, Academic Press, 2010.
- [21] Iberdrola Renovables S.A., "Iberdrola renovables logra un récord histórico de producción eólica en Estados Unidos durante el segundo trimestre de 2010". 2011, [Online], Available: <http://www.iberdrola.es/>
- [22] T. Couture and Y. Gagnon, "An analysis of feed-in tariff remuneration models: Implications for renewable energy investment", *Energy Policy*, Vol. 38, No. 2, pp. 955-965, Feb., 2010.
- [23] B. Pierre, N. Long and C. Steger, "Designing Feed-in Tariff Policies to Scale Clean Distributed Generation in the U.S", *The Electricity Journal*, Vol. 24, No. 3, pp. 52-58, April, 2011.
- [24] M. Ringel, "Fostering the use of renewable energies in the European Union: the race between feed-in tariffs and green certificates", *Renewable Energy*, Vol. 31, No. 1, pp. 1- 17, Jan., 2006.
- [25] H. Andrade, I. Dynner, A. Espinosa, H. López, y R. Sotaquirá, "Pensamiento Sistémico: Diversidad en búsqueda de Unidad", ISBN 958-9318-78-9. Ediciones Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga – Colombia, 2001.