



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Una aproximación a la adopción de medidores inteligentes en el mercado eléctrico colombiano y su influencia en la demanda

Natalia Castaño Jaramillo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de minas, Escuela de Sistemas
Medellín, Colombia

2013

Una aproximación a la adopción de medidores inteligentes en el mercado eléctrico colombiano y su influencia en la demanda

Natalia Castaño Jaramillo

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería de Sistemas

Director:

Ph.D, Carlos Jaime Franco Cardona

Línea de Investigación:

Investigación de Operaciones: Dinámica de Sistemas

Grupo de Investigación:

Grupo de investigación en Sistemas e Informática

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de minas, Escuela de Sistemas
Medellín, Colombia

2013

Agradecimientos

A Dios por la fortaleza que me brinda para afrontar cada día los obstáculos que se me presentan y cumplir cada una de mis metas propuestas.

Por su apoyo incondicional agradezco a mi familia, la cual ha sido un pilar fundamental en mi vida y en el logro de mis objetivos.

A mi director de tesis Carlos Jaime Franco Cardona, que siempre estuvo dirigiendo mi trabajo y ayudando con todo su conocimiento y paciencia.

A mis amigos y a todas aquellas personas que me brindaron conocimiento y fortaleza, que creyeron en mí y me ayudaron a crecer tanto en el campo académico como personal.

Una aproximación a la adopción de medidores inteligentes en el mercado eléctrico colombiano y su influencia en la demanda

Resumen

La creciente demanda de electricidad y los elevados picos en la curva de carga hacen necesarias fuertes inversiones en infraestructura para poder suplir las necesidades de los usuarios en los cortos periodos de tiempo en los que se dan, lo que conlleva a que se deba tener gran capacidad instalada solo para periodos cortos del día. Es por esto que se deben buscar opciones y nuevos desarrollos que permitan suplir satisfactoriamente estas necesidades y que se utilicen los recursos del sistema eficientemente. Debido a esto nacen las Redes Eléctricas Inteligentes como un enfoque para mejorar las condiciones actuales del sistema y brindar a los usuarios mayor autonomía en la cadena de suministro. El foco de esta investigación son los hogares, ya que estos pueden monitorear se demanda y mover una parte de esta lo cual ayuda a reducir los picos de la curva de carga. Para poder hacer esto los usuarios deben usar medidores inteligentes, por medio de los cuales se puede medir y controlar su demanda horaria. Dado lo anterior se desea estudiar el posible comportamiento de los usuarios ante la entrada de los medidores inteligentes en el sistema eléctrico colombiano y evaluar cómo sería el cambio en la curva de carga con los cambios en los hábitos de consumo de los hogares.

Palabras clave: Curva de carga, Dinámica de sistemas, Dispositivos inteligentes, DSM, pico de demanda, Redes Eléctricas Inteligentes, consumidor.

An approach to the smart meters adoption in the Colombian electricity market and its influence on demand

Abstract

The high growth in electricity demand and the peaks in the load curve make it necessary to make big investments in infrastructure in order to meet the needs of users, which causes the necessity of capacity for short periods of time. This is why it is necessary to look for new developments that allow meeting the needs of users as well as using the electricity system resources efficiently. This is why we have researched Smart Grid (SG), which is an approach to improve conditions of the current system and to allow for users to have autonomy in the electricity supply chain. The focus of this research is households, because they can monitor their demand and move a part of this which helps to reduce the load curve peaks. To do this, users must use smart meters, through which it is possible to measure and control the hourly demand. Based on the aforementioned, the possible user's behavior with Smart meters implementation in the Colombian electricity system will be studied and the change in the load curve given by habits change by household will be evaluated.

Keywords: Consumer, Demand Side Management (DSM), load curve, smart devices, Smart Grid, System Dynamics, Peak demand.

Contenido

	Pág.
Introducción	1
1. Justificación.....	5
2. Mercado eléctrico colombiano	9
3. Redes Eléctricas Inteligentes (REI).....	13
3.1 Dispositivos Inteligentes.....	14
3.2 Respuesta de la demanda (DR)	16
3.3 Medidores Inteligentes	17
4. Estado del arte.....	19
4.1 Revisión de literatura	19
4.2 Implementación de las redes eléctricas inteligentes (REI) en Colombia	20
4.3 Demanda de electricidad	21
4.4 Comportamiento del consumidor	22
4.5 Tecnologías de las REI que se instalan en los hogares	23
4.6 OBJETIVOS	24
Objetivo General	24
Objetivos Específicos.....	24
5. Metodología.....	25
5.1 Elección de la metodología	26
5.2 Otras Metodologías.....	28
6. Descripción del modelo.....	31
6.1 Sub-modelo de despacho de electricidad	32
6.2 Sub-modelo de penetración de medidores inteligentes	38
6.3 Sub-modelo de cambio de demanda.....	43
6.4 Especificaciones del modelo.....	46
7. Validación del modelo	49
7.1 Pruebas directas sobre la estructura	50
7.2 Pruebas de comportamiento orientadas a la estructura	51
7.3 Validación del comportamiento.....	52
8. Escenario base	53

Una aproximación a la adopción de medidores inteligentes en el mercado eléctrico colombiano y su influencia en la demanda

9. Definición y análisis de políticas	57
9.1 Medición y cobro del consumo de energía eléctrica de manera horaria.	58
9.2 Incentivos económicos en el precio del medidor.....	60
10. Conclusiones	65
10.1 Difusión del trabajo	68
A. Anexo1: Pruebas de condiciones extremas	69
B. Anexo2: Análisis de sensibilidad	71
C. Anexo3: Ecuaciones del modelo de dinámica de Sistemas	79
Referencias	85

Lista de figuras

	Pág.
Figura 0-1: Demanda diaria de electricidad (XM, 2007).	2
Figura 2-1: Participación de Combustible en la Capacidad Efectiva de Generación – 2010(UPME, 2011)	10
Figura 2-2: Demanda acumulada anual a diciembre de 2009(XM, 2009).....	10
Figura 6-1: Dinámica entre sub-modelos	31
Figura 6-2: Despacho de energía eléctrica	32
Figura 6-3: Diagrama Causal – Sub-modelo de despacho.....	33
Figura 6-4: Diagrama causal – Embalse	33
Figura 6-5: Ciclo de balance B1 – Precio de electricidad e inversiones en capacidad 34	
Figura 6-6: Ciclo de balance B2 - Demanda	34
Figura 6-7: Ciclo de balance B3 - Generación Hidro	35
Figura 6-8: Ciclo de balance B4 - Vertimientos.....	35
Figura 6-9: Diagrama de Flujos y Niveles - Expansión de Capacidad de Generación 36	
Figura 6-10: Diagrama de Flujos y Niveles - Embalse.....	37
Figura 6-11: Diagrama de Flujos y Niveles - Despacho	38
Figura 6-12: Adopción de medidores inteligentes.....	39
Figura 6-13: Diagrama Causal – Sub-modelo de penetración de medidores inteligentes 39	
Figura 6-14: Ciclo de Refuerzo R1 - Adopción por publicidad Boca a Boca.....	40
Figura 6-15: Ciclo de Refuerzo R2 - Adopción por ahorro.....	40
Figura 6-16: Ciclos de Balance B5-B6 - Adoptadores potenciales - Adopción Boca a Boca 41	
Figura 6-17: Ciclo de Balance B7 - Adopción por publicidad	41
Figura 6-18: Diagrama de Flujos y Niveles - Ahorro	42
Figura 6-19: Diagrama de Flujos y Niveles - Adopción de Medidores Inteligentes.....	43
Figura 6-20: Diagrama Causal–Sub-modelo de cambio de demanda	44
Figura 6-21: Cambio en la demanda.....	45
Figura 6-22: Diagrama de Flujos y Niveles - Cambio en la demanda	46
Figura 7-1: Proceso de validación. (Barlas, 1996).....	50
Figura 8-1: Despacho de electricidad.....	54
Figura 8-2: Evolución en la capacidad instalada.....	55
Figura 8-3: Curva de carga de referencia (Elaboración propia).	55
Figura 9-1: Escenarios en el análisis de políticas	57

Una aproximación a la adopción de medidores inteligentes en el mercado eléctrico colombiano y su influencia en la demanda

Figura 9-2:	Adoptadores medidores inteligentes - Escenario de cobro horario	59
Figura 9-3:	Curva de carga Escenario base Vs curva de carga Escenario de cobro horario	60
Figura 9-4:	Adoptadores medidores inteligentes en el Escenario de cobro horario Vs. Adoptadores medidores inteligentes en el Escenario de incentivo económico en el precio del medidor.	61
Figura 9-5:	Curva de carga Escenario base Vs curva de carga Escenario de incentivo económico en el precio del medidor.....	62
Figura 9-6:	Margen entre capacidad instalada y demanda máxima de potencia para los escenarios analizados	63
Figura 10-1.	Despacho de electricidad con demanda en cero	69
Figura 10-2.	Adopción de medidores inteligentes con demanda en cero	70
Figura 10-3.	Adopción de medidores inteligentes con costo de la electricidad muy bajo.	70
Figura 10-4.	Adoptadores medidores inteligentes Escenario 1 Vs. Disminución en precio de 10%	72
Figura 10-5.	Adoptadores medidores inteligentes Escenario de cobro horario Vs. Aumento en precio en 10%	72
Figura 10-6.	Curva de carga Escenario de cobro horario Vs. Cambios en el precio del medidor	73
Figura 10-7.	Adoptadores medidores inteligentes Escenario de cobro horario Vs. cambios en la tasa de imitadores.....	74
Figura 10-8.	Curva de carga Escenario de cobro horario Vs. cambios en la tasa de imitadores.....	75
Figura 10-9.	Adoptadores medidores inteligentes Escenario Cobro horario Vs. cambios en la tasa de descuento.....	76
Figura 10-10.	Curva de carga Escenario 1 Vs. cambios en la tasa de descuento	77

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Proyectos de generación asignados por subastas (Ossa López, 2012).	11
Tabla 3-1: Redes Eléctricas Inteligentes Vs. Red actual (Farhangi, 2010).....	14
Tabla 4-1. Fases mapa de referencia para implementación de REI(Aldana et al., 2011)	20

Introducción

El Mercado Mayorista de Energía Eléctrica colombiano se creó gracias a las leyes 142 y 143 de 1994 (Colombia, 1994a, 1994b), por medio de las cuales se incentivó la inversión privada y la competencia, terminando con el monopolio que se tenía (Franco, 2002). Sin embargo y debido al alto impacto que la electricidad tiene en la sociedad, esta es un tema que está en constante desarrollo.

A pesar de esta liberalización la evolución de la red eléctrica no va a la par con las necesidades de la sociedad, esta se está volviendo obsoleta rápidamente, y la necesidad de realizarle mantenimiento y actualización es cada vez más visible (Werbos, 2011).

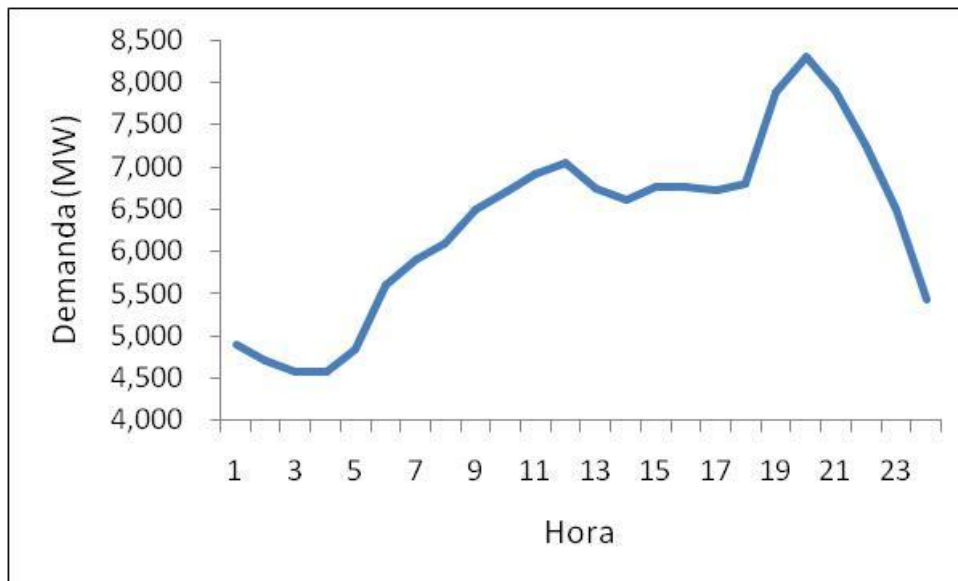
Las exigencias de los consumidores son cada vez mayores, el consumo de los mismos aumenta y estos buscan maneras de consumir eficientemente y servicios e innovaciones que les ayuden en esta tarea (Harris, 2009).

Adicionalmente se tienen preocupaciones ambientales debido a ineficiencias en la infraestructura actual, emisiones causadas por la generación de electricidad y el hecho de que las plantas a carbón son consideradas la mayor fuente de emisiones (U.S. Department of Energy, 2011). Lo anterior sumado al hecho de que la demanda de energía sigue en aumento constantemente y la capacidad de generarla y distribuirla aumenta a un ritmo mucho más lento (Lui, Stirling, & Marcy, 2010) muestran que la red actual de electricidad necesita nuevos desarrollos.

Esta problemática de la demanda cambiante y los elevados picos en la curva de carga de electricidad requieren fuertes inversiones en infraestructuras para poder suplir las necesidades de los usuarios en los cortos periodos de tiempo en los que se dan, lo que conlleva a que se deba tener gran capacidad instalada solo para periodos cortos del día (Farhangi, 2010).

Por esto se hace necesario que los consumidores (usuarios) y la industria de electricidad trabajen conjuntamente para así lograr reducir la demanda diaria de energía en las horas en que se presentan los picos (Figura 0-1), siendo estas horas en las que la electricidad presenta mayores costos y se utilizan tecnologías menos eficientes y ambientalmente sucias.

Figura 0-1: Demanda diaria de electricidad (XM, 2007).



Esta situación obliga a la búsqueda de opciones y nuevos desarrollos que permitan suplir satisfactoriamente las necesidades de los usuarios pero de manera que se utilicen los recursos del sistema de la forma más eficiente posible. Hoy en día se están realizando esfuerzos para tratar de encontrar soluciones innovadoras a la creciente demanda y para atender las necesidades actuales y las que se podrían tener (Garrity, 2008).

Con el objetivo de afrontar esta problemática nacen las Redes Eléctricas Inteligentes (REI), como un enfoque para mejorar las condiciones actuales del sistema, hacer uso eficiente de todos los recursos disponibles y brindar a los usuarios mayor información y autonomía en la cadena de suministro de electricidad.

Para poder utilizar todas las mejoras que brindan las REI es necesaria la implementación de nuevas tecnologías y metodologías que permitan una buena administración de los recursos del sistema y, a su vez, una satisfacción completa de las exigencias del usuario.

Desde el lado de la demanda una de las principales mejoras que se presentan es el cobro de la energía eléctrica de manera horaria y así se incentiva a los usuarios a mermar el consumo en las horas en las que se tiene mayores costos. Para que esto sea posible se deben utilizar medidores inteligentes los cuales permiten que se realice la medición de manera horaria, ya que los medidores convencionales no permiten esto y por medio de esta nueva tecnología los hogares puedan administrar de manera eficiente su consumo, ya que estos podrían tener información de consumos y precios de electricidad lo que les permite un mayor control.

Para el caso colombiano se tiene que los medidores inteligentes no se han implementado, por lo que se desea estudiar cómo sería la penetración de estos al sistema eléctrico y como serían los cambios en la curva de carga con la entrada de los mismos, lo cual es el objetivo de esta tesis.

Luego de realizar la revisión de literatura se vio la necesidad de desarrollar una herramienta por medio de la cual se pueda estudiar cómo sería el cambio en la curva de carga del sistema eléctrico colombiano con la entrada de los medidores inteligentes. Para lograr esto se desarrolló un modelo de Dinámica de Sistemas que permite analizar el cambio en la curva de carga gracias a la entrada de medidores inteligentes al sistema eléctrico.

Una corta descripción del mercado eléctrico colombiano y sus características se plantea en el Capítulo 2. En el Capítulo 3 se tiene la justificación de la investigación y en el Capítulo 4 se define que son las redes eléctricas inteligentes y sus principales características.

En el Capítulo 5 se presenta la revisión de literatura realizada y se exponen falencias y la necesidad de una herramienta que permita analizar cómo se puede modificar la curva de carga del sistema eléctrico, herramienta que es el principal aporte de esta tesis y que

tiene como objetivo comprender el comportamiento del sistema, mas no pronosticar como sería el futuro del sistema eléctrico con la entrada de los medidores inteligentes.

En el Capítulo 6 se especifica la metodología utilizada. El modelo desarrollado y su validación son presentados en los Capítulos 7 y 8 respectivamente, seguidos del Escenario base presentado en el Capítulo 9.

El análisis de políticas es mostrado en el Capítulo 10, en el cual se definen diferentes políticas por medio de las cuales se desea identificar los posibles efectos de estas y así poder tener una referencia para la toma de decisiones.

Por último se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.

1. Justificación

A lo largo de más de 100 años la red eléctrica ha evolucionado, esta fue construida para trabajar de manera eficiente, pero nuevos desafíos y grandes avances técnicos exigen nuevas ideas y acciones para mejorar el rendimiento de la misma (Hammons, 2008).

La red ha servido bien en la actualidad pero no es adecuada para las exigencias en el futuro, ya que esta debe permitir seguridad del suministro y tomar ventaja de las nuevas tecnologías (European Commission, 2006). Esto muestra que la red eléctrica se está volviendo obsoleta y la necesidad de realizar mantenimiento y mejoras a esta es cada vez más visible. A su vez la industria reconoce muchas más necesidades, como lo son el uso de medidores eléctricos automáticos, sensores y sistemas de comunicación para permitir conocer el estado del sistema (Werbos, 2011).

Otro aspecto a tomar en cuenta, y que muestra aún más la necesidad de cambio, es que la red actual es unidireccional, convierte solo 1/3 de combustible en energía y aproximadamente el 20% de la capacidad instalada solo se utiliza para cubrir el pico de demanda (Solo se usa el 5% del tiempo) (Farhangi, 2010).

Sumado a esto se tiene que como en muchos lugares, como por ejemplo en EE.UU, el 25% de la generación de energía y el 10% de los activos de distribución están asociados a la generación durante las horas pico (cerca de 400 horas anualmente), por lo que esta capacidad representa cientos de millones de dólares en inversión que se utiliza muy pocas horas (Lui et al., 2010).

Es por esto que se deben estudiar planes y métodos para afrontar dichas necesidades de manera eficiente y poder suplir la demanda de electricidad, la cual sigue en aumento constantemente y la capacidad de generarla y distribuirla aumenta a un ritmo mucho más lento (Lui et al., 2010).

Adicional a las necesidades de cambio ya mencionadas se tiene que el costo de la electricidad ha tenido variaciones sustanciales para cada hora del día, pero los consumidores usualmente pagan el mismo precio por esta sin importar la hora del día en la que consumieron, a esto se suma que los medidores que poseen los hogares actualmente no permiten que se diferencie cuanto consume el usuario en cada hora, solo permiten saber el consumo que se tiene en el momento de la medida. Esto es algo que se espera cambie y que permita a los consumidores comprar más electricidad en momentos en los que esta es menos costosa (Werbos, 2011).

Para que esto sea posible y los consumidores puedan obtener información sobre los precios de la electricidad de manera horaria y que la medición del consumo también se realice de manera horaria se deben realizar cambios y mejoras en el sistema eléctrico, los cuales van encaminados a las metodologías y nuevos enfoques que brinda las Redes Eléctricas Inteligentes.

Para que el diseño de las REI pueda brindar todas las mejoras al sistema eléctrico, en especial a todo lo relacionado con la parte de la demanda y la medición y cobro de manera horaria, es necesaria la penetración y adición al sistema de tecnologías avanzadas tales como medidores inteligentes, electrodomésticos inteligentes y otros dispositivos (O' Malley, Wu, & Jenkins, 2010; Saffre & Gedge, 2010), por medio de los cuales se pueda obtener información, monitorear y tener un control completo y en tiempo real del estado actual del sistema, los consumos propios, los precios horarios de la energía eléctrica, entre otros, lo que permite tener un consumo de manera más eficiente, la optimización del uso de las redes de suministro de electricidad, una mayor estabilidad y control sobre el sistema, una administración total de los recursos y la toma de decisiones por parte de los usuarios que le permita autonomía sobre sus facturas, reducciones en los costos de las mismas y ayudar a reducir los picos de demanda en las horas en los que se presentan (Cecati, Mokryani, Piccolo, & Siano, 2010).

Para que los usuarios puedan tener dicha autonomía es necesario que cambien los antiguos medidores por medidores inteligentes, por medio de los cuales se les podrá realizar la medición de su consumo de manera horaria y adicionalmente podrán tener

acceso a toda la información relacionada con su consumo de energía eléctrica y los costos de la misma, la cual es necesaria para la toma de decisiones, para tener control del mismo y obtener beneficios reduciendo el costo de sus tarifas de electricidad.

Esta medición horaria se considera una de las maneras más oportuna de reducir el uso de la capacidad en las horas pico, ya que se dará al consumidor señales de precio para comunicarles el verdadero costo de su consumo (Faruqui, Harris, & Hledik, 2010).

Se espera que recibiendo toda la información relacionada con su consumo y los costos del mismo, el consumidor cambiará su comportamiento de consumo variando ciertos patrones en su demanda, mitigar costos y ahorrar en sus facturas (Collier, 2010; Sianaki, Hussain, Dillon, & Tabesh, 2010).

Por medio de esta información los consumidores responderán reduciendo su demanda eléctrica en las horas pico, ya que en estas horas se presentan mayores costos (Faruqui et al., 2010; Sianaki, Hussain, Dillon, et al., 2010). Esta realimentación (información sobre su consumo) puede dar como resultado un 9% de reducción en el consumo de energía eléctrica en los hogares (Hauttekeete, Stragier, Haerick, & De Marez, 2010; Stragier, Hauttekeete, & Marez, 2010) y una reducción en la demanda de entre 10-20% en los periodos de demanda pico (Chassin, 2010; Vojdani, 2008).

Cuando los usuarios tienen acceso a la información sobre su consumo de energía eléctrica y el precio de la misma, tienen más probabilidades de cambiar una parte de su demanda para periodos en los que se tengan precios más bajos y así poder obtener ahorros por medio de rebajas en sus facturas (Ajaja, 2010), por lo que se espera que el resultado sea que la altura de los picos y la profundidad de los valles en los perfiles de demanda serán reducidos (Moshari, Yousefi, Ebrahimi, & Haghbin, 2010).

Resultados publicados por el Departamento de Energía de EE.UU. (DOE) en el 2008 permiten llegar a la conclusión que cuando a los consumidores se les da acceso a toda la información y los medios necesarios para realizar seguimiento y ajustar su consumo de energía eléctrica, el consumo merma en promedio 10% en total y se obtiene una reducción de un 15% en los periodos de demanda máxima (demanda en las horas pico) (Vojdani, 2008).

Es por esto que se desea estudiar y entender cómo sería el comportamiento de los consumidores con la penetración de los medidores inteligentes en el sistema eléctrico colombiano y evaluar que tanto la entrada de los mismos puede hacer que la curva de carga tenga variaciones y que sus picos sean inferiores.

Para lograr esto se desarrolló un modelo de Dinámica de Sistemas que permite observar cómo sería la entrada de los medidores inteligentes y el cambio en la curva de carga. Adicionalmente se desea evaluar diferentes políticas que permitan observar cambios en el sistema por medio de cambios en diferentes variables involucradas en el proceso.

A continuación se describe brevemente el sistema eléctrico colombiano para luego presentar el concepto de Redes Eléctricas Inteligentes y las mejoras que estas pueden traer al sistema eléctrico.

2. Mercado eléctrico colombiano

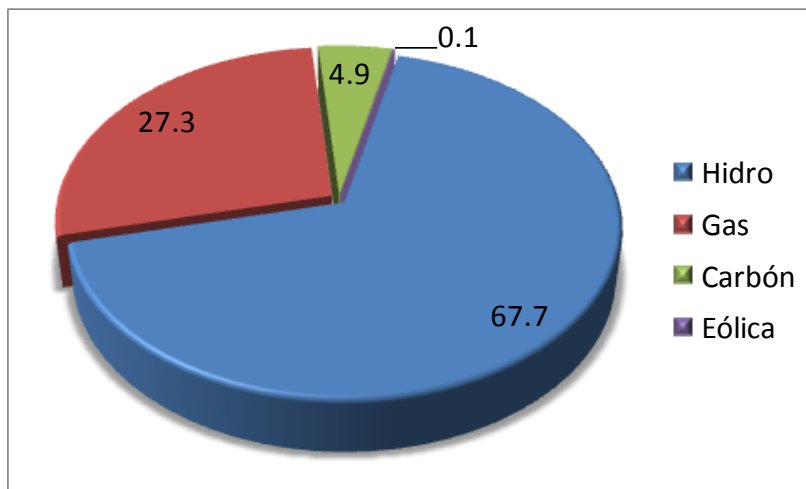
El sector eléctrico colombiano ha tenido grandes sucesos, entre los más representativos está la creación del Mercado Mayorista de Energía Eléctrica, el cual nació con la implantación de las leyes 142 y 143 de 1994 (Colombia, 1994a, 1994b), las cuales se crearon con el objetivo de lograr eficiencia en la prestación del servicio de electricidad y la liberación del mismo para permitir la libre competencia y la entrada de entes privados (Franco, 2002; UPME, 2004). Una de las razones por las cuales nace esta iniciativa es atraer inversión privada para suplir la necesidad de incrementar la capacidad instalada en el sistema y evitar apagones (en 1983 y 1992-1993 se habían afrontado dos fuertes apagones) (Ochoa, 2010).

Actualmente y gracias a esta desregulación, las actividades del mercado eléctrico (generación, transmisión, distribución y comercialización) están separadas para así evitar prácticas indebidas y monopolios (UPME, 2004).

El mercado de energía nació en julio de 1995, con la entrada en funcionamiento de la bolsa de energía y adicionalmente se crearon entes para regular y administrar el mercado. La CREG, Comisión de Regulación de Energía y Gas, es la entidad encargada de toda la parte regulatoria del mercado (CREG, 2012).

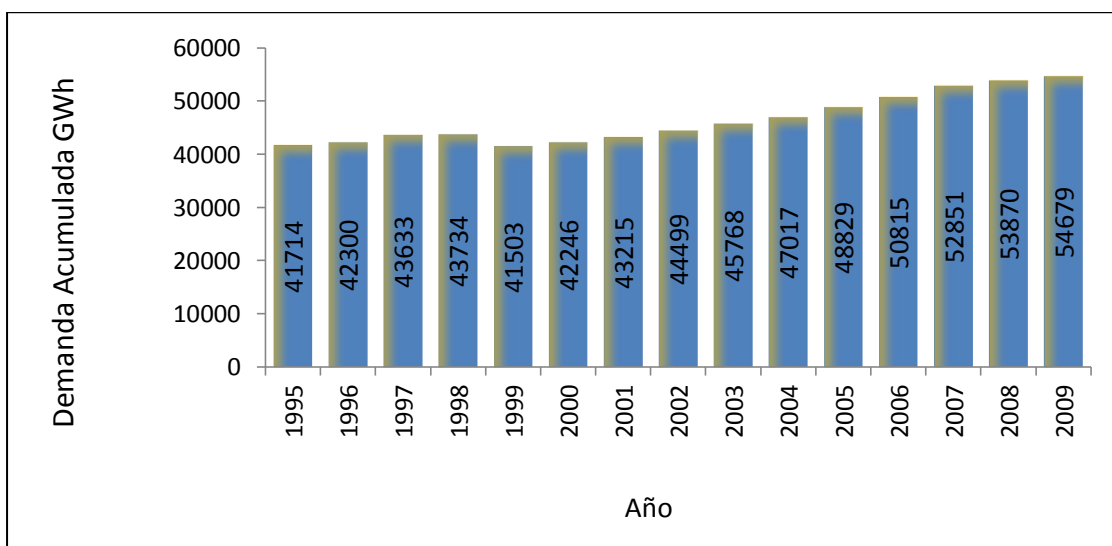
Actualmente Colombia cuenta con una capacidad efectiva neta de 13,289.5 MW hasta diciembre de 2010 (XM, 2010) y gracias a los altos recursos hídricos que posee y su gran potencial hidroeléctrico, la capacidad instalada de generación es en su mayoría por medio de este recurso, seguida de tecnologías como carbón y gas. En la Figura 2-1 se puede observar la participación de cada combustible utilizado para la generación de energía eléctrica.

Figura 2-1: Participación de Combustible en la Capacidad Efectiva de Generación – 2010(UPME, 2011)



Desde la creación del mercado se ha tenido un crecimiento de la demanda de manera variable(UPME, 2004), la cual puede observarse en la Figura 2-2. Esta ha sido atendida satisfactoriamente y gracias a este crecimiento se han impulsado grandes proyectos para aumentar la capacidad instalada de generación de energía eléctrica en el sistema.

Figura 2-2: Demanda acumulada anual a diciembre de 2009(XM, 2009)



Para el año 2009 se tuvo un consumo de energía de 45.783 GWh, de los cuales 59.2% fue por parte del sector no residencial para un total de 27.114, y un 40.8% para el sector residencial, con un consumo de 18.669 GWh(Nacional, Bariloche, & Energética, 2010).

La demanda de energía eléctrica ha presentado continuos incrementos, estos incrementos han sido aproximadamente de 17.4% en los últimos 7 años y se espera que esta cifra siga amentando y se obtenga una demanda de aproximadamente 110.000GWh para el 2031 (UPME, 2010).

Para poder suplir la demanda de energía eléctrica y hacer frente a estos incrementos en la misma se necesita la construcción de nuevas centrales de generación, las cuales buscan aumentar la capacidad instalada en el sistema a largo plazo. Este aumento en la capacidad de generación viene ligado al concepto de Obligación de Energía Firme (OEF), el cual representa el compromiso que tienen algunos generadores para producir energía firme durante condiciones críticas del sistema (Ossa López, 2012).

Para determinar la energía necesaria a largo plazo se realizan proyecciones y las OEF se distribuyen entre los agentes generadores por medio de subastas y los agentes que las obtienen reciben remuneraciones y estos se comprometen a entregar la energía que se definió en la subasta cuando sea necesario (Ossa López, 2012).

Los nuevos proyectos de generación resultantes de las subastas son presentados en laTabla 2-1, en la cual se muestra por año y tecnología la capacidad que ingresa al sistema:

Tabla 2-1: Proyectos de generación asignados por subastas (Ossa López, 2012).

Año entrada	Recurso	Capacidad (MW)
2012	Carbón	150
	Hidro	78
2014	Hidro	1811.5
2015	Carbón	410
	Hidro	165
2018	Hidro	1552

Después de describir brevemente el mercado eléctrico colombiano y algunas de las necesidades que este posee actualmente, se hace indispensable la búsqueda de nuevos desarrollos y soluciones que permitan suplir estas necesidades y que a su vez posibiliten la actualización y mejora del sistema. Para esto se definen las Redes Eléctricas Inteligentes, las cuales son presentadas en el capítulo siguiente.

3.Redes Eléctricas Inteligentes (REI)

Las Redes Eléctricas Inteligentes son la colección de tecnologías, conceptos y metodologías, que permite a toda la cadena de electricidad (generación, transmisión, distribución y consumo) ser reemplazada por un ambiente integrado totalmente, donde los recursos del sistema son utilizados de una manera más eficiente y en donde los procesos de negocio, objetivos y necesidades de todos son suplidos (Farhangi, 2010).

Esta es una red eléctrica que puede integrar inteligentemente las acciones de los usuarios conectados, con el objetivo de entregar electricidad de manera eficiente, económica y segura (Harris, 2009).

Este concepto nace con el objetivo de actualizar la red de electricidad, mejorar la fiabilidad del suministro y poder tener una respuesta rápida ante desastres naturales o daños al sistema (Rahimi & Ipekchi, 2010).

Entre los beneficios que puede traer las REI se tiene (Harris, 2009):

- Más facilidad de conexión y operación para los generadores de todos los tamaños y tecnologías.
- Permitir a los consumidores ser entes activos en el mercado de energía eléctrica y poder jugar un papel importante en la optimización de la operación del sistema y en la seguridad de toda la red.
- Proveer a los consumidores con toda la información y las opciones necesarias que les permitan conocer su estado de consumo actual y tomar decisiones sobre el mismo y sobre sus facturas.
- Ayudar a reducir el impacto ambiental que ocasiona la red eléctrica, por medio de la adición de generación distribuida y nuevas tecnologías y herramientas más limpias y eficientes.

A su vez las Redes Eléctricas Inteligentes presentan oportunidades para la automatización, recolección de datos y control por medio de aplicaciones inteligentes, con las cuales se logrará mejorar la eficiencia y permitir que la generación distribuida se pueda integrar al sistema con más facilidad (Rahman, 2009).

En la Tabla 3-1 se presentan las mejoras que las Redes Eléctricas Inteligentes poseen en comparación con la red actual.

Tabla 3-1: Redes Eléctricas Inteligentes Vs. Red actual (Farhangi, 2010)

Red Actual	Redes Eléctricas Inteligentes (REI)
Electromecánica	Digital
Comunicaciones de una sola vía	Comunicaciones de dos vías
Generación centralizada	Generación distribuida
Pocos sensores	Sensores en toda la red
Control limitado	Control generalizado
Restauración manual	Auto-sanable
Fallas y apagones	Adaptativa y separada por áreas
Pocas opciones al consumidor	Muchas opciones al consumidor

Según cifras de los EE.UU. si se llegara a un 100% en la penetración de las tecnologías de las REI, esto podría llevar a una reducción de un 18% en las emisiones de dióxido de carbono para el año 2030. Adicionalmente se ha estimado que si la red eléctrica fuera un 5% más eficiente, este aumento en la eficiencia lograría que el equivalente de 42 plantas térmicas a carbón en los EE.UU. fueran desplazadas, lo que traería beneficios para todo el sistema y toda la comunidad (Hamilton & Summy, 2011).

3.1 Dispositivos Inteligentes

Para que las Redes Eléctricas Inteligentes puedan brindar a la sociedad todos los beneficios propuestos desde el lado de la demanda se hace necesaria la implementación de nuevas tecnologías y estándares, entre los cuales están (Rahman, 2009):

- Lectura automática de contadores (AMR): este es uno de los pasos más representativos para la implementación de las REI desde el lado de la demanda y el cual permitirá que el consumo de los usuarios sea leído remotamente, lo que permite tener la información de los consumos en todo momento.
- Software y sensores apropiados, que ayudarán a las compañías de servicios públicos a obtener información sobre los dispositivos que poseen los consumidores y poder tomar decisiones para controlar el consumo de estos. Así mismo servirán para tener control y evitar fallas en la red eléctrica.
- Medidores Inteligentes: estos dispositivos son el foco de atención actualmente para muchos países, debido a que van encaminados hacia el lado de la demanda y permitirán a los usuarios participar en el mercado, ya que le brindaran a este la posibilidad de conocer su consumo y las tarifas del mismo.

Otra característica importante de las nuevas aplicaciones y desarrollos de las REI - lo cual permite la definición del nuevo término prosumidores: consumidores que a su vez son productores - es que por medio de estas los consumidores serán capaces de generar y entregar electricidad a la red, así los consumidores podrán cambiar sus perfiles de compradores a vendedores en el momento en el que lo deseen (Lampropoulos, Vanalme, & Kling, 2010).

Así mismo y gracias a la información que el sistema le proporcionará, el usuario decidirá si desea consumir electricidad de la red basado en las condiciones del sistema y los precios que se estén presentando o si en caso contrario desea venderle a la red la electricidad que él genere (Fan & Borlase, 2009).

Para que esto sea posible y el usuario pueda decidir qué perfil desea usar dependiendo del precio de la electricidad, es necesario el uso de medidores inteligentes. Actualmente se están desarrollando e implementando diferentes proyectos para la adición de medidores inteligentes al sistema eléctrico, por medio de los cuales se espera ayudar a los usuarios a hacer uso eficiente de su consumo y obtener ahorros (Shargal, 2009).

3.2 Respuesta de la demanda (DR)

Una de las características clave de las REI es la respuesta de la demanda (DR) (Rahimi & Ipakchi, 2010). Según la asociación de fabricantes de electrodomésticos para el hogar, la DR se refiere a un conjunto de escenarios donde el consumidor puede reducir el consumo de energía durante las horas pico u otros periodos críticos (Lui et al., 2010).

Esta característica (DR), la cual es el foco de esta investigación, es uno de los objetivos principales de las REI y se define como todas aquellas decisiones y acciones que los usuarios toman de manera voluntaria para ajustar la cantidad de su consumo de electricidad, dichas acciones casi siempre son realizadas respondiendo a señales económicas. La DR es una solución efectiva para afrontar los picos en la curva de carga en vez de añadir más capacidad instalada al sistema (Sianaki, Hussain, & Tabesh, 2010).

Otras definiciones de la DR se refieren a los cambios en los hábitos de consumo de energía eléctrica de los usuarios en respuesta a señales de precios o incentivos definidos y la cual tiene como principal objetivo modificar los patrones de consumo y así poder disminuir el mismo en las horas pico y cambiarlo a periodos en los que se tengan costos más bajos (Zhu, Bai, & Meng, 2011).

Adicional a los cambios en los hábitos de consumo, la DR puede proporcionar presión y competitividad en el mercado, que ayudará a la reducción en los precios, aumentar la conciencia sobre el uso, proporcionar un funcionamiento más eficiente de los mercados, mejorar la fiabilidad y ayudar al soporte del uso de los recursos de energía renovables, generación distribuida y medición avanzada (Ipakchi & Albuyeh, 2009).

Para obtener todos estos beneficios es necesario vincular al consumidor, el cual juega un papel crucial e importante para la DR, ya que este es el que toma la decisión de cuando y como consumir. Una de las formas más efectivas para motivarlos es por medio de incentivos financieros que pueden hacer que los consumidores cambien sus hábitos de consumo. Cuando hay cambios en el comportamiento de los consumidores se debe principalmente a respuestas de los mismos ante variaciones en el precio de la electricidad o por incentivos dados por entes regulatorios o por el gobierno para inducir la reducción del uso de la electricidad en las horas pico (Lui et al., 2010).

Algunos de los beneficios de esta vinculación de los consumidores con el sistema se puede observar en investigaciones de la Unión Europea, en las cuales se ha detectado que si el 80% de los consumidores reducen su demanda de energía eléctrica en las horas pico debido al precio dinámico de la misma, la reducción de la capacidad asociada y los costos de transmisión sería de €67 billones (Faruqi et al., 2010).

Otro resultado se puede ver en Wood & Newborough (2003), en el que se muestra que por medio del estudio del consumo en los hogares en el Reino Unido se encontró que la retroalimentación dinámica de consumo de energía a través de contadores inteligentes reduce el consumo entre 10-20% dentro de los hogares (Stragier et al., 2010).

3.3 Medidores Inteligentes

Las REI buscan renovar y actualizar la red eléctrica convencional por medio del uso de tecnologías de información y comunicación avanzada, entre las cuales se destacan los medidores inteligentes, los cuales habilitan las comunicaciones en dos vías entre las compañías y los consumidores y permiten tener información detallada del consumo (Erolkantarci & Mouftah, 2010; O' Malley et al., 2010), además de permitir a los hogares administrar su uso de electricidad (Sianaki, Hussain, Dillon, et al., 2010)

Para la implementación de estos medidores inteligentes, actualmente se están estudiado diferentes proyectos, por medio de los cuales se espera ayudar a los clientes a hacer uso eficiente de su consumo y obtener ahorros (Shargal, 2009).

Estos proyectos tiene como objetivo afrontar el hecho de que los consumidores en la actualidad no tienen contacto con el precio de la electricidad ni información relacionada con este de manera oportuna que permita la toma de decisiones y su consumo no se diferencia por período, es decir, no se tiene información del consumo en cada hora del día. Pero por medio de medidores inteligentes que realizan una medición del consumo horario se logrará aumentar la susceptibilidad de los mismos ante los cambios en el precio del mercado. Adicionalmente, se podrá encontrar disponible en todo momento el consumo real de electricidad de cada usuario (Moshari et al., 2010).

Toda esta información permitirá reducir el uso de la capacidad instalada en las horas de demanda máxima (horas pico), ya que se proveerá al consumidor señales de precios para comunicarles el verdadero costo de su consumo, y el prerequisite para proveer estas señales es la instalación de medidores inteligentes (Faruqui et al., 2010).

Para poder instalar estos medidores se han implementado estrategias, entre las cuales se tiene el mandato que estableció el gobierno británico para desplegar medidores inteligentes a todos los hogares en el 2020. Estos medidores son una parte clave de la infraestructura de comunicación que pueden recibir señales sobre los parámetros del sistema (O' Malley et al., 2010).

A diferencia de los mercados de electricidad actual y gracias a los medidores inteligentes, los usuarios que no consumen en los períodos de precios altos no va a pagar un costo adicional por el consumo de otros que si lo hacen (Moshari et al., 2010).

Esta diferencia en los costos provoca interés en esta nueva tecnología, interés que fue demostrado por una encuesta realizada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos en la cual se encontró que el 70% de los encuestados desean obtener un dispositivo inteligente que los ayude a mantenerse informados sobre su consumo de energía y los precios del mercado (U.S. Department of Energy, 2008).

Gracias a estos hallazgos se espera que la penetración de medidores inteligentes en los hogares en Norte América aumente de 6% a un 89% para el 2012 (Vojdani, 2008). Según Capgemini para el año 2012 entre un 25-40% de los hogares tendrán medidores inteligentes (Shargal, 2009).

Luego de definir las Redes Eléctricas Inteligentes y sus características, se muestra en el capítulo siguiente (Estado del arte), los trabajos relacionados con este tema los cuales permiten determinar los aportes de esta investigación.

4.Estado del arte

La revisión de literatura fue realizada con el objetivo de identificar los diferentes trabajos relacionados con el tema de investigación y así poder definir los objetivos de esta tesis.

El objetivo principal de esta revisión es evaluar que tanta relevancia tienen las investigaciones realizadas sobre el tema de interés, cuáles son los trabajos más representativos realizados sobre este y que tanto aporte generan a la investigación a realizar (Software Engineering Group, 2007).

4.1 Revisión de literatura

Las Redes Eléctricas Inteligentes son un tema que está siendo muy estudiado, se tienen investigaciones relacionadas con la generación, el transporte y la distribución, el estudio del comportamiento de los usuarios finales, la penetración de recursos renovables al sistema, la entrada de nuevos dispositivos y aplicaciones más robustas, entre otros, por lo que las investigaciones no se centran en una sola área de conocimiento, si no que por el contrario cada área posee sus necesidades e intereses particulares y por lo tanto cada una de estas utiliza diferentes metodologías que se aplican a los trabajos realizados. Es por esto que se ve la necesidad de realizar una revisión sistemática de la literatura, por medio de la cual se pretende acotar la gran gama de bibliografía disponible y poder centrarse en los principales y más importantes aportes en el área y en el foco de investigación que son los consumidores finales.

La revisión realizada se centró en la identificación de los cambios en las costumbres y acciones de los consumidores ante la entrada de las REI en el sistema eléctrico, específicamente con la penetración de medidores inteligentes, de tal forma que cualquier cambio en el comportamiento de los usuarios finales (Hogares) que se deba a eventos o cambios en las condiciones del sistema se puedan percibir y analizar de una manera clara, rápida y eficiente.

4.2 Implementación de las redes eléctricas inteligentes (REI) en Colombia

En un trabajo realizado por Pérez Miranda en el 2008 se presenta una introducción a las nuevas tecnologías que van en búsqueda de lograr la implementación de las REI. Este trabajo presenta una síntesis de las publicaciones que estudian los temas relacionados con el desarrollo y utilización de las REI y las investigaciones actuales en cuanto a este tema en todo el mundo (Perez Miranda, 2008). En este trabajo también se estudia el desarrollo de la generación distribuida, la posibilidad de su implementación en Colombia y el porcentaje de participación en comparación con otros países.

Otro trabajo encaminado al estudio de las REI fue realizado por la Universidad Nacional de Colombia en compañía de la empresa XM. En este trabajo se define un mapa de referencia para la implementación de las REI en el sector eléctrico colombiano. En este trabajo se tuvo la participación de empresas, universidades y entidades gubernamentales relacionadas con este sector. El objetivo es determinar el estado actual de las REI en Colombia y poder construir una guía de referencia basada en el conocimiento de los participantes (Aldana, Céspedes, Parra, Lopez, & Ruiz, 2011).

Las áreas de estudio en este trabajo son: transmisión, generación, distribución, consumidores y áreas de soporte (regulación, estándares, recursos) y para poder estudiarlas se dividió el mapa de referencia en tres fases, en las cuales se definieron fechas para el estudio y la implementación de soluciones para cada una de estas (Aldana et al., 2011). En la Tabla 4-1 se pueden observar las fases y las fechas previstas.

Tabla 4-1. Fases mapa de referencia para implementación de REI (Aldana et al., 2011)

Fases	Fecha	Observaciones
Conceptualización	2011-2012	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión del estado actual de las redes eléctricas inteligentes • Mapa de referencia y visión • Formulación de proyectos
Desarrollo	2012-2025	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación en el sistema de tecnologías inteligentes y eficientes • Adopción de tendencias internacionales para proyectos específicos

Consolidación	2026-...	<ul style="list-style-type: none">• Cultura energética orientada a sistemas eficientes y amigables con el medio ambiente.• Nuevas tecnologías establecidas como parte de la red.
----------------------	----------	---

Adicional a los trabajos mencionados se tiene Colombia Inteligente: “Colombia Inteligente es una iniciativa de desarrollo hacia las nuevas tecnologías y tendencias mundiales”, “La Colombia Inteligente es el marco estratégico intersectorial que define los lineamientos y la métrica de seguimiento de una ruta hacia un sector eléctrico eficiente y sostenible con una operación confiable y segura de la red eléctrica” (XM et al., 2012).

Esta propuesta la desarrollaron empresas y organizaciones relacionados con el sector eléctrico, estas son: XM Compañía de Expertos en Mercados, CIDET (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Sector Eléctrico), COCIER (Comité Colombiano de la Comisión de Integración Energética Regional), CNO (Consejo Nacional de Operación), CAC (Comité Asesor de Comercialización) y CINTEL (Centro de Investigación de las Comunicaciones) (XM et al., 2012).

Con esto, dichas compañías tienen como objetivo determinar lineamientos, políticas y estrategias para la implementación de las REI en Colombia y permitir que el país cuente con buenas prácticas en eficiencia energética y tecnológica en este sector.

4.3 Demanda de electricidad

Desde el lado de la demanda se espera que recibiendo información sobre su consumo y los costos del mismo, el usuario cambiará su comportamiento de consumo con el objetivo de ahorrar en sus facturas (Collier, 2010; Sianaki, Hussain, Dillon, et al., 2010).

Recibiendo información relacionada con el sistema eléctrico, información propia y las tarifas, los consumidores responderán a esta reduciendo su consumo principalmente en las horas de demanda máxima (Faruqui et al., 2010; Sianaki, Hussain, Dillon, et al., 2010). Esta realimentación puede dar como resultado un 9% de reducción en el consumo en los hogares (Hauttekeete et al., 2010; Stragier et al., 2010) y una reducción de entre 10-20% en los periodos de demanda pico (Chassin, 2010; Vojdani, 2008).

Cuando los consumidores están informados sobre el precio de la electricidad, tienen más probabilidades de cambiar una parte de su demanda para períodos en los que se tengan precios más bajos (Ajaja, 2010; Moshari et al., 2010), por lo que se espera que la altura de los picos y la profundidad de los valles en los perfiles de demanda serán reducidos (Moshari et al., 2010). Este cambio en la demanda se verá en una disminución en promedio de un 10% en total y se obtiene una reducción de un 15% en los periodos de demanda máxima (demanda en las horas pico) (Vojdani, 2008).

Es por esto que cobrar precios diferentes para las diferentes horas del día da a los usuarios una razón para cambiar su consumo de energía para los momentos de demanda mínima. Esto hace que se cree un consumo de energía de forma más uniforme y reduce el pico diario de la demanda (Faruqui et al., 2010).

4.4 Comportamiento del consumidor

Entre los objetivos de las REI se tiene el uso de la electricidad de manera más eficiente y así poder reducir el consumo en los picos de demanda. Para lograr esto es necesaria la participación de los usuarios para que estos reduzcan su consumo o lo trasladen a las horas en las que se tiene una menor demanda y así minimizar los requisitos de carga máxima (Davies, 2010). Para lograr esto se debe alentar a los consumidores a que comiencen a usar tecnología avanzada como por ejemplo contadores inteligentes y otros dispositivos inteligentes (O' Malley et al., 2010; Saffre & Gedge, 2010).

Para lograr el uso de electricidad de manera más eficiente se debe direccionar activamente a los consumidores dándoles información importante relacionada con su consumo de electricidad (Hauttekeete et al., 2010; Lampropoulos et al., 2010; Stragier et al., 2010), pues el usuario es el que toma la decisión de cuánto, en qué horas del día y de qué manera desea consumir energía (Faruqui et al., 2010; Santacana, E., Husain, B., Pinnekamp, F., Halvarsson, P., Rackliffe, G., Tang, L., Feng, 2010).

Esta participación activa de la demanda puede traer grandes beneficios para todo el mercado, como por ejemplo la reducción de los costos de la energía para los consumidores, reducción en el costo total de generación de electricidad, evitar los picos en la curva de carga y por lo tanto reducción en los precios (Moshari et al., 2010).

Como aporte de esta tesis se desea evaluar la entrada de los medidores inteligentes al sistema eléctrico colombiano y que tanto la curva de carga se ve aplanada gracias a los cambios en los consumos de los usuarios que poseen un medidor inteligente, lo que da como resultado beneficios tanto individuales (en ahorro para el consumidor), como globales (para la eficiencia de todo el sistema.)

4.5 Tecnologías de las REI que se instalan en los hogares

En los hogares se pueden instalar diferentes dispositivos, entre los cuales los más populares son los Medidores inteligentes, estos permiten a los usuarios administrar su uso de electricidad (Sianaki, Hussain, Dillon, et al., 2010; Xin-wei & Qiang, 2010).

Los medidores inteligentes son una parte clave de la infraestructura de comunicación que puede, teniendo en cuenta las especificaciones adecuadas, recibir señales y ayudar a los usuarios a la toma de decisiones (Misra & Schulzrinne, 2010; O' Malley et al., 2010).

También existen infraestructuras avanzadas de medición (AMI), las cuales son un sistema de medición compuesto por diferentes equipos que puede registrar el consumo de los usuarios y otros parámetros por hora (o menos) y transferir esta información al centro de datos. Los usuarios también pueden tener acceso a esta información, como precio, cantidad de consumo, parámetros del sistema, entre otros (Zhang, Chen, Yang, Chen, & Li, 2010).

Adicionalmente se tienen controladores inteligentes, por medio de los cuales cualquier tipo de electrodoméstico puede ser configurado para que tome decisiones de manera autónoma ante señales previamente especificadas, como por ejemplo se pueden definir niveles para el precio de la energía y así cuando el precio este por debajo de este nivel el electrodoméstico comenzará a funcionar de manera automática y cuando el precio este por encima del nivel el electrodoméstico dejará de trabajar (Hauttekeete et al., 2010; Sianaki, Hussain, Dillon, et al., 2010; Stragier et al., 2010). Todo esto gracias a que dichos controladores pueden administrar la demanda de los consumidores basados en el precio de la energía eléctrica y demás parámetros del sistema (Moshari et al., 2010).

El tema de estudio de esta tesis es la entrada de los medidores inteligentes a los hogares y el cambio en la curva de carga, ya que por medio de estos dispositivos los usuarios tendrán la posibilidad de acceder a información, a una tarifa horaria y podrán modificar su demanda de acuerdo a los parámetros que estos dispositivos les proporcionen.

Para lograr esto se definieron los siguientes objetivos y en el capítulo siguiente (Metodología) se presenta la metodología utilizada para cumplir con dichos objetivos.

4.6 OBJETIVOS

Objetivo General

Analizar el impacto en la demanda residencial del sector eléctrico colombiano debido a la entrada de los medidores inteligentes en los hogares.

Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo de dinámica de sistemas que represente la entrada de los medidores inteligentes en Colombia.
- Desarrollar un modelo de dinámica de sistemas que represente la respuesta de la demanda gracias a la entrada de los medidores inteligentes en Colombia.
- Formular políticas para determinar qué acciones deben ser tomadas para la entrada de los medidores inteligentes.
- Formular políticas para determinar qué acciones deben ser tomadas para fomentar la respuesta de la demanda después de la entrada de los medidores inteligentes.
- Evaluar políticas para el fomento de la penetración de los medidores inteligentes al sistema eléctrico colombiano.

5. Metodología

A continuación se presentan diferentes trabajos relacionados con el tema de investigación, de estos trabajos se resaltarán sus aportes. Luego de exponer estos trabajos y sus principales características se discutirá la metodología seleccionada, las razones de su elección y como sería abordado el problema de estudio.

Wood & Newborough(2003) por medio del estudio de los patrones de consumo de electricidad de los hogares en el Reino Unido encontraron que la retroalimentación dinámica de esta información a través de contadores inteligentes puede dar una reducción en el consumo de entre 10-20% dentro de los hogares.

En el trabajo de Karnouskos & De Holanda (2009) se modelaron las REI por medio de agentes y se simuló el comportamiento de una ciudad inteligente dinámica en la infraestructura futura.

Otro trabajo que usa el modelo basado en agentes tiene como objetivo simular mercados eléctricos reestructurados y explorar el impacto en el mercado de la elasticidad del precio de la demanda (Thimmapuram et al. 2010).

En (Sianakietal.2010)se definió un sistema para el soporte inteligente a las decisiones. Este modelo busca añadir inteligencia al proceso de consumo de energía eléctrica con el objetivo de obtener una respuesta de la demanda. En este trabajo se utilizó un modelo de redes neuronales, el cual aprende sobre las preferencias y los perfiles de los usuarios.

Pese a todos los trabajos realizados sobre las Redes Eléctricas Inteligentes y especialmente direccionados con el estudio desde el lado de la demanda y cambios en los comportamientos de los consumidores, en la literatura revisada no se encontraron investigaciones que se encarguen de analizar cómo sería la entrada de los Medidores

Inteligentes en los hogares, y tampoco se encontraron estudios reportados sobre el análisis de las Redes Eléctricas Inteligentes para el caso de Colombia. En la literatura tampoco se hallaron herramientas de análisis que permitan estudiar esta situación en algún país con condiciones parecidas a las de Colombia.

Es por esto que se desea, como aporte de esta tesis, realizar un modelo para analizar cómo sería la entrada de los Medidores Inteligentes en los hogares colombianos y como se aplanaría la curva de carga por medio del cambio en los patrones de consumo de energía eléctrica de los usuarios que posean dicho medidor.

Se espera que este modelo permita estudiar y entender la dinámica de este proceso y que se puedan definir una variedad de políticas por medio de las cuales se vean diferentes evoluciones en la entrada de los medidores inteligentes y el aplanamiento de la curva de carga.

A continuación se presenta la metodología con la cual se va a abordar este problema y el análisis que conlleva la elección de dicha metodología.

5.1 Elección de la metodología

Para analizar la entrada de los medidores inteligentes en Colombia y estudiar como esto podría variar la curva de carga es necesario desarrollar un modelo que permita observar la dinámica en este proceso y su evolución en el tiempo.

Para esta tarea es necesario considerar retroalimentación entre las variables, ya que esto produce diferentes comportamientos y la comprensión de los mismos es necesaria para el análisis de políticas y la toma de decisiones. Adicionalmente se necesita un mecanismo por medio del cual se puedan modificar las condiciones del sistema y así poder observar diferentes repuestas del modelo que permitan mayor entendimiento y análisis de esta investigación.

Lo antes mencionado sugiere la necesidad de utilizar herramientas como la Dinámica de Sistemas (DS) ya que este tipo de metodología posibilita el estudio y el aprendizaje sobre

el comportamiento del sistema modelado y adicionalmente permite utilizar características de retroalimentación entre las variables.

El principal objetivo de la Dinámica de Sistemas es estudiar sistemas complejos que poseen interacción entre las diferentes variables que representan su comportamiento y que presentan características de retroalimentación. También se tiene la posibilidad de evaluar y comparar posibles políticas en las cuales se plantean alternativas de sucesos futuros, lo que permite un mayor entendimiento del modelo a estudiar (Sterman, 2000).

La entrada de nuevas tecnologías como los medidores inteligentes al sistema eléctrico colombiano es un sistema complejo que cuenta con las características antes mencionadas (ciclos de realimentación e interacción entre las variables), por lo que se espera modelar este proceso por medio de la Dinámica de Sistemas.

Adicionalmente la DS permite observar cómo sería el comportamiento a largo plazo de la entrada de los medidores inteligentes al sistema eléctrico colombiano, el cambio en la curva de carga y da la posibilidad de definir diferentes escenarios por medio de los cuales se puede observar las variaciones en el comportamiento del modelo y, así, evaluar el nivel de aceptación de los usuarios ante la entrada de esta nueva tecnología.

Por otro lado, las características de este caso de aplicación con un alto componente social, determinan una dinámica continua en el tiempo por lo que hace importante que se pueda aprender sobre esta situación en particular. Razón por la cual, la utilización de simulación con Dinámica de Sistemas para evaluar los diferentes casos y respuestas del sistema permite un mayor acercamiento a la realidad, que puede ser un referente durante el proceso de toma decisiones.

Para este estudio se definió un modelo que consta de 3 sub-modelos interconectados, el primero tiene como objetivo representar la entrada de los medidores inteligentes en los hogares, el segundo se encarga de realizar el despacho de energía de manera horaria dependiendo de los recursos disponibles y de la demanda que se desea suplir y por último, el tercer sub-modelo muestra cómo sería el cambio en la curva de carga gracias al cambio en los patrones de consumo de los usuarios.

5.2 Otras Metodologías

Para modelar el despacho de energía se han usado varias técnicas, la optimización es una técnica que ha sido ampliamente utilizada para modelar esto, pero Dyner y Larsen en 2001 señalan que los mercados liberalizados requieren enfoques de modelado complementarios a esta, como modelos basados en agentes, Dinámica de Sistemas, teoría de juegos, entre otros (Dyner & Larsen, 2001).

Adicionalmente para el uso de optimización es necesario que haya información y para este caso no se posee esta característica, ya que no se tiene información histórica, ni reportes de cómo sería la entrada de los medidores inteligentes o tecnologías parecidas.

Para realizar el modelo también podría considerarse la Teoría de juegos (GT). Esta es una herramienta útil que ayuda a simular sistemas con tomadores de decisiones independientes (Rasouli, 2010). Dada la complejidad en el cálculo de los equilibrios - que pueden no ser únicos –y que este tipo de metodología es muy sensible a las condiciones iniciales (Ochoa, 2010), se hace innecesario el análisis y la complejidad de la GT.

Otra alternativa que puede ser utilizada para representar el sistema de estudio es la simulación basada en agentes (ABM). El interés para esta investigación no es analizar el comportamiento estratégico de cada uno de los consumidores por separado, sino los efectos de la aplicación de las políticas asumiendo que todos se rigen por estas. Es por esta razón que no se considera necesario utilizar un modelo basado en agentes para analizar este problema.

Dado lo anterior se decidió desarrollar un modelo de dinámica de sistemas.

La “dinámica” en DS se refiere a los patrones fundamentales del cambio como el crecimiento, la decadencia y oscilaciones (Pasaoglu Kilanc & Or, 2008). Esta es una herramienta que puede ser utilizada para estudiar una gran variedad de sistemas, incluyendo sistemas sociales, económicos, políticos, entre otros (Rasouli, 2010).

Simulando escenarios “Que pasaría si” para poner a prueba ciertas políticas en un modelo de DS puede ser de gran ayuda en la comprensión de cómo el sistema cambia en el tiempo (Pasaoglu Kilanc & Or, 2008).

La Dinámica de Sistemas permite ver cómo sería el comportamiento en el futuro y el efecto ante diferentes cambios, por lo que es una herramienta útil para definir políticas dependiendo de cómo se desea que se comporte el sistema en el futuro (Rasouli, 2010).

Forrester define esta metodología como: "La DS es el estudio de las características de retroalimentación para mostrar cómo la estructura, la amplificación (en las políticas), y los retrasos (en las decisiones y acciones) interactúan para influir en el comportamiento de un sistema"(Borshchev & Filippov, n.d.).

Otra ventaja que presenta este método es que se puede empezar a probar y entender el modelo y los diferentes comportamientos que se presenten en una fase temprana de la implementación (Dyner & Larsen, 2001).

Este tipo de modelado proporciona un ambiente seguro en el cual se pueden probar las estrategias y políticas y así ayudar en la toma de decisiones a los diferentes agentes del mercado y a comprender mejor la dinámica en estos sistemas complejos (Pourdehnad, Maani, & Sedehi, n.d.)

El objetivo de la dinámica de sistemas es estudiar el comportamiento de un sistema y observar que pasa a largo plazo en cada uno de los escenarios definidos, mas no pronosticar el comportamiento del sistema. Gracias a esto no es necesario poseer información completa, ya que por medio de la definición de diferentes políticas se puede observar el comportamiento del sistema ante cambios en las variables para las cuales no se tiene mucha información histórica o no se conoce su verdadero valor.

Para este estudio se tienen en cuenta los factores que intervienen en este proceso, como lo son:

- Para el despacho de electricidad: los precios, la demanda, la capacidad instalada de las diferentes tecnologías, entre otros.
- Para la entrada de medidores inteligentes: el precio de los medidores, la adopción por boca a boca y publicidad, la adopción por ahorro, entre otros.
- Para el cambio en la curva de carga: la demanda, los precios de electricidad, los porcentajes de uso de los electrodomésticos el hogar, entre otros.

Todos los factores antes mencionados generan ciclos de realimentación, tanto positivos como negativos, los cuales adicionan complejidad al problema y no permiten intuir el comportamiento del mismo sin la ayuda de un modelo.

Para la descripción del modelo que se presenta en el capítulo siguiente (Descripción del modelo), se utilizarán diagramas causales, los cuales permiten ilustrar la dinámica del sistema y representan la estructura y las relaciones que existen entre cada una de las variables involucradas.

Los diagramas causales permiten observar la realimentación presente en el sistema, efecto que produce el comportamiento dinámico del mismo, esta realimentación puede ser de dos tipos: la primera es una realimentación positiva o ciclo de refuerzo, la cual provoca que el comportamiento del sistema se vea amplificado y la segunda es la realimentación negativa o ciclo de balance la cual evita el cambio en el sistema.

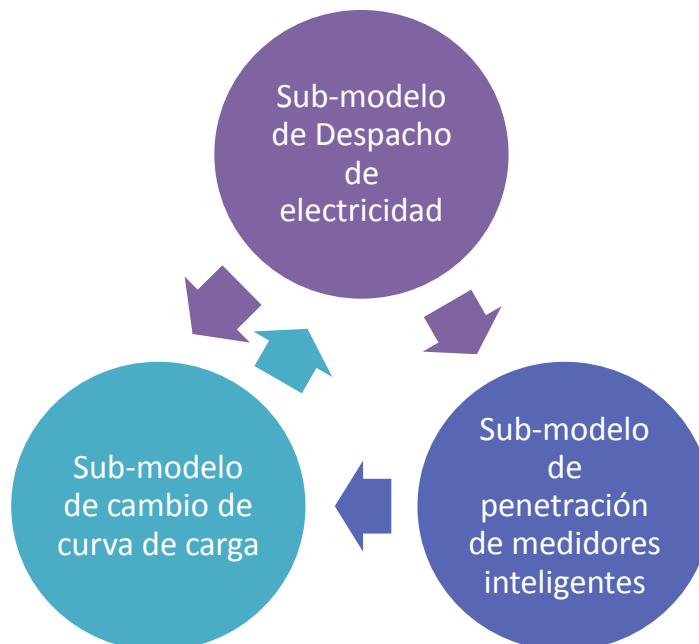
6.Descripción del modelo

Para el estudio de la penetración de medidores inteligentes en los hogares colombianos y el cambio en la curva de carga se construyó un modelo de Dinámica de Sistemas para el cual se usó el software PowerSim Studio 7. Este modelo está compuesto por variables y relaciones entre estas que fueron analizadas. Adicionalmente las características de realimentación fueron tenidas en cuenta en el modelado.

Con este modelo se busca entender y analizar el sistema antes mencionado y definir diferentes políticas que ayuden a la adecuada implementación de estos dispositivos (medidores inteligentes) y a la comprensión de los eventos futuros resultantes.

El modelo consta de 3 sub-modelos que representan cada una de las componentes en este proceso y que interactúan entre sí. La dinámica de estos sub-modelos se puede observar en la Figura 6-1, en la cual las flechas indican el intercambio de información.

Figura 6-1: Dinámica entre sub-modelos



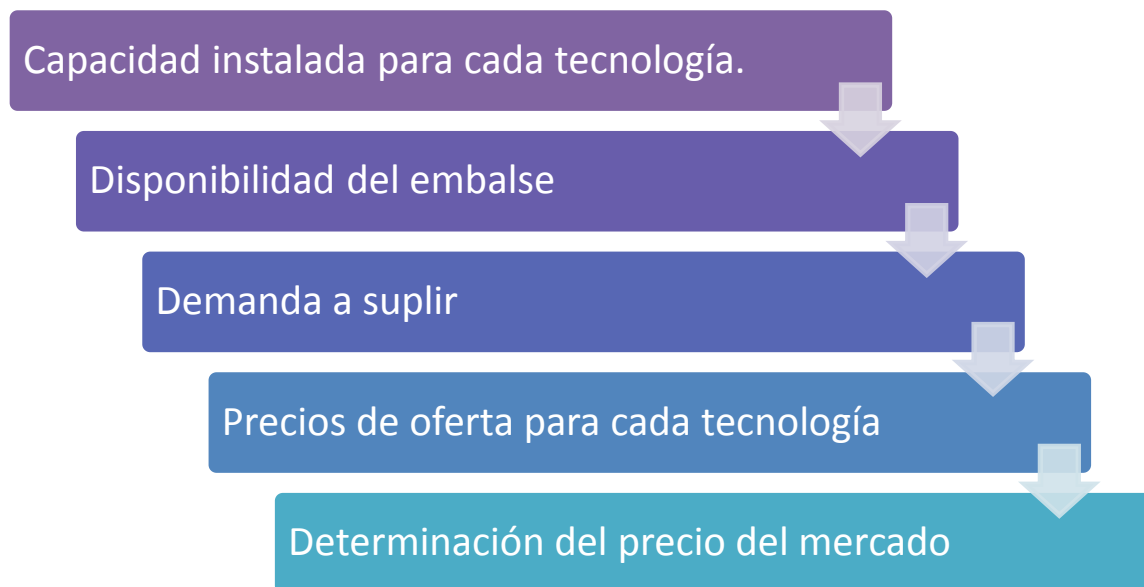
A continuación se describen cada uno de los sub-modelos:

6.1 Sub-modelo de despacho de electricidad

Este modelo se encarga de simular el despacho de electricidad horario por medio de insumos como las capacidades de las tecnologías utilizadas, los precios de cada una de estas, la demanda que se debe suplir y otras características del sistema eléctrico necesarias para poder realizar el modelado y por último da como resultado la generación para cada una de las tecnologías y el precio del mercado.

El despacho se realiza de la siguiente manera:

Figura 6-2: Despacho de energía eléctrica



Por medio de diagramas causales se diseñó la hipótesis dinámica para el despacho y los procesos involucrados. Este diagrama se puede ver en la **Figura 6-3**.

Figura 6-3: Diagrama Causal – Sub-modelo de despacho

*Una ampliación del embalse se encuentra en la **Figura 6-4**.

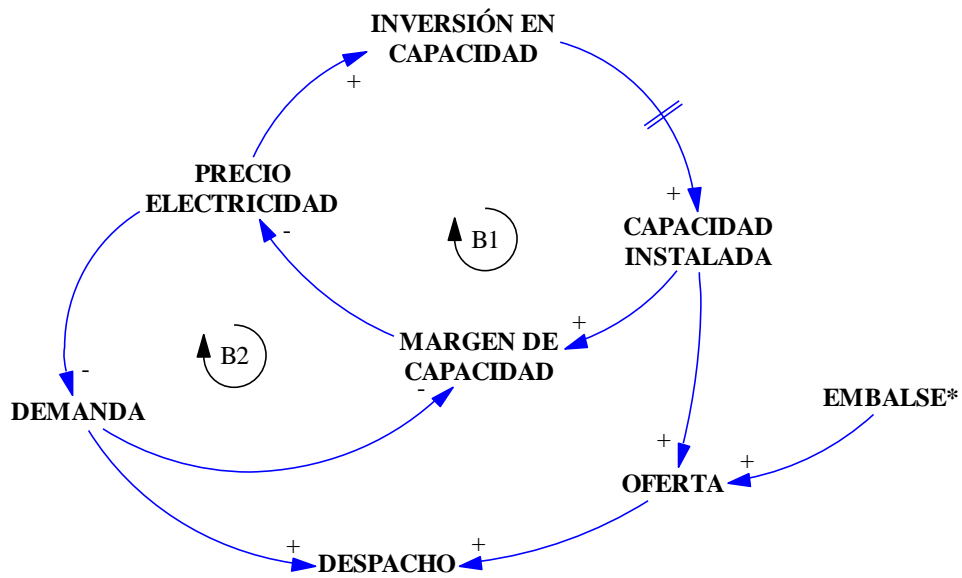
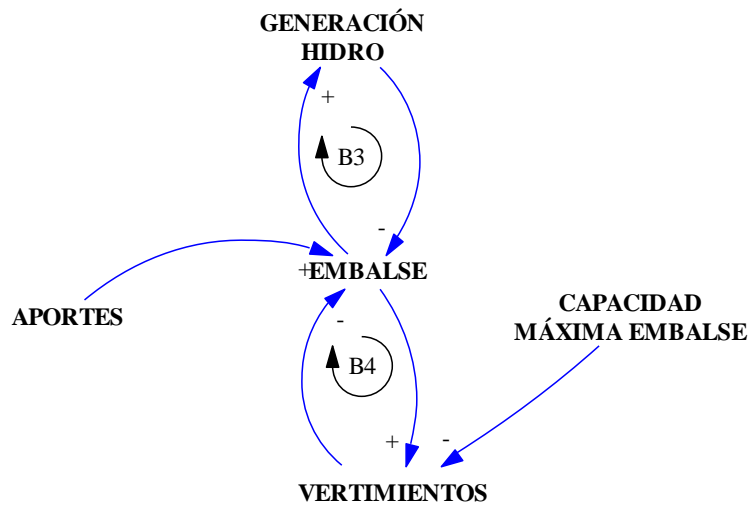
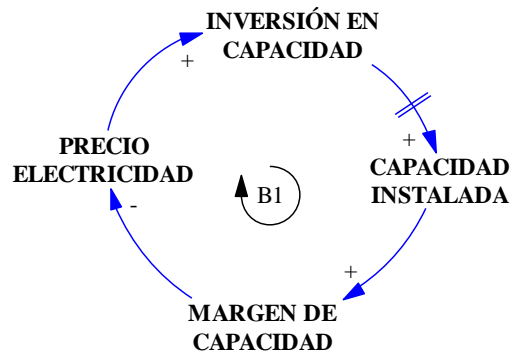


Figura 6-4: Diagrama causal – Embalse

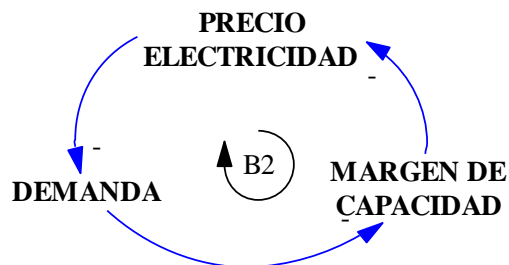


En la Figura 6-5 se presenta el ciclo de balance B1, el cual representa la preocupación del mercado eléctrico por asegurar el suministro, esto se logra manteniendo un margen de capacidad entre la capacidad instalada y la demanda, la capacidad instalada debe ser mayor que la demanda, y así se evita cualquier consecuencia causada por daños, eventos del sistema inesperados o eventos naturales como El Niño.

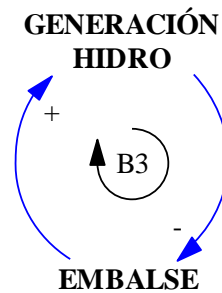
Figura 6-5: Ciclo de balance B1 – Precio de electricidad e inversiones en capacidad

En el ciclo de balance B1 (Figura 6-5) también se presenta la dinámica del cambio en el precio de la electricidad debido al margen de capacidad, ya que si se tiene un margen alto el precio tiende a bajar debido a que no sería necesario poner a funcionar las plantas más caras y esto ocasionaría que la inversión en capacidad también se viera disminuida.

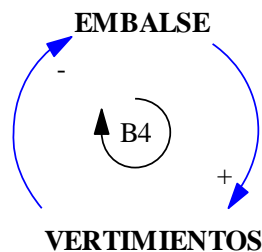
En el ciclo de balance B2, representado en la **Figura 6-6** se observa como la demanda se ve influenciada por el precio, esto se da gracias a que el precio de la electricidad se calcula de manera horaria y los como los consumidores tienen acceso a esta información pueden observar en que intervalos la electricidad tiene un costo alto y mover una parte de su demanda a los periodos en los que la electricidad presenta menores costos.

Figura 6-6: Ciclo de balance B2 - Demanda

La oferta de energía para la tecnología hidráulica con embalse depende directamente del nivel del embalse, ya que cuando se tiene un nivel del embalse alto esta tecnología es la que predomina en el despacho por ser más barata y por lo tanto hay mucha más generación hidráulica, como se observa en el ciclo de balance B3 (**Figura 6-7**).

Figura 6-7: Ciclo de balance B3 - Generación Hidro

En el momento en el que se tiene un nivel del embalse muy alto y la cantidad de agua supera la capacidad máxima del mismo, comienza un proceso de vertimientos que es representado en el ciclo B4 (**Figura 6-8**).

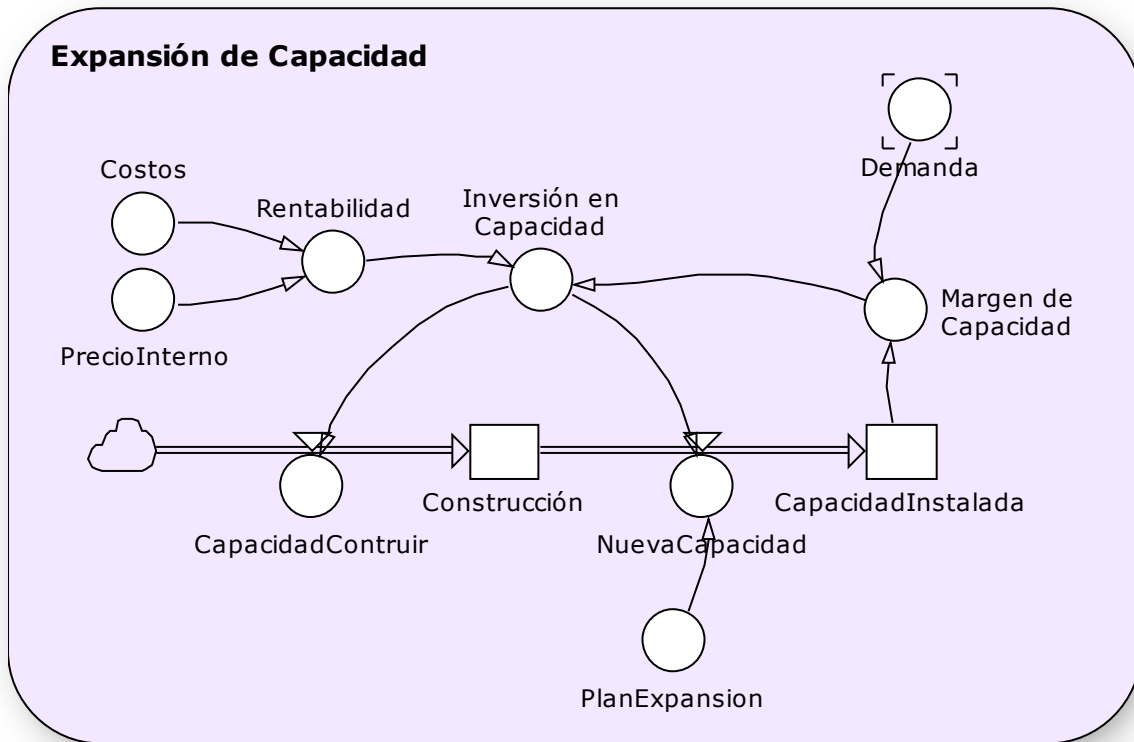
Figura 6-8: Ciclo de balance B4 - Vertimientos

Tomando como base las hipótesis dinámicas planteadas, se desarrolló el modelo de dinámica de sistemas para estudiar el despacho de energía eléctrica, este está compuesto por la expansión en capacidad de generación, el estudio del comportamiento del embalse, la determinación del precio del despacho por mérito.

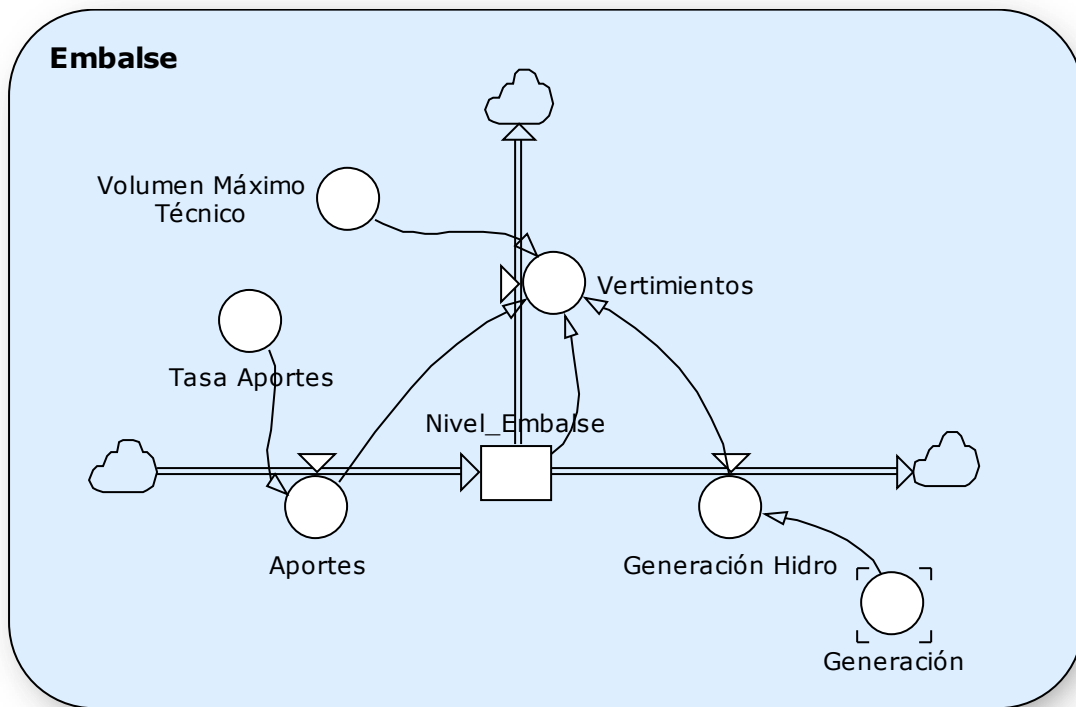
Para este modelo se utilizó información de planes de expansión, proyectos en construcción, pronósticos de demanda, situación actual del sistema eléctrico, entre otros. Y estos datos se obtuvieron de fuentes como XM (XM, 2009, 2010, 2012), Neón(NEON, 2012), la UPME(UPME, 2004, 2010), entre otros.

La expansión en capacidad se puede observar en la **Figura 6-9**.

Figura 6-9: Diagrama de Flujos y Niveles - Expansión de Capacidad de Generación



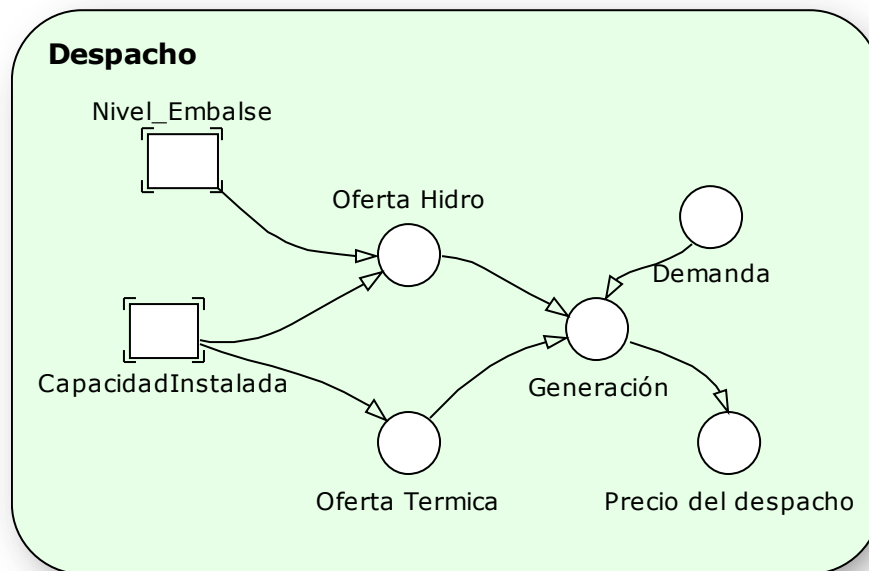
Como se mencionó antes la oferta de las plantas hidráulicas con embalse depende del nivel del embalse que se posea. Adicionalmente este embalse puede verter agua en el momento en el que se supere su capacidad de almacenamiento de la misma, este comportamiento se puede observar en la **Figura 6-10**.

Figura 6-10: Diagrama de Flujos y Niveles - Embalse

Las tecnologías que se tuvieron en cuenta para el despacho fueron:

- Hidráulica con embalse: esta tecnología se divide en tres plantas, las cuales poseen precios de oferta diferentes de acuerdo a la información histórica de los precios de oferta de esta tecnología.
- Hidráulica filo de agua
- Térmica a gas
- Térmica a carbón.

El precio del mercado se obtiene utilizando toda la capacidad disponible de cada una de las diferentes tecnologías, comenzando desde la más barata hasta la más cara hasta que se supla la demanda. El precio final corresponde al valor de la última tecnología que se utilizó. Esto se puede ver en la **Figura 6-11**.

Figura 6-11: Diagrama de Flujos y Niveles - Despacho

La demanda es un vector que consta de 24 posiciones, cada posición corresponde a la demanda en cada hora del día.

El precio resultante también es un vector de 24 posiciones que corresponden a los precios de la energía para cada una de las horas.

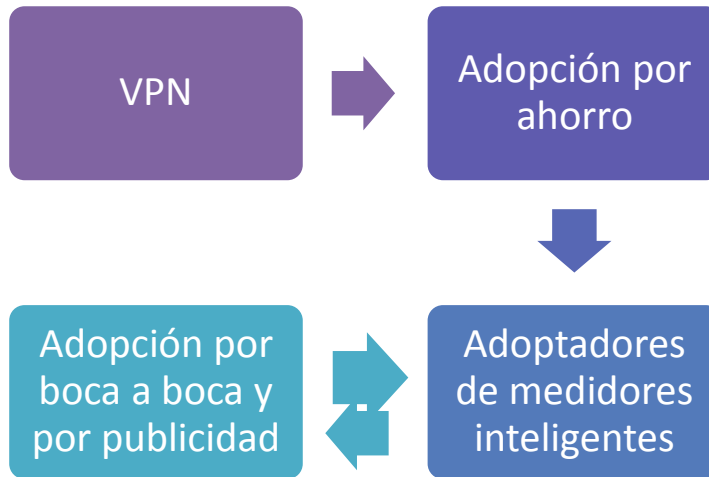
6.2 Sub-modelo de penetración de medidores inteligentes

Por medio de este modelo se estudia como sería la entrada de los medidores inteligentes en los hogares colombianos. Los resultados de este modelo permiten saber el número de hogares que poseen un medidor inteligente.

Las principales variables de este modelo y las cuales permiten que estos dispositivos sean obtenidos por los usuarios son: adopción por ahorro, adopción por boca a boca y adopción por publicidad.

En la Figura 6-12 se observan las variables involucradas y en resumen el proceso de adopción de medidores inteligentes.

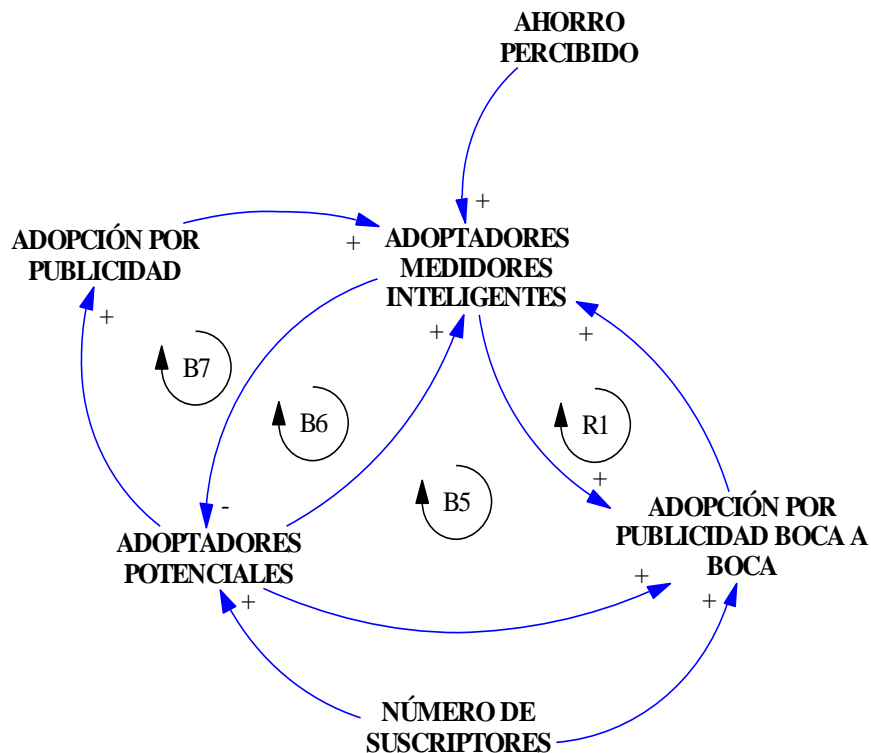
Figura 6-12: Adopción de medidores inteligentes.



Como se mostró en la Figura 6-1, este sub-modelo recibe la información del precio de la electricidad del sub-modelo de despacho de energía y envía la cantidad de adoptadores de medidores inteligentes al sub-modelo de cambio de curva de carga.

Para este sub-modelo se tiene la siguiente hipótesis dinámica:

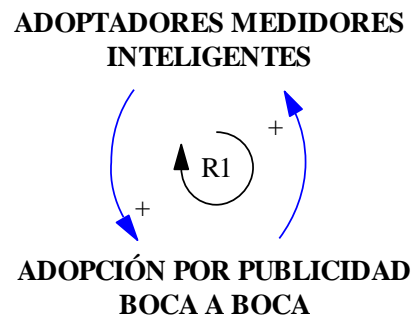
Figura 6-13: Diagrama Causal – Sub-modelo de penetración de medidores inteligentes



Este diagrama causal está compuesto por un ciclo de refuerzo y tres ciclos de balance, los cuales son explicados a continuación.

Como se mencionó anteriormente, en el modelo de Bass se tienen dos perfiles, uno de innovadores y otro de imitadores, en este caso los imitadores se ven representados por la adopción por boca a boca, ya que esta es la difusión de la existencia de la nueva tecnología gracias a que ya unos cuantos usuarios la poseen y los imitadores comienzan a adquirir los medidores inteligentes también. Esta dinámica se observa en la **Figura 6-14**, que representa el ciclo de refuerzo R1.

Figura 6-14: Ciclo de Refuerzo R1 - Adopción por publicidad Boca a Boca



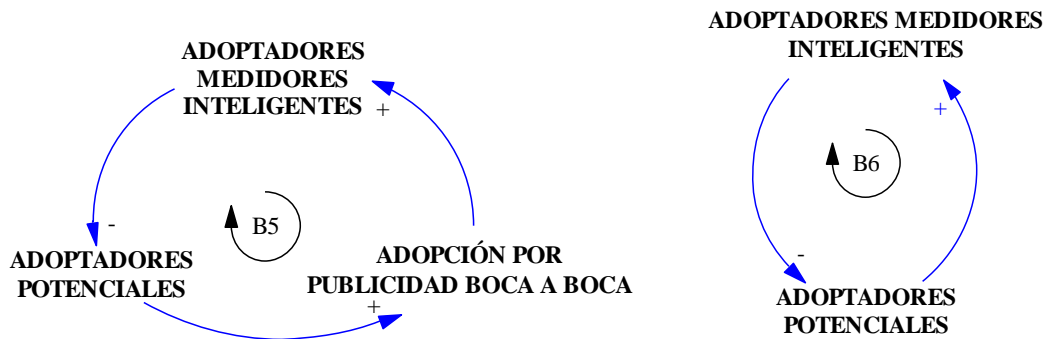
El ahorro que los consumidores perciben gracias a la obtención de un medidor inteligente es el que permite que los usuarios muestren interés y compren este dispositivo. Mientras mayor sea el ahorro percibido la cantidad de adoptadores será mayor, pues existe un incentivo financiero alto. En la **Figura 6-15** podemos ver esto, lo cual muestra el comportamiento de los innovadores.

Figura 6-15: Adopción por ahorro



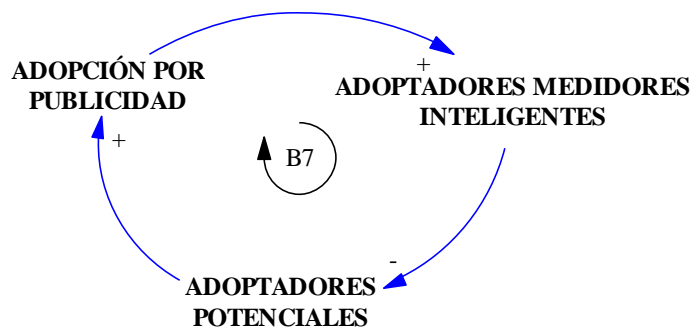
En los ciclos de balance B6 y B7 se observa la disminución en la cantidad de adoptadores potenciales gracias al aumento en la cantidad de adoptadores de medidores inteligentes.

Figura 6-16: Ciclos de Balance B5-B6 - Adoptadores potenciales - Adopción Boca a Boca

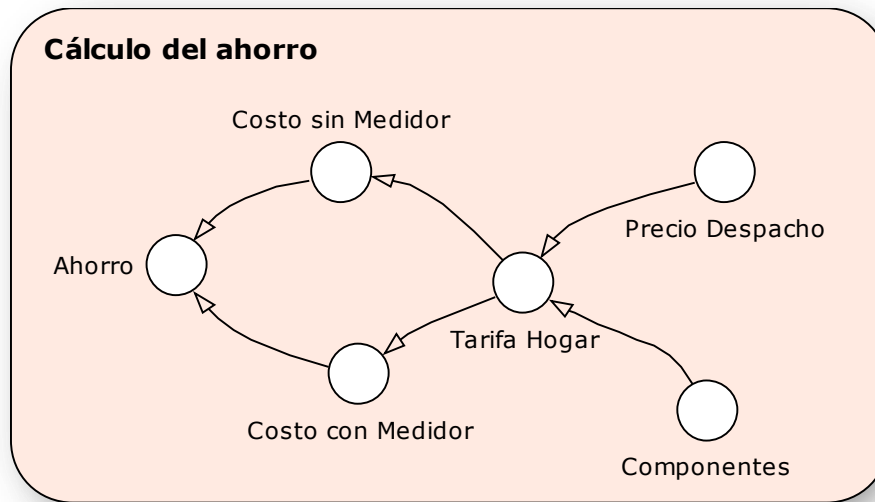


En la Figura 6-17 se muestran los esfuerzos en publicidad en tipo de dispositivos. Si la cantidad de adoptadores potenciales es muy alta, la publicidad que se genera es mayor.

Figura 6-17: Ciclo de Balance B7 - Adopción por publicidad



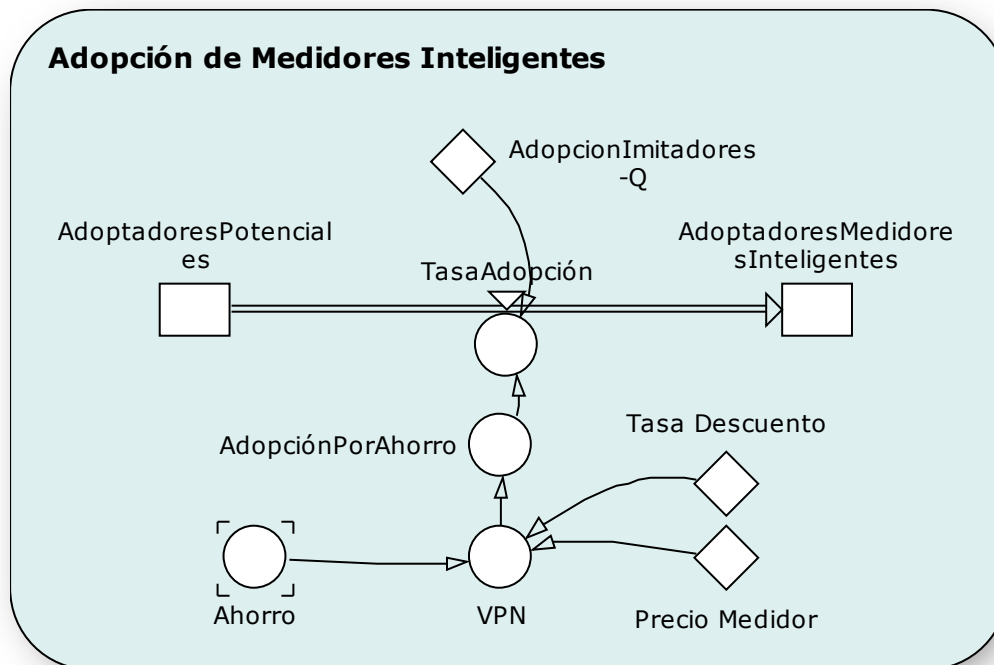
El modelo de dinámica de sistemas que representa el cálculo del ahorro, el cual es el incentivo para los usuarios se presenta en la **Figura 6-18**.

Figura 6-18: Diagrama de Flujos y Niveles - Ahorro

El ahorro que se obtiene del modelo se calcula por medio de la diferencia del costo de la electricidad con un medidor inteligente y otro sin medidor inteligente. Adicionalmente se tienen en cuenta todas las componentes que componen la factura eléctrica.

Para el proceso de entrada de medidores inteligentes a los hogares se tomó como referencia el modelo de Bass y artículos relacionados con la penetración de nuevas tecnologías (Daim & Suntharasaj, 2009; Lee, Kim, & Cho, 2010; Michalakelis, Varoutas, & Sphicopoulos, 2008; Teng, Grover, & Güttler, 2002). Y otra información de fuentes como: DANE (DANE, 2010, 2012), XM (XM, 2012). Este proceso puede verse en la **Figura 6-19**.

Figura 6-19: Diagrama de Flujos y Niveles - Adopción de Medidores Inteligentes



La adopción por ahorro está compuesta por el Valor Presente Neto que se encarga de calcular que tan viable y rentable es obtener un medidor inteligente. La información que se utiliza para calcular este VPN es el precio del equipo, el cual se traduce como la inversión que el usuario debe realizar y el ahorro obtenido por medio de la compra del mismo, que en este caso sería las ganancias. Este ahorro se calcula por medio de la diferencia entre el precio de la factura eléctrica de un consumidor sin medidor inteligente y el precio de la misma para alguien que si posee dicho medidor.

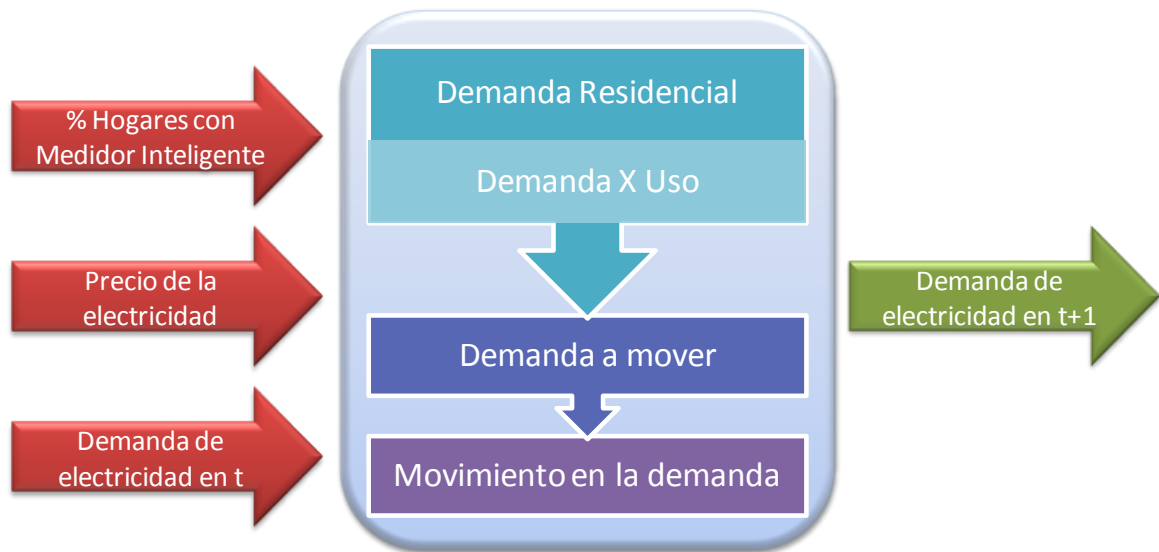
6.3 Sub-modelo de cambio de demanda

En este modelo se estudia como es el cambio en la demanda de los hogares gracias a la entrada de los medidores inteligentes, pues estos permiten realizar un cálculo horario del consumo de energía eléctrica y así poder mover una parte de la demanda para los periodos en los que el precio de la misma sea menor.

Los insumos que este sub-modelo necesita para realizar los cálculos y los cuales son recibidos de los demás sub-modelos son:

El proceso que se realiza para el cambio en la demanda comienza por determinar la cantidad de consumidores que poseen medidor inteligente, luego se define cual es el porcentaje de la demanda que pertenece a los hogares y qué cantidad de esta se puede mover y por último la parte de la demanda que se puede mover y que está en una hora en la que el precio de la electricidad es más alto es trasladada a una hora en la que esta tenga un costo más bajo. Este proceso se puede ver ilustrado en la Figura 6-21.

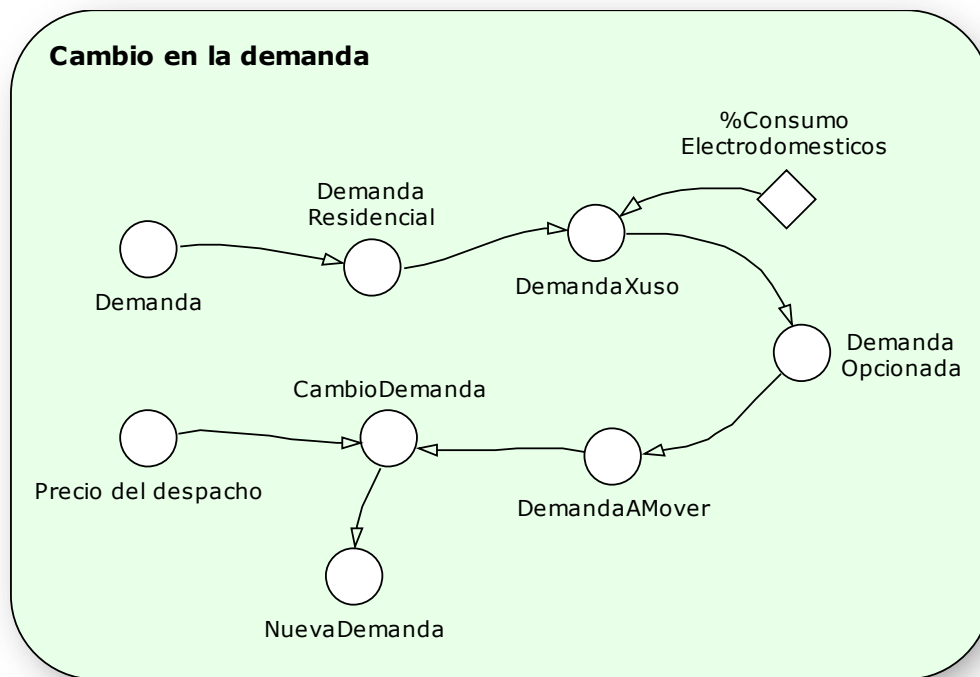
Figura 6-21: Cambio en la demanda



La demanda que los consumidores pueden cambiar es la que pertenece a electrodomésticos como la lavadora, la plancha, entre otros, siendo esta la demanda que puede trasladarse para otros periodos del día, la demanda de electricidad por iluminación o por electrodomésticos como la estufa, no puede moverse.

La decisión de cambiar parte de la demanda para otros periodos de tiempo se toma con base en el precio de la misma y como se mencionó anteriormente, la cantidad de demanda que se puede variar es solo la que pertenece a aquellos consumidores que posean medidor inteligente.

Luego de obtener un nuevo vector de demanda este es enviado al sub-modelo del despacho de electricidad, el cual vuelve a calcular el precio para el siguiente período basado en la nueva demanda que se debe suplir. En la **Figura 6-22** se muestra el diagrama de Flujos y Niveles.

Figura 6-22: Diagrama de Flujos y Niveles - Cambio en la demanda

Para realizar los cálculos necesarios y así determinar la demanda de los diferentes electrodomésticos se utilizó la información de la UPME del Estudio de las características residenciales (UPME, 2006, 2012) y se revisaron otras fuentes (Brugnoni, Tanides, & Dutt, 1996; Capasso, Grattieri, Lamedica, & Prudenzi, 1994; Chaudhry, 2010; Jardine, 2008; Paatero & Lund, 2006; Prudenzi, 2002; Widén et al., 2009; Zimmermann, 2009).

6.4 Especificaciones del modelo

Las especificaciones adicionales definidas para el modelo de Dinámica de Sistemas son:

- El horizonte de simulación utilizado es de 10 años, que comprende un periodo desde el 2012 hasta el 2022 y el paso de tiempo de la simulación es 1 mes. El tiempo que se definió fue debido a que es suficiente para estudiar los cambios en el sistema y adicionalmente la vida útil del medidor inteligente es de aproximadamente 10-15 años.

-
- Las siguientes variables son exógenas al modelo: adopción por publicidad, adoptadores potenciales, número de suscriptores.
 - El despacho se realiza por mérito, intentando cubrir la mayor cantidad de la demanda con las tecnologías más baratas. Si en algún momento no se logra cubrir la demanda el precio de la electricidad será el precio de razonamiento.
 - Las tecnologías utilizadas para el despacho son: hidráulica con embalse (compuesta por 3 plantas), filo de agua, térmica a carbón y térmica a gas. Aunque para este proceso en realidad se consideran más tecnologías, estas no fueron evaluadas ya que no son necesarias para cumplir los objetivos de esta tesis.
 - La oferta de electricidad depende de varios factores más que no fueron tenidos en cuenta, estos son la disponibilidad del combustible, el cargo por confiabilidad, las plantas que son despachadas por seguridad, contratos ya realizados, entre otros, pero estos factores se sale del alcance de esta tesis.
 - El embalse es modificado por 3 factores: aportes, generación y vertimientos. Si en algún momento el embalse sobrepasa su capacidad máxima este comenzara a derramar agua y si por el contrario la cantidad de agua almacenada en el es muy poca ocasionaría que el precio de esta tecnología se ponga muy caro. Adicionalmente la capacidad máxima del embalse se verá afectada si en algún momento y por motivos de expansión en capacidad entran plantas al sistema que son de tipo hidráulicas con embalse, ya que la entrada de estos proyectos hace que el nivel máximo del embalse aumente de manera proporcional.
 - La demanda que los consumidores pueden variar es solo un porcentaje de su demanda, la cual pertenece a aquellos electrodomésticos que pueden ser utilizados en otras horas del día diferentes a las habituales.

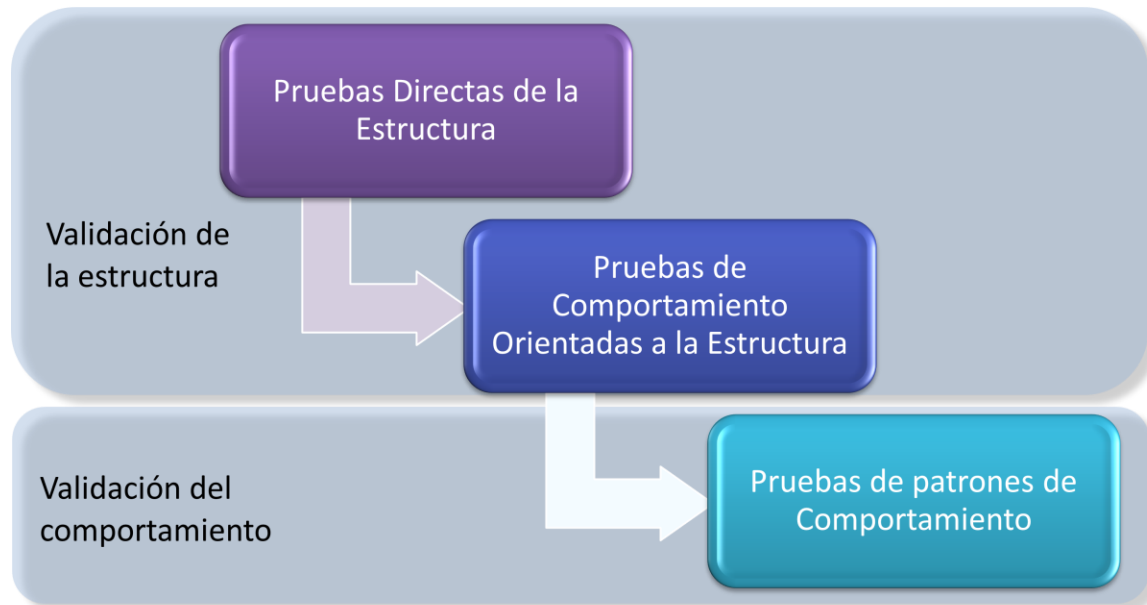
7. Validación del modelo

La validación es una parte importante y fundamental en cualquier tipo de modelado y mucho más en modelos de Dinámica de Sistemas, ya que este tipo de modelado, sobre el sistema real, debe no solo reproducir el comportamiento del mismo, sino también explicar cómo el comportamiento es generado y sugerir maneras de cambiar el comportamiento existente (Barlas, 1996).

Adicionalmente muchos de estos modelos no cuentan con toda la información necesaria y los resultados pueden no ajustarse perfectamente a la realidad sino que buscan mostrar el funcionamiento del sistema y los diferentes comportamientos que se presentan ante diversas políticas.

Según Forrester & Senge (1980), la validación es el proceso en el cual se establece confianza en la robustez y en la utilidad del modelo. Por otro lado se tiene la definición de Barlas (Barlas, 1996), el cual expone que la validez se define como: "Adecuado con respecto a un propósito" y que el objetivo de la validación de un modelo de dinámica de sistemas es establecer la validez de la estructura del modelo.

El proceso de validación que propone Barlas en el año 1996 posee la siguiente estructura:

Figura 7-1: Proceso de validación. (Barlas, 1996)

A continuación se presenta el proceso de validación.

7.1 Pruebas directas sobre la estructura

Las pruebas directas de la estructura están compuestas por:

- Pruebas empíricas: buscan comparar la estructura del modelo con la información y el conocimiento que se posee del mismo en el mundo real (Barlas, 1996).
- Pruebas teóricas: el objetivo es comparar la estructura con conocimiento real del sistema reportado en la literatura (Barlas, 1996).

Estas pruebas buscan comparar la estructura del modelo directamente con la estructura del sistema real que el modelo representa y esta debe no contradecir el conocimiento del sistema real. También verificar que los parámetros del modelo correspondan conceptual y numéricamente a los parámetros del mundo real (Forrester & Senge, 1980).

La validación se realizó en el capítulo anterior (Descripción del modelo), en la cual se presentó la estructura completa del modelo y se analizó cada una de las relaciones existentes comparándolas con el comportamiento del sistema en la vida real.

- Pruebas de condiciones extremas: evalúa el modelo ante condiciones extremas. ejemplos de este test son valores en cero o muy altos. Es muy útil para descubrir fallas en el modelo (Barlas, 1996; Forrester & Senge, 1980).

Para realizar esta prueba el modelo se sometió a condiciones extremas, las cuales fueron poner la demanda en cero lo que da como resultado que el modelo no realice ningún despacho pues no hay demanda que suplir, también se puso un costo de la electricidad muy barato por lo que el incentivo para obtener un medidor inteligente es casi nulo y por lo tanto no hay penetración de esta nueva tecnología.

Los resultados de estas pruebas se presentan en el Anexo1: Pruebas de condiciones extremas.

- Consistencia dimensional: el objetivo de esta prueba es validar la consistencia dimensional de todas las ecuaciones del modelo (Barlas, 1996; Forrester & Senge, 1980).

Esta comprobación se realizó por medio de la herramienta que incluye PowerSim Estudio para verificar las dimensiones en cada una de las variables del sistema.

7.2 Pruebas de comportamiento orientadas a la estructura

Para realizar esta validación se realizaron las siguientes pruebas:

- Pruebas de sensibilidad: para esta prueba se deben establecer aquellos parámetros para los cuales el modelo es muy sensible y determinar si el sistema real también exhibe esta misma sensibilidad ante estos parámetros (Barlas, 1996).

Para esta prueba se realizó el análisis de sensibilidad que se presenta en el Anexo2: Análisis de sensibilidad.

7.3 Validación del comportamiento

Para validar el comportamiento del modelo se deben realizar pruebas de patrones de comportamiento, las cuales tienen como objetivo determinar si el modelo posee la capacidad de reproducir los patrones de comportamiento del sistema real más representativos (Barlas, 1996; Forrester & Senge, 1980).

Esta validación posee pruebas que pueden ser realizadas (Forrester & Senge, 1980):

- Reproducción del comportamiento: Evalúa que tanto el comportamiento del modelo concuerda con el comportamiento del sistema real observado. Se centra en el comportamiento histórico.
- Predicción del comportamiento: Evalúa que tanto el comportamiento del modelo concuerda con el comportamiento del sistema real observado. Se centra en comportamiento futuro.
- Anomalías en el comportamiento: Esta prueba se basa en observar las principales anomalías que presenta el modelo en comparación con el sistema real.
- Políticas: Para esta validación se debe realizar la alteración de una política y así poder observar y determinar las consecuencias dinámicas que dicha política presenta en el modelo.

El sistema que se desea modelar apenas está en estado de formación, por lo que no se poseen datos históricos, lo que dificulta la comparación del modelo con el comportamiento histórico del sistema real y no es posible realizar algunas pruebas como la de reproducción del comportamiento y la de predicción del mismo. Es por esto que se realiza una validación por medio de la cual se busca comprobar si los comportamientos del modelo son lógicos y coherentes y van de acuerdo a la información y el conocimiento que se posee sobre el sistema.

Para esto se realiza la definición y análisis de políticas, las cuales son expuestas en el capítulo Definición y análisis de políticas que se presenta más adelante.

8. Escenario base

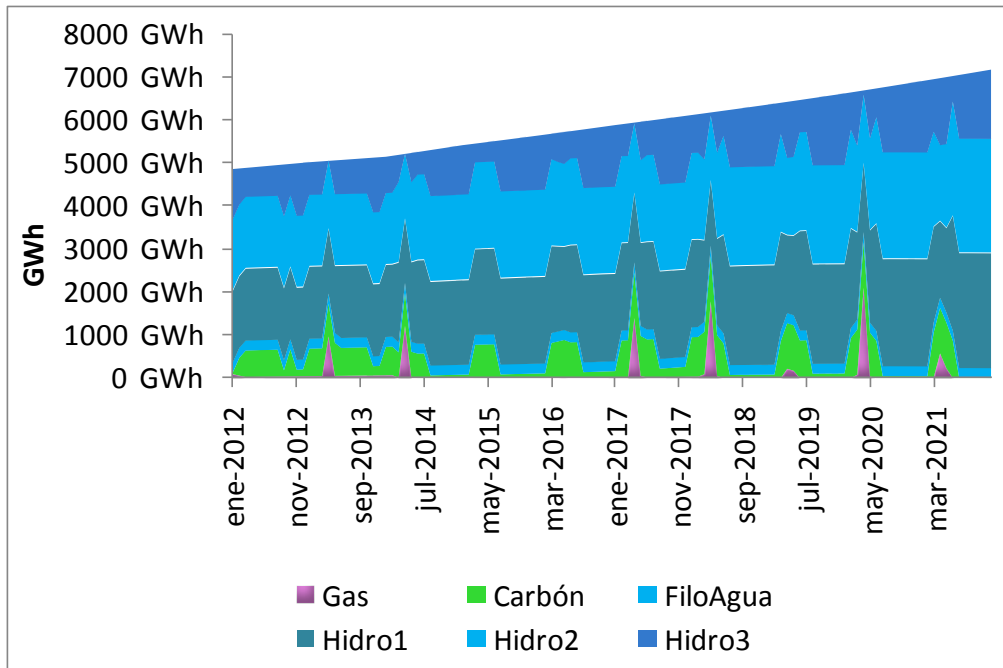
El escenario base es un punto de referencia para el estudio del sistema, este escenario es el que permite realizar la validación al modelo y observar si se comporta de manera adecuada y consistente con la realidad y adicionalmente por medio del mismo se pueden aplicar las diferentes políticas, observar el comportamiento y los cambios en el modelo y así realizar el análisis de las mismas.

Es por esto que el escenario base muestra el estado del sistema en su condición actual, en el cual se realiza el despacho y se tiene en cuenta la expansión en la capacidad de generación y no se tiene entrada de los medidores inteligentes a los hogares y mucho menos el cambio en la curva de carga.

Para este escenario se busca suplir satisfactoriamente la demanda con los recursos disponibles y con las capacidades de las diferentes tecnologías (hidráulica con embalse, hidráulica filo de agua, carbón y gas). Los precios de los recursos de carbón y gas son en principio más caros que los de las plantas hidráulicas y el precio de estas varía dependiendo del nivel del embalse, por lo que si en algún momento los embalses están con un nivel muy bajo este precio puede superar los precios de las plantas térmicas.

En esta simulación no se tienen en cuenta los cambios climáticos como La Niña o El Niño.

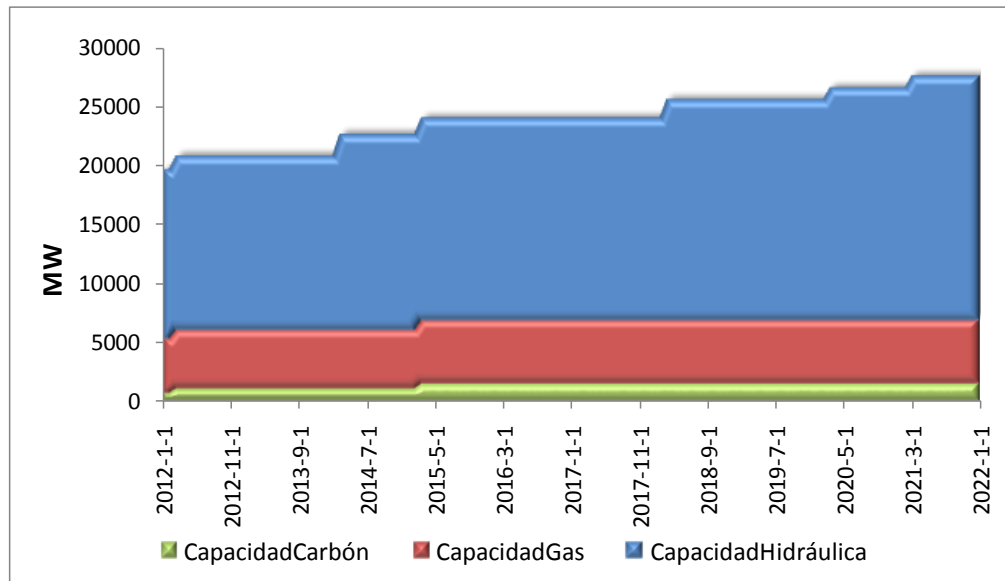
El despacho de electricidad se puede observar en la **Figura 8-1**, en la cual se puede ver como entran las diferentes tecnologías gracias a los precios de las mismas. La tecnología que predomina es la hidráulica por ser más barata, pero en ciertos períodos, cuando comienza a bajar el nivel del embalse, las térmicas entran con más fuerza en el despacho por tener un costo más barato que la hidro para dicho periodo.

Figura 8-1: Despacho de electricidad

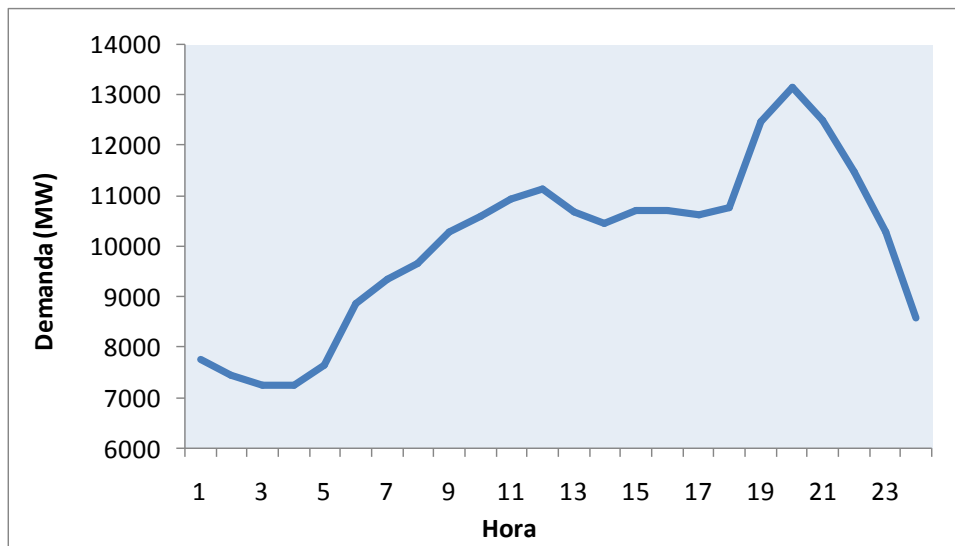
Por otro lado se tiene la expansión en la capacidad de generación, la cual se realiza de acuerdo a las subastas realizadas, las cuales deben cumplir con la Obligación de Energía Firme (OEF)(Ossa López, 2012). En este caso se tienen las fechas en las que entran los proyectos de construcción de nuevas plantas y en el instante en el que se cumple la fecha en la que está presupuestada la entrada de algún proyecto se adiciona al sistema la capacidad nueva, esta capacidad se adiciona a la tecnología a la cual pertenece el proyecto (térmica o hidráulica). Los nuevos proyectos que están definidos en estas subastas y las diferentes capacidades fueron presentadas en el capítulo Justificación.

La evolución en la capacidad instalada se puede observar en la **Figura 8-2**, en la cual se puede ver la dinámica en la expansión de capacidad de generación gracias a la entrada de los nuevos proyectos en la fecha estipulada.

Gracias al gran potencial hidroeléctrico que posee Colombia y a que este tipo de tecnología presenta costos de generación más bajos, la tecnología que es más atractiva a los inversionistas en la hidroeléctrica como se observa en la **Figura 8-2**.

Figura 8-2: Evolución en la capacidad instalada

Del modelo también podemos obtener la curva de carga final (**Figura 8-3**), en la cual se pueden ver claramente los picos en las horas de demanda máxima, los cuales ocasionan que el precio de la energía eléctrica sean más alto y que se deba tener capacidad de generación instalada que solo se utiliza para suplir estos picos y adicionalmente planes de expansión que vayan acorde a las proyecciones de aumento en la demanda y permitan suplir las necesidades y exigencias de consumo en el largo plazo.

Figura 8-3: Curva de carga de referencia (Elaboración propia).

El cálculo del costo de la energía eléctrica se realiza por medio de la fórmula tarifaria definida en la resolución CREG 119 del año 2007 (CREG, 2007), en la cual no se diferencia el período del día en el que los hogares consumen, es decir, no importa en qué horas del día se consume o si consume mucho más en las horas picos, ya que el costo final entregado al usuario es el mismo para cualquier hora del día.

Esta fórmula tarifaria está compuesta por 6 componentes las cuales son: generación, comercialización, transmisión, distribución, pérdidas y restricciones. Para el cálculo de la fórmula tarifaria se separó cada una de las componentes y la generación es calculada por el sub-modelo de despacho y corresponde al precio del despacho, las demás componentes son calculadas por medio de valores que el administrador del mercado (XM) publica en sus servidores (XM, 2012)(NEON, 2012).

Según lo anterior, no existe ninguna diferencia en el costo de la energía para las diferentes horas del día y la cantidad que se consume en las horas fuera de pico y en las horas en pico no influyen en la tarifa de energía eléctrica que el usuario recibe.

Es por esto que para este escenario no se tiene entrada de medidores inteligentes a los hogares, ya que no se tienen tarifas horarias y por lo tanto el costo en las horas pico es el mismo que en las demás horas, por lo que no hay un incentivo económico, un ahorro que los usuarios ven reflejados en sus facturas gracias a utilizar estos medidores.

Así mismo, no hay cambios en los hábitos de consumo de los usuarios y por lo tanto el sub-modelo de cambio de demanda permanece estático y la curva de carga no presenta ningún cambio.

9. Definición y análisis de políticas

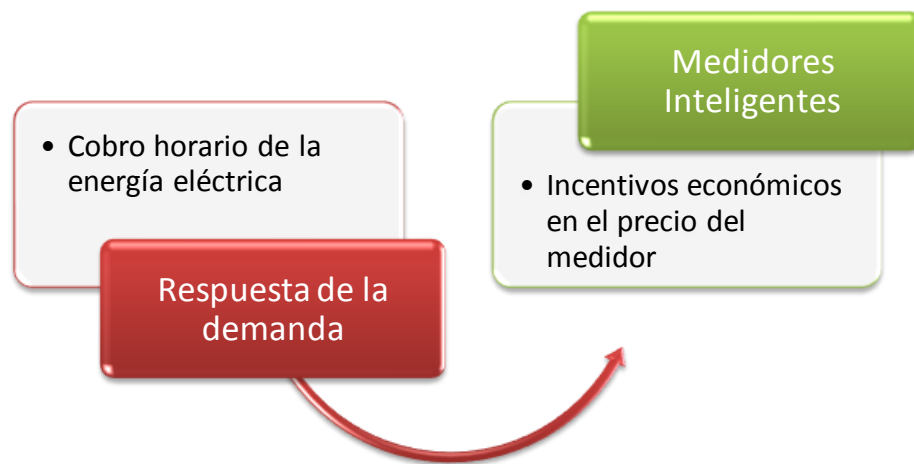
El objetivo principal para el análisis de políticas es poder observar diferentes comportamientos a partir de diferentes políticas en las cuales se modifican algunos parámetros del sistema. Se desea estudiar estos cambios en el comportamiento, analizar los patrones que se presentan y poder aprender sobre este sistema.

Para poder realizar esta tarea se definieron diferentes escenarios y se corre el modelo con las especificaciones de cada escenario, observando cómo sería el comportamiento ante las condiciones definidas.

Este análisis de políticas gira en torno a dos frentes, el primero tiene como objetivo incentivar la respuesta de la demanda y el segundo busca fomentar la entrada de medidores inteligentes de una manera más amplia.

En la **Figura 9-1** se presentan los escenarios planteados para estudiar los frentes antes mencionados.

Figura 9-1: Escenarios en el análisis de políticas



Para el escenario de cobro horario de energía eléctrica se modifica el cálculo del costo de la misma, ya que se comienzan a diferenciar los periodos del día en el que los hogares consumen y por lo tanto si importa en qué horas del día se consume y si se consume mucho más en las horas picos. Esto se ve reflejado en la tarifa de energía eléctrica que el usuario recibe.

El escenario de incentivos económicos en el precio del medidor busca aumentar la entrada de medidores inteligentes a los hogares y por lo tanto se realizan incentivos en el precio, mermando el costo del mismo a los usuarios, lo que los hace más atractivos.

9.1 Medición y cobro del consumo de energía eléctrica de manera horaria.

En este escenario se define como parte fundamental el cobro horario de la energía eléctrica, por lo que se comienza a diferenciar el costo de la energía para las diferentes horas del día.

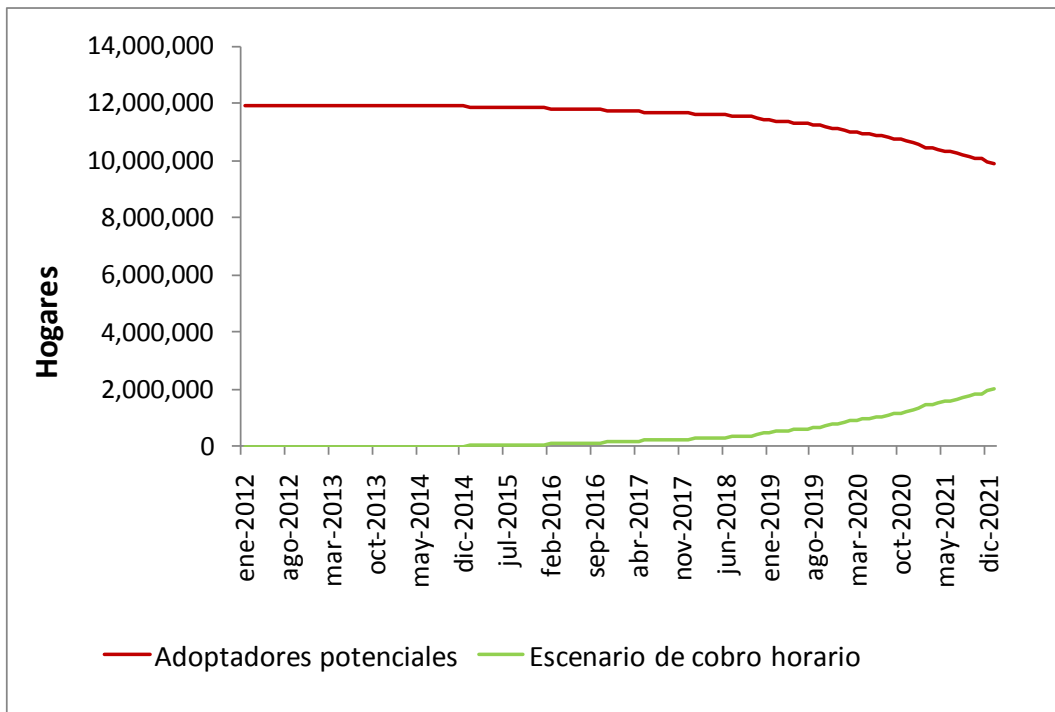
Para este escenario se tienen las mismas características y condiciones del escenario base y se adiciona el cobro de la energía eléctrica de manera horaria.

La entrada de los medidores inteligentes a los hogares en este escenario es viable, ya que se tienen tarifas horarias y por lo tanto el costo en las horas pico es diferente a las demás horas, por lo que hay un incentivo económico para cambiar los hábitos de consumo y mover una parte de la demanda de las horas pico a las horas en las que se tiene un menor costo. Esto se ve reflejado en un ahorro en las facturas de energía eléctrica gracias al uso de estos medidores, los cuales brindan la posibilidad de un cobro horario.

Para que los medidores inteligentes entren en los hogares los usuarios deben percibir un ahorro, para este escenario el ahorro percibido corresponde a la diferencia entre el costo de una factura con medidor inteligente y una sin medidor inteligente.

En la **Figura 9-2** se puede observar la dinámica de la entrada de los medidores inteligentes.

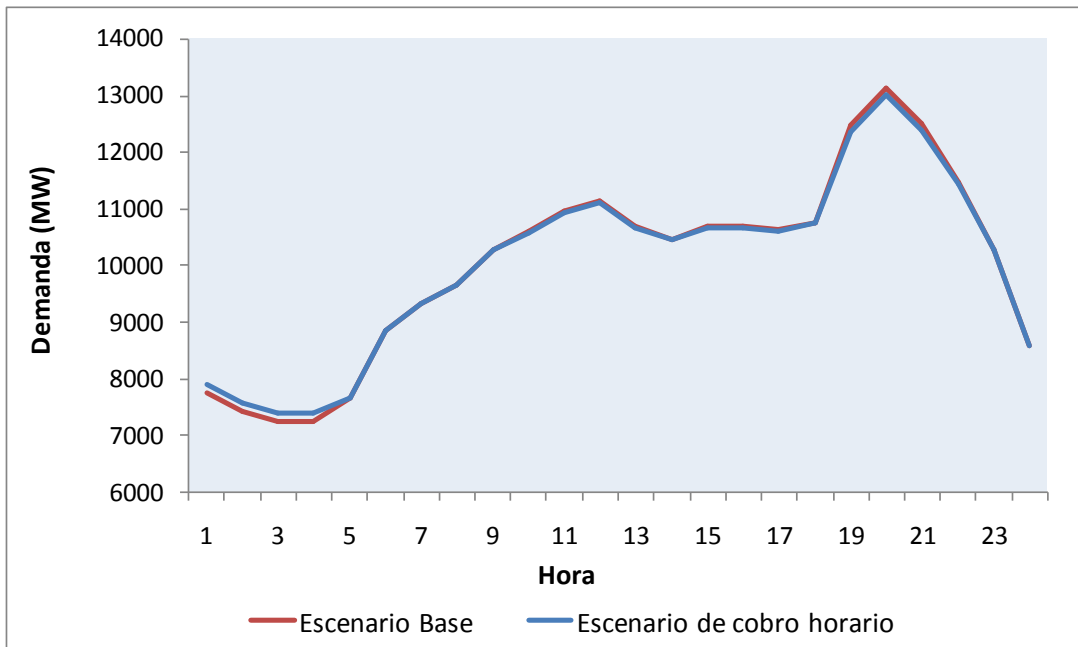
Figura 9-2: Adoptadores medidores inteligentes - Escenario de cobro horario



La cantidad de adoptadores de medidores inteligentes no es muy alta (Figura 9-2) debido a que el incentivo económico, que en este escenario se ve reflejado como el ahorro percibido, no es lo suficientemente alto para incentivar a muchos compradores a obtener esta nueva tecnología.

Por otro lado, en este escenario se presentan cambios en los hábitos de consumo de los usuarios, ya que los consumidores que poseen medidor inteligente pueden mover una parte de su demanda de las horas pico a las demás horas, ya que la medición de su consumo es horario y su factura depende de los precios de las diferentes horas y el consumo en cada una de estas. Dado esto la curva de carga presenta cambios, los cuales se pueden ver en la **Figura 9-3**

Figura 9-3: Curva de carga Escenario base Vs curva de carga Escenario de cobro horario



En la Figura 9-3 se compara la curva de carga del escenario base con la del escenario de cobro horario y se puede ver que hay un cambio entre estas dos curvas. Esto ocurre debido a que las personas que adoptan la nueva tecnología, a pesar de no ser muchas, mueven una parte de su demanda a las horas en las que la electricidad tiene menor precio y por ende se logra aplanar un poco la curva de carga.

9.2 Incentivos económicos en el precio del medidor

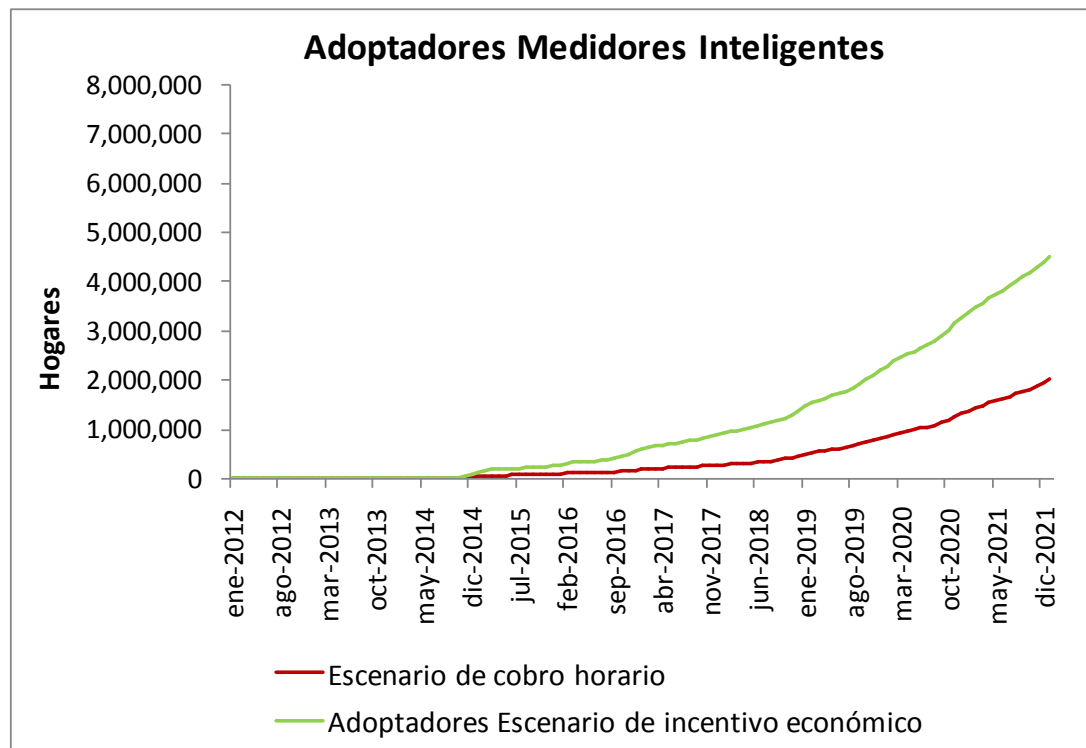
Para evaluar este escenario se adicionó al modelo un incentivo económico en el precio del medidor inteligente. Esto ocasiona que la compra del medidor inteligente sea más atractiva para los consumidores, ya que el precio del medidor sería inferior y también se tendría el beneficio económico que estos obtienen en sus facturas de energía eléctrica.

Se utilizó en el modelo las características del modelo en el escenario de cobro horario para poder hacer el cálculo del consumo y los costos horarios y se adiciona la disminución en el precio del medidor de un 40%.

En este escenario se tiene que la entrada de los medidores inteligentes es más amplia, esto se debe a que el ahorro percibido es más alto y por lo tanto comprar un medidor inteligente es una opción más atractiva comparada con el escenario anterior.

Este comportamiento se puede observar en la **Figura 9-4**.

Figura 9-4: Adoptadores medidores inteligentes en el Escenario de cobro horario Vs. Adoptadores medidores inteligentes en el Escenario de incentivo económico en el precio del medidor.

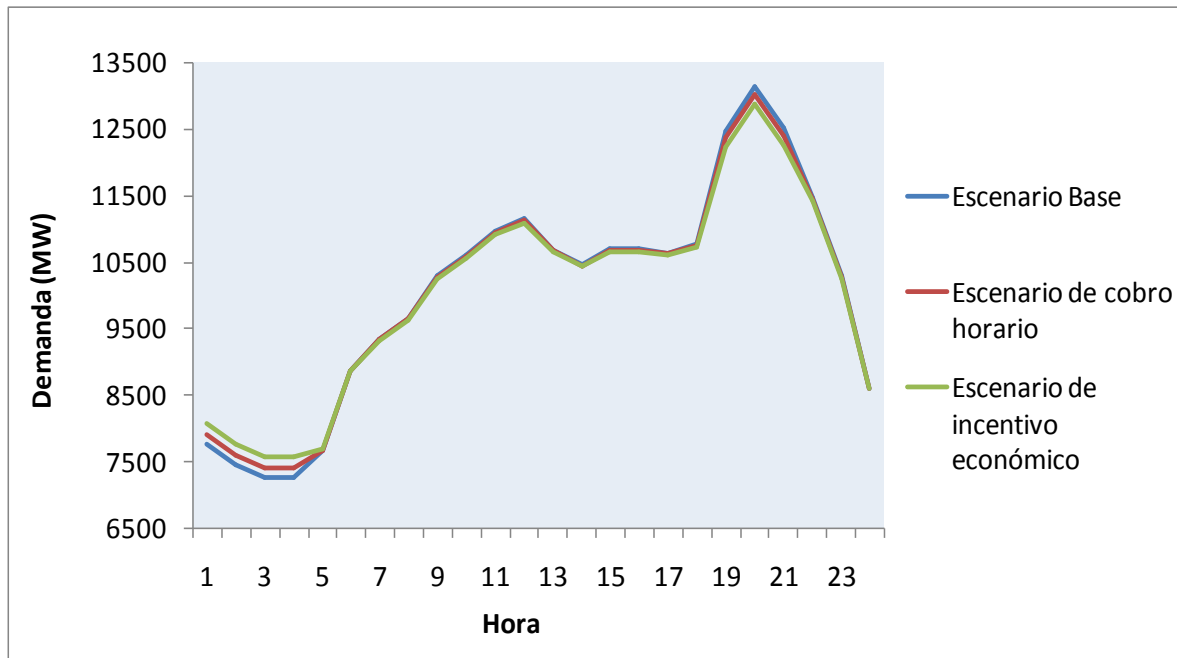


En la **Figura 9-4** se compara la entrada de medidores inteligentes en el escenario de cobro horario con el escenario de incentivo económico y se puede ver que la entrada de los mismos es mayor en este segundo escenario.

Los cambios en la curva de carga se presentan en la **Figura 9-5**, en la cual se compara el comportamiento del modelo para los diferentes escenarios: escenario base, escenario de cobro horario y escenario de incentivo económico en el precio del medidor.

En este caso el aplanamiento de la curva de carga es mayor debido a que la cantidad de consumidores con medidor inteligentes es más alta, por lo tanto más usuarios cambian sus hábitos de consumo y mueven una parte de su demanda de las horas de demanda máxima a otras horas en las que la electricidad esté más barata.

Figura 9-5: Curva de carga Escenario base Vs curva de carga Escenario de incentivo económico en el precio del medidor.

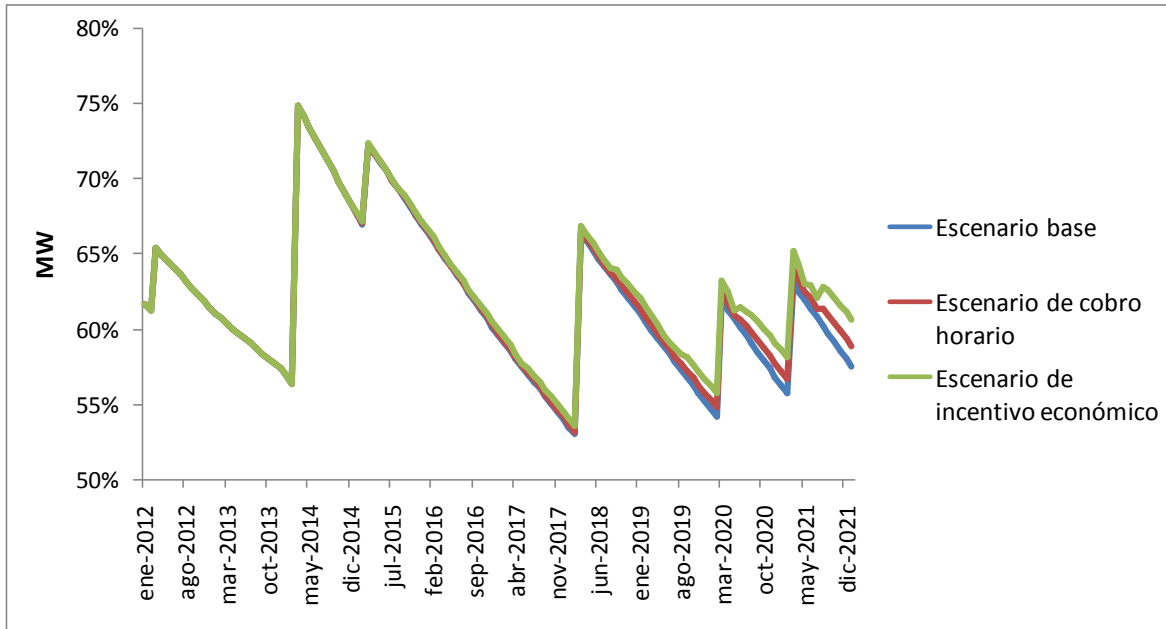


En este caso se presenta una diferencia entre las curvas de carga para la hora de demanda máxima (Hora 20) de:

- Escenario base – Escenario de cobro horario: La demanda paso de 13138.39 MW a 13021.81 MW, para una disminución de 117.58 MW.
- Escenario base – Escenario de incentivo económico: La demanda se movió de 13138.39 MW a 12881.33 MW, para una diferencia de: 257.06 MW

En la Figura 9-6 se puede apreciar con más claridad como la necesidad de instalar más capacidad instalada disminuye debido a que el margen que existe entre la capacidad instalada y la demanda máxima de potencia para los diferentes escenarios va aumentando en el largo plazo.

Figura 9-6: Margen entre capacidad instalada y demanda máxima de potencia para los escenarios analizados



Para el escenario base se tiene un margen de 57.5%, mientras que para el escenario de incentivo económico en el precio del medidor y gracias al cambio en la curva de potencia, el margen tiene un valor de 60.7%.

10. Conclusiones

- Los cambios en las condiciones del sistema eléctrico y en las exigencias de los consumidores ocasionan que se deban buscar nuevos enfoques y desarrollos para la mejora y actualización del mismo, ya que siempre se busca garantizar la confiabilidad, seguridad y calidad en el suministro de energía eléctrica.
- Luego de realizar la revisión sistemática de literatura se encuentra que existen diferentes metodologías para la construcción de modelos para mercados de electricidad, a pesar de esto, se evidencia la necesidad del desarrollo de una herramienta que ayude a la comprensión de la entrada de los medidores inteligentes al sistema eléctrico colombiano y al cambio en la curva de carga.
- Para este trabajo se desarrolló un modelo de simulación en Dinámica de Sistemas que reproduce el comportamiento de la entrada de medidores al sistema y cambios en la curva de carga teniendo en cuenta la estructura del mercado de energía eléctrica de Colombia y modelos que estudian la entrada de nuevas tecnologías, para este caso los medidores inteligentes.
- Para la definición del modelo de penetración de medidores inteligentes se lograron identificar las principales variables en este proceso, lo que permite entender la relación entre las mismas y el comportamiento dado gracias a estas.
- La herramienta desarrollada considera las variables involucradas en los procesos, realimentación y las demás especificaciones necesarias y permite la identificación de variables importantes para este tipo de modelado.
- La entrada de medidores inteligentes a los hogares puede traer grandes beneficios a los usuarios y al sistema, sin embargo es necesaria la participación activa de los consumidores para que todas estas mejoras puedan tener un efecto positivo.

- Algunas de las mejoras que se obtienen al realizarse un aplanamiento de la curva de carga son por ejemplo la reducción en los precios de la energía eléctrica, incentivar la competencia, evitar la necesidad de construcción de capacidad de generación en el corto-mediano plazo y por ende permitir el aprovechamiento de todos los recursos disponibles de una manera más eficiente.
- Por medio de la obtención de medidores inteligentes y del cambio en los patrones de consumo los hogares pueden obtener beneficios económicos reflejados en los costos de su factura.
- El modelo permite la evaluación de diferentes políticas, lo cual posibilita un mayor entendimiento del sistema y el análisis de los diferentes eventos futuros que pueden presentarse.
- Después de estudiar la entrada de los medidores inteligentes a los hogares, se encontró que este comportamiento está determinado principalmente por el comportamiento de los innovadores, es decir, aquellas personas que gracias a que perciben un ahorro por medio de la obtención de estos dispositivos realizan la compra del mismo incentivando a los demás posibles compradores.
- El estudio del comportamiento de los consumidores respecto a las REI es importante, pues estos pasarían a ser entes activos en la cadena de suministro y su comportamiento puede ayudar al aplanamiento de la curva de carga.
- Para que la entrada de los medidores inteligentes al país sea viable es necesario un ahorro percibido por los consumidores gracias a la entrada de esta nueva tecnología.
- La entrada de los medidores inteligentes incentiva a los usuarios para que cambien sus hábitos de consumo y trasladen una parte de su demanda para las horas en las que se tienen menores precios.

-
- A mayor cantidad de usuarios con estos medidores más rápido es el aplanamiento de la curva de carga, pues el consumo en los rangos de demanda (alta, media, baja) tiende a ser el mismo.
 - La política de cobro de la energía eléctrica de manera horaria incentiva la penetración de medidores inteligentes, pues esta permite que a cada usuario se le cobre por lo que consume en cada hora.
 - Por medio de la política de cobro horario los usuarios pueden ver los precios en los que la energía eléctrica tiene mayor costo, lo que los incentiva a cambiar sus hábitos de consumo y pasar una parte de su demanda para las horas en las que tiene menor costo.
 - Gracias al cambio que hay en la curva de carga y que los picos en la misma disminuyen, el margen que existe entre la capacidad instalada y la demanda máxima de potencia en el escenario de cobro horario es más amplio que para el escenario base y por lo tanto la necesidad de realizar una expansión en capacidad de generación disminuye.
 - La política de incentivo económico en el precio del medidor ayuda a aumentar la cantidad de personas que obtienen un medidor inteligente, ya que el ahorro que los usuarios perciben es mayor.
 - La penetración de medidores inteligentes es más alta para el escenario de incentivo económico que para el escenario de cobro horario, debido a que el beneficio percibido es mayor.
 - El cambio en la curva de carga para el escenario de incentivo económico en el precio del medidor es más alto que en el escenario de cobro horario, esto se debe a que hay más usuarios que poseen medidor inteligente y por lo tanto más hogares pueden tener acceso a información relacionada con su consumo y con el precio del mismo y por lo tanto más personas pueden mover parte de su demanda para otras horas del día.

- Para el escenario de incentivo económico en el precio del medidor se tiene que el margen entre la capacidad instalada y la demanda máxima de potencia es mayor que para los demás escenarios analizados, disminuyendo aún más la necesidad de instalar capacidad de generación en el sistema.
- Una de las principales dificultades que se presentó en la realización de este trabajo fue la disponibilidad de información, ya que no hay reportes para estas nuevas tecnologías.

10.1 Difusión del trabajo

- Se presentó la ponencia Formulación de políticas para la penetración de las Smart Grid en Colombia en el IX Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas.
- La ponencia Formulación de políticas para la penetración de las Redes Eléctricas Inteligentes en Colombia se presentó en el IX Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas.
- En el X Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas se presentó la ponencia Políticas para la adopción de medidores inteligentes en el mercado eléctrico y su influencia en la demanda.

A. Anexo1: Pruebas de condiciones extremas

Los resultados de las pruebas de condiciones extremas se presentan en este anexo.

Demanda en cero

La demanda con un valor de cero provoca que no se realice ningún despacho, este comportamiento se puede observar en la Figura 10-1 y se debe a que no hay demanda para suplir.

Adicionalmente la entrada de medidores inteligentes es nula, como se muestra en la Figura 10-2

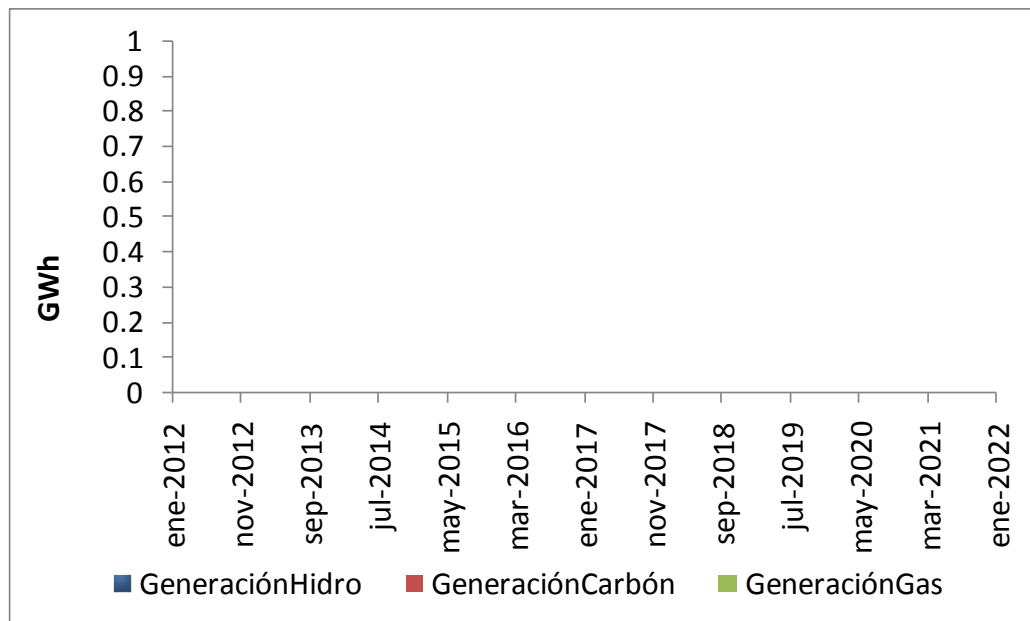
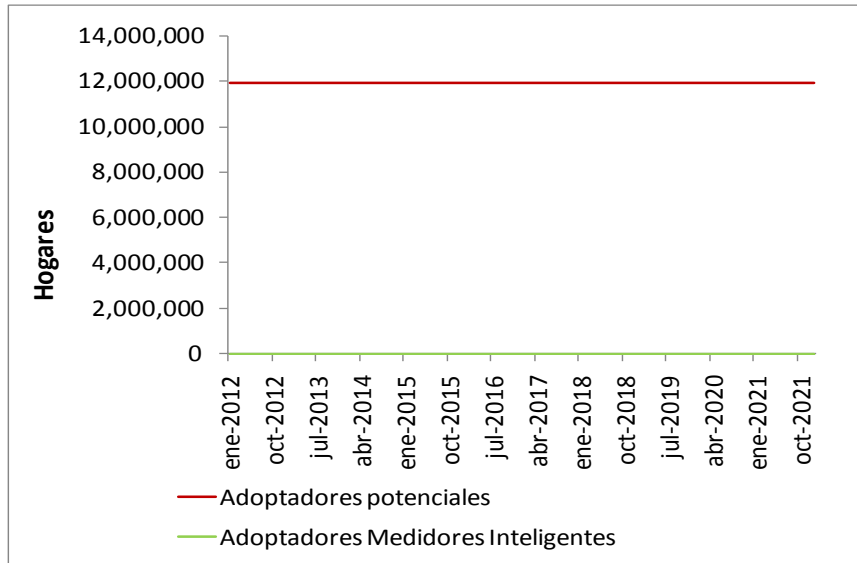
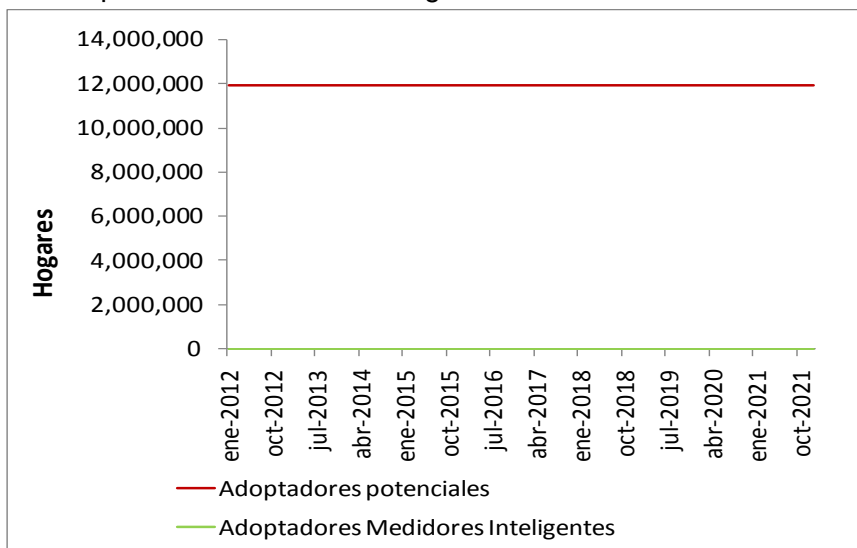


Figura 10-1. Despacho de electricidad con demanda en cero

Figura 10-2. Adopción de medidores inteligentes con demanda en cero

Costo de la electricidad muy bajo

Para el caso en el que la electricidad tenga un costo muy bajo el incentivo para obtener un medidor inteligente es casi nulo y por lo tanto no hay penetración de esta nueva tecnología, dando como resultado el comportamiento de la Figura 10-3 para la entrada de los medidores inteligentes.

Figura 10-3. Adopción de medidores inteligentes con costo de la electricidad muy bajo

B. Anexo2: Análisis de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad se seleccionaron las variables que presentaban mayor incertidumbre en el modelo y se analizaron.

Los resultados de este análisis son comparados con el comportamiento del modelo en el escenario base mostrado en el capítulo 8: Escenario base.

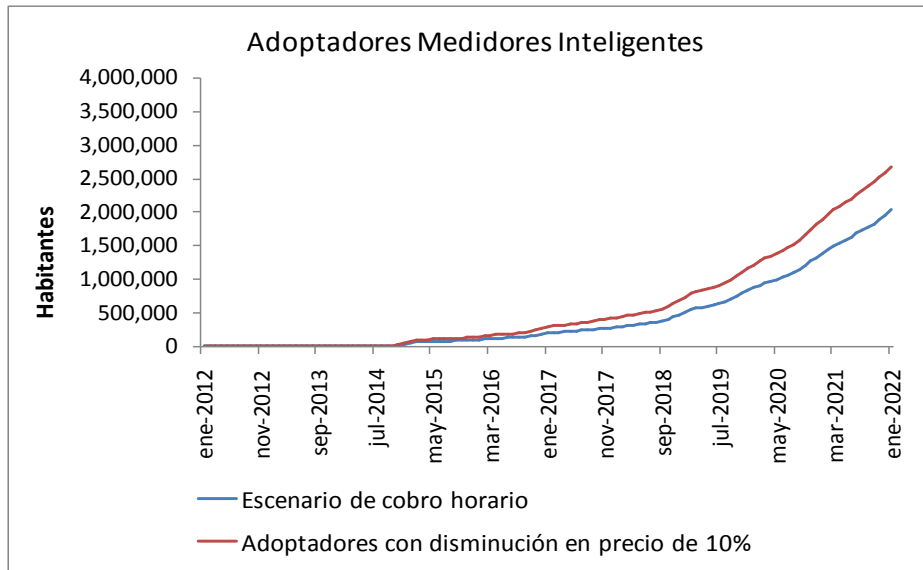
Sensibilidad del precio del medidor inteligente

El modelo presenta alta sensibilidad en los parámetros que influyen y tienen efecto en el cálculo del valor presente neto (VPN), factor que determina el comportamiento de la entrada de los medidores inteligentes.

En este caso se analizó la sensibilidad de cambios en el precio del medidor inteligente, para lo cual se aumentó o disminuyó el precio del mismo en un 10%.

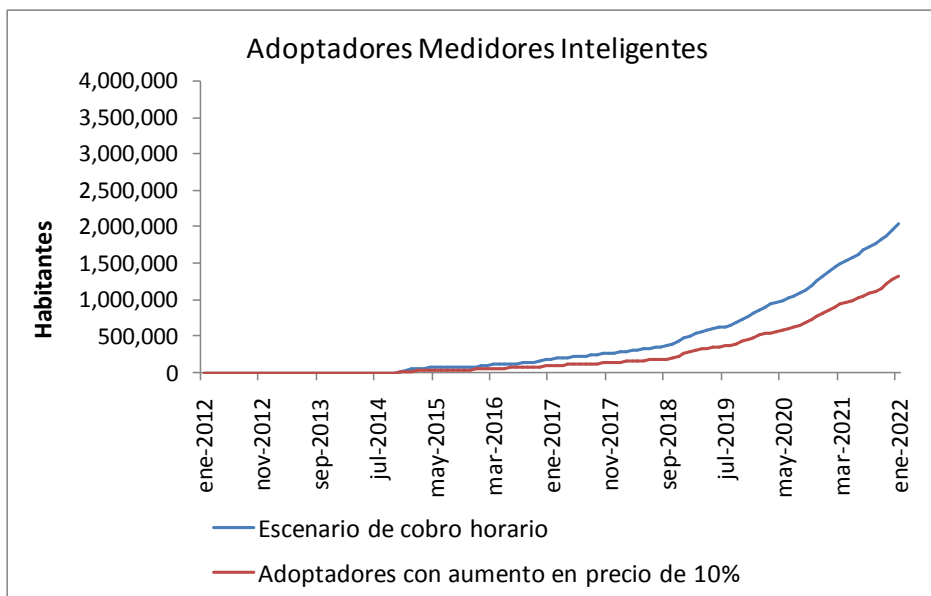
Para el caso en el que el precio del medidor disminuye un 10% la entrada de los mismos a los hogares colombianos es más alta, ya que al disminuir el precio el VPN es más alto y ayuda a incentivar a los usuarios para que lo obtengan. Esto se puede observar en la **Figura 10-4**, en la cual se presenta la entrada de los medidores inteligentes para el escenario 1 comparada con la entrada de estos con un 10% de descuento en el precio.

Figura 10-4. Adoptadores medidores inteligentes Escenario 1 Vs. Disminución en precio de 10%



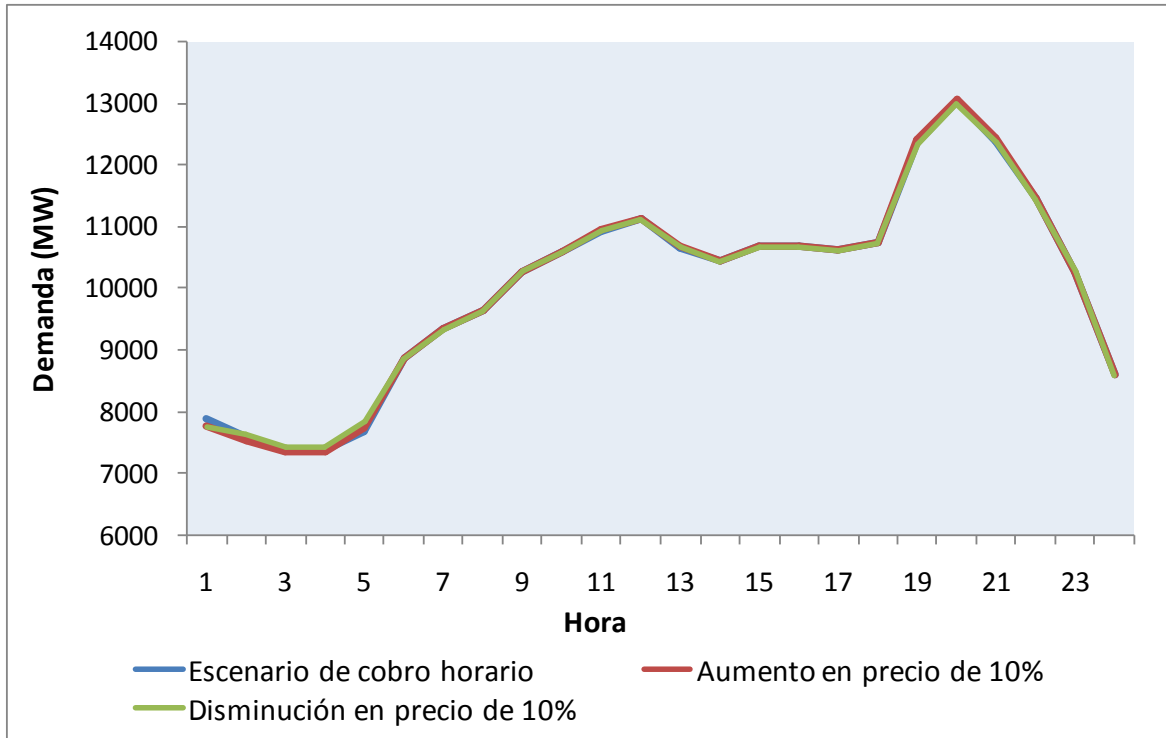
Por otro lado, el comportamiento de la entrada de los medidores inteligentes en el caso en el que se aumente el precio del mismo en un 10% se puede ver en la Figura 10-5. Se observa que la entrada de los medidores inteligentes es menor comparada con el escenario 1 ya que el VPN en este caso es menor.

Figura 10-5. Adoptadores medidores inteligentes Escenario de cobro horario Vs. Aumento en precio en 10%



Por otro lado se tiene el cambio en la curva de carga, ya que la entrada de los medidores inteligentes influencia en el comportamiento de esta. En la Figura 10-6 se muestra la comparación de la curva de carga en el escenario 1 con las curvas de carga resultantes de la disminución o el aumento en el precio del medidor.

Figura 10-6. Curva de carga Escenario de cobro horario Vs. Cambios en el precio del medidor

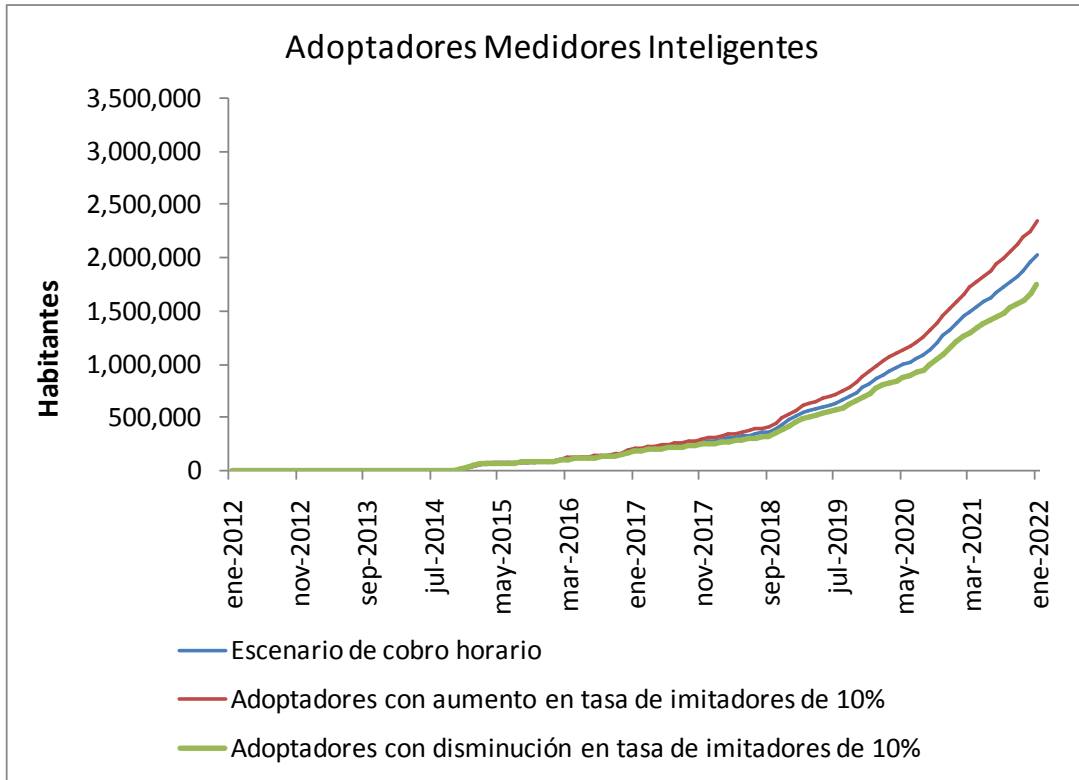


Sensibilidad a la adopción por parte de los imitadores

Para analizar la sensibilidad en la adopción de los medidores inteligentes gracias a los imitadores se varió el factor de imitación en un 10%.

En la Figura 10-7 se puede ver el comportamiento de la adopción con las variaciones en la tasa de imitadores. En este caso la adopción de medidores inteligentes es sensible ante cambios en los imitadores, ya que variaciones pequeñas en este valor puede provocar que la adopción de medidores inteligentes aumente o disminuya según el caso.

Figura 10-7. Adoptadores medidores inteligentes Escenario de cobro horario Vs. cambios en la tasa de imitadores



La curva de carga también se ve influenciada por cambios en los imitadores, pero este cambio es muy bajo. En la Figura 10-8 podemos ver como es el comportamiento en la curva de carga en cada uno de los cambios realizados al factor de imitadores y como un aumento en la tasa de imitadores provoca mayor entrada de medidores inteligentes esto ocasiona un cambio muy leve en la curva de carga, que aunque no es muy alto ayuda al sistema y así mismo se da en caso contrario, si se disminuye la tasa de imitación el cambio en la curva de carga es mucho menor.

Figura 10-8. Curva de carga Escenario de cobro horario Vs. cambios en la tasa de imitadores

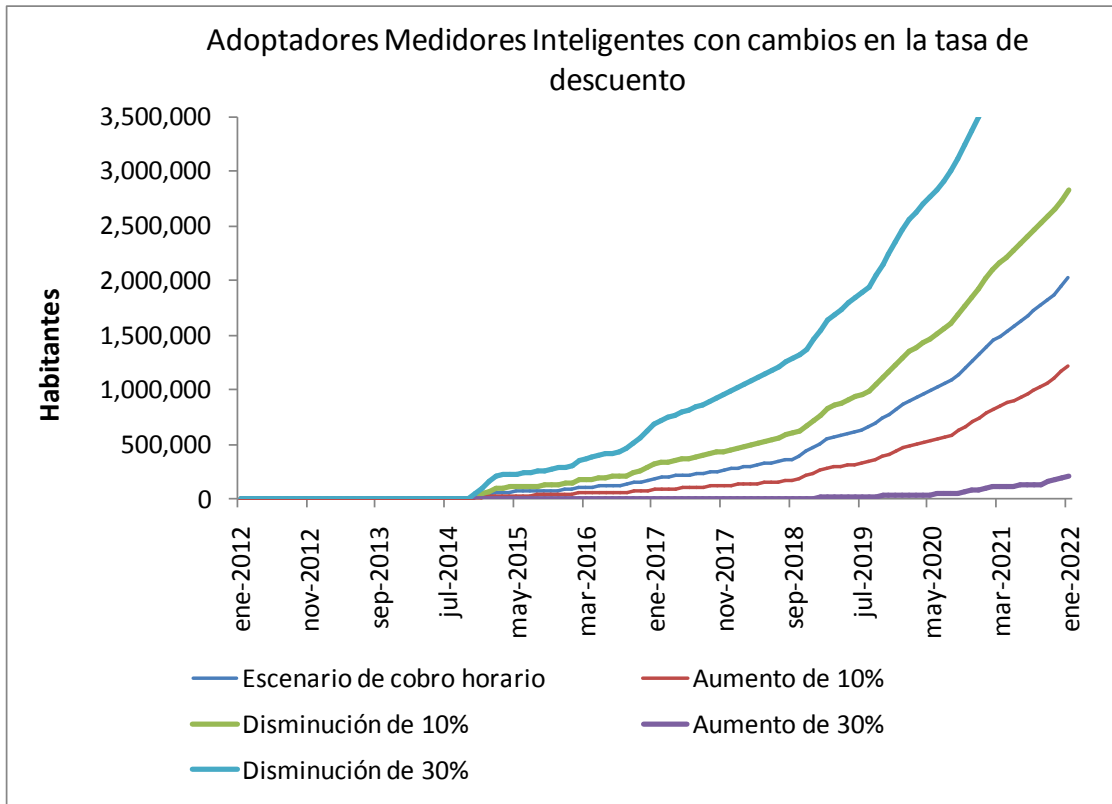


Sensibilidad a la tasa de descuento del VPN

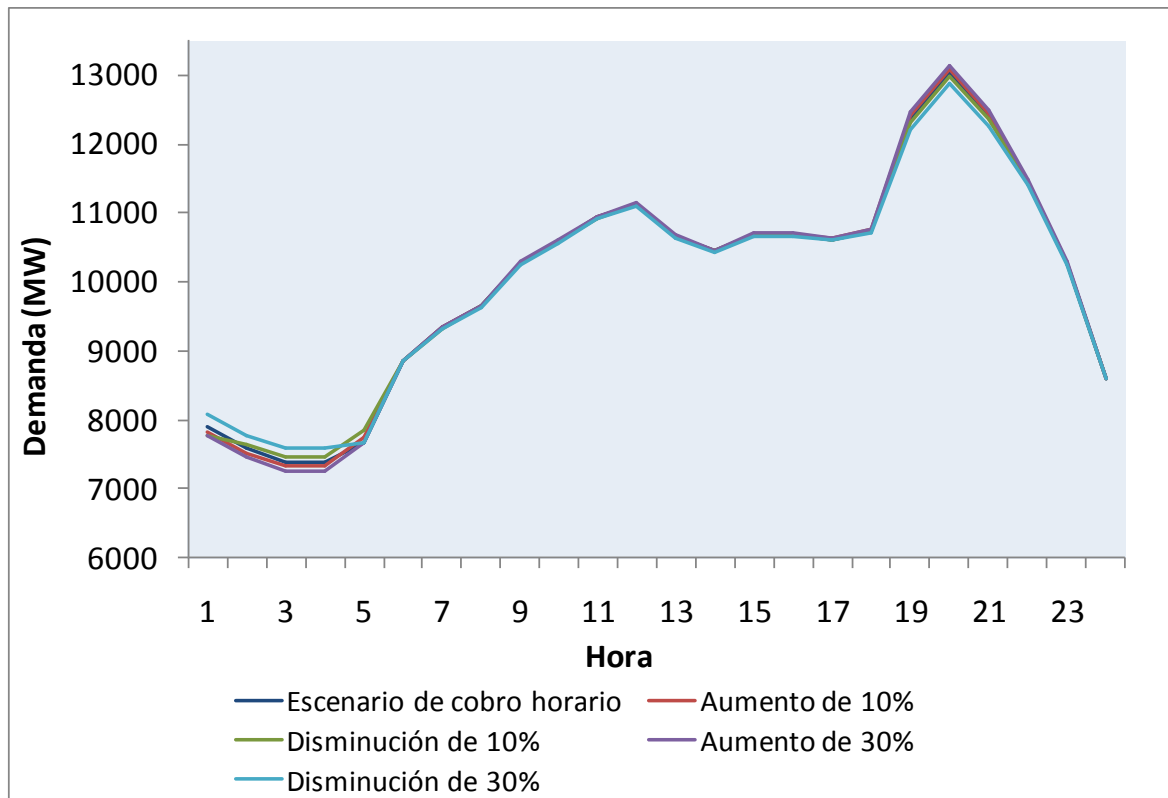
La sensibilidad en la tasa de descuento fue analizada por medio de variaciones en este valor correspondientes a 10% y 30% con respecto al valor inicial del modelo.

En la Figura 10-9 se muestran los cambios en la cantidad de adoptadores inteligentes y se observa que a menor tasa de descuento, obtener un medidor inteligente es más atractivo para los usuarios, por lo que la penetración de esta nueva tecnología es más amplia. En el caso en el que la tasa de descuento aumenta, el incentivo económico de tener un medidor inteligente no es tan alta por lo que la entrada de los medidores es más baja a medida que se aumenta la tasa de descuento.

Figura 10-9. Adoptadores medidores inteligentes Escenario Cobro horario Vs. cambios en la tasa de descuento.



Los cambios en la curva de carga están relacionados directamente con la entrada de los medidores inteligentes a los hogares, por lo que a mayor tasa de descuento, menor número de adoptadores y por lo tanto menor cambio en la curva de carga. Esto mismo sucede en el caso contrario, a menor tasa de descuento mayor es el cambio en la curva de carga. Este comportamiento es presentado en la Figura 10-10.

Figura 10-10. Curva de carga Escenario 1 Vs. cambios en la tasa de descuento

C. Anexo3: Ecuaciones del modelo de dinámica de Sistemas

Nombre	Ecuación	Unidad
%Aumento	NuevaCapacidad/CapacidadInstalada	mo ⁻¹
%AumentoHidro	'%Aumento'[1]	mo ⁻¹
%HogaresConMedidor	1 - (('Suscriptores-M'-AdoptadoresMedidoresInteligentes)/'Suscriptores-M')	
AdopciónPorAhorro	(IF(AhorroPercibidoFactura<0 <<1/yr>>;0.0<<1/yr>>;AhorroPercibidoFactura)) // * (1.4) // // 0 <<1/yr>>	yr ⁻¹
AhorroAnual	FacturaElectricidadPromedioAnual*PorcentajeAhorro	\$/Hab
AhorroCalculado	DemandaHogares * 'PrecioHora2-Hora20' //((Demanda * 1000000 * 0.43) / 'Suscriptores-M') * 1 <<kWh/(GWh/Hab)>>	\$
AhorroMensual	(CostoTotalSinMedidor-CostoTotalConMedidor) / 1 <<\$/Hab>>	
AhorroPercibidoFactura	(VPN)/(FacturaElectricidadPromedioAnual*TiempoSimulación)	yr ⁻¹
AporteHidro1	TasaAporteHidro[INDEX(INTEGER(MesActual))]*1<<GWh/mo>>	GWh/mo
CambioDemanda	FOR(i=1..24 (Precio[i] / (ARRSUM(Precio))) * DemandaAMover)	GWh
Capacidad Disponible Hidro1	MIN((IF (Auxiliar_4<=0 <<GWh>>;0 <<GWh>>;Auxiliar_4));CapacidadHidro)	GWh
Capacidad Mensual en Energía	(CapacidadInstalada*30 * (1 <<GWh>> / 1000 <<MW>>))	GWh
CapacidadEnergíaHoraria	VECTOR('Capacidad Mensual en Energía'[1];'Capacidad Mensual en Energía'[2];'Capacidad Mensual en Energía'[3]*Disponibilidad[1];'Capacidad Mensual en Energía'[4]*Disponibilidad[2])	GWh
CapacidadInicial	VECTOR(9252.78; 473.67; 3922.19; 703.98) * 1<<MW>>	MW

CapacidadInstalarCarbon	XLDATA("DatosDespacho.xls";"ExpansionCapacidad";"E11:M11")	
CapacidadInstalarFiloAgua	XLDATA("DatosDespacho.xls";"ExpansionCapacidad";"E9:M9")	
CapacidadInstalarGas	XLDATA("DatosDespacho.xls";"ExpansionCapacidad";"E10:M10")	
CapacidadInstalarHidro	XLDATA("DatosDespacho.xls";"ExpansionCapacidad";"E8:M8")	
Componentes	//T,D,C,PR,R// VECTOR(21.558; 108.67; 31.496; 19.559; 12.06) * 1 <<\$</kWh >>	\$/kWh
CostoCombustibleCarbonAnual	GRAPH(YEAR();2012;1;CostosCombustibleCarbon)	
CostoCombustibleGasAnual	GRAPH(YEAR();2012;1;CostosCombustibleGas)	
CostoG_ConMedidor	ARRSUM(DemandaIndividual*PrecioInternoColombia)	\$
CostoG_SinMedidor	(DemandaIndividualTotal*PrecioMaximo)	\$
CostoOfertaCarbon	XLDATA("DatosDespacho.xls";"ExpansionCapacidad";"C106:M106")	
CostoOfertaGas	XLDATA("DatosDespacho.xls";"ExpansionCapacidad";"C105:M105")	
CostoTotalConMedidor	(ARRSUM(ComponentesPorHogar) + CostoG_ConMedidor) / 1 <<Hab>>	\$/Hab
CostoTotalSinMedidor	(ARRSUM(ComponentesPorHogar) + CostoG_SinMedidor) / 1 <<Hab>>	\$/Hab
CrecDemanda	GRAPH(YEAR();2012;1;TasaCrecDemandaPotencia) * DemandaPotencia	MW/mo
CrecimientoDemanda	GRAPH(YEAR();2012;1;TasaCrecimientoDemanda) * DemandaInternaNivel * 1 <<1/mo>>	GWh/mo
CV_PrecioBolsa	FOR (i=1..4 IF('Costos Variables'[i]<PrecioBolsaModelo;CapacidadInstalar[i];0 <<MW>>))	MW
Demanda	IF(TIME = STARTTIME;DemandaInterna;NuevaDemandaCrecimiento)	GWh
DemandaAMover	ARRSUM(DemandaAMoverPreliminar)	GWh
DemandaAMoverPreliminar	(TRANSPPOSE(DemandaOpcionada)[Lavadora] + TRANSPPOSE(DemandaOpcionada)[Plancha])	GWh

DemandaIndividual	((Demanda * 1000000 * 0.43) / 'Suscriptores-M') * 1 <<kWh/(GWh/Hab)>>	kWh
DemandaInterna	DemandaInternaNivel*'%Demanda'	GWh
DemandaObligatoria	IF(TIME = STARTTIME;DemandaInterna;NuevaDemandaIncremento)	GWh
DemandaObligatoriaFinal	(DemandaObligatoria-GeneracionObligatoriaCarbon-GeneracionObligatoriaGas)*NuevosPorcentajes	GWh
DemandaOpcionada	DemandaXuso * '%HogaresConMedidor'	GWh
DemandaPotencia	9295 <<MW>>	MW
DemandaResidencial	DemandaTotalAux*0.43	GWh
DemandaTotal	ARRSUM(Demanda)	GWh
DemandaTotalAux	DemandaAux2	GWh
DemandaXuso	FOR (i=1..24 '%ConsumoElectrodomesticos' * DemandaResidencial [i])	GWh
Disponibilidad	//Gas, Carbon// VECTOR(0.974;0.9994)	
DisponibilidadFiloAgua	0.71	
ExpansionCarbon	GRAPH(YEAR();2012;1;CapacidadInstalarCarbon)	
ExpansionFiloAgua	GRAPH(YEAR();2012;1;CapacidadInstalarFiloAgua)	
ExpansionGas	GRAPH(YEAR();2012;1;CapacidadInstalarGas)	
ExpansionHidro	GRAPH(YEAR();2012;1;CapacidadInstalarHidro)	
ExpansionPlan	VECTOR(ExpansionHidro;ExpansionFiloAgua;ExpansionGas;ExpansionCarbon)	
FacturaElectricidadPromedioAnual	CostoTotalSinMedidor*12	\$/Hab
Generación_Carbón	(FOR (i=1..24 FOR(j=1..6 IF (Recurso[i][j]=4; Generación_preliminar[i][j]; 0))) * 1<<GWh>>)	GWh
Generación_Gas	(FOR (i=1..24 FOR(j=1..6 IF (Recurso[i][j]=3; Generación_preliminar[i][j]; 0))) * 1<<GWh>>)	GWh
Generación_Hidro1_Preliminar	(FOR (i=1..24 FOR(j=1..6 IF (Recurso[i][j]=1; Generación_preliminar[i][j]; 0))) * 1<<GWh>>)	GWh
Generación_Hidro1_Total	ARRSUM(Generación_Hidro1_Preliminar)	GWh
Generación_Hidro2_Preliminar	(FOR (i=1..24 FOR(j=1..6 IF (Recurso[i][j]=5; Generación_preliminar[i][j]; 0))) * 1<<GWh>>)	GWh

Generación_Hidro2_Total	ARRSUM(Generación_Hidro2_Preliminar)	GWh
Generación_Hidro3_Preliminar	(FOR (i=1..24 FOR(j=1..6 IF (Recurso[i][j]=6; Generación_preliminar[i][j]; 0))) * 1<<GWh>>)	GWh
Generación_Hidro3_Total	ARRSUM(Generación_Hidro3_Preliminar)	GWh
Generación_Hidro_1	(Generación_Hidro1_Total + Generación_Hidro2_Total+Generación_Hidro3_Total) / 1 <<mo>>	GWh/mo
Generación_HidroFilo_Preliminar	(FOR (i=1..24 FOR(j=1..6 IF (Recurso[i][j]=2; Generación_preliminar[i][j]; 0))) * 1<<GWh>>)	GWh
Generación_HidroFilo_Total	ARRSUM(Generación_HidroFilo_Preliminar)	GWh
Generación_preliminar	FOR (i=1..24 FOR(j=1..6 IF (Cap_Acumulada[j]<= (Demanda[i] /1 <<GWh>>); Cap_Tecnologías[j]; Cap_Tecnologías[j] -(Cap_Acumulada[j] - (Demanda[i] /1 <<GWh>>))))))	
GeneraciónCarbón	ARRSUM('Generación_Carbón') + GeneracionObligatoriaCarbon	GWh
GeneraciónGas	ARRSUM(Generación_Gas) + GeneracionObligatoriaGas	GWh
GeneraciónHidro	Generación_Hidro1_Total + Generación_Hidro2_Total + Generación_Hidro3_Total + ARRSUM(Generación_HidroFilo_Preliminar)	GWh
GeneraciónTotal	FOR (i=1..24 ARRSUM(Generación_Hidro1_Preliminar[i]) + ARRSUM(Generación_Hidro2_Preliminar[i]) + ARRSUM(Generación_Hidro3_Preliminar[i]) +ARRSUM(Generación_Gas[i])+ARRSUM('Generación_Carbón'[i]) + ARRSUM(Generación_HidroFilo_Preliminar[i]))	GWh
Hidro_1	VECTOR((PrecioHidro)* 1 <<(kWh)/\$>>;1;(CapacidadTotalDispoHidro1) / 1 <<GWh>>)	
Hidro_2	VECTOR((PrecioHidro)* 0.8 <<(kWh)/\$>>;5;(CapacidadTotalDispoHidro2) / 1 <<GWh>>) //VECTOR((PrecioHidro)* 1.15 <<(kWh)/\$>>;5;(CapacidadTotalDispoHidro1) / 1 <<GWh>>)	
Hidro_2FiloAgua	VECTOR(0;2;(CapacidadEnergiaHoraria[2]*DisponibilidadFiloAgua)/1<<GWh>>)	
Hidro_3	VECTOR((PrecioHidro)* 1.4 <<(kWh)/\$>>;6;(CapacidadTotalDispoHidro3) / 1 <<GWh>>)	
Inversión en Capacidad	FOR (i=1..4 IF ('Margen de Capacidad'<0.3; CV_PrecioBolsa[i]; 0<<MW>>))	MW

Margen de Capacidad	(ARRSUM(CapacidadInstalada)-DemandaPotencia)/DemandaPotencia	
NuevaDemanda	FOR(i=1..24 DemandaTotalAux[i] + (CambioDemanda[i]-DemandaAmovePreeliminar[i]) //0 <<GW*h>> //)	GWh
PorcentajeAhorro	(AhorroAnual2/FacturaElectricidadPromedioAnual) * 1 <<\$/Hab>>	
Precio Electricidad Preliminar Despacho	FOR (i=1..24 FOR (j=1..6 IF (Generación_preliminar[i][j]>0; TecnologiaOrdenada[j][1];0))) * 1 <<\$/kWh>>	\$/kWh
PrecioBolsaModelo	ARRAVERAGE(PrecioInternoColombia)	\$/kWh
PrecioConDescuento	PrecioEquipo*(1-IncentivoGobiernoEquipo)	\$/Hab
PrecioHidro	GRAPH(Auxiliar_4; 0<<GWh>>; 50 <<GWh>>; {455; 455; tmc - 5; tmc - 10; tmc - 15; tmc - 20; tmb - 3; tmb - 12; tmb - 21; tmb - 29; tmb - 38; tmb - 46; CostoFijoHidro *1<<(kWh)/\$>>; CostoFijoHidro *1<<(kWh)/\$>> //Min:40.000;Max:455.000 //}*1<<\$/kWh>>)	\$/kWh
PrecioInternoColombia	FOR(i=1..24 IF (Demanda[i]>GeneraciónTotal[i]+1<<GWh>>; 'Precio_ Racionamiento'; ARRMAX('Precio Electricidad Preliminar Despacho'[i])))	\$/kWh
Recurso	FOR (i=1..24 FOR (j=1..6 IF (Generación_preliminar[i][j]>0;TecnologiasOrdenadasPorPrecio[2][j];0)))	
Suscriptores-M	Habitantes/PersonasPorHogar	Hab
TasaAdopción	('Suscriptores-M'*P + ('AdopcionImitadores-Q'-P)*AdoptadoresMedidoresInteligentes - ('AdopcionImitadores-Q'/'Suscriptores-M')*AdoptadoresMedidoresInteligentes^2)	Hab/yr
TasaAporteHidro	TasaAporteHidroInicial	
TasaAporteHidroInicial	XLDATA("DatosDespacho.xls";"Embalse";"J9:J20")	
TasaCrecDemandaPotencia	XLDATA("DatosDespacho.xls";"ExpansionCapacidad";"G62:G72") <<1/mo>>	mo^-1
TasaCrecimientoDemanda	XLDATA("DatosDespacho.xls";"Demanda";"G29:G39")	
TasaCrecimientoMeses	GRAPH(YEAR();2012;1;TasaCrecimientoDemanda) * SumaNuevaDemanda * 1 <<1/mo>>	GWh/mo
TasaDescuentoVPN		0.5

TasaMes	GRAPH(YEAR();2012;1;TasaCrecimientoDemanda)	
TecnologiaOrdenada	TRANPOSE(TecnologiasOrdenadasPorPrecio)	
TecnologiasOrdenadasPorPrecio	TRANPOSE(SORT(VECTOR(Hidro_1;Hidro_2;Hidro_3;Hidro_2FiloAgua;Gas;Carbón)))	
Tecnologías	CUMULATIVESUM('Vector Tecnologías')	MW
tmb	MIN(PrecioCarbon;PrecioGas)	
tmc	MAX(PrecioCarbon;PrecioGas)	
TotalDemandaAMoverPreliminar	ARRSUM(DemandaAMoverPreliminar)	GWh
TotalDemandaOpcionada	ARRSUM(DemandaOpcionada)	GWh
TotalDemandaPorUso	ARRSUM(DemandaXuso)	GWh
Vector Tecnologías	VECTOR(CapacidadInstalada[4];CapacidadInstalada[3];(CapacidadInstalada[1]+CapacidadInstalada[2]))	MW
VectorGeneración	VECTOR(GeneraciónGas;GeneraciónCarbón;Generación_HidroFilo_Total;Generación_Hidro1_Total;Generación_Hidro2_Total;Generación_Hidro3_Total)	GWh
Vertimientos	MAX(((Nivel_Embalse / 1 <<mo>>) + AporteHidro1 - Generación_Hidro_1) - (VolumenMaximoTecnico / 1 <<mo>>); 0 <<GWh>> / 1 <<mo>>) //IF (Nivel_Embalse>'Volumen maximo tecnico', (Nivel_Embalse-'Volumen maximo tecnico') , 0 <<GW*h>>) / 1 <<mo>>	GWh/mo
VNA	-(PV(TasaDescuentoVPN; 20; AhorroAnual; 0 <<\$/Hab>>))	\$/Hab
VolumenMaximoTecnico	VolumenMaximoTecnicoInicial	GWh
VolumenMaximoTecnicoInicial	16374.39279 <<GWh>>	GWh
VPN	VNA-PrecioConDescuento	\$/Hab

Referencias

- Ajaja, A. (2010). Reinventing electric distribution. *IEEE Potentials*, 29(1), 29–31. doi:10.1109/MPOT.2009.935612
- Aldana, A., Cespedes, R., Parra, E., Lopez, R., & Ruiz, M. E. (2011). Implementation of Smart Grids in the Colombian Electrical Sector.
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 183–210. doi:10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4
- Borshchev, A., & Filippov, A. (n.d.). From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling : Reasons , Techniques , Tools. *Simulation*.
- Brugnoni, M., Tanides, C., & Dutt, G. (1996). Característica de la demanda residencial - REVISAR. *9º Congreso y Exposición Internacional de la Energía Eléctrica (CEDE/96)*, 1–4.
- Capasso, A., Grattieri, W., Lamedica, R., & Prudenzi, A. (1994). A bottom-up approach to residential load modeling. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(2), 957–964. doi:10.1109/59.317650
- Cecati, C., Mokryani, G., Piccolo, A., & Siano, P. (2010). An Overview on the Smart Grid Concept. *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, -, 3322–3327.
- Chassin, D. P. (2010). What Can the Smart Grid Do for You? And What Can You Do for the Smart Grid? *The Electricity Journal*, 23(5), 57–63. doi:10.1016/j.tej.2010.05.001
- Chaudhry, T. (2010). Estimating Residential Electricity Demand Responses in Pakistan's Punjab. *The Lahore Journal of Economics*, (September), 107–138.
- Collier, S. E. (2010). Ten steps to a smarter grid. *IEEE Industry Applications Magazine*, 62–68.
- Colombia, C. de. (1994a). Ley 143 de 1994. *Ley Eléctrica*.
- Colombia, C. de. (1994b). Ley 142 de 1994. *Servicios públicos domiciliarios*.

- CREG. (2007). Creg 119 del 2007 - Formula Tarifaria.
- CREG. (2012). Comisión de Regulación de Energía y Gas. Retrieved from <http://www.creg.gov.co>
- Daim, T., & Suntharasaj, P. (2009). Technology diffusion: forecasting with bibliometric analysis and Bass model. *Foresight*, 11(3), 45–55. doi:10.1108/14636680910963936
- DANE. (2010). *Ceso General 2005* (pp. 9–14).
- DANE. (2012). Población colombiana. 2012. Retrieved from http://www.dane.gov.co/reloj/reloj_animado.php
- Davies, S. (2010). Grid looks to smart solutions. *Engineering and Technology*, (May).
- Dyner, I., & Larsen, E. R. (2001). From planning to strategy in the electricity industry. *Energy Policy*, 29(13), 1145–1154. doi:10.1016/S0301-4215(01)00040-4
- Erol-kantarci, M., & Mouftah, H. T. (2010). The Impact of Smart Grid Residential Energy Management Schemes on the Carbon Footprint of the Household Electricity Consumption. *Electric Power and Energy Conference (EPEC), 2010 IEEE*.
- European Commission. (2006). *European SmartGrids Technology Platform*. *Energy*.
- Fan, J., & Borlase, S. (2009). The evolution of distribution. *IEEE Power and Energy Magazine*, 7(2), 63–68. doi:10.1109/MPE.2008.931392
- Farhangi, H. (2010). The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(1), 18–28. doi:10.1109/MPE.2009.934876
- Faruqui, A., Harris, D., & Hledik, R. (2010). Unlocking the €53 billion savings from smart meters in the EU: How increasing the adoption of dynamic tariffs could make or break the EU's smart grid investment. *Energy Policy*, 38(10), 6222–6231. doi:10.1016/j.enpol.2010.06.010
- Forrester, J. W., & Senge, P. M. (1980). Test for building confidence in System Dynamics Models, 14, 209–228.
- Franco, C. J. (2002). *RACIONALIDAD LIMITADA DEL CONSUMIDOR EN MERCADOS ENERGÉTICOS DESREGULADOS Y LA FUNCIÓN DEL COMERCIALIZADOR Y EL GOBIERNO*.
- Garrity, T. F. (2008). Getting Smart. *Power and Energy Magazine, IEEE*, 6(2), 38–45.
- Hamilton, B., & Summy, M. (2011). benefits of the smart grid. *Power and Energy Magazine, IEEE*, 9(1).

- Hammons, T. J. (2008). Integrating renewable energy sources into European grids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 30(8), 462–475. doi:10.1016/j.ijepes.2008.04.010
- Harris, A. (2009). Smart grid thinking. *Engineering & Technology*, 4(9), 46. doi:10.1049/et.2009.0909
- Hauttekeete, L., Stragier, J., Haerick, W., & De Marez, L. (2010). Smart, smarter, smartest... the consumer meets the smart electrical grid. *Telecommunications Internet and Media Techno Economics (CTTE), 2010 9th Conference on*.
- Ipakchi, A., & Albuyeh, F. (2009). Grid of the future. *IEEE Power and Energy Magazine*, 7(2), 52–62. doi:10.1109/MPE.2008.931384
- Jardine, C. N. (2008). SYNTHESIS OF HIGH RESOLUTION DOMESTIC ELECTRICITY LOAD PROFILES. In *Proceedings of the Microgen 2008, The First International Conference and Workshop on Micro-cogeneration and applications*, 1–8.
- Karnouskos, S., & De Holanda, T. N. (2009). Simulation of a Smart Grid City with Software Agents. *2009 Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation*, 424–429. doi:10.1109/EMS.2009.53
- Lampropoulos, I., Vanalme, G. M. A., & Kling, W. L. (2010). A methodology for modeling the behavior of electricity prosumers within the smart grid. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, ISGT Europe*, 1–8.
- Lee, M., Kim, K., & Cho, Y. (2010). A study on the relationship between technology diffusion and new product diffusion. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(5), 796–802. doi:10.1016/j.techfore.2010.01.003
- Lui, T. J., Stirling, W., & Marcy, H. O. (2010). Get Smart. *Power and Energy Magazine, IEEE*, 8(3).
- Michalakelis, C., Varoutas, D., & Sphicopoulos, T. (2008). Diffusion models of mobile telephony in Greece. *Telecommunications Policy*, 32(3-4), 234–245. doi:10.1016/j.telpol.2008.01.004
- Misra, A., & Schulzrinne, H. (2010). Policy-driven distributed and collaborative demand response in multi-domain commercial buildings. *Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking - e-Energy '10*, 119. doi:10.1145/1791314.1791332
- Moshari, A., Yousefi, G. R., Ebrahimi, A., & Haghbin, S. (2010). Demand-Side Behavior in the Smart Grid Environment. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, ISGT Europe*, 1–7.

- Nacional, U., Bariloche, F., & Energética, P. (2010). *Análisis y revisión de los objetivos de política energética colombiana de largo plazo y actualización de sus estrategias de desarrollo. Potencia* (pp. 1–253).
- NEON. (2012). Sistema de Información de XM. Retrieved from <http://sv04.xm.com.co/neonweb/>
- Ochoa, M. C. (2010). *ANÁLISIS DE LA INTEGRACIÓN ELÉCTRICA PANAMÁ – CAN BAJO EL ESQUEMA DE SUBASTA IMPLÍCITA*.
- Ossa López, D. F. (2012). *Análisis del comportamiento estratégico de los agentes generadores en el mercado eléctrico colombiano*.
- O' Malley, G., Wu, J., & Jenkins, N. (2010). Technical Requirements of Smart Electric Power Distribution Networks in the UK. *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International*.
- Paatero, J. V., & Lund, P. D. (2006). A model for generating household electricity load profiles. *International Journal of Energy Research*, 30(5), 273–290. doi:10.1002/er.1136
- Pasaoglu Kilanc, G., & Or, I. (2008). A decision support tool for the analysis of pricing, investment and regulatory processes in a decentralized electricity market. *Energy Policy*, 36(8), 3036–3044. doi:10.1016/j.enpol.2008.03.034
- Perez Miranda, D. (2008). *Estado y desarrollo de la tecnología Smart Grid en Colombia. Control*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- Pourdehnad, J., Maani, K., & Sedehi, H. (n.d.). System Dynamics and Intelligent Agent-Based Simulation : Where is the Synergy? *Business*.
- Prudenzi, A. (2002). A Neuron Nets Based Procedure for Identifying Domestic Appliances Pattern-of-Use from Energy Recordings at Meter Panel ., 00(c), 1–6.
- Rahimi, F., & Ipakchi, A. (2010). Demand Response as a Market Resource Under the Smart Grid Paradigm. *IEEE Transactions on*, 1(1), 82–88.
- Rahman, S. (2009). Smart grid expectations. *IEEE Power and Energy Magazine*, 7(5), 88, 84–85. doi:10.1109/MPE.2009.933415
- Rasouli, M. (2010). A Game-Theoretic Frame Work for Studying Dynamics of Multi Decision-maker Systems. *The 28th International Conference of the System Dynamics Society*, (23).

- Saffre, F., & Gedge, R. (2010). Demand-Side Management for the Smart Grid. *Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS Wksps), 2010 IEEE/IFIP*, 300–303. doi:10.1109/NOMSW.2010.5486558
- Santacana, E., Husain, B., Pinnekamp, F., Halvarsson, P., Rackliffe, G., Tang, L., Feng, X. (2010). Smart grids: The next level of evolution. *ABB Review*, 463(7277), 10–15. doi:10.1038/463018a
- Shargal, M. (2009). From Policy to Implementation : The Status of Europe's Smart Metering Market. *Energy, Utilities & Chemicals*.
- Sianaki, O. A., Hussain, O., Dillon, T., & Tabesh, A. R. (2010). Intelligent Decision Support System for Including Consumers' Preferences in Residential Energy Consumption in Smart Grid. *2010 Second International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation*, 154–159. doi:10.1109/CIMSiM.2010.84
- Sianaki, O. A., Hussain, O., & Tabesh, A. R. (2010). A Knapsack Problem Approach For Achieving Efficient Energy Consumption in Smart Grid for End- users ' Life Style. *2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply, CITRES 2010*, 159–164.
- Software Engineering Group, K. U. (2007). Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. *Technical Report EBSE-2007-01*.
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: McGraw-Hill.
- Stragier, J., Hauttekeete, L., & Marez, L. De. (2010). Introducing Smart Grids in Residential Contexts : Consumers ' Perception of Smart Household Appliances. *2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply, CITRES 2010*, 135–142.
- Teng, J. T. C., Grover, V., & Güttler, W. (2002). Information Technology Innovations : General Diffusion Patterns and Its Relationships to Innovation Characteristics. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 49(1), 13–27.
- Thimmapuram, P. R., Kim, J., Botterud, A., & Nam, Y. (2010). Modeling and simulation of price elasticity of demand using an agent-based model. *Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2010*, 1–8. doi:10.1109/ISGT.2010.5434739
- U.S. Department of Energy. (2008). *HOW THE SMART GRID PROMOTES A GREENER FUTURE*.
- U.S. Department of Energy. (2011). Environmental Impacts of Smart Grid.
- UPME. (2004). *UNA VISION DEL MERCADO ELECTRICO COLOMBIANO*.

- UPME. (2006). *DETERMINACIÓN DEL CONSUMO FINAL URBANO Y COMERCIAL DOMÉSTICOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y GAS*.
- UPME. (2010). *Plan de Expansión de Referencia Generación-Transmisión 2010-2024*.
- UPME. (2011). *Plan de Expansión de Referencia Generación – Transmisión 2011-2025*.
- UPME. (2012). *DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y GAS - CARACTERÍSTICAS RESIDENCIALES*.
- Vojdani, A. (2008). Smart Integration. *IEEE Power and Energy Magazine*, 6(6), 71–79.
- Werbos, P. J. (2011). Computational Intelligence for the Smart Grid-History, Challenges, and Opportunities. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 6(3), 14–21.
- Widén, J., Lundh, M., Vassileva, I., Dahlquist, E., Ellegård, K., & Wäckelgård, E. (2009). Constructing load profiles for household electricity and hot water from time-use data—Modelling approach and validation. *Energy and Buildings*, 41(7), 753–768. doi:10.1016/j.enbuild.2009.02.013
- Wood, G., & Newborough, M. (2003). Dynamic energy-consumption indicators for domestic appliances: environment, behaviour and design. *Energy and Buildings*, 35(8), 821–841. doi:10.1016/S0378-7788(02)00241-4
- Xin-wei, D., & Qiang, Y. (2010). Review of Smart Grid and its Development Prospect in Sichuan. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, 1–4.
- XM. (2009). *DEMANDA DE ELECTRICIDAD, PRODUCCIÓN E INTERCAMBIOS*.
- XM. (2010). *Informe anual 2010*.
- XM. (2012). Información Operativa y Comercial. Retrieved from <http://www.xm.com.co/Pages/TransaccionesenelMercadoEnergiaMayorista.aspx>
- XM, CIDET, COCIER, CNO, CAC, & CINTEL. (2012). Colombia Inteligente. Retrieved from <http://www.colombiainteligente.org>
- Zhang, J., Chen, Z., Yang, X., Chen, K., & Li, K. (2010). Ponder over Advanced Metering Infrastructure and Future Power Grid. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, 1–4. doi:10.1109/APPEEC.2010.5448797
- Zhu, N., Bai, X., & Meng, J. (2011). Benefits Analysis of All Parties Participating in Demand Response. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2011* (pp. 11–14).

Zimmermann, J. P. (2009). End-use metering campaign in 400 households In Sweden - Assessment of the Potential Electricity Savings. *Swedish Energy Agency*, (September).