



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación de los efectos de la penetración fotovoltaica en la curva de carga del sector residencial: el caso colombiano

Maritza Jiménez Zapata

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión
Medellín, Colombia
2016

Evaluación de los efectos de la penetración fotovoltaica en la curva de carga del sector residencial: el caso colombiano

Maritza Jiménez Zapata

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

Director:

Ph.D. Carlos Jaime Franco Cardona

Codirector:

Ph.D. Isaac Dyner Rezonzew

Línea de Investigación:

Investigación de Operaciones

Grupo de Investigación:

Grupo de Sistemas Energéticos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión

Medellín, Colombia

2016

*Con todo mi afecto para las maravillosas
personas que incondicionalmente me
acompañan y apoyan:*

Mi familia

Agradecimientos

Sea esta la oportunidad para manifestar abiertamente mi más profundo agradecimiento con todas aquellas personas que contribuyeron a la realización y culminación exitosa de la tesis de maestría que aquí se expone.

De forma especial quiero agradecer a mis padres y hermanos por su amoroso e incondicional acompañamiento en cada etapa de mi vida, por apoyarme en el logro de cada una de mis metas y por inculcarme el deseo de buscar incansablemente convertirme en mejor ser humano.

A Santiago por la forma en que su amor me motiva a lograr mis metas, y por su invaluable compañía y apoyo durante estos años.

A Isaac y Carlos Jaime por sus asesorías, recomendaciones y valiosos aportes; por siempre estar dispuestos a resolver mis inquietudes, y orientar de la mejor manera mi trabajo.

A Colciencias, Empresas Públicas de Medellín y a la Universidad Nacional de Colombia por el soporte financiero durante estos dos años a través de la convocatoria *Jóvenes Investigadores*, el proyecto de investigación *Instituciones y políticas en el camino hacia una economía baja en carbono*, y la *Beca de Exención de Derechos Académicos* de la Universidad Nacional.

A mis compañeros y amigos por sus explicaciones y por compartir tantos momentos de dispersión y diversión que siempre me ayudaron a sobreponerme en los momentos de estrés y cansancio.

Resumen

Gobiernos internacionales, preocupados por la sostenibilidad de sus mercados eléctricos ante el aumento de instalaciones fotovoltaicas residenciales, se han visto en la obligación de suspender o reestructurar los incentivos formulados para la promoción de estas alternativas. Colombia, que recientemente formuló la ley 1715 buscando permitir el uso de alternativas de generación renovables en los hogares, se enfrenta a un problema de incertidumbre sobre la difusión de la tecnología fotovoltaica y los efectos de su penetración en el mercado eléctrico, considerando que el sector residencial es responsable del 40% de la demanda. Esta tesis aborda esta problemática a través del desarrollo de un modelo de simulación con dinámica de sistemas que permite identificar y evaluar con diferentes políticas, las dinámicas de difusión y los efectos en la curva de carga residencial y total del sistema, así como las dinámicas de la tarifa del mercado a raíz de la penetración fotovoltaica. Los resultados muestran cómo en ausencia de políticas, la adopción de sistemas sin baterías de respaldo afecta la viabilidad y sostenibilidad del sistema eléctrico colombiano. Adicionalmente los resultados indican que políticas orientadas a la educación y contagio social aumentan la velocidad de difusión comparada con políticas enfocadas a precios.

Palabras clave: Microgeneración, Sistemas Fotovoltaicos, Curva de Carga, Mercado Eléctrico Colombiano, Pato Colombiano, Cisne Colombiano, Difusión de Tecnologías, Dinámica de Sistemas.

Abstract

Governments worldwide decided to modify their incentives to promote renewables diffusion in residential rooftops, this because of the photovoltaics' high level of penetration and its consequences in electricity markets. Colombia's government recently created the law 1715 focused on enabling renewable alternatives for microgeneration in households, but there is a big uncertainty about the diffusion rates in the residential sector and its effects in the colombian electricity market, considering that residential accounts for about 40% of system's demand. A system dynamics model was developed to identify the diffusion dynamics and its effects on the colombian load curve, as well as the tariff behaviour, evaluating different policies in the simulation model. Results show the risk of sustainability problems for the colombian electricity market where diffusion without battery support is taking place. Additional results indicates that policies focused in education and social interaction increase the speed of photovoltaics diffusion, compared to subsidy polices.

Keywords: Microgeneration, Photovoltaics, Load Curve, Technology Diffusion, Colombian Electricity Market, Colombian Duck, Colombian Swan, System Dynamics.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Lista de figuras	IX
Lista de tablas	XII
Lista de símbolos y abreviaturas	XIII
Introducción	1
Capítulo 1. Antecedentes	3
1.1 Tecnología solar fotovoltaica	3
1.2 Penetración de FV en el mundo.....	5
1.3 Mercado eléctrico colombiano.	7
1.4 Ley 1715.....	10
1.4.1 Gestión por el lado de la demanda: eficiencia energética y respuesta de la demanda	10
1.4.2 Generación distribuida y microgeneración.....	11
1.5 Formulación del problema	13
1.6 Conclusiones del capítulo	14
Capítulo 2. Estado del arte	15
2.1 Revisión de la difusión de microgeneración renovable en energía.....	15
2.2 Objetivos.....	22
2.2.1 Objetivo general.....	22
2.2.2 Objetivos específicos	22
2.3 Alcance.....	22
2.4 Conclusiones del capítulo	23
Capítulo 3. Metodología	25
3.1 Herramientas metodológicas para el análisis de difusión de innovaciones en energía.....	25
3.2 Etapas metodológicas.....	27
3.3 Conclusiones del capítulo	28
Capítulo 4. Modelo de simulación	29
4.1 Propósito del modelo	29
4.2 Hipótesis dinámica.....	29
4.3 Análisis por ciclos de realimentación	30
4.4 Diagrama de flujos y niveles	33

4.5	Supuestos y especificaciones.....	37
4.6	Validación.....	38
4.6.1	Validación de la estructura.....	38
4.6.2	Validación del comportamiento.....	43
4.7	Conclusiones del capítulo.....	45
Capítulo 5.	Resultados del modelo de simulación.....	47
5.1	Análisis del caso base.....	47
5.1.1	Resultados sobre la difusión.....	47
5.1.2	Efectos en la curva de carga.....	49
5.1.3	Efectos en la tarifa.....	52
5.2	Evaluación de políticas y estrategias.....	55
5.2.1	Criterios de evaluación.....	55
5.2.2	Implementación de políticas.....	56
5.2.3	Evaluación comparativa del desempeño de las políticas.....	61
5.3	Conclusiones del capítulo.....	65
Capítulo 6.	Conclusiones y recomendaciones.....	67
6.1	Reporte del cumplimiento de objetivos específicos.....	67
6.1.1	Objetivos específicos 1 y 2.....	67
6.1.2	Objetivo específico 3.....	68
6.2	Conclusiones y aportes específicos de la tesis.....	69
6.3	Recomendaciones y trabajo futuro.....	70
6.4	Divulgación de resultados.....	71
A.	Anexo: Ecuaciones del modelo de simulación.....	73
B.	Anexo: Difusión de sistemas de 0.5 kW.....	77
	Referencias.....	79

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Clasificación de sistemas fotovoltaicos de acuerdo a sus aplicaciones. Traducido de (Joshi et al., 2009)	4
Figura 1-2: Tipos de materiales para las celdas fotovoltaicas. Adaptado y traducido de (Tyagi et al., 2013)	4
Figura 1-3: Capacidad acumulada mundial en energía renovable (IEA, 2014a)	5
Figura 1-4: Incrementos en la instalación de techos solares mundiales por regiones (EPIA, 2014) 6	6
Figura 1-5: Curva de carga diaria - Total del sistema. Año 2014. Elaboración propia con datos de (Xm, 2015c)	8
Figura 1-6: Curva de carga diaria - Residencial. Año 2014. Elaboración propia con datos de (UPME, 2008; Xm, 2015c)	9
Figura 1-7: Curva de carga diaria - Otros sectores. Año 2014. Elaboración propia con datos de (UPME, 2008; Xm, 2015c)	9
Figura 3-1: Etapas de modelado usando dinámica de sistemas. Traducido de (Sterman, 2000) 28	28
Figura 4-1: Hipótesis dinámica de la difusión de tecnología solar fotovoltaica para microgeneración en el sector residencial de Colombia. Elaboración propia.....	30
Figura 4-2: Diagrama causal. Ciclos B1 y B2. Elaboración propia usando la hipótesis de mercado (I Dyner, 2000).....	31
Figura 4-3: Diagrama causal. Ciclos B3, B4 y B5. Elaboración propia.....	31
Figura 4-4: Diagrama causal. Ciclos R1 y B6. Elaboración propia.....	32
Figura 4-5: Diagrama causal. Ciclos R2 y B7. Elaboración propia.....	32
Figura 4-6: Diagrama de flujos y niveles. Sección de crecimiento poblacional. Elaboración propia.	33
Figura 4-7: Diagrama de flujos y niveles. Sección de difusión de la tecnología solar FV para microgeneración. Elaboración propia.	33
Figura 4-8: Diagrama de flujos y niveles. Sección de cálculo de la demanda residencial del sistema. Elaboración propia.....	34
Figura 4-9: Diagrama de flujos y niveles. Sección demanda total del sistema. Elaboración propia.	35
Figura 4-10: Diagrama de flujos y niveles. Sección cálculo de la tarifa de la red. Elaboración propia.	35
Figura 4-11: Diagrama de flujos y niveles. Sección del cálculo del precio de generación. Elaboración propia.	36

Figura 4-12: Diagrama de flujos y niveles. Sección de cálculo del costo FV. Elaboración propia.	36
Figura 4-13: Diagrama de flujos y niveles. Sección de cálculo de la generación de un sistema FV. Elaboración propia.	37
Figura 4-14: Hogares Totales y Hogares Adoptadores sin crecimiento poblacional y con cero hogares. Elaboración propia.....	42
Figura 4-15: Curva de carga residencial sin crecimiento poblacional y con cero hogares. Elaboración propia.	42
Figura 4-16: Hogares Totales y Hogares Adoptadores con la tarifa de la red igual a cero. Elaboración propia	42
Figura 4-17: Curva de carga residencial con tarifa de la red igual a cero. Elaboración propia.....	42
Figura 4-18: Análisis de sensibilidad de viviendas adoptadoras al parámetro de innovación (p). Elaboración propia.	43
Figura 4-19: Análisis de sensibilidad de viviendas adoptadoras al parámetro de imitación (q). Elaboración propia.....	44
Figura 4-20: Análisis de sensibilidad de viviendas adoptadoras a variaciones en el costo fotovoltaico. Elaboración propia.....	44
Figura 4-21: Sensibilidad al método de integración. Elaboración propia.....	45
Figura 4-22: Sensibilidad al tiempo de paso. Elaboración propia.	45
Figura 5-1: Hogares Potenciales – Escenario sin baterías. Elaboración propia.....	48
Figura 5-2: Hogares Potenciales – Escenario con baterías. Elaboración propia.....	48
Figura 5-3: Hogares Totales Vs Hogares Adoptadores – Escenario sin baterías. Elaboración propia.	48
Figura 5-4: Hogares Totales Vs Hogares Adoptadores – Escenario con baterías. Elaboración propia.	48
Figura 5-5: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano cuando no hay difusión de los sistemas de microgeneración fotovoltaica residencial. Elaboración propia.	49
Figura 5-6: Curva de carga del sector residencial colombiano. Escenario sin baterías. Elaboración propia.	50
Figura 5-7: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano. Escenario sin baterías – Utilizando los excedentes de generación. Elaboración propia.....	50
Figura 5-8: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano. Escenario sin baterías – Perdiendo los excedentes de generación. Elaboración propia.	51
Figura 5-9: Curva de carga del sector residencial colombiano. Escenario con baterías. Elaboración propia.	51
Figura 5-10: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano. Escenario con baterías. Elaboración propia.	52
Figura 5-11: Tarifa. Escenario sin baterías. Elaboración propia.	53
Figura 5-12: Costo de transmisión. Escenario sin baterías. Elaboración propia.	53
Figura 5-13: Precio. Escenario sin baterías. Elaboración propia.	53
Figura 5-14: Costo de distribución. Escenario sin baterías. Elaboración propia.	53
Figura 5-15: Tarifa. Escenario con baterías. Elaboración propia.	54

Figura 5-16: Costo de Transmisión. Escenario con baterías. Elaboración propia.	54
Figura 5-17: Precio de generación. Escenario con baterías. Elaboración propia.	54
Figura 5-18: Costo de distribución. Escenario con baterías. Elaboración propia.....	54
Figura 5-19: Hogares Potenciales y Hogares Adoptadores – P1. Subsidio a precios. Elaboración propia.	57
Figura 5-20: Tarifa de la red – P1. Subsidio a precios. Elaboración propia.....	57
Figura 5-21: Curva de carga del sector residencial – P1. Subsidio a precios. Elaboración propia.	57
Figura 5-22: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano – P1. Subsidio a precios. Elaboración propia.	57
Figura 5-23: Hogares Potenciales y Hogares Adoptadores – P2. Financiación a la educación FV. Elaboración propia.....	58
Figura 5-24: Tarifa de la red – P2. Financiación a la educación FV. Elaboración propia. 58	
Figura 5-25: Curva de carga del sector residencial – P2. Financiación a la educación FV. Elaboración propia.	58
Figura 5-26: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano – P2. Financiación a la educación FV. Elaboración propia.....	58
Figura 5-27: Hogares Potenciales y Hogares Adoptadores – P3. Incremento del contagio social. Elaboración propia.	59
Figura 5-28: Tarifa de la red – P3. Incremento del contagio social. Elaboración propia. . 59	
Figura 5-29: Curva de carga del sector residencial – P3. Incremento del contagio social. Elaboración propia.	59
Figura 5-30: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano – P3. Incremento del contagio social. Elaboración propia.	59
Figura 5-31: Hogares Potenciales y Hogares Adoptadores – P4. Costo de distribución fijo. Elaboración propia.	60
Figura 5-32: Tarifa de la red – P4. Costo de distribución fijo. Elaboración propia.	60
Figura 5-33: Curva de carga del sector residencial – P4. Costo de distribución fijo. Elaboración propia.	61
Figura 5-34: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano – P4. Costo de distribución fijo. Elaboración propia.	61
Figura 5-35: Curvas de difusión con diferentes políticas – Viviendas Adoptadoras. Elaboración propia.	62
Figura 5-36: Indicador demanda máxima / demanda Mínima para diferentes políticas – Demanda total del sistema. Elaboración propia.....	63
Figura 5-37: Indicador demanda máxima / demanda Mínima para diferentes políticas – Demanda Residencial. Elaboración propia.....	63
Figura 5-38: Resultados comparativos tarifa de energía. Elaboración propia	64

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Estrategias para despliegue de mercado FV. Elaboración propia a partir de (IEA, 2014b) 6	6
Tabla 1-2: Ejemplos de países que modificaron incentivos. (IEA, 2014a)	7
Tabla 1-3: Tarifa nacional residencial. Año 2015. Elaboración propia con datos de (SUI, 2016) 10	10
Tabla 1-4: Mecanismos de promoción de generación distribuida y microgeneración. Elaboración propia a partir de (Congreso de la República de Colombia, 2014).....	12
Tabla 1-5: Incentivos a la inversión en fuentes no convencionales de energía. Elaboración propia a partir de (Congreso de la República de Colombia, 2014).....	12
Tabla 1-6: Mecanismos para incentivar generación distribuida y microgeneración en el mundo. Elaboración propia a partir de (IEA, 2014a).....	13
Tabla 2-1: Factores que afectan la adopción y difusión de tecnologías renovables de microgeneración. Elaboración propia	16
Tabla 2-2: Efectos de algunos incentivos en la adopción de tecnologías renovables en energía. Elaboración propia	19
Tabla 2-3: Efectos de la microgeneración en los mercados eléctricos. Elaboración propia 21	21
Tabla 3-1: Herramientas de modelado nivel macro y micro. Elaboración propia de acuerdo con (Laciana et al., 2013).....	26
Tabla 4-1: Especificaciones de los parámetros del modelo. Elaboración propia.	39
Tabla 5-1: Criterios de evaluación. Elaboración propia utilizando para la curva de difusión* indicadores definidos por Rahmandad & Sterman (2008), citados por Cadavid, (2015)	55
Tabla 5-2: Resultados comparativos de indicadores de curva de difusión. Elaboración propia.....	61
Tabla 5-3: Resultados comparativos de indicadores de curva de carga. Elaboración propia.....	63
Tabla 5-4: Resultados comparativos de indicadores de la tarifa. Elaboración propia	64

Lista de símbolos y abreviaturas

A continuación se presenta el listado de abreviaturas utilizadas a lo largo de este documento

Abreviatura Término

<i>CREG</i>	Comisión de Regulación de Energía y Gas
<i>DANE</i>	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
<i>DECC</i>	Department of Energy & Climate Change
<i>DSM</i>	Demand Side Management
<i>EE</i>	Eficiencia Energética
<i>EPIA</i>	European Photovoltaic Industry Association
<i>FENOGE</i>	Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía
<i>FIT</i>	Feed In Tariff
<i>FV</i>	Fotovoltaico
<i>GCE</i>	Grandes Consumidores Especiales
<i>IEA</i>	International Energy Agency
<i>LCOE</i>	Levelized Cost of Energy – Costo Nivelado de Energía
<i>NREL</i>	National Renewable Energy Laboratory
<i>REFIT</i>	Renewable Energy Feed In Tariff
<i>RPS</i>	Renewable Portfolio Standard ó Cartera de Energía Renovable
<i>SSPD</i>	Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios
<i>UE</i>	Unión Europea
<i>UPME</i>	Unidad de Planeación Minero Energética
<i>WMO</i>	World Meteorological Organization

Introducción

Los reportes internacionales sobre el panorama energético mundial, muestran como las energías renovables empiezan a ganar un espacio importante en el suministro de energía eléctrica en diferentes países del mundo (IEA, 2014a). Lo cual ocurre como respuesta a diversas condiciones internacionales que llevan a los países a buscar soluciones de abastecimiento energético con fuentes alternativas, situaciones como los requerimientos de disminuciones de emisiones, los incrementos en la demanda y los propósitos de independencia energética (Tyagi, Rahim, Rahim, & Selvaraj, 2013).

Dentro de las energías renovables con potencial de incremento de su capacidad instalada a nivel internacional, se destaca la tecnología solar fotovoltaica, la cual debido a sus condiciones benéficas en términos económicos, ambientales y técnicos ha sobresalido en instalaciones de gran y pequeña escala (Balcombe, Rigby, & Azapagic, 2013; El Chaar, Lamont, & El Zein, 2011; Solangi, Islam, & Saidur, 2011; Toledo, Oliveira Filho, & Diniz, 2010).

No obstante sus beneficios, la masiva implementación de estos sistemas para generación, sobre todo para microgeneración, ha ocasionado problemas en los países pioneros como Alemania e Italia, y ha llevado a la reestructuración de los incentivos para su adopción con el fin de evitar problemas en el funcionamiento de los mercados eléctricos de estas regiones (IEA, 2014b).

Colombia requiere identificar y evaluar los efectos en el mercado eléctrico de la difusión de la tecnología solar fotovoltaica para microgeneración en el sector residencial, el cual es el objetivo general de esta tesis; esto basado en que recientemente adoptó la ley 1715 para la promoción de energías renovables (Congreso de la República de Colombia, 2014), además cuenta con condiciones privilegiadas para la implementación de sistemas fotovoltaicos de microgeneración (Jiménez, Cadavid, & Franco, 2014) y posee un sector residencial con una alta participación en el consumo nacional de energía eléctrica (SUI, 2014).

El documento de tesis se estructura como sigue: en el primer capítulo se explican los antecedentes que dan origen al problema de investigación, en el segundo capítulo se expone el estado del arte de donde surgen los objetivos y alcances de este trabajo, en el tercer capítulo se justifica y explica la metodología bajo la que se desarrolla el modelo de simulación, en el cuarto capítulo se presenta el modelo de simulación incluyendo supuestos y validación que le den robustez a los resultados, en el quinto capítulo se

exponen los resultados del caso base y la evaluación de los efectos de la penetración fotovoltaica bajo cuatro diferentes políticas y estrategias, y finalmente en el capítulo sexto se exponen las principales conclusiones y aportes logrados.

Capítulo 1. Antecedentes

En este capítulo se presenta la evolución de la tecnología solar fotovoltaica, el proceso de difusión en mercados internacionales; un contexto general sobre mercado eléctrico colombiano y algunos aspectos importantes de la ley 1715 sobre la gestión por el lado de la demanda, la generación distribuida y la microgeneración. Todo ello para enmarcar el problema que motiva la realización de este trabajo investigativo.

1.1 Tecnología solar fotovoltaica

Las diferentes tecnologías que utilizan el recurso solar como fuente para la generación de energía se han posicionado como alternativas viables para satisfacer tanto las necesidades de energía como los requerimientos de disminución de emisiones contaminantes al medio ambiente en las sociedades actuales (Joshi, Dincer, & Reddy, 2009).

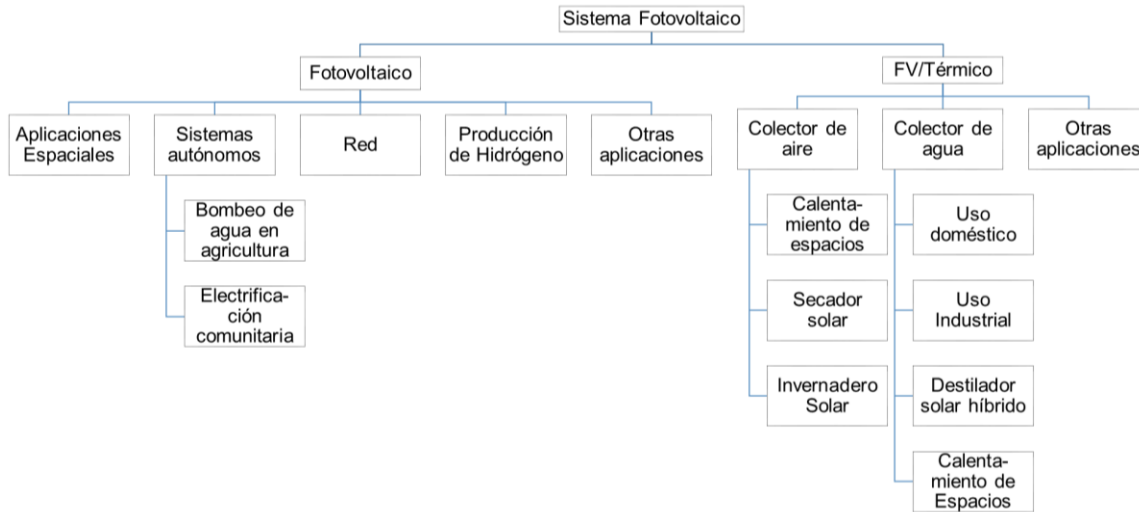
Específicamente la tecnología solar fotovoltaica, que convierte la radiación solar en electricidad de forma directa (El Chaar et al., 2011; Tyagi et al., 2013), presenta un alto potencial para la generación de electricidad en el mundo (Tyagi et al., 2013), esto debido a múltiples factores como: su facilidad para instalarse y desinstalarse, que es amigable con el ambiente, su bajo mantenimiento, la capacidad para funcionar autónomamente y alta modularidad (es decir que puede fácilmente pasarse de pequeñas a grandes plantas de generación) (Balcombe et al., 2013; El Chaar et al., 2011; Solangi et al., 2011; Toledo et al., 2010).

De acuerdo con sus aplicaciones, pueden mencionarse dos tipos de tecnología fotovoltaica, la que sólo usa el efecto fotovoltaico y la termo-fotovoltaica que utiliza también el efecto térmico del sol (Joshi et al., 2009). En la Figura 1-1 se presentan las diferentes clasificaciones de la tecnología solar fotovoltaica de acuerdo a sus aplicaciones.

Los sistemas fotovoltaicos para generación de energía eléctrica se componen de reguladores, controladores, en algunos casos baterías para almacenar energía (particularmente en sistemas autónomos), y principalmente celdas fotovoltaicas. Las celdas tienen como función principal convertir la radiación solar (tanto directa como difusa (Peters, Schmidt, Wiederkehr, & Schneider, 2011)) en energía, funcionando como material semiconductor (Tyagi et al., 2013). Su fuente de funcionamiento es la radiación solar, y por tanto, de su intensidad dependerá la cantidad de energía generada (Tyagi et al., 2013). La luz solar que irradia a la Tierra puede medirse utilizando el concepto de duración de brillo

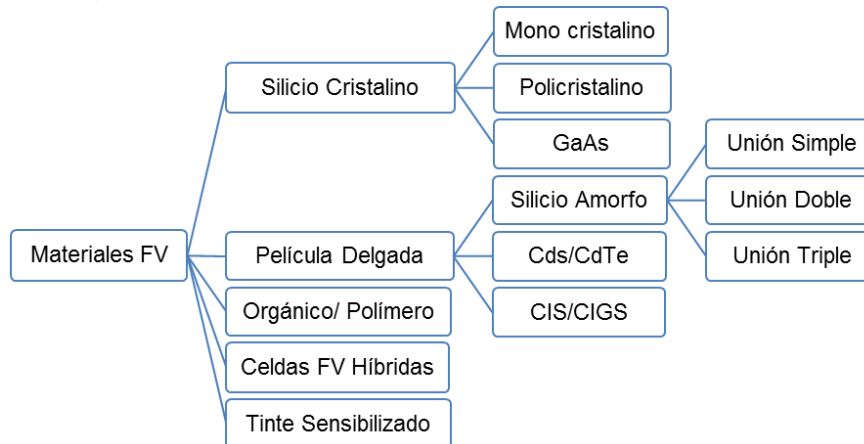
solar, el cual, según la definición de la World Meteorological Organization (WMO), es medido en horas y refleja el tiempo total en el cual la irradiancia directa del sol sobrepasa los 120 W/m² (WMO, 2008).

Figura 1-1: Clasificación de sistemas fotovoltaicos de acuerdo a sus aplicaciones. Traducido de (Joshi et al., 2009)



Existen diferentes tipos de celdas fotovoltaicas de acuerdo con sus materiales de fabricación, en la Figura 1-2, se presenta una clasificación de acuerdo con (Tyagi et al., 2013). Estas celdas presentan diferentes eficiencias sobresaliendo las celdas de uniones simples y múltiples, y en segundo lugar las mono-cristalinas (NREL, 2015). Es importante anotar que las celdas pioneras fueron las desarrolladas a partir de silicio, y que la búsqueda de nuevos materiales se corresponde con el interés de buscar disminución en los costos de los sistemas fotovoltaicos (Tyagi et al., 2013).

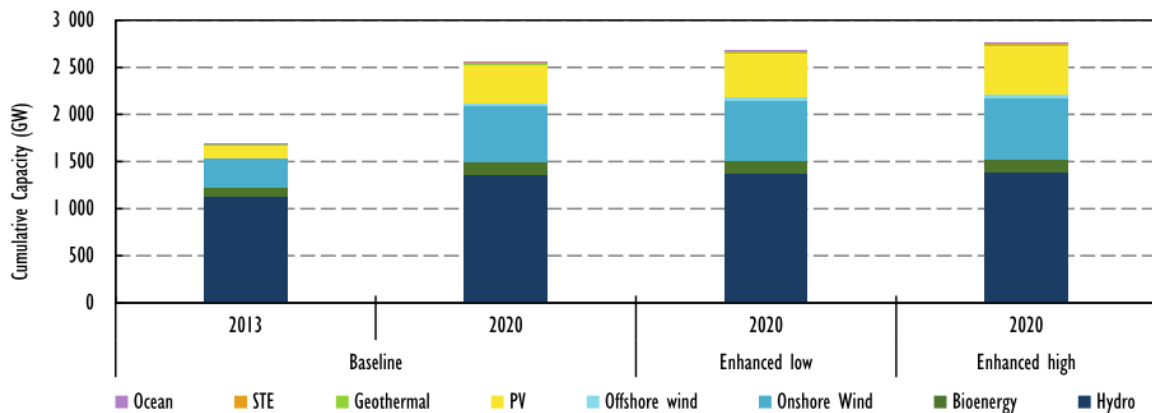
Figura 1-2: Tipos de materiales para las celdas fotovoltaicas. Adaptado y traducido de (Tyagi et al., 2013)



1.2 Penetración de FV en el mundo

Una revisión por la evolución de la tecnología solar fotovoltaica en el mundo, muestra que tanto la capacidad instalada, como la generación de energía utilizando esta tecnología ha estado en aumento en los últimos años, y más aún, se espera que estas tendencias continúen siendo crecientes para los próximos años, de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2014a). La Figura 1-3 muestra las proyecciones a 2020 de capacidad acumulada mundial renovable.

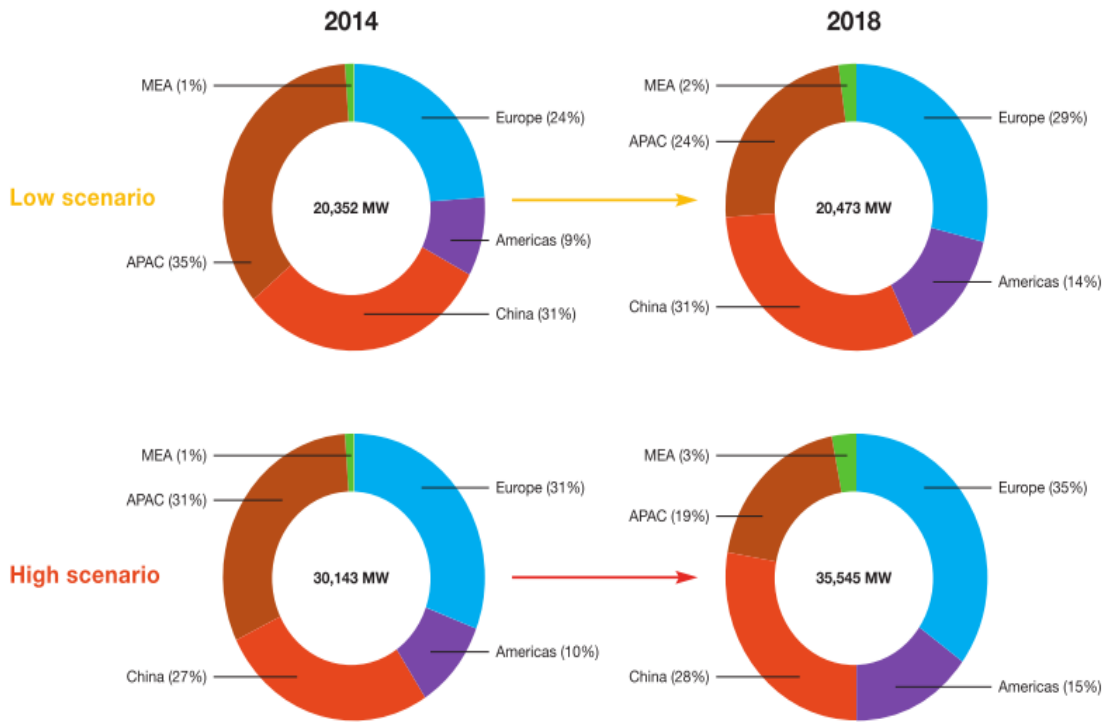
Figura 1-3: Capacidad acumulada mundial en energía renovable (IEA, 2014a)



Esta tendencia es creciente para las instalaciones fotovoltaicas en múltiples escalas, pues como lo muestra el *Reporte de Mercado Anual de 2014*, realizado por la Asociación de Industria Fotovoltaica Europea (EPIA, 2014), en el año 2013 las instalaciones en techos, llamadas “techos solares” sumaron en total 23 GW, y sus proyecciones indican que para el año 2018 la cantidad irá en ascenso. La Figura 1-4 permite observar estas tendencias.

La Figura 1-4, expone que para la región de América se esperan incrementos en las instalaciones de techos solares del 5% tanto en un escenario bajo (que parte del 9% de instalaciones a 2014) como en el escenario alto (que parte del 10% en 2014 y llega hasta el 15% en 2018).

Los incrementos en las instalaciones fotovoltaicas, en cualquiera de sus tamaños, han estado relacionados no sólo con los beneficios que se perciben de la tecnología fotovoltaica que ya se mencionaron anteriormente (ver 1.1); sino también a dos factores adicionales referidos primero a la disminución de los costos de los sistemas en el tiempo (actualmente los sistemas solares cuentan con un ratio global de aprendizaje de 20% (Hayward & Graham, 2013)), y segundo a las políticas para incentivar la adquisición de los sistemas.

Figura 1-4: Incrementos en la instalación de techos solares mundiales por regiones (EPIA, 2014)

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2014b), para propiciar el despliegue de la tecnología fotovoltaica, se requiere un marco político favorable que le permita instaurarse y competir en un mercado liberalizado. En este sentido, la IEA propone cuatro acciones importantes de los gobiernos para lograr las condiciones favorables deseadas, estas acciones se esquematizan en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1: Estrategias para despliegue de mercado FV. Elaboración propia a partir de (IEA, 2014b)

Tipo de Estrategia	Estrategia
Disminución barreras no económicas	Permitir a cualquier productor generar energía FV en cualquier escala.
	Eliminar tramitología innecesaria en procesos de permisos y conexiones
	Diseñar y aplicar estándares para los paneles y los sistemas FV
	Crear programas de capacitación y entrenamiento para instaladores de FV
Facilitar condiciones de mercado	Adaptar de planes de incentivos
	Rediseñar mercado hacia su competitividad
	Incluir objetivos de instalación en el plan nacional
Facilitar integración de FV en gran escala	Fomentar la transformación del sistema eléctrico hacia su flexibilización
Financiación	Otorgar sistemas de financiación innovadores

Algunas de las políticas específicas (regulatorias y financieras) que han instaurado los países alrededor del mundo para incentivar la adquisición de los sistemas fotovoltaicos, incluyen legislación sobre renovables, determinación de objetivos (targets), feed in tariff, medición neta (net metering), certificados verdes negociables, subsidios a capital, entre otros. (IEA, 2014a).

Adicionalmente, es importante mantener siempre un control sobre el funcionamiento de los incentivos, para asegurarse de que el despliegue de la tecnología se mantenga bajo control y en los límites deseados, utilizando estrategias como la alemana de cambiar las tasas de acuerdo a la adopción o la italiana de limitar los subsidios (feed in tariff) anualmente de acuerdo a la capacidad o el volumen (IEA, 2014b).

Las anteriores medidas han surgido como medidas de aseguramiento para evitar inestabilidades en los mercados eléctricos de esos países, puesto que se evidenciaron ratios de adopción elevados en los países que instituyeron incentivos a la adquisición. Algunas de los países que debieron modificar sus esquemas de incentivos (principalmente a la microgeneración), se presentan en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2: Ejemplos de países que modificaron incentivos. (IEA, 2014a)

País	Fecha	Caso
Italia	Julio 2012	Suspendió su sistema de subsidios (feed in tariff) y lo reemplazó por el neteo de energía (net metering)
Dinamarca	2012	Modificó la forma de neteo por una con base horaria para limitar el despliegue de la tecnología fotovoltaica
Algunos estados de Estados Unidos		Limitaron la capacidad disponible para el net metering
Alemania	Abril, 2012	Las FITs se ubicaron debajo de la porción variable del precio de comercialización, lo que convirtió el autoconsumo en un negocio atractivo, desde entonces es muy difícil controlar el nivel de autoconsumo de los hogares

1.3 Mercado eléctrico colombiano.

El mercado eléctrico colombiano es un mercado liberalizado que permite la competencia a través de la cadena de suministro desde el año 1995, cuyo marco regulatorio está fundamentado en las leyes 142 y 143 de 1994 (Congreso de la República de Colombia, 1994a, 1994b).

Por el lado de la oferta se destaca que para el año 2014 la capacidad instalada de generación fue de 15.478 MW con aportes de generación con fuentes hidráulicas (69,6%), térmica carbón (4.53%), térmica gas (25.26%), eólica (0.1%) y otros (0.5%), de acuerdo con UPME (2015a).

En cuanto a la generación eléctrica, en Colombia las fuentes renovables no convencionales (como la solar) aún cuentan con una participación muy baja, con un estimado de participación entre 9 y 11 MWp en sistemas fotovoltaicos aislados o aplicaciones profesionales (UPME, 2015b). Sin embargo el plan de expansión de referencia generación y transmisión 2014-2028 (UPME, 2015b), considera en sus escenarios la incorporación de capacidad renovable no convencional a la matriz de generación nacional para el año 2028, incluyendo en el escenario bajo la entrada de 474 MW de energía eólica, en el escenario medio 474 MW de eólica, 143 MW de solar, 275 MW de geotermia y 314 MW de cogeneración con biomasa; y en el escenario alto 1370 MW eólica, 239 MW solar y 375 MW geotérmicos y 314.8 MW de cogeneración.

El total de agentes generadores para inicios del año 2015 era de 56, y en los demás negocios el registro indicaba la existencia de 12 agentes transmisores, 31 distribuidores y 93 comercializadores (Xm, 2015b).

Por el lado de la demanda, es importante mencionar que en Colombia el 96% de la población cuenta con acceso a la electricidad (UPME, 2015b); y que el sector residencial es el que cuenta con mayor participación en la demanda de energía eléctrica, siendo ésta el 40% de la demanda total de energía eléctrica del sistema (SUI, 2014).

En cuanto al consumo del sector residencial, el consumo promedio mensual por hogar en 2014 se ubicó en 153.96 kWh/mes (cálculos propios de acuerdo con DANE (2014) y Xm (2015a)); y la caracterización del consumo diario, por sector se presenta en las figuras siguientes:

Figura 1-5: Curva de carga diaria - Total del sistema. Año 2014. Elaboración propia con datos de (Xm, 2015c)

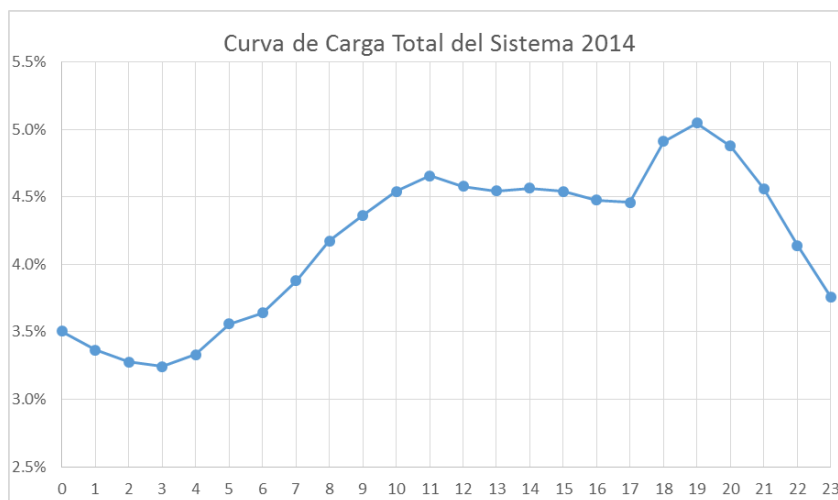


Figura 1-6: Curva de carga diaria - Residencial. Año 2014. Elaboración propia con datos de (UPME, 2008; Xm, 2015c)

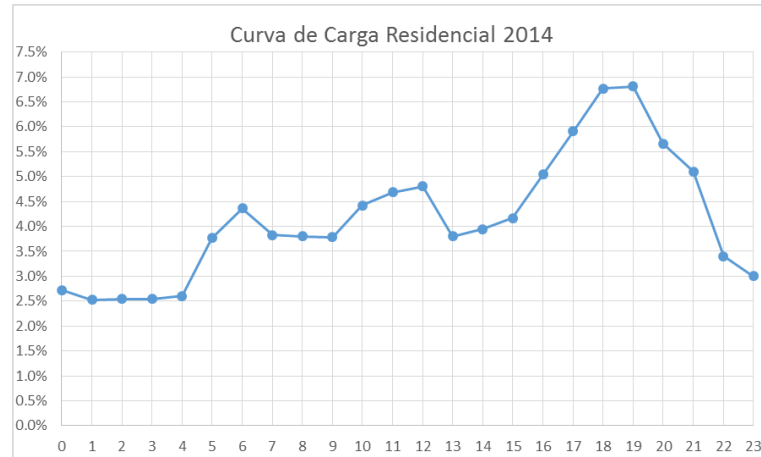
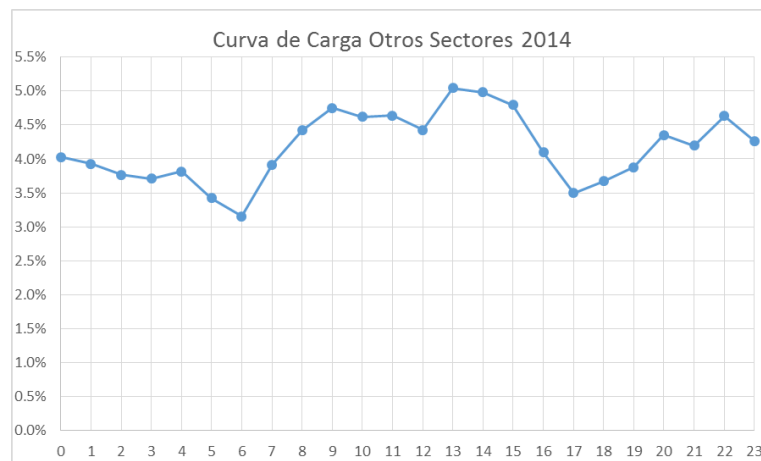


Figura 1-7: Curva de carga diaria - Otros sectores. Año 2014. Elaboración propia con datos de (UPME, 2008; Xm, 2015c)



Los pequeños consumidores en Colombia pueden ejercer su poder de mercado variando su demanda de acuerdo a los precios (siendo estas tarifas reguladas), haciendo sustitución (cuando es posible), conservación o cambiando de comercializadora (I Dyner, Franco, & Arango, 2008). Sin embargo el consumidor no dispone de información instantánea ya que la frecuencia de facturación es de por lo menos un mes.

El precio del mercado al que están sujetos los consumidores residenciales se calcula como la suma de los costos de generación (G_m) transmisión (T_m), distribución ($D_{n,m}$), comercialización (Cv_m), pérdidas ($PR_{n,m}$) y restricciones (R_m) (ver ecuación 1-1); donde los costos de distribución y transmisión dependen del total de la demanda (CREG, 2007, 2008)

$$CUV_{m,n} = G_m + T_m + D_{n,m} + Cv_m + PR_{n,m} + R_m$$

1-1

Donde n representa el nivel de tensión y m el mes para el que se realiza el cálculo.

En 2015 los valores promedio de la tarifa de estrato 4 para cada mes, de los departamentos con mayor densidad poblacional, se presentan en la Tabla 1-3. Se selecciona el estrato 4 debido a que en Colombia existe un sistema de subsidios en el cual los usuarios de mayores ingresos (estratos 5 y 6) pagan un sobrecosto para subsidiar a los usuarios de menores ingresos (estratos 1, 2 y 3) (Arango et al., 2012), por tanto el estrato 4 muestra la tarifa residencial sin subsidios ni contribuciones.

Tabla 1-3: Tarifa nacional residencial. Año 2015. Elaboración propia con datos de (SUI, 2016)

Departamento	Empresa	Tarifa Estrato 4
Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.	399.48
Atlántico	Electrificadora del Caribe S.A. E.S.P.	335.18
Bolívar	Electrificadora del Caribe S.A. E.S.P.	346.87
Caldas	Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P.	410.09
Cundinamarca	Empresa de Energía de Cundinamarca S.A. E.S.P.	450.23
La guajira	Electrificadora del Caribe S.A. E.S.P.	231.08
Magdalena	Electrificadora del Caribe S.A. E.S.P.	298.38
Norte de Santander	Centrales Eléctricas del Norte de Santander S.A. E.S.P.	405.96
Santander	Electrificadora de Santander S.A. E.S.P.	398.47
Tolima	Compañía Energética del Tolima S.A. E.S.P.	434.17

1.4 Ley 1715

La ley 1715 sancionada en 2014 por el presidente de la República de Colombia (Congreso de la República de Colombia, 2014), busca tanto promover el uso de fuentes no convencionales de energía como la gestión eficiente de la energía, enfatizando en la estimulación a la gestión por el lado de la demanda a través de la respuesta de la demanda y la eficiencia energética; y al desarrollo de actividades como la generación distribuida y la microgeneración; los cuales tienen una gran importancia para el desarrollo de esta tesis. Por lo tanto a continuación se explican cada uno de estos conceptos desde la ley y desde la literatura.

1.4.1 Gestión por el lado de la demanda: eficiencia energética y respuesta de la demanda

La gestión por el lado de la demanda o DSM (*Demand Side Management*) por sus siglas en inglés, se refiere comúnmente a las acciones hacia los consumidores que buscan modificaciones en los patrones de consumo de energía, que permiten aumentar la eficiencia y mejorar la operación de un sistema de energía eléctrica (Behrangrad, 2015; Luthander, Widén, Nilsson, & Palm, 2015).

Las acciones a los consumidores desde la gestión por el lado de la demanda comprenden dos líneas principales: la eficiencia energética (E.E., que se centra en la reducción de los requerimientos de energía) y a la respuesta de la demanda (que se asocia con los cambios en el consumo de acuerdo a cambios en los precios o a incentivos que buscan modificar la curva de carga) (Behrangrad, 2015).

La ley 1715 incluye ambos conceptos, definiendo a la eficiencia energética de una forma más amplia que no abarca solamente la actividad del consumo sino las demás involucradas en la cadena de suministro, así: “Es la relación entre la energía aprovechada y la total utilizada en cualquier proceso de la cadena energética, que busca ser maximizada a través de buenas prácticas de reconversión tecnológica o sustitución de combustibles.” (Congreso de la República de Colombia, 2014, art.5, p.3). Y la respuesta de la demanda es definida como: “...cambios en el consumo de energía eléctrica por parte del consumidor, con respecto a un patrón usual de consumo, en respuesta a señales de precios o incentivos diseñados para inducir bajos consumos.” (Congreso de la República de Colombia, 2014, art.31, p.19).

1.4.2 Generación distribuida y microgeneración

La generación distribuida se refiere a la generación de energía eléctrica de forma descentralizada por varias zonas geográficas y con múltiples puntos de generación de tamaño modular (es decir, que se pueden aumentar en su tamaño conforme a la demanda), pero que generalmente son de pequeña escala (Toledo et al., 2010).

En la legislación colombiana la generación distribuida es definida como sigue:

“Es la producción de energía eléctrica, cerca de los centros de consumo, conectada a un Sistema de Distribución Local (SDL). La capacidad de la generación distribuida se definirá en función de la capacidad del sistema en donde se va a conectar, según los términos del código de conexión y las demás disposiciones que la CREG defina para tal fin”.(Congreso de la República de Colombia, 2014, art.5, p.5)

Por su parte, la microgeneración, también conocida como autogeneración, suele asociarse a la generación de energía eléctrica para satisfacer los requerimientos de energía de quien la genera, es decir para el autoconsumo (Luthander et al., 2015); por lo tanto las tecnologías de microgeneración suelen asociarse a aquellas que se utilizan para generar energía para una vivienda (der Veen & De Vries, 2009; Sauter & Watson, 2007).

Para la regulación colombiana existe microgeneración a pequeña y gran escala. La de pequeña escala es aquella inferior a 1 MW (UPME, 2015c), sin embargo a la fecha la UPME no ha divulgado los límites correspondientes a la microgeneración de gran escala. Las definiciones correspondientes se presentan a continuación.

“1. Autogeneración. Aquella actividad realizada por personas naturales o jurídicas que producen energía eléctrica principalmente, para atender sus propias

necesidades. En el evento en que se generen excedentes de energía eléctrica a partir de tal actividad, estos podrán entregarse a la red, en los términos que establezca la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) para tal fin.

2. Autogeneración a gran escala. Autogeneración cuya potencia máxima supera el límite establecido por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).

3. Autogeneración a pequeña escala. Autogeneración cuya potencia máxima no supera el límite establecido por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).” (Congreso de la República de Colombia, 2014, art.5, p.3).

Dentro de los mecanismos para la promoción de la microgeneración a pequeña y gran escala, así como la generación distribuida, la ley 1715 contempla los siguientes:

Tabla 1-4: Mecanismos de promoción de generación distribuida y microgeneración. Elaboración propia a partir de (Congreso de la República de Colombia, 2014)

Mecanismo	Público Objetivo
Entrega de excedentes a la red de distribución y/o transporte	Microgeneradores
Sistemas de medición bidireccional y mecanismos simplificados de conexión y entrega de excedentes.	Microgeneradores de pequeña escala.
Venta de energía	Generadores distribuidos
Venta de créditos de energía	Microgeneradores
Programas de divulgación masiva sobre microgeneración de pequeña escala	Público en general- Microgeneradores de pequeña escala
Programas de divulgación focalizada	Microgeneradores a pequeña escala

Adicionalmente, en la Ley 1715 se contemplan los siguientes incentivos financieros para promover el uso de fuentes no convencionales de energía para microgeneración a pequeña escala, utilizando el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE):

Tabla 1-5: Incentivos a la inversión en fuentes no convencionales de energía. Elaboración propia a partir de (Congreso de la República de Colombia, 2014)

Incentivos	Funcionamiento
Reducción del impuesto de renta	Por los 5 años siguientes desde que se realiza la inversión se descontará el 50% del valor total de la inversión realizada.
Incentivo Tributario: IVA	Equipos, elementos, maquinaria y servicios nacionales o importados destinados a pre-inversión e inversión, producción y utilización de energía de fuentes no convencionales, además de la medición y evaluación de potenciales recursos serán excluidos de IVA.
Incentivo Arancelario	Exención del pago de los derechos arancelarios de importación de maquinaria, equipos materiales e insumos destinados exclusivamente para labores de pre-inversión y de inversión en proyectos con fuentes no convencionales.

Incentivos	Funcionamiento
Depreciación Acelerada	Una tasa de depreciación no mayor al 20% como tasa global anual, aplicable a maquinarias, equipos y obras civiles necesarias para la pre-inversión, inversión y operación de la generación con fuentes no convencionales de energía.

Tabla 1-5: (Continuación)

Cuando se habla específicamente de las políticas destinadas a promover la generación fotovoltaica de forma distribuida y la microgeneración, la IEA (2014a) menciona las siguientes como políticas genéricas implementadas en algunas regiones del mundo:

Tabla 1-6: Mecanismos para incentivar generación distribuida y microgeneración en el mundo. Elaboración propia a partir de (IEA, 2014a)

Política	Mecanismo
Intervención de costo de generación	Disminuir Impuestos, gravámenes, tasas. Bajas tasas de financiación de sistemas FV Disminuir costos de compra de sistemas FV
Remuneración por inyección a la red y regulación sobre la máxima cantidad de energía (kWh) y capacidad (kW) permitida para inyectar a la red.	Medición de energía neta (net metering) * Autoconsumo y remuneración por exceso de producción** "Compra todo, Vende todo"***
Cambiar el costo de incentivos para desplazar la demanda o almacenar energía.	Incentivos Impuestos

*El mecanismo de Medición de Energía Neta (Net Metering), permite que en la cuenta de cobro, se facture el valor neto entre la energía consumida y la entregada a la red. Es un sistema común en Estados Unidos (43 estados), Australia, Italia, entre otros. Todos los esquemas limitan el rango de aplicabilidad a sistemas entre 20 kW y 200 kW (IEA, 2014a).

**El sistema de Autoconsumo y Remuneración por el exceso de producción combina el autoconsumo con el FIT. Deben cuidarse que los niveles de autoconsumo no sean demasiado altos, para evitar problemas de mercado como el caso de Alemania (IEA, 2014a).

***Modelo "compra todo, vende todo". Se definen el valor de la tarifa solar, impide la creación de subsidios cruzados (IEA, 2014a).

1.5 Formulación del problema

Considerando los antecedentes descritos, donde se destaca por un lado el importante despliegue de la tecnología solar fotovoltaica a nivel internacional con implicaciones en el funcionamiento tradicional de los mercados eléctricos en donde fueron incentivados; y por otro, las actuales condiciones favorables de Colombia que propenden por incentivar la

adquisición de tecnologías renovables no convencionales, así como la respuesta de la demanda y el uso de la microgeneración; se reconoce que existe incertidumbre respecto a las tasas de difusión de la tecnología fotovoltaica para microgeneración en el sector residencial y sus implicaciones en el comportamiento del mercado eléctrico colombiano.

1.6 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se identifica y caracteriza la tecnología solar fotovoltaica y se reconoce su potencial para la generación de energía eléctrica tanto en escala macro como micro. Se identifican las tendencias mundiales hacia la adopción de los sistemas fotovoltaicos como fuentes de generación eléctrica, que entre otros beneficios, no es contaminante con la atmósfera.

Se identifica además la estructura y funcionamiento actual del mercado eléctrico colombiano, dejando ver el papel pasivo actual de la demanda dentro del sistema, y las intenciones de los reguladores por volverlo un agente más activo con los mecanismos que procuran la respuesta de la demanda, donde tienen influencia la generación distribuida y la microgeneración.

Se reconoce además, que existen problemas asociados a los ratios de adopción de la tecnología fotovoltaica en los países que lo han incentivado desde años pasados; y debido a la incertidumbre en cuanto a los posibles niveles de adquisición de dicha tecnología en Colombia y sus posibles efectos en el mercado eléctrico nacional, se identifica éste como problema de investigación.

El próximo capítulo presentará el estado del arte sobre la difusión de tecnologías renovables de microgeneración en el mundo con énfasis en la tecnología solar fotovoltaica.

Capítulo 2. Estado del arte

En este capítulo se ofrece una revisión sobre cómo en la literatura se ha analizado y estudiado el proceso de difusión de innovaciones de tecnologías renovables en energía, enfatizando en la tecnología solar fotovoltaica para microgeneración; permitiendo identificar los principales avances que se han desarrollado sobre el tema y los vacíos en el conocimiento que aún no han sido abordados; de donde surgen los objetivos y alcances de la tesis, que se muestran al final del capítulo.

2.1 Revisión de la difusión de microgeneración renovable en energía

La revisión del estado del arte sobre la difusión de tecnologías renovables en el sector de la energía, con énfasis en las tecnologías de microgeneración, se realizó enfatizando en tres líneas principales:

1. Una revisión sobre aquellos estudios orientados a responder preguntas sobre los elementos que son motivadores o que se convierten en barreras a la adquisición de los sistemas renovables en energía, principalmente los fotovoltaicos;
2. Una revisión sobre las distintas políticas implementadas para la difusión de innovaciones renovables en energía, enfatizando en las orientadas a los sistemas de microgeneración fotovoltaica, y sus implicaciones en la difusión; y
3. Una búsqueda de estudios que se concentren en el análisis de los efectos en mercados eléctricos de la difusión de sistemas renovables de microgeneración.

La primera línea, relacionada con el reconocimiento de los factores que motivan o dificultan la adopción de tecnologías renovables en energía, se realiza debido a que su identificación es importante para diseñar estrategias que permitan lograr adecuadamente los niveles de penetración tecnológica deseados. A continuación se sintetizan los principales hallazgos en este aspecto:

Tabla 2-1: Factores que afectan la adopción y difusión de tecnologías renovables de microgeneración. Elaboración propia.

Autor y Año	Factor	País	Tecnología	Conclusiones principales
(Karakaya, Hidalgo, & Nuur, 2015)	General	Alemania	Tecnología FV	Más allá de la paridad de red lo que motiva la adopción es la autosuficiencia y la independencia de las compañías eléctricas. Las motivaciones se complementan con la conciencia ambiental, efecto de grupo y estabilidad financiera.
(Balcombe, Rigby, & Azapagic, 2014)	General	Reino Unido	Tecnologías de Microgeneración	Como motivaciones principales están: ganar dinero de la instalación, incrementar la independencia energética de la vivienda y el blindaje frente a futuros costos elevados de energía. Los factores financieros como los altos costos de capital, la ganancia o ahorro de dinero, y el riesgo de pérdida si se muda de vivienda, son las barreras principales. Otra barrera importante es la dificultad para encontrar información confiable.
(Borchers, Xiarchos, & Beckman, 2014)	General	Estados Unidos	Eólica y solar	Muestra que las características del Estado como recursos solares, niveles de ingreso per cápita y votación democrática, incrementan las posibilidades de adopción en las granjas. Además muestra que las condiciones de la granja como la propiedad de la finca, ganadería, acceso a internet, operaciones orgánicas y nuevos finqueros, incrementan la posibilidad de adopción.
(Islam, 2014)	Atributos de la tecnología	Canadá	Tecnología FV	Hogares jóvenes que tienen una alta conciencia de la tecnología y menor sensibilidad a los costos, son más propensos a la adopción temprana. Tienen un efecto positivo el ahorro en costos de energía, la retribución por exportación y la adopción de los vecinos a través del efecto boca a boca. La conciencia de la tecnología y el ahorro en costos de energía tienen efectos positivos en la probabilidad de adopción; reforzando la necesidad de educación efectiva que enfatice en criterios de inversión, incentivos (FIT) y efectos ambientales.
(Wirth, 2014)	Precondiciones institucionales	Italia	Cooperativas de biogás	El espíritu de comunidad, la tradición de cooperación, las normas de la localidad y la responsabilidad son factores que impulsan la adopción. Además influyen la ubicación y escala de la planta. Es importante analizar a nivel de "comunidad".
(Balcombe et al., 2013)	General (6 categorías)	Reino Unido	Tecnologías de Microgeneración	Los costos de capital son la barrera más importante. Los motivadores más comunes son el beneficio ambiental y ahorro o ganancia de los incentivos y la reducción de cuenta de energía.

Autor y Año	Factor	País	Tecnología	Conclusiones principales
(Baskaran, Managi, & Bendig, 2013)	General	Nueva Zelanda	Tecnologías de Microgeneración	Las políticas gubernamentales juegan un rol crucial acelerando el desarrollo de las tecnologías renovables. El desarrollo sistemático y transparente de políticas sostenibles para reducir riesgos y mejorar el retorno de la inversión facilitará el desarrollo de energía renovable, y tecnologías de bajo costo.
(Wirth, Markard, Truffer, & Rohracher, 2013)	Instituciones formales	Regiones Australianas	Biogás	La cultura profesional de los agricultores modula los efectos de las FIT y los subsidios de inversión considerablemente; lo que explica diferencias regionales en la difusión, diseño y operación de los sistemas. Los estudios de tecnologías emergentes se benefician del análisis sistemático de la interacción instituciones reguladoras, normativas y cultural-cognitivas.
(Genus, 2012)	Reglas institucionales	Reino Unido	Tecnologías de Microgeneración	El artículo profundiza en cómo la conformidad o la innovación en las reglas institucionales puede hundir o contribuir a la difusión de microgeneración.
(Mills & Schleich, 2012)	Actitudes – Educación.	10 países UE y Noruega	Tecnologías de eficiencia energética (EE) y comportamientos de conservación.	Hogares con niños pequeños son más propensos a adoptar tecnologías de E.E. y prácticas de conservación; y sus razones principales son ahorro en energía por causa ambiental. Hogares donde predominan personas mayores tienen menores niveles de conocimiento sobre el uso de energía en el hogar, menores prácticas de conservación y adquieren menos tecnologías de E.E. Sus razones principales son los ahorros financieros. Los niveles de educación se relacionan con la adquisición de E.E. y prácticas de conservación. La educación universitaria incrementa la importancia que se otorga al ahorro de energía y decrece la importancia en ahorros financieros. Los impactos de la educación varían de acuerdo al país.
(Bergman & Eyre, 2011)	General	Reino Unido	Tecnologías de Microgeneración	En el sector doméstico son evidentes las barreras culturales, institucionales y económicas para la microgeneración.
(Provance, Donnelly, & Carayannis, 2011)	Instituciones	Reino Unido	Negocios de Microgeneración	Las fuerzas político institucionales influyen en las empresas regionales y nacionales en las condiciones en que éstas se crean, crecen y compiten. Las fuerzas socio-institucionales impactan las nuevas empresas en su medio social, respecto a sus grupos de interés.

Autor y Año	Factor	País	Tecnología	Conclusiones principales
(Claudy, Michelsen, & O'Driscoll, 2011)	Disposición de pago	Irlanda	Tecnologías de Microgeneración	<p>La baja adopción de la microgeneración se debe a que la disposición a pagar de los hogares está por debajo del precio de mercado.</p> <p>Se sugiere que las decisiones de inversión no son completamente racionales y están influenciadas por otros factores además de la relación costo – beneficio.</p> <p>Los hogares se preocupan por la reacción de los vecinos, por lo que la influencia social puede tener efectos adversos.</p> <p>Para FV los costos iniciales son la mayor barrera.</p>
(Zhang, Song, & Hamori, 2011)	General	Japón	Tecnología fotovoltaica	<p>Los costos de instalación tienen un efecto negativo en la adopción de sistemas FV; mientras que la inversión en el hogar y la conciencia ambiental tienen un efecto positivo.</p>
(Claudy, Michelsen, O'Driscoll, & Mullen, 2010)	Conciencia de la tecnología	Irlanda	Tecnologías de Microgeneración	<p>La conciencia y conocimiento de la tecnología precede la evaluación de las características del producto y por ende la decisión de adopción.</p> <p>Diferentes segmentos poblacionales poseen diversos niveles de conciencia de la tecnología.</p>
(Scarpa & Willis, 2010)	General-Disp. A pagar	Reino Unido	Tecnologías de Microgeneración	<p>A pesar de que la microgeneración de energía renovable es bien valorada por los hogares, esto no es suficiente comparado con los altos costos de adopción.</p>
(Agterbosch, Meertens, & Vermeulen, 2009).	Instituciones: Aceptación Socio-política	Países bajos	Eólica	<p>Las condiciones sociales como estilos de gestión, intereses y contactos informales prevalecen sobre las instituciones formales.</p> <p>La forma en que los actores están de acuerdo con la estructura institucional clarifica la aceptación social y con ella la implementación tecnológica.</p>
(Sauter & Watson, 2007)	Aceptación Social	Reino Unido	Microgeneración	<p>La microgeneración requiere aceptación activa de los hogares; que se podría expresar como: actitudes, comportamiento e inversión.</p> <p>Diferentes modelos de despliegue tecnológico, tendrán significativos impactos diferentes en la aceptación social de la tecnología.</p>
(Serpa & Zilles, 2007)	Antropológico	Brasil	Tecnología fotovoltaica	<p>La orientación teórica y práctica de la antropología aplicada son esenciales para garantizar un exitoso cambio tecnológico.</p>

Tabla 2-1: (continuación)

Se evidencia de esta búsqueda que existen muchísimos factores importantes que intervienen en las decisiones de adquisición de una tecnología renovable, que abordan

aspectos más allá del costo o los elementos financieros, incluyendo aspectos sociales, políticos e institucionales.

Debido a que algunos autores han enfatizado que las políticas favorecen el desarrollo de nuevos mercados y la disminución de barreras a la adopción, y que, además, es necesario conocer los mecanismos que entorpecen la difusión de nuevas tecnologías para evitarlos (Chowdhury, Sumita, Islam, & Bedja, 2014); se realiza el estudio de la segunda línea de trabajo, en la cual se presenta una revisión sobre las políticas implementadas en algunos países y los efectos que ha tenido en la difusión de las tecnologías de microgeneración. La Tabla 2-2 resume los principales hallazgos.

Tabla 2-2: Efectos de algunos incentivos en la adopción de tecnologías renovables en energía. Elaboración propia

Autor y año	Incentivo/política	Región	Conclusiones
(Simpson & Clifton, 2015)	Incentivos financieros: FIT	Australia	Los ratios de satisfacción disminuyen cuando los consumidores no reciben la prima del FIT y cuando no obtienen “auto-información”. Los usuarios consideran la información del gobierno como inconsistente e inaccesible; y sienten que no les pagan lo justo por inyectar a la red.
(Luthander et al., 2015)	Dsm y almacenamiento	--	Es posible incrementar el autoconsumo entre un 13% y 24% con almacenamiento de 0.5 a 1kW por kW instalado, y entre 2% y 15% con gestión por el lado de la demanda.
(Balcombe et al., 2014)	FIT, Pacto verde (Green Deal)	Reino Unido	El FIT incrementó el grupo de motivados a instalar por razones financieras. El pacto Verde procura enfrentar la barrera de costo de instalación y del riesgo de perder el capital por mudanzas.
(Chowdhury et al., 2014)	FIT, Pacto Verde (Green New Deal)	Japón y Alemania	En Japón ambos incentivos han mostrado un alto crecimiento de las energías renovables. En Alemania el FIT condujo a que ahora sea más barato producir energía FV que comprarla de la red.
(Cherrington, Goodship, Longfield, & Kirwan, 2013)	FIT	Reino Unido	Costo de instalación fue reducido dramáticamente desde la implementación del FIT.
(Hsu, 2012)	FIT, Subsidios a capital.	Taiwan	Cuando se adopta sólo FIT o subsidios con límites superiores fijos en el ROI, incrementar uno o el otro es buena opción. Cuando el límite del ROI está fijo, diferentes combinaciones de FIT y subsidios son insignificantes.
(Claudy et al., 2011)	REFIT (FIT para	Irlanda	El REFIT ha tenido un impacto significativo en la difusión de energías renovables para

Autor y año	Incentivo/ política	Región	Conclusiones
	energía renovable); Subvenciones		generación eléctrica, pero se cuestiona si alentará a los hogares, comunidades y pequeños negocios a invertir en microgeneración, ya que los precios de referencia para los pagos son pequeños. Las subvenciones si se han reconocido como las mayores promotoras de la microgeneración. Los esquemas actuales (subvenciones y FIT) no disminuyen el bache entre la disposición a pagar y los precios de mercado.
(Solangi et al., 2011)	Revisión de literatura	---	Se encuentra que las FIT, las carteras de energía renovable (RPS) y los incentivos, son las políticas más comúnmente implementadas en el mundo; proveyendo motivación para el desarrollo y uso de tecnologías renovables en energía.
(Thiam, 2011)	Prima a tarifa renovable	Senegal	Este apoyo puede reforzar la implementación de sistemas renovables en áreas remotas de senegal. Esquemas de tarifas sostenibles requieren de estructuras institucionales confiables.
(Zhang et al., 2011)	General	Japón	Las políticas gubernamentales generales ayudan a promover la adopción fotovoltaica.
(Agterbosch et al., 2009).	FIT	Reino Unido	El uso de FIT incrementó en Reino Unido la disposición a pagar de los usuarios.
(del Río González, 2008)	FIT	España	Gracias a los incentivos, las FV experimentaron significativas tasas de crecimiento. Compromiso político y actitud de los actores interesados son factores importantes en el éxito del esquema.
(Watson et al., 2008)	General	Reino Unido	Reformas fiscales y de mercado podrían incrementar considerablemente el atractivo de las tecnologías de microgeneración
(Maribu, Firestone, Marnay, & Siddiqui, 2007)	Programas de Investigación e investigación tecnológica	Estados Unidos	Los programas de investigación aceleran e incrementan las inversiones en los recursos de energía distribuidos. La regulación y los incentivos tienen el potencial para mejorar los beneficios económicos de los recursos de energía distribuidos.
(Jacobsson & Lauber, 2006)	Marco regulatorio	Alemania	Se relaciona la difusión con la naturaleza de los instrumentos políticos y el proceso que condujo a la adopción de esos instrumentos.

Tabla 2-2: (Continuación)

De esta revisión puede concluirse que uno de los incentivos más abordados en la literatura es el FIT, y además que las políticas e incentivos para fomentar la difusión de tecnologías renovables tienen, en general, efectos positivos en los ratios de adopción en los países implementados.

La última línea de búsqueda se enfoca en reconocer estudios que abordan los efectos en los mercados eléctricos de la implementación de tecnologías renovables de microgeneración. Los principales hallazgos, referidos a variaciones en los hábitos de consumo, intermitencia y problemas de balance, se observan en la Tabla 2-3:

Tabla 2-3: Efectos de la microgeneración en los mercados eléctricos. Elaboración propia

Autor y año	Región	Efectos
(Balcombe, Rigby, & Azapagic, 2015)	Reino Unido	El rápido incremento de FV en los hogares puede ocasionar problemas de intermitencia en la red y problemas de balance, lo que disminuirá la confiabilidad de la red. La solución de añadir batería es sensible a los créditos por la exportación de electricidad.
(Eid, Reneses Guillén, Frías Marín, & Hakvoort, 2014)	España	El incremento de los prosumidores con FV combinada con medición neta, resulta en reducción de ingresos para los servidores de red en todo el mundo; lo que obligaría a incrementar los costos de la red para recuperar las ganancias, generando tarifas injustas para los hogares que no tienen FV.
(Widén, 2014)	Suecia	El desplazamiento de la carga con programar el uso de aparatos electrodomésticos en ciertas horas del día, puede incrementar el autoconsumo FV.
(der Veen & De Vries, 2009)	Holanda	El rápido desarrollo de la microgeneración FV puede cambiar las dinámicas y generar problemas de rentabilidad y eficiencia en mercado eléctrico holandés. El cambio de diseño de mercado requerirá regulación y medidores inteligentes.
(Keirstead, 2007).	Reino Unido	La instalación de FV animó a una disminución del consumo total de electricidad de los hogares en un 6% y desplazar la demanda a los tiempos de generación pico. El papel de los microgeneradores en el sistema eléctrico está aún en evolución. Se requieren políticas incluyentes y consumidores que reciban información de apoyo sobre consumo y generación.

La revisión de literatura permite identificar que los análisis de difusión de tecnologías de microgeneración renovables en energía alrededor del mundo, se han concentrado sobre todo en la identificación de los factores que conllevan a las decisiones de adopción, y las políticas que incentivan la adquisición de dichos sistemas; y que son pocos los artículos que se ocupan del análisis de los impactos en los mercados o sistemas eléctricos con la amplia difusión de dichas tecnologías.

En el caso colombiano específicamente, los resultados no se alejan mucho del escenario internacional; puesto que se encuentran pocos trabajos que abordan el tema; dentro de ellos se destaca el trabajo de Jiménez, Cadavid, & Franco (2014) que presentan un análisis de la evolución de los sistemas fotovoltaicos para microgeneración en términos de costo, mostrando la existencia de paridad de red en muchas ciudades colombianas para los próximos años; el trabajo de Zapata (2014) que presenta políticas para la microgeneración y algunas curvas de difusión para diferentes regiones colombianas, de acuerdo a ellas; y el trabajo de Castaño (2013) que hace un estudio sobre los cambios en la curva de carga ante la adopción de medidores inteligentes; pero no se han hecho, en lo fundamental, trabajos que evalúen los efectos sobre la curva de carga de la penetración de microgeneración fotovoltaica para el caso de Colombia.

2.2 Objetivos

Considerando los vacíos en la literatura presentados en este capítulo para el problema planteado en la sección 1.5, se plantean los siguientes como objetivos de esta tesis:

2.2.1 Objetivo general

Evaluar los efectos en la curva de carga de la penetración fotovoltaica en el sector residencial colombiano.

2.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo de simulación que permita analizar el proceso de difusión de la tecnología solar fotovoltaica para microgeneración en el sector residencial.
- Desarrollar un modelo de simulación que permita evaluar los efectos en la curva de carga de la penetración de la tecnología de microgeneración solar fotovoltaica en el sector residencial.
- Evaluar los efectos en el mercado eléctrico de políticas y estrategias relacionadas con la difusión de la tecnología solar fotovoltaica para microgeneración en el sector residencial colombiano.

2.3 Alcance

Esta tesis permitirá comprender los efectos que se producirán en la curva de carga del sector residencial debidos a la penetración de microgeneración solar fotovoltaica para el caso colombiano.

Como resultados directos se obtendrán los siguientes:

- Un modelo de simulación que permita analizar el proceso de difusión de la tecnología solar fotovoltaica para microgeneración en el sector residencial.
- Un modelo de simulación que permita evaluar los efectos en la curva de carga de la penetración de la tecnología de microgeneración solar fotovoltaica en el sector residencial.
- Una evaluación de los efectos en el mercado eléctrico de la implementación de diferentes políticas y estrategias relacionadas con la difusión de la tecnología solar fotovoltaica para microgeneración en el sector residencial colombiano.

2.4 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se ofreció una revisión de literatura sobre tres elementos importantes en la difusión de tecnologías renovables de microgeneración: en primer lugar se revisaron los estudios sobre los factores que motivan o dificultan la adquisición de estas tecnologías, encontrando que existe una variedad de motivos que abarcan razones financieras, políticas, sociales, ambientales e institucionales; en segundo lugar se revisaron las diferentes políticas e incentivos reportados en la literatura y sus efectos para la difusión fotovoltaica en varias regiones del mundo, encontrando que el incentivo más recurrente en la literatura es el FIT y que en general las políticas e incentivos implementados aportaron en el incremento de los ratios de adquisición de la tecnología; y finalmente se hizo una revisión sobre los efectos de la microgeneración en los mercados eléctricos, encontrando en la literatura reportes sobre efectos relacionados con variaciones en los hábitos de consumo, intermitencia y problemas de balance en los mercados de electricidad.

Se hizo también una revisión de los avances en la literatura para el mercado colombiano, encontrando pocos trabajos al respecto, e identificando vacíos en el conocimiento sobre los efectos que podría generar la aplicación de los incentivos propuestos en la ley 1715 al funcionamiento del mercado eléctrico colombiano.

Dado lo anterior se definieron en las secciones 2.2 y 2.3 los objetivos y alcances de esta tesis.

En el capítulo siguiente se describe y justifica la metodología seleccionada para abordar el problema de esta tesis y cumplir los objetivos definidos en este capítulo.

Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se describe la metodología a utilizar para el desarrollo de la tesis, justificando su selección y describiendo las diferentes etapas que conlleva su implementación.

3.1 Herramientas metodológicas para el análisis de difusión de innovaciones en energía.

Para analizar los problemas relacionados con los mercados de energía, son múltiples los enfoques metodológicos que se encuentran en la literatura. Por ejemplo Nakata, Silva y Rodionov (2011), clasifican los tipos de modelos existentes de acuerdo con los siguientes factores: su enfoque analítico (agregado o desagregado), el propósito (pronóstico, exploración o retrospectiva) la metodología (económicos, macroeconómicos, equilibrio económico, optimización, simulación y multi-criterio), el enfoque matemático (programación lineal, programación mixta integrada, programación dinámica), la amplitud de su cobertura geográfica (global, regional o local), el horizonte de tiempo (corto, mediano o largo plazo) y la información requerida (cuantitativa, cualitativa, agregada o desagregada).

Por otro lado, Pfenninger, Hawkes, & Keirstead (2014), clasifican los modelos de los sistemas de energía en cuatro tipos y los asocian con su uso principal, así: modelos de simulación (predicción y pronóstico de cómo podría desenvolverse el sistema), modelos de optimización (proveen escenarios normativos), modelos que se enfocan exclusivamente al mercado eléctrico (incluyen desde escenarios de optimización hasta predicción con simulación, y se enfocan en decisiones operacionales y planeación de negocios), y escenarios que incluyen métodos más cualitativos que matemáticos (se enfocan en descripción de los escenarios).

Como se observa en ambas clasificaciones, los métodos de simulación son una herramienta común en el estudio de sistemas energéticos, y en particular de mercados de energía, lo cual no es extraño debido a que posee características que la hacen una herramienta metodológica adecuada para tratar los problemas que pueden presentarse en este tipo de sistemas.

De acuerdo con Gilbert & Troitzsch (2005), algunas de sus características principales son: facilita una mejor comprensión y entendimiento de aspectos sociales, permite predecir

estados futuros a partir de la reproducción de dinámicas de comportamientos, permite desarrollar herramientas que sustituyen capacidades humanas y pueden ser utilizadas para entrenamiento sin comprometer las consecuencias sobre el mundo real. Estas características la convierten en una metodología propicia para abordar la problemática central de este trabajo investigativo.

Ahora bien, dentro de la simulación, existen diferentes técnicas de modelado, por ejemplo Troitzsch (2013) menciona la dinámica de sistemas, la micro simulación, los autómatas celulares y los modelos basados en agentes. Para la selección de la herramienta de modelado, se toman en consideración los beneficios que ofrecen diferentes herramientas para el análisis específico de procesos de difusión, de acuerdo con su nivel de agregación, según el trabajo realizado por Laciana, Rovere & Podestá (2013), el cual se resume a continuación:

Tabla 3-1: Herramientas de modelado nivel macro y micro. Elaboración propia de acuerdo con (Laciana et al., 2013)

Nivel de agregación	Herramientas	Características	Tipo de información que provee	Limitaciones
Macro	Basadas en el modelo de Bass. Herramienta destacada: Dinámica de Sistemas	Provee información parsimoniosa del mercado como un todo e interpreta su comportamiento. Requiere información a nivel del mercado (usualmente más disponible)	Examina el mercado como un todo. Información sobre el tamaño de mercado: cantidad de adoptadores y el Momento de adopción.	No provee información sobre los procesos que determinan la adopción. No brinda información sobre la forma en que las decisiones individuales están ligadas al comportamiento general del mercado. Asume Homogeneidad de los agentes
Micro	Autómatas celulares, Modelos de Simulación de Basada en Agentes, Modelos de percolación. Herramienta destacada: Simulación Basada en Agentes	Se analiza una unidad decisora. Combina percepción individual de la utilidad relativa de la adopción. Influencia social de los miembros de la red	Permite comprensión de procesos o factores que influyen en el comportamiento individual de adopción. Incluye características del producto y los efectos de	No permite una visión holística del mercado y del comportamiento global del sistema.

Nivel de agregación	Herramientas	Características	Tipo de información que provee	Limitaciones
			la interacción social. Considera heterogeneidad de los agentes.	

Tabla 3-1: (Continuación)

De acuerdo con la información de la Tabla 3-1, en donde se subraya la herramienta destacada en cada nivel, se considera que la herramienta adecuada para el desarrollo de la tesis es la dinámica de sistemas, ya que permitirá comprender de manera holística el proceso de difusión de la tecnología fotovoltaica en el sector residencial colombiano, y favorecerá la comprensión de los efectos a nivel de mercado, permitiendo identificar tamaño y momento de la adopción.

Finalmente, es importante resaltar que la dinámica de sistemas ya ha sido implementada con éxito en el análisis de mercados eléctricos, como puede observarse en los trabajos de Bunn & Larsen (1992), Ford (1983), Franco, Castaneda & Dyer (2015), Larsen, Dyer, Bedoya V & Franco (2004), Naill (1992), Ochoa, Dyer & Franco (2013) y Movilla, Miguel & Blázquez (2013), éste último enfocado especialmente en políticas para los sistemas fotovoltaicos.

3.2 Etapas metodológicas

De acuerdo con Sterman (2000), para la implementación de la metodología de dinámica de sistemas se requiere el desarrollo de cinco etapas: Articulación del problema, formulación de la hipótesis dinámica, formulación del modelo de simulación, validación y diseño y evaluación de políticas; estas etapas se desarrollan de manera cíclica e iterativa tal y como se muestra en la Figura 3-1.

En cada una de las etapas del proceso de modelado se espera que se realicen procesos importantes para alcanzar el objetivo de la simulación. Estos procesos se ilustran a continuación:

Etapas de articulación del problema: Según Sterman (2000), esta es la etapa más importante del proceso de modelado, porque en ella se identifica el problema real, y consecuentemente, el propósito del modelo. En esta etapa se describen también las variables claves, los modos de referencia y el horizonte de tiempo para el estudio.

Formulación de la hipótesis dinámica: Durante esta etapa se construye la hipótesis sobre el funcionamiento del comportamiento problemático desde una perspectiva endógena, es

decir, que permita identificar la estructura de realimentación de las variables del sistema (Sterman, 2000).

Formulación del modelo de simulación: En esta etapa es importante especificar las reglas de decisión, de estructura, las condiciones iniciales y los parámetros; y validar la consistencia del modelo desarrollado con el propósito inicial (Sterman, 2000).

En la etapa de validación, para Sterman (2000), se requiere verificar la robustez del modelo, se comparan sus resultados con modelos de referencia y se realiza un análisis de sensibilidad frente a parámetros de interés (condiciones iniciales, parámetros inciertos, entre otros).

Finalmente, para la etapa de diseño y evaluación de políticas, en (Sterman, 2000), se especifica como proceso importante la determinación de las condiciones del escenario a evaluar y de la política diseñada, para identificar los efectos de las políticas implementadas en los escenarios considerados. Incluye además la realización de un análisis de sensibilidad para identificar la robustez de las políticas y la forma en que las políticas interactúan entre ellas.

Figura 3-1: Etapas de modelado usando dinámica de sistemas. Traducido de (Sterman, 2000)



3.3 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se seleccionó la metodología de simulación y la herramienta de dinámica de sistemas para el desarrollo metodológico de este trabajo investigativo. Las razones se deben a que sus características y ventajas son coherentes con los objetivos y el enfoque propuestos; además de que la dinámica de sistemas es una herramienta ya implementada en el análisis de mercados eléctricos. Se describen además las etapas metodológicas que se deberán desarrollar para lograr los objetivos de la tesis propuesta bajo el enfoque de la dinámica de sistemas. En el próximo capítulo se describe, delimita y valida el modelo de simulación.

Capítulo 4. Modelo de simulación

En este capítulo se describe, delimita y valida el modelo de simulación desarrollado para analizar la difusión de la tecnología solar fotovoltaica en el sector residencial colombiano y evaluar los efectos de este proceso en la curva de carga horaria.

4.1 Propósito del modelo

De acuerdo con los capítulos anteriores que llevaron a definir el problema de investigación y la metodología a implementar para abordarlos, en esta sección se define el propósito del modelo desarrollado y se delimita.

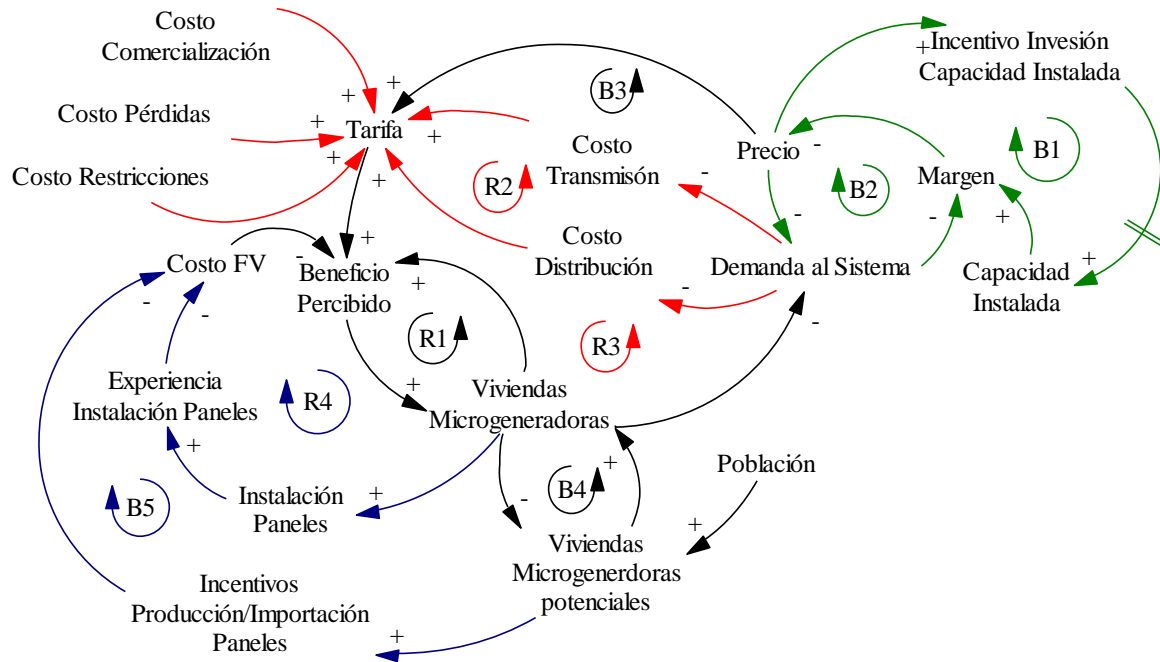
El modelo de simulación se desarrolló utilizando la metodología de dinámica de sistemas y la plataforma de simulación PowerSim Studio 10. El modelo tiene dos propósitos fundamentales: permitir el análisis del proceso de difusión de la tecnología solar fotovoltaica para microgeneración en el sector residencial y posibilitar la evaluación de los efectos de dicho proceso en la curva de carga. La descripción detallada del modelo se realiza en las secciones siguientes.

4.2 Hipótesis dinámica

En esta sección se presentan las relaciones causales que describen el comportamiento del sistema de estudio y que enmarcan la construcción del modelo de simulación en dinámica de sistemas. La Figura 4-1 muestra la hipótesis dinámica desarrollada, la cual a través de 9 ciclos de realimentación (7 de balance y 2 de refuerzo) explica las relaciones causales de las variables del sistema.

A grandes rasgos, la hipótesis desarrollada muestra que el número de viviendas que adoptan la microgeneración fotovoltaica depende del beneficio percibido de microgenerar, el cual incrementa cuando el costo fotovoltaico es más favorable que la tarifa de la red, y cuando hay más viviendas microgeneradoras en el sistema, debido a un efecto de contagio y de imitación. La hipótesis explica además que las viviendas microgeneradoras realimentan el sistema de acuerdo a la cantidad de energía que demandan de la red ya que varía la demanda total del sistema y por ende el margen y la tarifa de la red.

Figura 4-1: Hipótesis dinámica de la difusión de tecnología solar fotovoltaica para microgeneración en el sector residencial de Colombia. Elaboración propia.

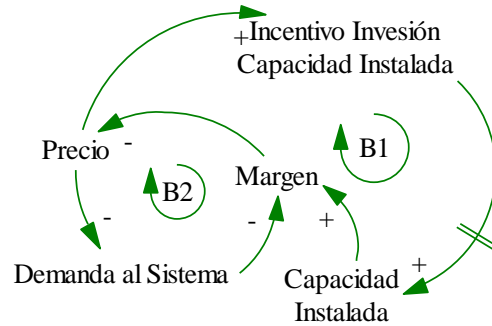


Para una comprensión más detallada de la dinámica causal propuesta, se presenta en la siguiente sección el análisis del comportamiento de los ciclos de realimentación que componen la Figura 4-1.

4.3 Análisis por ciclos de realimentación

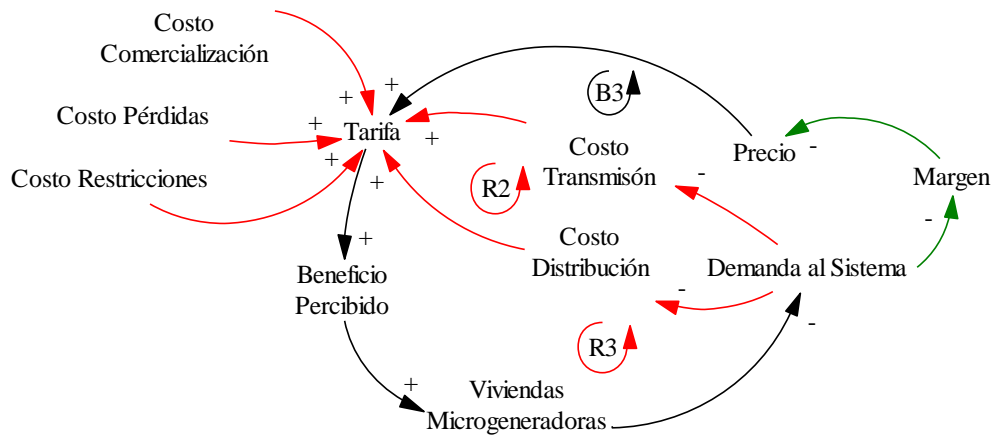
Los ciclos de balance B1 y B2 explican cómo se forman los precios del mercado a partir del margen de energía, según la hipótesis de mercado de Dyner (2000). De acuerdo con esta hipótesis, cuando el precio de generación es alto la demanda de energía al sistema disminuye, lo cual ocasiona un aumento en el margen de energía que produce que los precios bajen, balanceando así el incremento inicial en los precios (Ciclo B2). Por su parte el ciclo B1, muestra que un incremento en los precios aumentará los incentivos a invertir en capacidad instalada, lo que con algún tiempo de retardo (tiempo de construcción de nueva capacidad) incrementará la capacidad instalada del sistema, lo que incrementará el margen de energía y ocasionará una disminución de los precios, balanceando de nuevo el sistema.

Figura 4-2: Diagrama causal. Ciclos B1 y B2. Elaboración propia usando la hipótesis de mercado (I Dyner, 2000)



El ciclo de balance B3 explica que ante un incremento en el precio de generación, se tendrán incrementos en la tarifa de la red, estos incrementos aumentarán el beneficio percibido de adquirir sistemas fotovoltaicos para microgeneración, lo cual incrementará la cantidad de viviendas microgeneradoras en el sistema y por tanto disminuirá la demanda total de electricidad al sistema, lo que a su vez aumentará el margen del sistema, y disminuirá el precio de generación, balanceando los efectos del incremento inicial en los precios.

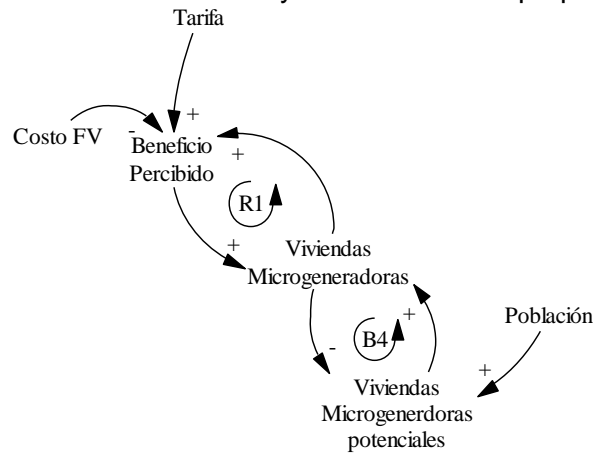
Figura 4-3: Diagrama causal. Ciclos B3, R2 y R3. Elaboración propia



Los ciclos R2 y R3 explican los efectos de la demanda de electricidad al sistema sobre la tarifa de la red, mostrando que cuando la demanda al sistema incrementa se disminuye el costo de transmisión y el de distribución puesto que se calculan de forma volumétrica, los incrementos en estos costos incrementan la tarifa, la cual aumenta el beneficio percibido de microgenerar y las viviendas microgeneradoras, afectando nuevamente la demanda al sistema.

El ciclo R1 explica que a mayor beneficio percibido de microgenerar habrá más viviendas microgeneradoras y mientras haya más microgeneradores en el sistema, habrá un efecto de contagio que ocasionará que se incremente el beneficio percibido de microgenerar. Este beneficio percibido se obtiene a partir de la relación entre la tarifa de la red y el costo de microgeneración FV.

Figura 4-4: Diagrama causal. Ciclos R1 y B4. Elaboración propia.

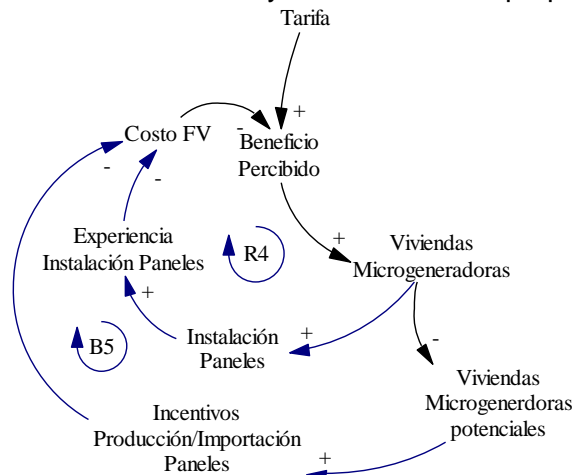


El ciclo B4 muestra que a mayor cantidad de viviendas potenciales habrá más viviendas microgeneradoras, pero cuando hay más viviendas microgeneradoras disminuirá el nivel de viviendas potenciales, generando un ciclo de realimentación negativo.

El ciclo R4, explica que cuando hay un incremento en el beneficio percibido de microgenerar, se incrementa la población micro generadora, lo cual aumenta la instalación de paneles y mejora la experiencia en Instalación de paneles, la que por efectos de curvas de aprendizaje, conlleva a una disminución del costo fotovoltaico y continúa mejorando el beneficio percibido de microgenerar.

Finalmente, el ciclo B5, muestra cuando incrementa el beneficio percibido de microgenerar y esto causa el incremento de las viviendas microgeneradoras, se disminuyen las viviendas microgeneradoras potenciales, lo cual disminuye los incentivos a producir o importar más sistemas fotovoltaicos y causa un encarecimiento de los costos de los sistemas fotovoltaicos lo que lleva disminuir el beneficio percibido de microgenerar con un efecto de balance.

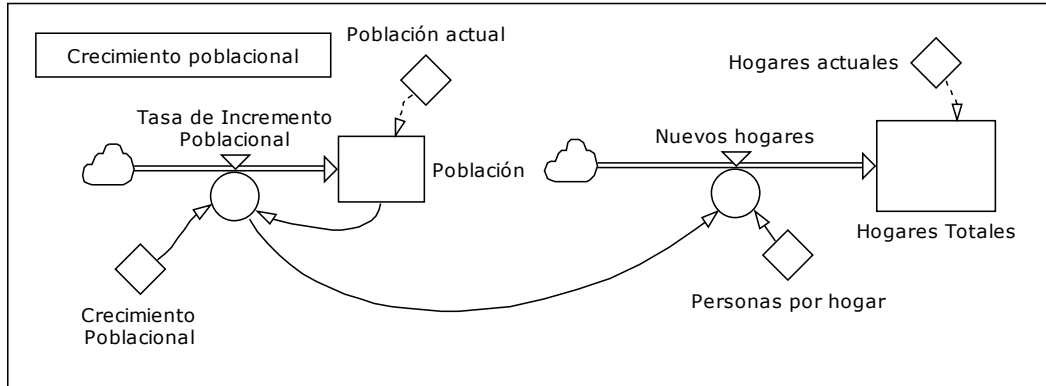
Figura 4-5: Diagrama causal. Ciclos R4 y B5. Elaboración propia.



4.4 Diagrama de flujos y niveles

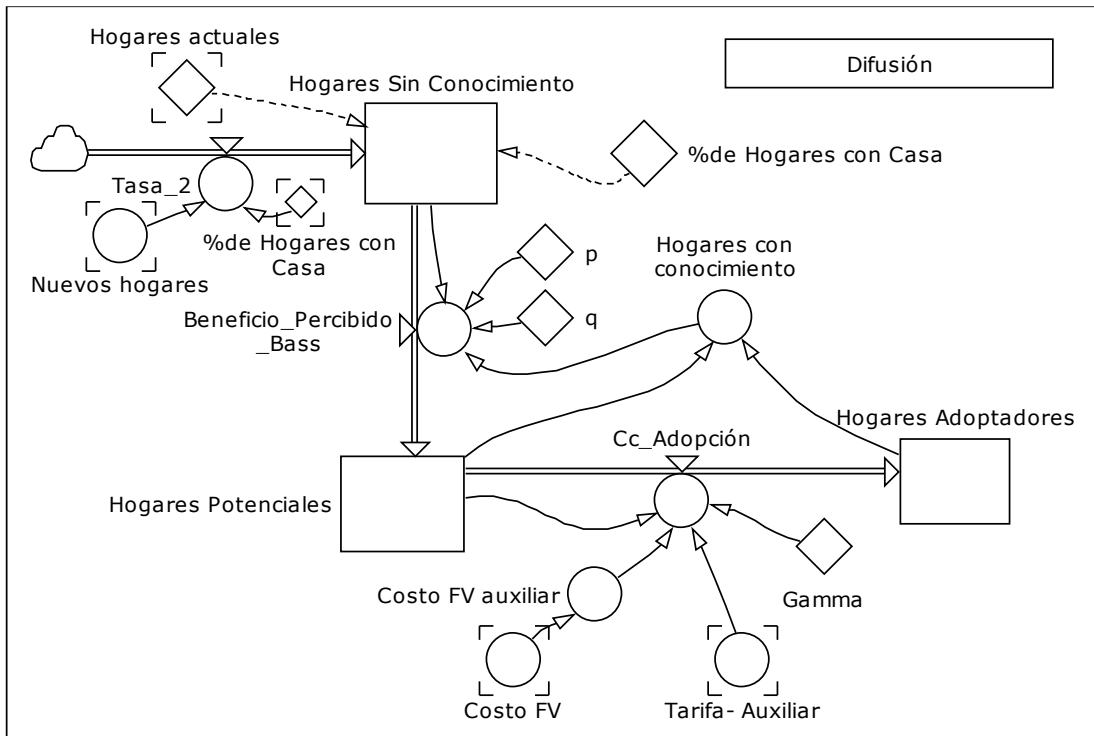
En esta sección se presenta el diagrama de flujos y niveles a través de varios módulos representados en 8 figuras. La Figura 4-6 exhibe el módulo de crecimiento poblacional, en él se muestra cómo el nivel de hogares totales en el sistema depende de la dinámica poblacional y del número de personas que en promedio integran un hogar.

Figura 4-6: Diagrama de flujos y niveles. Sección de crecimiento poblacional. Elaboración propia.



La dinámica de formación de los hogares en el sistema, se utiliza como insumo para la sección de difusión de la tecnología del modelo elaborado, presentado en la Figura 4-7.

Figura 4-7: Diagrama de flujos y niveles. Sección de difusión de la tecnología solar FV para microgeneración. Elaboración propia.

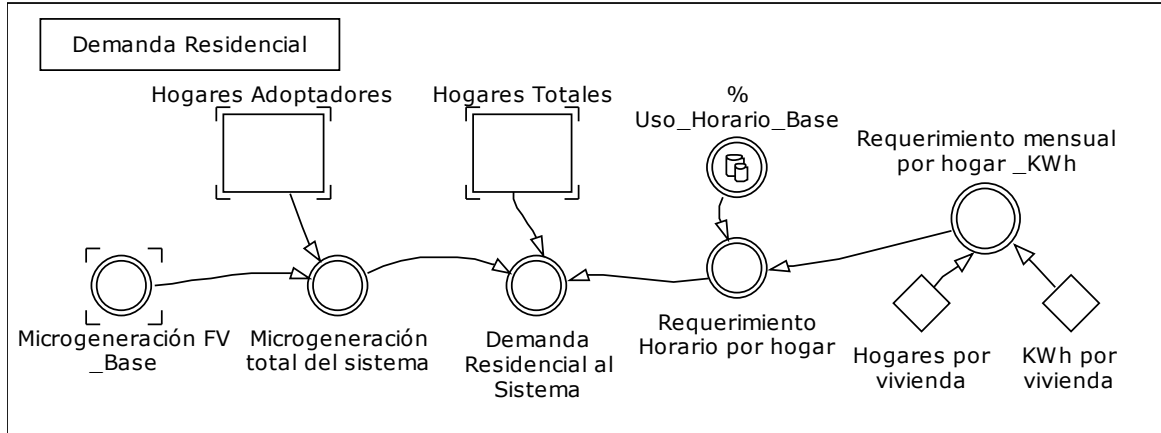


En esta sección, se considera que existe un nivel de hogares que no conocen la tecnología, nombrado “Hogares sin Conocimiento”, dichos hogares dependen de los hogares que hay en el sistema y de la formación de nuevos hogares de acuerdo con la Figura 4-6. Los hogares sin conocimiento, que podrían llegar a adoptar están condicionados por la vivienda que habitan, es decir, sólo pueden pasar a ser hogares potenciales aquellos que vivan en casas dónde hacer la instalación de los paneles fotovoltaicos.

Los hogares sin conocimiento se vuelven “Hogares Potenciales” para adoptar la tecnología de acuerdo con el contagio social con aquellos hogares que ya tienen un conocimiento de la tecnología, bien sea porque son ya hogares adoptadores (es decir, que ya adquirieron los sistemas FV de microgeneración) o porque son hogares potenciales que saben de la tecnología por experiencias de otro o por búsqueda de información si poseen características de consumidores innovadores de acuerdo con el modelo de innovadores e imitadores propuesto por Bass (1969).

Finalmente, los hogares potenciales toman la decisión de adoptar o no la tecnología de acuerdo a la relación entre el costo fotovoltaico (Costo FV) y la tarifa de la red (Tarifa), de acuerdo con una función logit.

Figura 4-8: Diagrama de flujos y niveles. Sección de cálculo de la demanda residencial del sistema. Elaboración propia.

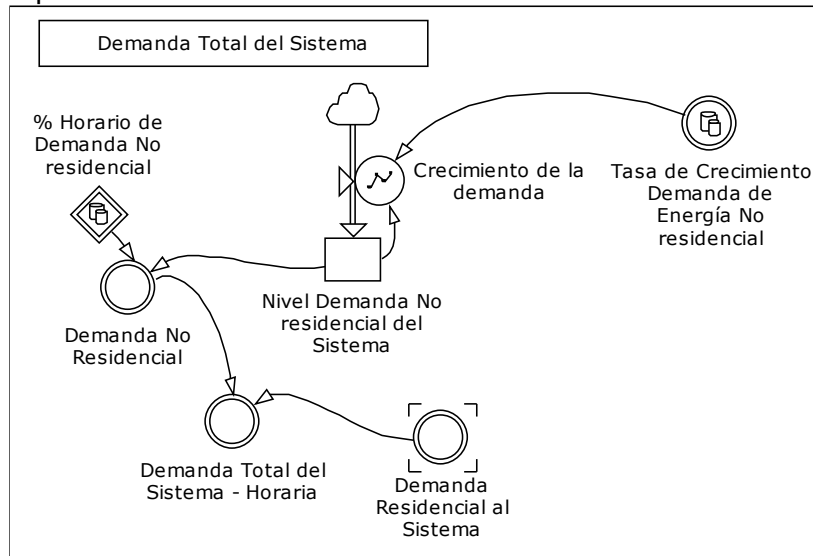


La Figura 4-8, muestra el cálculo de la demanda residencial del sistema, la cual es la diferencia entre la demanda de energía residencial total, menos la porción de la demanda que dejan de requerir del sistema aquellos hogares que poseen sistemas de microgeneración fotovoltaica.

Para realizar este cálculo, se considera el requerimiento de energía mensual por hogar, el uso horario de dicha energía de acuerdo con la curva de carga residencial del sistema, los hogares totales del sistema (explicados en la Figura 4-6), los hogares adoptadores (explicados en Figura 4-7) y la energía generada por los sistemas FV de forma horaria (Microgeneración FV_Base) que se explica en la Figura 4-13.

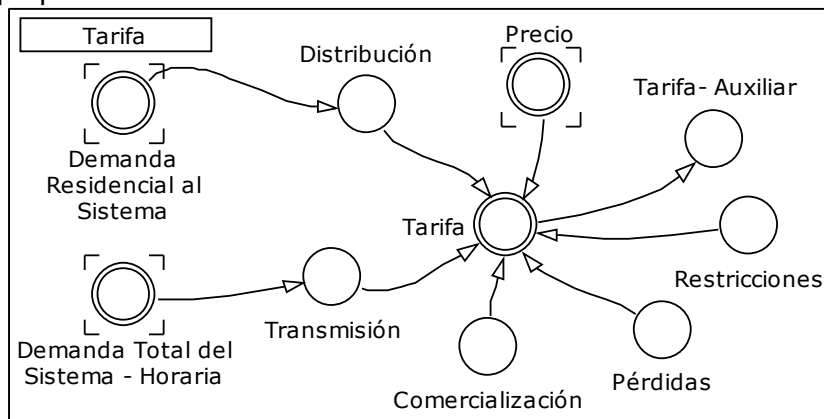
La Figura 4-9 presenta la sección del modelo de simulación donde se calcula la demanda total del sistema. Esta sección asume que la demanda total es la suma entre la demanda residencial (explicada en la Figura 4-8) y la demanda de otros sectores, la cual se calcula de acuerdo a las proyecciones de la UPME (2015a) en el escenario de crecimiento medio de largo plazo que no incluye Grandes Consumidores Especiales (GCE) ni Panamá. Esta demanda se vuelve horaria de acuerdo con el uso horario de la electricidad en los otros sectores.

Figura 4-9: Diagrama de flujos y niveles. Sección demanda total del sistema. Elaboración propia.



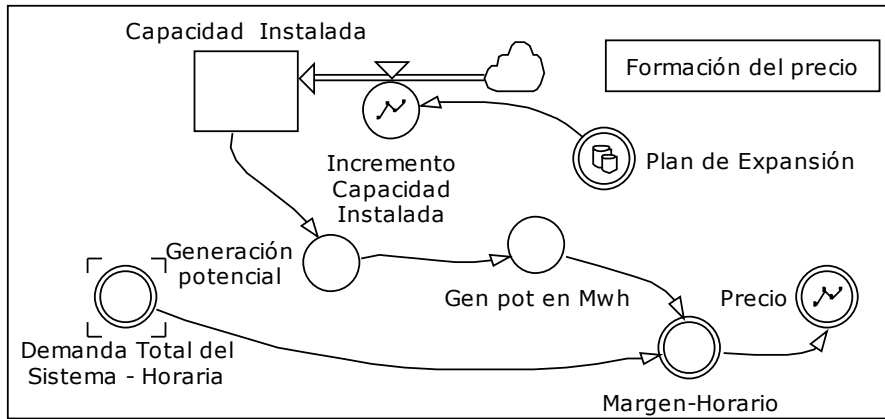
La Figura 4-10, muestra cómo se calcula la tarifa de la red, la cual, acorde con la hipótesis dinámica y a la legislación actual, corresponde a la suma de los componentes de comercialización, pérdidas, restricciones, precio de generación (que se explica en detalle en la Figura 4-11), distribución (que depende de la demanda residencial del sistema ya que corresponde al nivel de tensión 1) y transmisión (que depende de la demanda total del sistema).

Figura 4-10: Diagrama de flujos y niveles. Sección cálculo de la tarifa de la red. Elaboración propia.



La Figura 4-11 muestra el cálculo del precio de generación en función del margen de energía, el cual se calcula de acuerdo con la demanda total del sistema y la capacidad instalada.

Figura 4-11: Diagrama de flujos y niveles. Sección del cálculo del precio de generación. Elaboración propia.



Finalmente, en la Figura 4-12 y Figura 4-13, se muestra, respectivamente, cómo se obtiene el costo FV de acuerdo a si los sistemas FV tienen o no baterías, utilizando la metodología del costo nivelado de energía o *LCOE* (Branker, Pathak, & Pearce, 2011), y la generación horaria de acuerdo con la radiación solar promedio diaria de Colombia (Honsberg & Bowden, 2014).

Figura 4-12: Diagrama de flujos y niveles. Sección de cálculo del costo FV. Elaboración propia.

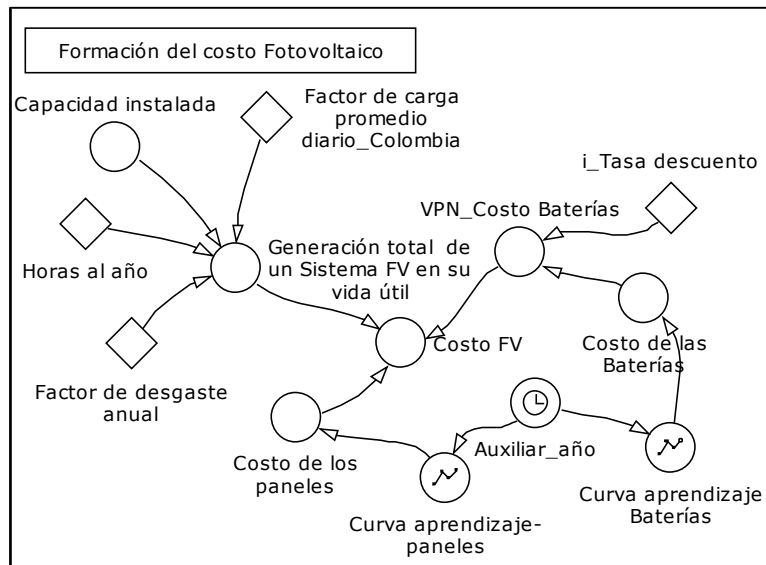
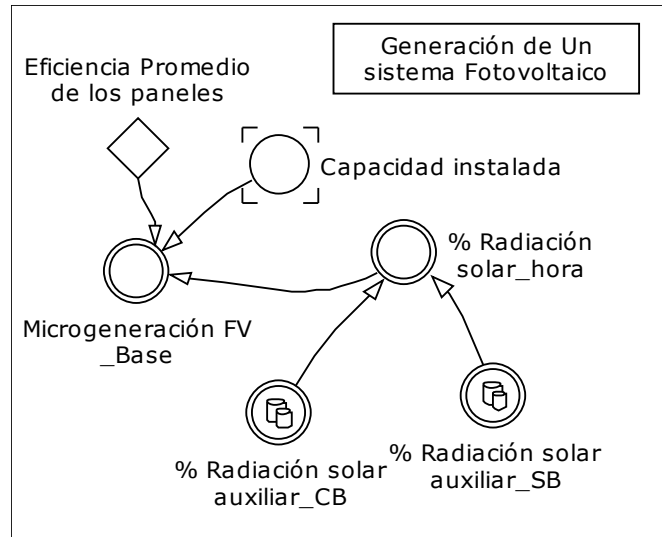


Figura 4-13: Diagrama de flujos y niveles. Sección de cálculo de la generación de un sistema FV. Elaboración propia.



Las ecuaciones que describen las relaciones presentadas se encuentran en el Anexo A; así mismo los valores de los parámetros utilizados pueden verificarse en la sección 4.6.

4.5 Supuestos y especificaciones

A continuación se presentan los supuestos y especificaciones sobre los que se construye el modelo de simulación:

- El tiempo de simulación del modelo es de 14 años iniciando en el año 2014 y terminando en el año 2028.
- La adopción de los sistemas fotovoltaicos sólo se da en el sector residencial. Los demás sectores, como el industrial y comercial, no presentan ninguna adopción de sistemas de microgeneración FV.
- El comportamiento de la demanda de los demás sectores diferentes al residencial, ocurre de acuerdo a las proyecciones de la UPME en el escenario de crecimiento medio de largo plazo que no incluye Grandes Consumidores Especiales (GCE) ni Panamá (UPME, 2015a).
- La capacidad instalada de los sistemas FV es suficiente para satisfacer los requerimientos promedio de electricidad de los hogares colombianos (los sistemas evaluados son de 1.5 kW, de forma adicional el anexo B presenta resultados con capacidad instala de 0.5 kW). Este supuesto implica que habrá momentos en que los sistemas tengan excesos o déficits de generación respecto al consumo real de un hogar, pero que en promedio las necesidades serán cubiertas por los sistemas instalados.

- La capacidad instalada de los sistemas de almacenamiento, en los casos en que se consideran, es suficiente para abastecer el autoconsumo durante las horas en que no haya generación fotovoltaica.
- Los hábitos de consumo de los hogares permanecen constantes a lo largo del tiempo de simulación. Es decir, los hogares mantienen sus requerimientos de energía constantes.
- Para los sistemas FV con baterías la microgeneración se consume uniformemente durante el día.
- La eficiencia de los sistemas FV es el promedio de la eficiencia de los sistemas durante su vida útil.
- Las curvas de aprendizaje de la tecnología FV se asemejan a las curvas internacionales.
- Los componentes tarifarios de comercialización, pérdidas, restricciones se asumen constantes durante el tiempo de simulación.

4.6 Validación

Para verificar la robustez del modelo desarrollado, y garantizar su validez para cumplir los objetivos propuestos, se presentan en esta sección los resultados de las pruebas de validación realizadas sobre la estructura y el comportamiento, de acuerdo con la propuesta de validación de Barlas (1996).

4.6.1 Validación de la estructura

Prueba de consistencia dimensional:

La evaluación de la consistencia dimensional del modelo se realizó utilizando el Software PowerSim Studio 10, que tiene una herramienta de verificación dimensional para todas las relaciones de niveles, flujos, variables y parámetros del modelo. Además se verificó la consistencia dimensional en cada uno de las ecuaciones del modelo, y se constató que dada la formulación de las ecuaciones los niveles no se volvieran negativos. La formulación de las ecuaciones y sus respectivas unidades pueden observarse en la descripción de las ecuaciones en el Anexo A. Consecuentemente, se concluye que el modelo supera la prueba de consistencia dimensional.

Verificación de parámetros:

Esta prueba tiene como objetivo verificar que los parámetros utilizados en el modelo se correspondan con la información real del sistema. A continuación, en la Tabla 4-1, se especifican los parámetros utilizados y la fuente de dónde se obtuvieron. Los parámetros señalados con asterisco (*) se estimaron a partir de la calibración del modelo debido a la ausencia de información sobre ellos.

Tabla 4-1: Especificaciones de los parámetros del modelo. Elaboración propia.

Parámetro	Valor	Significado	Fuente
Población actual	47203829 <<personas>>	Cantidad de personas en Colombia en 2014	(DANE, 2014)
Personas por hogar	4 <<personas/Hogar>>	Cantidad de personas que en promedio conforman un hogar en Colombia en 2014	(DANE, 2014)
Hogares actuales	13763148 <<Hogares>>	Cantidad de hogares en Colombia en 2014	(DANE, 2014)
Hogares por vivienda	1 <<Hogar/vivienda>>	Cantidad de hogares que ocupan una vivienda en Colombia en promedio.	(DANE, 2014)
Crecimiento poblacional	0.01094 <<1/yr>>	Es la tasa en que aumenta la población año a año, corresponde a la diferencia entre la tasa de natalidad y mortalidad en Colombia.	Cálculos propios con datos de (DANE, 2014)
KWh por vivienda	153.96 <<kWh/(vivienda*mo)>> >	Consumo mensual promedio por vivienda en Colombia en 2014	Cálculos propios con datos de (DANE, 2014; Xm, 2015a)
% Uso_ Horario _ Base	{0.0272,0.0252, 0.0254, 0.0254, 0.0260, 0.0376, 0.0436, 0.0382, 0.0380, 0.0378, 0.0442, 0.0468, 0.0480, 0.0380, 0.0394, 0.0416, 0.0505, 0.0591, 0.0677, 0.0681, 0.0567, 0.0511, 0.0340, 0.0300}	Curva de consumo porcentual del sector residencial en un día promedio.	Cálculos propios con datos de (UPME, 2008; Xm, 2015c)
%de Hogares con Casa	0.7	Porcentaje de viviendas que son casas y en donde es posible ubicar paneles en los techos	(DANE, 2010)
p*	0.0001	Parámetro de innovadores. De acuerdo al modelo de difusión de Bass	Calibración
q*	0.06	Parámetro de imitadores. De acuerdo al modelo de difusión de Bass	Calibración
Gamma	-0.8	Parámetro modelo Logit	(Isaac Dyner & Franco, 2004)
Plan de Expansión	{1.285.700, 1.124.100, 0, 88.000, 652.000, 2.700.000, 200.000, 3.600.000, 4.500.000, 550.000, 0, 0, 0, 0, 0} <<kW>>	Incremento de la capacidad instalada de acuerdo con el Escenario 5- Escenario base de largo plazo del <i>Plan de expansión de referencia</i>	(UPME, 2015a)

Parámetro	Valor	Significado	Fuente
Factor de carga promedio diario_Colombia	0.212	Factor de disponibilidad de brillo solar promedio en Colombia.	Cálculos propios con datos de (IDEAM, n.d.)
Horas al año	8760 <<ho>>	Horas en un año considerando el año de 365 días.	Cálculos propios.
Factor de desgaste anual	0.01	Factor de desgaste anual de los sistemas fotovoltaicos	(Jiménez et al., 2014)
i_Tasa de descuento	0.0172	Tasa de descuento que representa el riesgo de inversión en los sistemas comparados con la renta en una inversión a término fijo.	Cálculos propios considerando la tasa de CDT a 360 días (Banco de la República, 2015).
Eficiencia Promedio de los paneles	0.9	Eficiencia de los sistemas FV promedio durante su vida útil.	(Jiménez et al., 2014)
%Radiación solar auxiliar_CB	{0.212, 0.212, 0.212, 0.212, 0.212, 0.212, 0.212, 0.212, 0.212, 0.212, 0.212, 0.212, 0.212, 0.212, 0.212, 0.212}	Factor de disponibilidad de brillo solar promedio en Colombia.	Cálculos propios con datos de (IDEAM, n.d.)
%Radiación solar auxiliar_SB	{0.0000,0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.4254, 0.7748, 0.9211, 0.9928, 1.0000, 1.0000, 1.0000, 1.0000, 0.9988, 0.9330, 0.7999, 0.4902, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000}	Radiación solar en Colombia para cada hora del día	(Honsberg & Bowden, 2014)
% Horario de Demanda No residencial	{0.0403,0.0392, 0.0376, 0.0371, 0.0382, 0.0342, 0.0316, 0.0392, 0.0442, 0.0475, 0.0462, 0.0464, 0.0443, 0.0504, 0.0498, 0.0479, 0.0410, 0.0350, 0.0367, 0.0388, 0.0435, 0.0420, 0.0463, 0.0427}	Es la curva de carga de los demás sectores diferentes al sector residencial.	Cálculos propios con datos de (UPME, 2008; Xm, 2015c)
Tasa de Crecimiento Demanda	{0.0309,0.0242, 0.0268, 0.0279, 0.0244, 0.0246, 0.0252, 0.0227, 0.0240,	Es la tasa de incremento anual de la demanda de energía en los sectores	Cálculos propios con datos de

Parámetro	Valor	Significado	Fuente
de Energía No residencial	0.0262, 0.0193, 0.0234, 0.0245, 0.0271, 0.0220}	diferentes al residencial de acuerdo con el escenario medio de las proyecciones de demanda de largo plazo de la UPME que excluyen GCE y Panamá	(UPME, 2015a)

Tabla 4-1: (Continuación)

Como resultado de esta prueba se valida que los datos utilizados en el modelo provienen de fuentes confiables y de buena calidad, y que son consistentes con el comportamiento real del sistema, con lo cual se le otorga robustez al modelo.

Pruebas de los límites del modelo:

En esta prueba se analizan las variables endógenas y exógenas del modelo, con el fin de determinar si se deben agregar o eliminar relaciones entre las variables.

En el modelo se consideraron endógenas variables como los hogares con conocimiento de la tecnología, hogares potenciales, hogares adoptadores, la demanda residencial del sistema, la microgeneración total del sistema, la tarifa de la red, el precio de generación de energía, el margen del sistema y la demanda total del sistema. Estas variables son acertadamente modeladas como endógenas debido a que su comportamiento endógeno es lo que da respuesta al problema de interés. Es importante resaltar que el requerimiento mensual y horario por hogar y el porcentaje de uso de energía horario base son exógenos debido a que en los supuestos del modelo se asume que los hábitos de consumo permanecen constantes en el tiempo.

Por otro lado, se consideraron exógenas variables como: la tasa de incremento poblacional, el requerimiento mensual de energía por hogar, el plan de expansión, las curvas de aprendizaje. Variables que no son endogenizadas porque modelarlas extralimita los propósitos del modelo.

Se identifica que los límites del modelo están acordes con los supuestos y los objetivos establecidos, por lo tanto se concluye que la prueba es superada por el modelo.

Prueba de Condiciones extremas:

Con esta prueba se pretende determinar la respuesta del modelo ante variaciones extremas en los parámetros o variables. El modelo se sometió a valores extremos de las variables: crecimiento poblacional, cantidad de hogares y tarifa de la red. Los resultados se presentan a continuación:

- Cantidad de hogares en el sistema iguales a cero y crecimiento poblacional igual a cero.

Como consecuencia de la ausencia de hogares y de personas, no debería haber hogares adoptadores en el sistema y la demanda residencial al sistema debería permanecer siempre igual a cero.

La Figura 4-14 y Figura 4-15, muestran que los resultados arrojados por el modelo para estas simulaciones son coherentes con los resultados esperados.

Figura 4-14: Hogares Totales y Hogares Adoptadores sin crecimiento poblacional y con cero hogares. Elaboración propia.

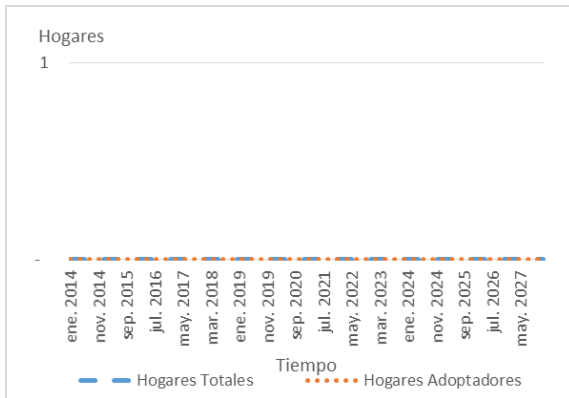
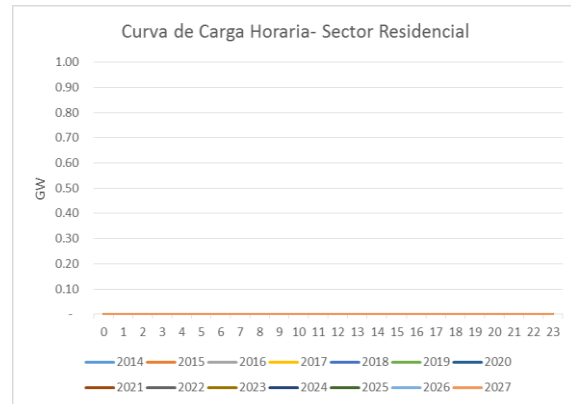


Figura 4-15: Curva de carga residencial sin crecimiento poblacional y con cero hogares. Elaboración propia.



- Tarifa de la red igual a cero

Con una tarifa de la red igual a 0 se espera que no haya adoptadores en el sistema, debido a que la energía de la red sería gratis mientras que los sistemas FV tendrían un costo y que la curva de carga residencial incremente anualmente, debido al incremento en la cantidad de hogares por las proyecciones de incremento poblacional. La Figura 4-16 y Figura 4-17 muestran los resultados del modelo frente a estas condiciones.

Figura 4-16: Hogares Totales y Hogares Adoptadores con la tarifa de la red igual a cero. Elaboración propia

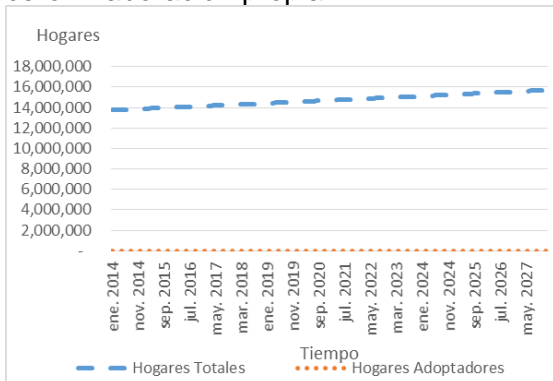
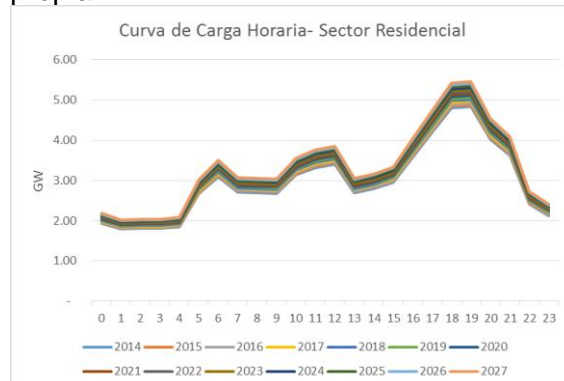


Figura 4-17: Curva de carga residencial con tarifa de la red igual a cero. Elaboración propia



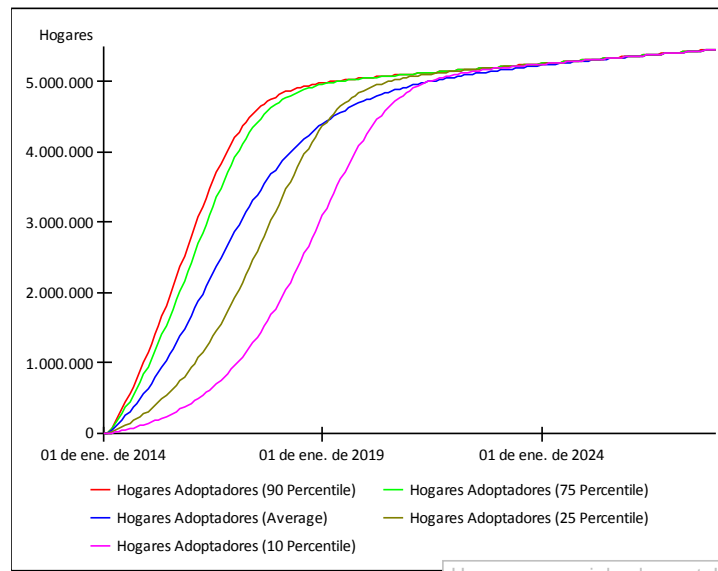
4.6.2 Validación del comportamiento

Prueba de sensibilidad del modelo:

Se realizaron pruebas de sensibilidad sobre tres parámetros importantes: el costo de los sistemas Fotovoltaicos, la tasa de descuento i , el parámetro de innovación (p) y el parámetro de imitación (q), buscando encontrar la sensibilidad del modelo en la variable viviendas adoptadoras antes los cambios en los parámetros mencionados. Las pruebas se realizaron utilizando el método Montecarlo con 1000 corridas, los resultados de diferentes percentiles se presentan en las figuras a continuación:

- Sensibilidad de la variable hogares adoptadores ante variaciones en el parámetro p , suponiendo una distribución uniforme del parámetro entre 0 y 0.01:

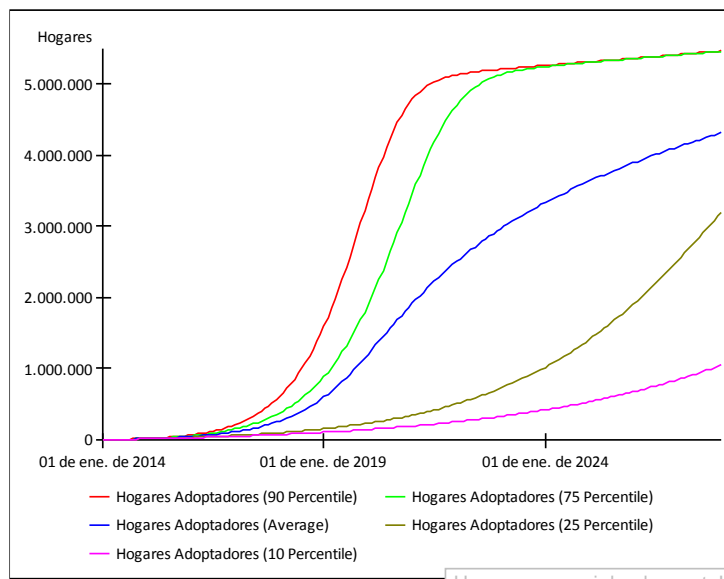
Figura 4-18: Análisis de sensibilidad de viviendas adoptadoras al parámetro de innovación (p). Elaboración propia.



Se observa que la variable hogares adoptadores tiene una sensibilidad alta al parámetro de innovación (p), evidenciando que ante valores pequeños de p la adopción es más tardía que frente a valores grandes de p . Sin embargo, con cualquier valor de p , al final del tiempo de simulación se logran los mismos niveles de adopción.

- Sensibilidad de la variable viviendas adoptadoras ante variaciones en el parámetro q , suponiendo una distribución uniforme del parámetro entre 0.01 y 0.1:

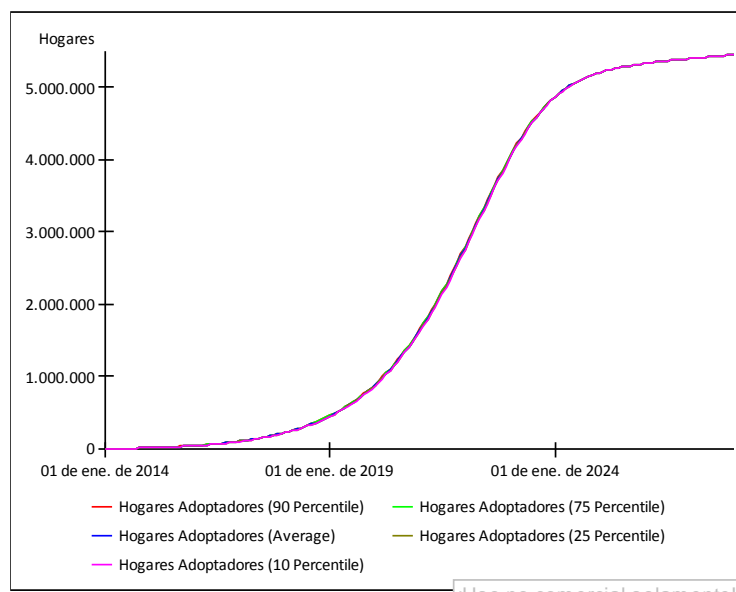
Figura 4-19: Análisis de sensibilidad de viviendas adoptadoras al parámetro de imitación (q). Elaboración propia.



Se observa que existe una gran sensibilidad al parámetro q y por tanto es importante calibrarlo adecuadamente para obtener buenos resultados del modelo.

- Sensibilidad de la variable viviendas adoptadoras ante variaciones en el costo del sistema Fotovoltaico, suponiendo una distribución uniforme entre 2 y 5 millones de pesos colombianos para un sistema de 1.5 kW

Figura 4-20: Análisis de sensibilidad de viviendas adoptadoras a variaciones en el costo fotovoltaico. Elaboración propia.



Se observa que la variable viviendas adoptadoras es poco sensible ante variaciones en el precio de los sistemas fotovoltaicos.

Error de integración:

Estas pruebas buscan identificar la sensibilidad del modelo ante cambios en el método de integración y en el tiempo de simulación. Se realizaron corridas variando el método de integración de Euler a métodos Runge-Kutta de segundo, tercer y cuarto orden; así mismo se realizaron corridas variando el tiempo de paso del modelo de 30 días, 20 días, 10 días y 1 día. Los resultados se presentan en las figuras a continuación:

Figura 4-21: Sensibilidad al método de integración. Elaboración propia.

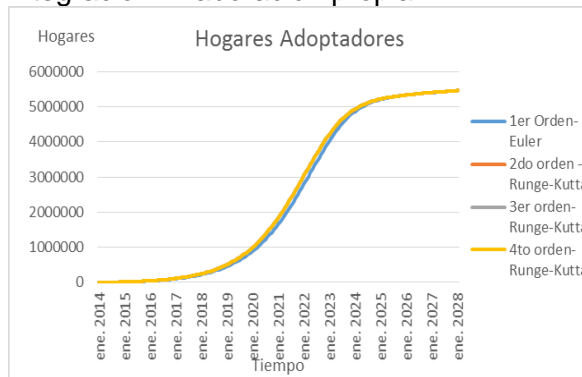
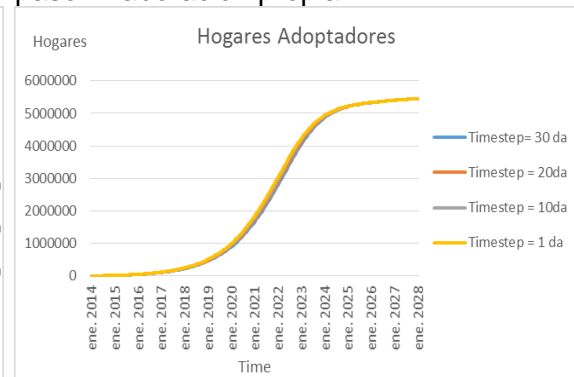


Figura 4-22: Sensibilidad al tiempo de paso. Elaboración propia.



Como conclusión se obtiene que la variable hogares adoptadores es insensible tanto al método de integración como al tiempo de paso de la simulación.

Pruebas históricas:

Para este modelo no es posible realizar pruebas históricas debido a que no se cuenta con información suficiente para comparar el comportamiento histórico real con el del modelo en el mercado colombiano, además los comportamientos de adopción de sistemas FV disponibles de otros países no son comparables, debido a las condiciones regulatorias y de incentivos que enmarcaron la difusión en el exterior y que no están presentes en el caso colombiano.

4.7 Conclusiones del capítulo

Este capítulo presenta las especificaciones, supuestos y validación de un modelo de simulación desarrollado para analizar el proceso de difusión de la tecnología solar fotovoltaica para microgeneración en el sector residencial y evaluar los efectos en la curva de carga de la penetración de la tecnología de microgeneración solar fotovoltaica en el sector residencial; con lo cual se da cumplimiento a los objetivos específicos uno y dos de esta tesis.

El modelo presentado en este capítulo se desarrolló implementando la metodología de dinámica de sistemas, lo cual permite tener una abstracción simplificada de la realidad desde donde se pueden realizar acercamientos sistémicos al problema de interés y que permitirá lograr un entendimiento de los efectos en las variables de interés a partir de las relaciones causales entre las principales variables del sistema.

En el próximo capítulo se presentan los resultados obtenidos con el modelo de simulación.

Capítulo 5. Resultados del modelo de simulación

En este capítulo se describe el escenario base y se presentan los resultados del modelo de simulación descrito en el Capítulo 4. Adicionalmente se describen y evalúan las políticas propuestas que dan cumplimiento al tercer objetivo específico de esta tesis.

5.1 Análisis del caso base

El análisis del caso base se realiza a partir de dos escenarios, el primer escenario llamado “Escenario sin baterías” muestra el proceso de difusión y penetración de la tecnología solar fotovoltaica sin baterías de respaldo, y sus efectos en la curva de carga; asumiendo que los hogares requerirán utilizar la red como alternativa de respaldo en las horas donde no hay brillo solar y por ende no hay generación fotovoltaica.

El segundo escenario se denomina “Escenario con baterías”, y en él se considera que los hogares adoptan sistemas con baterías como alternativa de respaldo. La adopción de sistema con baterías significa que, en promedio, los hogares tendrán respaldo para abastecer sus requerimientos de energía incluso en las horas donde no se cuenta con luz solar, debido a que la generación del día se almacena en las baterías y se utiliza durante la noche.

Los resultados presentados en esta sección son para instalaciones de 1.5 kW en los hogares, de acuerdo con los supuestos expuestos en la sección 4.5, resultados con instalaciones de menor tamaño (0.5 kW) se presentan en el anexo B.

5.1.1 Resultados sobre la difusión

Los resultados del caso base respecto a la difusión de los sistemas fotovoltaicos en los escenarios sin y con baterías se presentan de forma comparativa a través de los resultados de las variables Hogares Potenciales y la relación entre Hogares Totales y Hogares Adoptadores.

Figura 5-1: Hogares Potenciales – Escenario sin baterías. Elaboración propia.

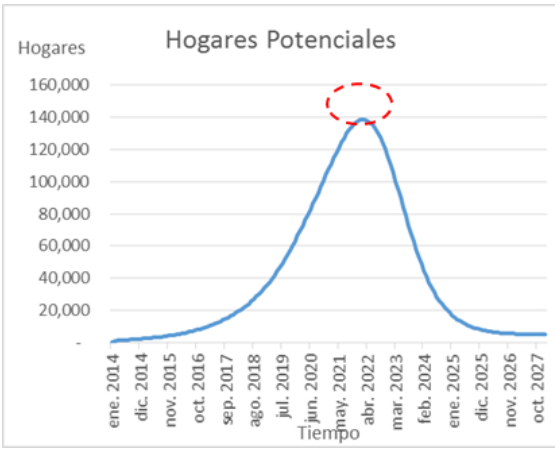


Figura 5-2: Hogares Potenciales – Escenario con baterías. Elaboración propia.

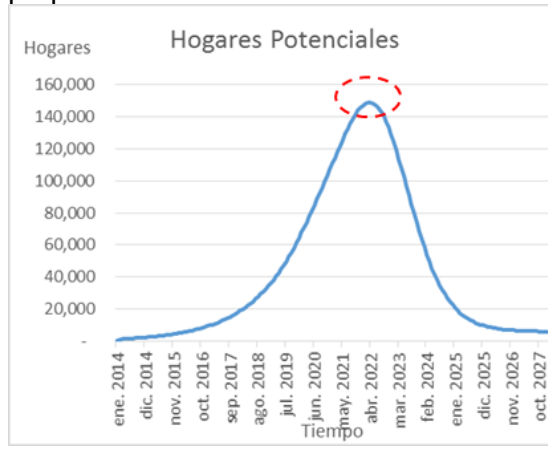


Figura 5-3: Hogares Totales Vs Hogares Adoptadores – Escenario sin baterías. Elaboración propia.

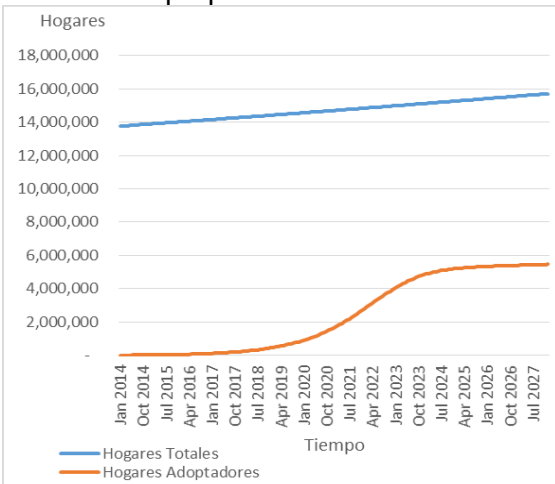
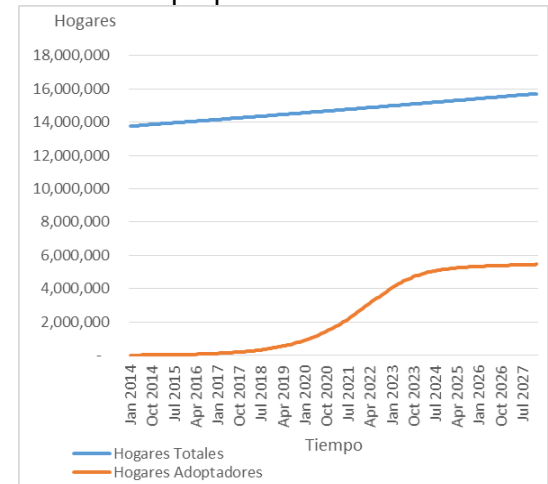


Figura 5-4: Hogares Totales Vs Hogares Adoptadores – Escenario con baterías. Elaboración propia.



Las Figura 5-1 y Figura 5-2 permiten observar el cambio en el tiempo de la cantidad de hogares que potencialmente adoptarían la tecnología fotovoltaica para microgeneración. De acuerdo con estas figuras, la cantidad de hogares no varía significativamente en los escenarios de adopción sin y con baterías (como lo muestra la línea punteada roja en ambas gráficas).

De igual forma, la cantidad de hogares que adoptan en el tiempo no presenta variaciones importantes entre cada uno de los escenarios (Figura 5-3 y Figura 5-4) y en proporción se conserva casi la misma relación entre los adoptadores y los hogares totales en ambos casos.

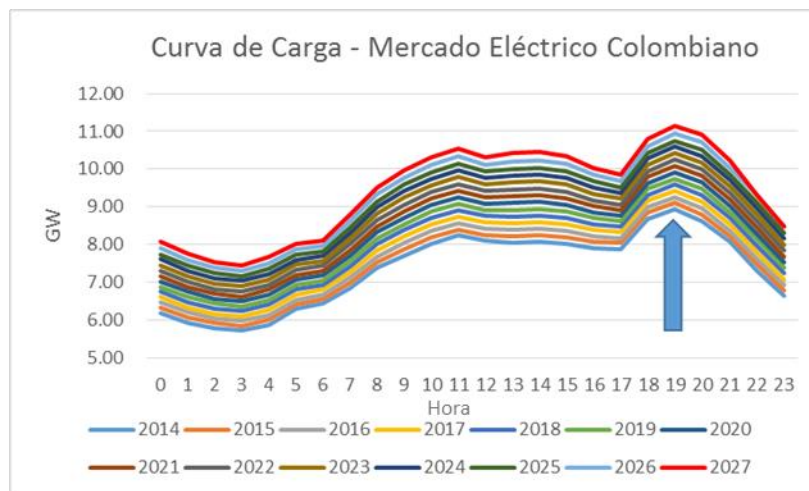
La adopción que toma forma de “s” alcanza en ambos escenarios un aproximado de seis millones (6.000.000) de adoptadores durante el tiempo de simulación.

5.1.2 Efectos en la curva de carga

Los efectos de la difusión de la tecnología fotovoltaica en la curva de carga del mercado eléctrico colombiano, se presentan en esta sección para cada uno de los escenarios analizados (casos sin y con baterías).

La Figura 5-5 presenta, a modo de referencia, el comportamiento esperado de la curva de carga del mercado eléctrico colombiano cuando no existe difusión de los sistemas de microgeneración fotovoltaica en el mercado. Se observa en ella una tendencia creciente de la demanda de energía horaria a través de la ventana de simulación.

Figura 5-5: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano cuando no hay difusión de los sistemas de microgeneración fotovoltaica residencial. Elaboración propia.



Efectos en la curva de carga – Escenario sin baterías:

En el escenario sin baterías, el comportamiento de la demanda horaria del sector residencial está condicionado por la ausencia del respaldo de las baterías para las horas donde no hay brillo solar, ocasionando que la energía requerida por los hogares durante estas horas sea demandada de la red. Esta dinámica produce en la curva de carga del sector residencial la figura de un “pato” (ver Figura 5-6), el cual muestra cómo en las horas donde no hay brillo solar, la demanda es creciente cada año (por el aumento de hogares en el tiempo), mientras que en las horas de oscuridad se reduce la demanda hasta el punto en que incluso es negativa, lo cual implica que hay un exceso de capacidad en el sistema.

Por su parte, la curva de carga del mercado, muestra una figura similar, donde el comportamiento del “pato” también se produce (ver Figura 5-7). Nótese que en este caso los excedentes de generación del sector residencial durante las horas de brillo solar podrían suplir una gran porción de los requerimientos de los otros sectores, si se permitiera la inyección a la red de los microgeneradores residenciales; aunque no habría excedentes de generación en el sistema como lo muestra la Figura 5-7.

Finalmente, la Figura 5-8, muestra la curva de carga total del sistema en el caso sin baterías, pero considerando el escenario en que los excedentes de la microgeneración residencial no pueden ser inyectados a la red, es decir, los excedentes de microgeneración se pierden. El resultado es que durante las horas de mayor generación solar, la demanda total del sistema no baja tanto como podría y tiene la forma de la demanda de los otros sectores (ver Figura 1-7), puesto que el sector residencial se autoabastece en esa franja horaria.

Figura 5-6: Curva de carga del sector residencial colombiano. Escenario sin baterías. Elaboración propia.

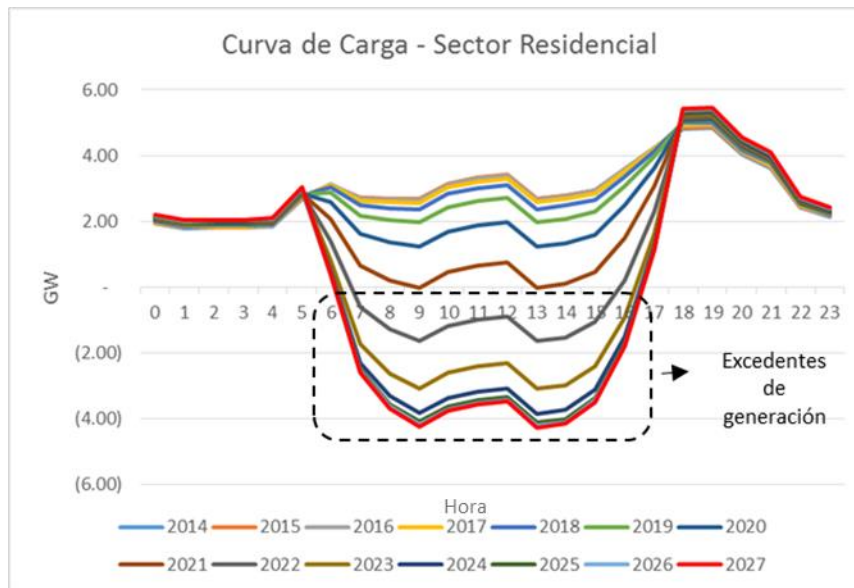


Figura 5-7: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano. Escenario sin baterías – Utilizando los excedentes de generación. Elaboración propia.

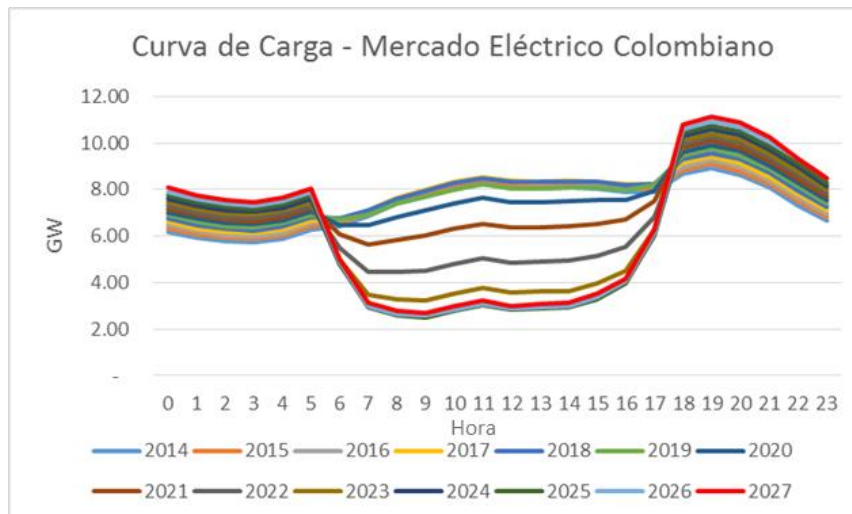
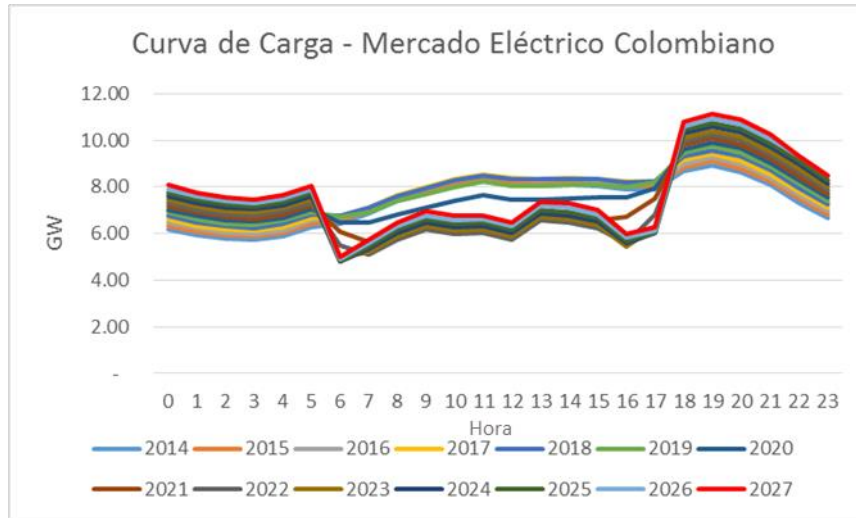


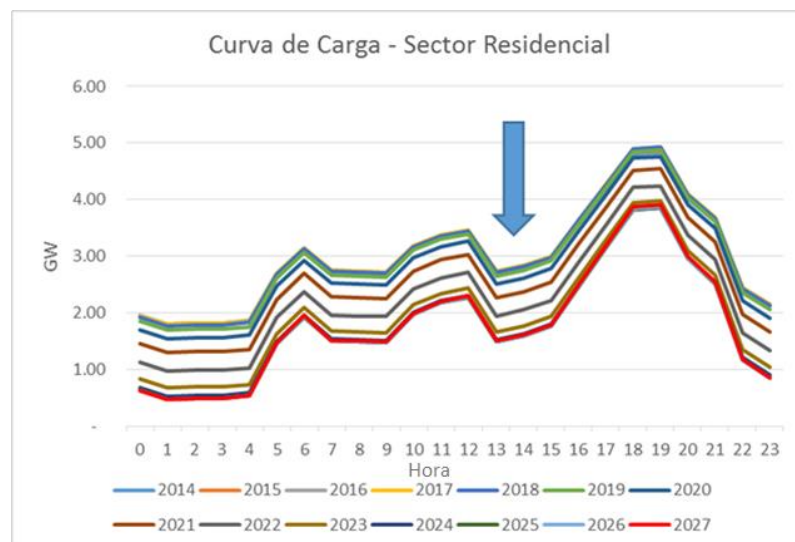
Figura 5-8: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano. Escenario sin baterías – Perdiendo los excedentes de generación. Elaboración propia.



Efectos en la curva de carga – Escenario con baterías:

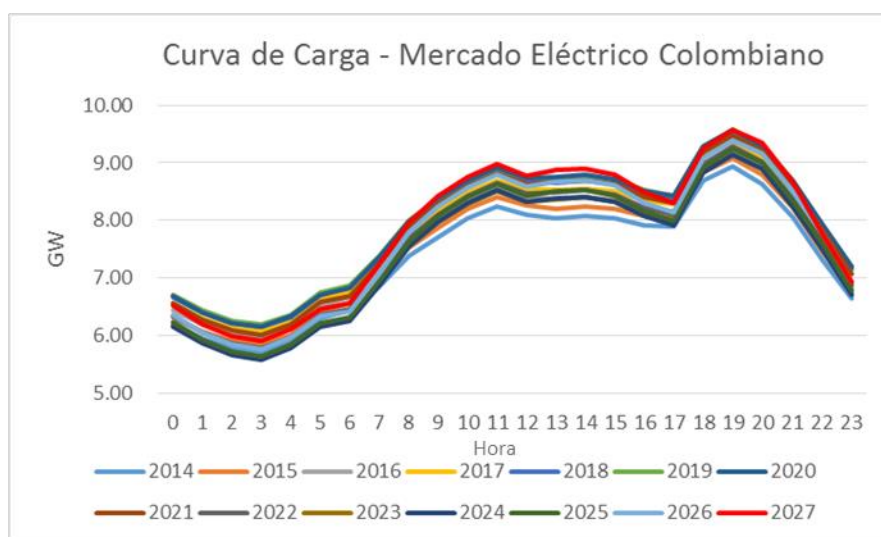
En el sector residencial, los efectos de la difusión de tecnología solar FV para microgeneración muestran la reducción progresiva de los requerimientos de energía eléctrica que se hacen a la red; lo cual se explica por el autoabastecimiento de los requerimientos de energía con los sistemas fotovoltaicos. Adicionalmente, la difusión de sistemas con baterías, muestra que la reducción de la demanda se hace de forma homogénea en todas las horas del día, debido a que la disponibilidad del almacenamiento permite conservar los excedentes de energía del día para utilizarlos durante la noche. La Figura 5-9 ilustra la dinámica descrita.

Figura 5-9: Curva de carga del sector residencial colombiano. Escenario con baterías. Elaboración propia.



A pesar de la disminución progresiva de la demanda residencial diaria representada en la Figura 5-9 (indicada por el sentido de la flecha), cuando se observan los efectos en el mercado eléctrico (Figura 5-10), se evidencia que los requerimientos de energía siguen en aumento en el tiempo pero en una menor proporción a la del modo de referencia (Figura 5-5). Lo cual se explica por el supuesto de que los sectores diferentes al residencial no realizan adopción de sistemas FV de microgeneración; y por la participación de los sectores diferentes al residencial en el total del mercado, aproximadamente un 60%, mientras los hogares representan alrededor de un 40%.

Figura 5-10: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano. Escenario con baterías. Elaboración propia.



5.1.3 Efectos en la tarifa

Las variaciones en el comportamiento de la demanda tienen incidencia en la tarifa final de la energía, debido a que algunos de sus componentes están sujetos a las variaciones de la demanda, como se explicó en el Capítulo 4 (ver Figura 4-1 y Figura 4-3). A continuación se presentan los efectos de la difusión de la tecnología FV en el sector residencial de la demanda, sobre la tarifa de electricidad y algunos de sus componentes (precio de generación, costo de transmisión y costo de distribución) para los escenarios sin y con baterías.

Efectos en la tarifa – Escenario sin baterías:

El comportamiento de la tarifa de la red bajo el escenario de difusión de sistemas FV sin baterías muestra incrementos en su valor de alrededor de 250% más que en el escenario con baterías, incrementando la tarifa hasta puntos cercanos a 1200 COP/kWh; formando la figura de un “Cisne” (Figura 5-11).

Aunque el precio de generación tiende a decrecer durante el período de simulación (Figura 5-13), debido a que una menor demanda se satisface con tecnologías más baratas, los incrementos en la tarifa se explican principalmente por el incremento en los componentes de transmisión y de distribución. El costo de transmisión (Figura 5-12) incrementa con oscilaciones hasta 20 COP/kWh, mientras el costo de distribución aumenta tanto (superando los 1000 COP/kWh) que requiere límites a su crecimiento para evitar que el sistema colapse alrededor del año 2024 (Figura 5-14).

Figura 5-11: Tarifa. Escenario sin baterías. Elaboración propia.

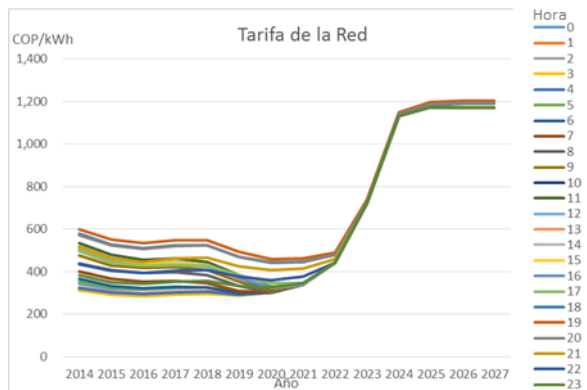


Figura 5-12: Costo de transmisión. Escenario sin baterías. Elaboración propia.

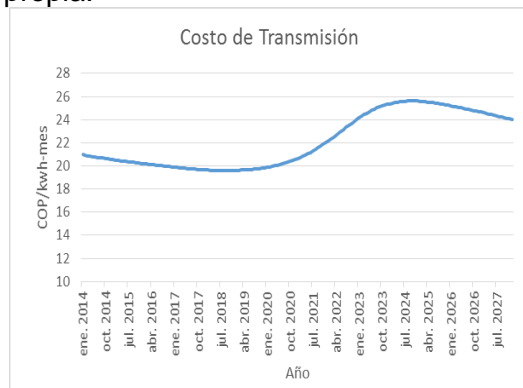


Figura 5-13: Precio. Escenario sin baterías. Elaboración propia.

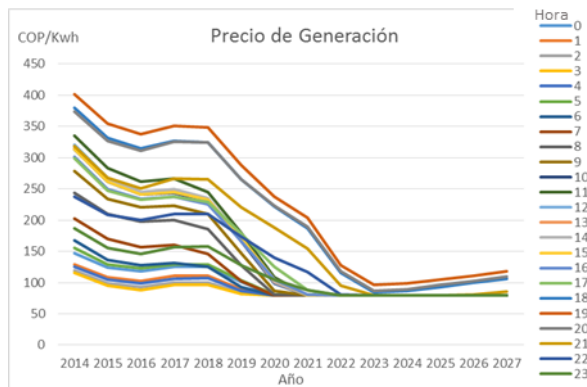


Figura 5-14: Costo de distribución. Escenario sin baterías. Elaboración propia.



Efectos en la tarifa – Escenario con baterías:

Debido a los efectos de la difusión de los sistemas FV en la demanda, los componentes tarifarios y la tarifa final sufren diferentes cambios durante el tiempo de simulación. La Figura 5-15 muestra las variaciones en la tarifa de la red ocasionados por los cambios conjuntos en sus componentes.

Se observa que las tarifas son mayores alrededor de las siete de la noche y más bajas entre las dos o tres de la tarde durante los primeros años de la simulación cuando la difusión de la tecnología apenas está comenzando. Sin embargo la tarifa va disminuyendo

a través de los años simulados hasta converger alrededor de 350 COP/kWh. El comportamiento del precio de generación (Figura 5-17) que se ubica al final por debajo de 100 COP/kWh tiene un comportamiento similar a la tarifa, debido a que la reducción en la demanda implica que ésta puede satisfacerse con tecnologías más baratas.

El costo de distribución (Figura 5-18) que se afecta directamente por la demanda residencial (calculado de acuerdo al nivel de tensión 1), muestra cómo al final de la simulación se va incrementando su valor debido a la disminución de la demanda de los hogares (ver Figura 5-9). Por su parte, el costo de transmisión es afectado por la demanda total del sistema (incluyendo sector residencial y otros sectores), la cual continúa creciendo a pesar de la disminución de la demanda residencial, debido a la participación mayoritaria de los otros sectores (ver Figura 5-10), por lo cual el costo de transmisión no sufre incrementos tan drásticos, pero sí algunas oscilaciones como se observa en la Figura 5-16.

Figura 5-15: Tarifa. Escenario con baterías. Elaboración propia.

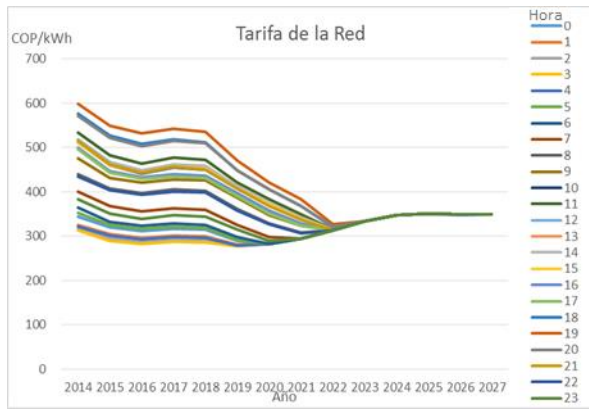


Figura 5-16: Costo de Transmisión. Escenario con baterías. Elaboración propia.

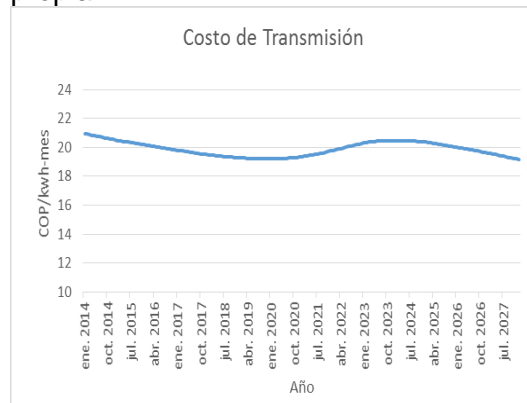


Figura 5-17: Precio de generación. Escenario con baterías. Elaboración propia.

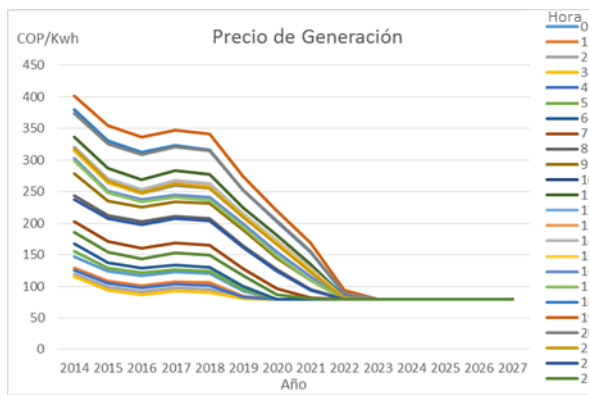


Figura 5-18: Costo de distribución. Escenario con baterías. Elaboración propia.



5.2 Evaluación de políticas y estrategias

En esta sección se describen y evalúan políticas y estrategias relacionadas con la difusión de la tecnología solar fotovoltaica para microgeneración en el sector residencial colombiano. Para ello, en primera instancia se definen los criterios e indicadores de evaluación y posteriormente se describen y evalúan las políticas implementadas.

5.2.1 Criterios de evaluación

Los criterios de evaluación, permiten comparar el desempeño de las diferentes políticas desde tres puntos de referencia: efectos en la curva de difusión, efectos en la curva de carga y efectos en la tarifa. A continuación, en la Tabla 5-1, se nombran y describen los criterios definidos para realizar la evaluación de los escenarios.

Tabla 5-1: Criterios de evaluación. Elaboración propia utilizando para la curva de difusión* indicadores definidos por Rahmandad & Sterman (2008), citados por Cadavid, (2015)

Criterio de evaluación	Indicador/ unidad	Descripción
Curva de Difusión	%HA* [%]	Cantidad de hogares adoptadores al final de la simulación respecto al total de hogares en el último año de la simulación.
	AP* [Hogares]	Cantidad máxima de hogares adoptadores potenciales.
	%Ad/P [%]	Cantidad de hogares adoptadores al final de la simulación respecto a la cantidad de hogares Potenciales durante todo el tiempo de simulación.
	Tp* [mes/Año]	Año donde la pendiente de la curva de difusión se hace máxima, es decir donde se da AP. Muestra la velocidad de adopción.
	Velocidad de adopción [Años]	Muestra el tiempo en años desde la primera adopción hasta el punto de pendiente máxima AP.
Curva de Carga	Demanda Máxima/Demanda Mínima	Relaciona los requerimientos de energía máxima respecto a las necesidades de energía mínima.
	Microgeneración Total [GW]	Corresponde al total de energía generada por la microgeneración en el sector residencial durante toda la simulación.
	Micro/ Gen. Total [%]	Proporción de la generación total del sistema que corresponde a microgeneración durante toda la simulación.
	Excedentes de Generación [GW]	Corresponde al total de energía generada por la microgeneración en el sector residencial que excede la demanda residencial, durante toda la simulación.
Tarifa	Valor Máximo [COP/kWh]	Valor máximo de la Tarifa durante todo el período de simulación

Criterio de evaluación	Indicador/ unidad	Descripción
	Valor Mínimo [COP/kWh]	Valor mínimo de la Tarifa durante todo el período de simulación
	Valor promedio [COP/kWh]	Valor promedio de la Tarifa durante todo el período de simulación
	Desviación Estándar	Desviación estándar entre las tarifas correspondientes al total de los años de simulación.

Tabla 5-1: (Continuación)

5.2.2 Implementación de políticas

En el capítulo 2.1 se expuso cómo en la literatura se ha reportado la existencia de numerosos factores que intervienen en las decisiones de adquisición de las tecnologías renovables, que incluyen aspectos tan variados como factores financieros, sociales e institucionales (ver Tabla 2-1). Adicionalmente en el capítulo 5.1 se presentó cómo las variaciones en la demanda tienen efectos en la curva de carga y en las tarifas del mercado. Por tanto en esta sección, se evaluarán políticas centradas en factores de diversa índole que podrían alterar la difusión de la tecnología FV (como lo son los costos, la educación y el contagio social entre las personas).

Caso base

Cada una de las políticas y estrategias implementadas será comparada con el caso base sin baterías; puesto que éste es el que presentó efectos más drásticos en el sistema (ver capítulo 5.1).

Política 1- P1. Subsidio a los precios

La política P1, expone un escenario en donde se financian los costos de inversión inicial de los sistemas FV para los hogares colombianos en un 50%; lo que implica que el costo de microgenerar disminuye. La inclusión de esta política se fundamenta en la idea general que se encuentra en la literatura sobre los efectos (de motivación o barrera) de los precios sobre la adquisición de nuevas tecnologías de microgeneración (Balcombe et al., 2013, 2014; Claudy et al., 2011; Scarpa & Willis, 2010; Solangi et al., 2011; Zhang et al., 2011).

Por tanto, con la evaluación de esta política se pretende identificar si existen cambios en la difusión debidos a los costos de los sistemas FV; y los impactos que estos cambios generarían en la curva de carga residencial y la tarifa. Los resultados se observan de la Figura 5-19 a la Figura 5-22.

Figura 5-19: Hogares Potenciales y Hogares Adoptadores – P1. Subsidio a precios. Elaboración propia.

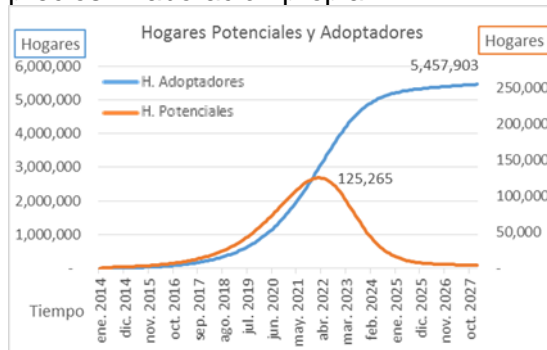


Figura 5-21: Curva de carga del sector residencial – P1. Subsidio a precios. Elaboración propia.

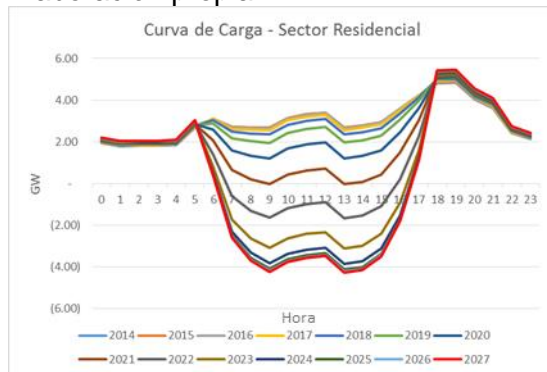


Figura 5-20: Tarifa de la red – P1. Subsidio a precios. Elaboración propia.

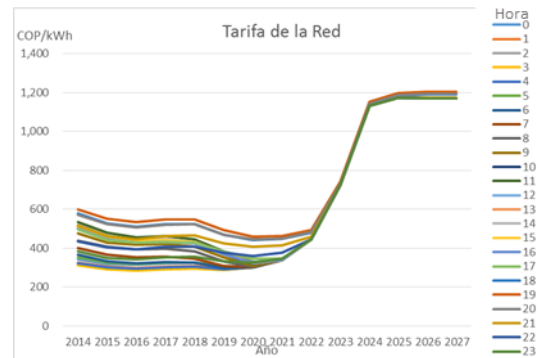
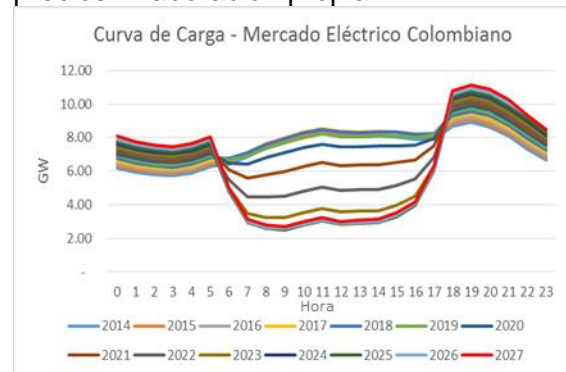


Figura 5-22: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano – P1. Subsidio a precios. Elaboración propia.



Una inspección visual a los resultados en el sistema implementando P2, permite afirmar que no hay cambios notorios respecto a los resultados del caso base sin baterías, ya que las curvas de difusión se comportan de forma similar, los efectos en el mercado (desde el punto de vista de la curva de carga y la tarifa) no difieren significativamente del caso base.

Política 2 - P2. Financiación a la educación en tecnología fotovoltaica

De acuerdo con diversos autores en la literatura la conciencia ambiental, la educación y el conocimiento de la tecnología son factores importantes y motivadores en la adopción de tecnologías de microgeneración (Balcombe et al., 2013; Claudy et al., 2010; Islam, 2014; Karakaya et al., 2015; Mills & Schleich, 2012; Zhang et al., 2011).

La política P2, de financiación a la educación sobre la tecnología; supone un escenario en el que se destinarían dineros públicos para financiar programas de educación superior y, en específico, aquellos con enfoque hacia la formación de la conciencia ambiental y de la tecnología fotovoltaica. De esta financiación, se supone un incremento de la conciencia ambiental, y por tanto un incremento en el coeficiente de innovación (p) a 0.005. Los resultados de la implementación de P2 se presentan de la Figura 5-23 a la Figura 5-26.

Figura 5-23: Hogares Potenciales y Hogares Adoptadores – P2. Financiación a la educación FV. Elaboración propia.

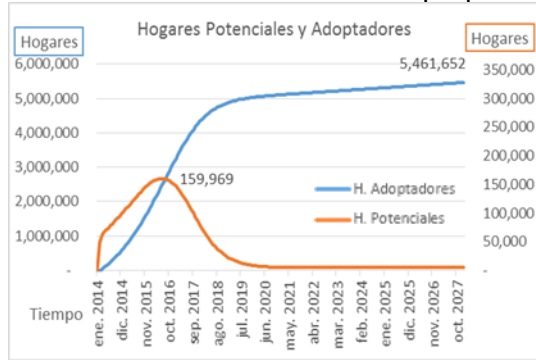


Figura 5-24: Tarifa de la red – P2. Financiación a la educación FV. Elaboración propia.

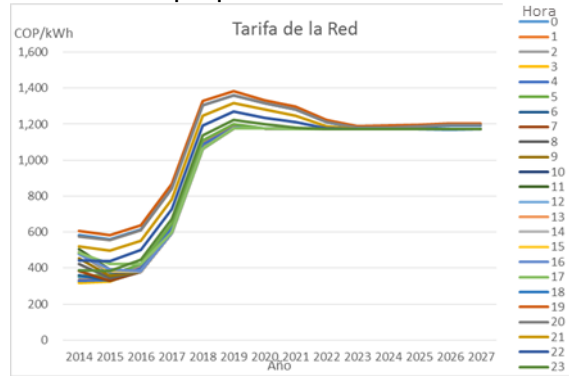


Figura 5-25: Curva de carga del sector residencial – P2. Financiación a la educación FV. Elaboración propia.

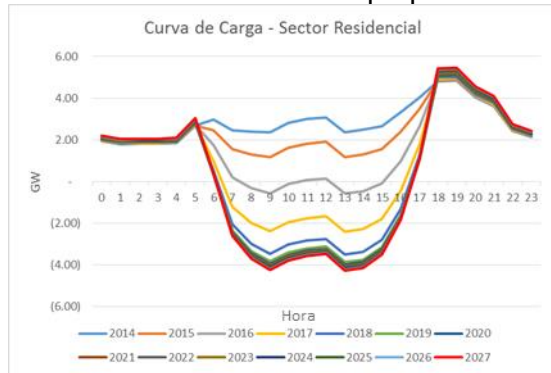
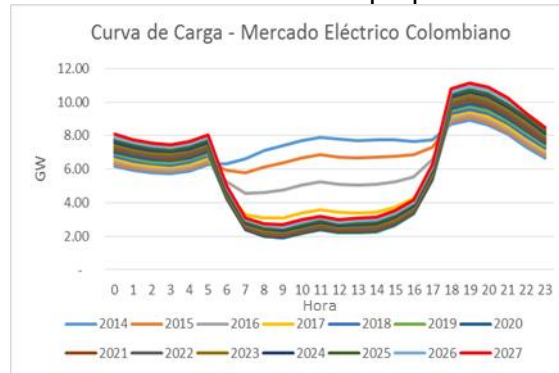


Figura 5-26: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano – P2. Financiación a la educación FV. Elaboración propia.



Los resultados de P2 respecto al caso base, parecen indicar que al incrementar la financiación a la educación en la tecnología, y por consiguiente, aumentando el conocimiento de la tecnología y de la responsabilidad y compromiso con el medio ambiente, la curva de difusión sería más rápida y por tanto los efectos en la curva de carga y en la tarifa del mercado sucederían mucho más rápido comparados con el caso base.

Política 3 – P3. Incremento del contagio social

La influencia de los vecinos, ha sido considerada como importante para las decisiones de adquisición de tecnologías de microgeneración (Claudy et al., 2011); por tanto, la política P3 evalúa los impactos de incrementar el contagio social o la propensión a imitar a aquellos hogares adoptadores. Políticas específicas para lograr este objetivo incluyen la financiación de hogares con sistemas FV piloto que generen experiencias positivas entre sus vecinos y aumenten los imitadores en el sistema; o beneficios y descuentos especiales para hogares pioneros que publiciten y recomienden la tecnología a sus vecinos, familiares y amigos. En este caso, se considera una política de financiación de los sistemas fotovoltaicos que permita incrementar el coeficiente de imitación (q) a 0.008. Los resultados de P3 se presentan de la Figura 5-27 a la Figura 5-30.

Figura 5-27: Hogares Potenciales y Hogares Adoptadores – P3. Incremento del contagio social. Elaboración propia.

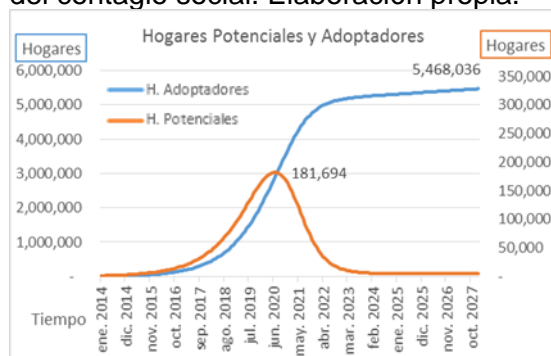


Figura 5-29: Curva de carga del sector residencial – P3. Incremento del contagio social. Elaboración propia.

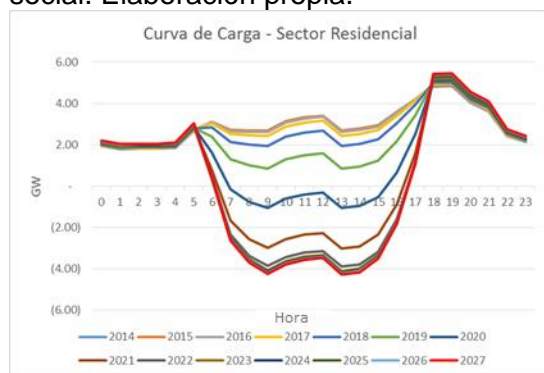


Figura 5-28: Tarifa de la red – P3. Incremento del contagio social. Elaboración propia.

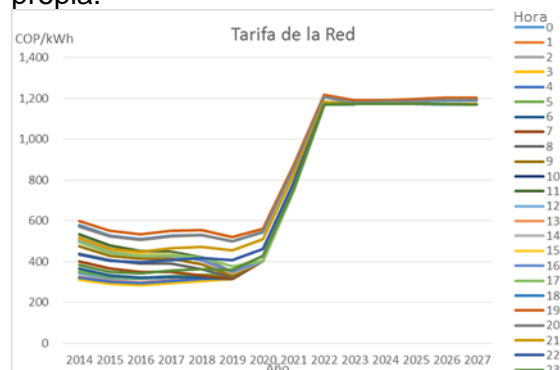
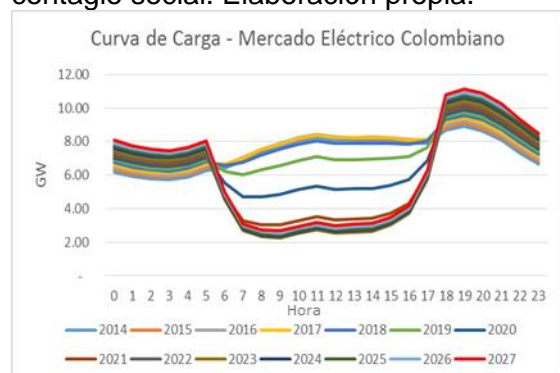


Figura 5-30: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano – P3. Incremento del contagio social. Elaboración propia.



Los resultados con P3 parecen indicar que tanto la difusión como los efectos en el mercado ocurrirían más rápido que en el caso base, en el mismo sentido, el sistema también colapsaría y lo haría probablemente antes que en el caso base.

Política 4 - P4. Modificación del costo de distribución

La política P4, propone una intervención directa sobre el diseño tarifario, que permita evaluar si con ello se evitan colapsos en el sistema cuando la cantidad de hogares adoptadores hace que los costos de distribución se vuelvan inviables, como se verificó con los resultados de la sección 5.1.3.

De acuerdo con Hledik (2014), existen múltiples modelos para el diseño de las tarifas dentro de los que se encuentran las opciones de cargos fijos y cargos variables. Para el sistema analizado, un costo de distribución variable calculado de forma volumétrica todo el tiempo no podrá solucionar el problema del colapso del sistema, puesto que siempre existe la posibilidad que la hayan excedentes de generación en el sistema; es decir, que haya demanda “negativa”; esto implica que habrá un momento en que la demanda residencial (que es el caso de interés de esta tesis) tomará el valor de cero y por tanto el valor del costo de distribución será infinito y el sistema colapsará. Matemáticamente,

$$\frac{\text{Costo de Distribución [\$]}}{\text{Demanda [kWh]}}$$

5-1

Cuando Demanda = 0

$$= \frac{\text{Costo de Distribución [\$]}}{0 \text{ [kWh]}} \rightarrow \infty$$

5-2

Una posible solución a este fenómeno sería sacar el cargo de distribución de la tarifa unitaria y cobrar un cargo fijo (independiente de la demanda) por contar con el respaldo de la red. Esto implicaría que tanto los usuarios que adquieran sistemas FV como aquellos que no, estarían obligados a pagar por la disponibilidad de la red. Los únicos usuarios que no pagarían dicho aporte serían aquellos que se desconecten completamente del sistema.

Una posible política para este cargo fijo por distribución sería el costo total dividido por el número de suscriptores, como se presenta en la ecuación 5-3.

$$\frac{\text{Costo Total de Distribución [\$]}}{\text{Número de Suscriptores}}$$

5-3

Para el sistema colombiano, el valor fijo del costo de distribución sería aproximadamente de 16981 COP/kWh (cálculos propios). Como resultado de implementar dicha política en el sistema, se obtienen los resultados de la Figura 5-31 a la Figura 5-34

Figura 5-31: Hogares Potenciales y Hogares Adoptadores – P4. Costo de distribución fijo. Elaboración propia.

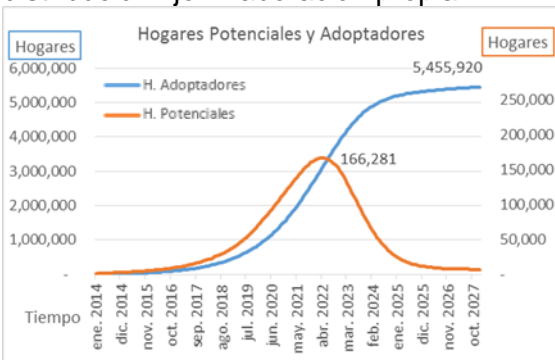


Figura 5-32: Tarifa de la red – P4. Costo de distribución fijo. Elaboración propia.

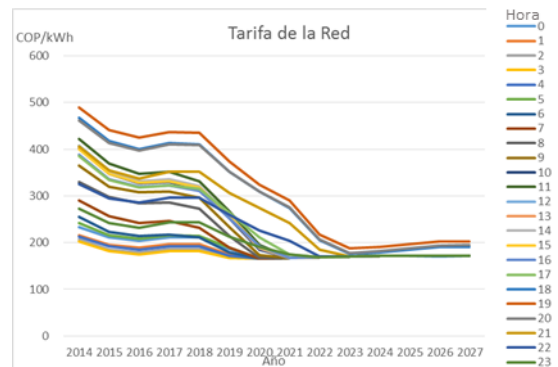


Figura 5-33: Curva de carga del sector residencial – P4. Costo de distribución fijo. Elaboración propia.

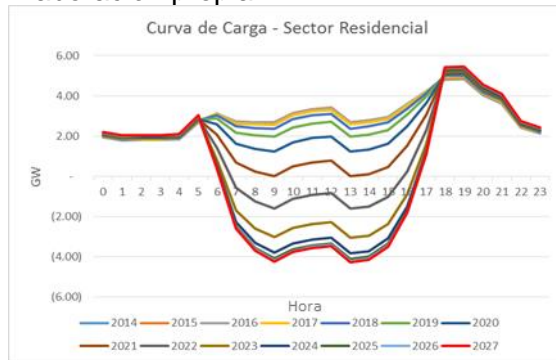
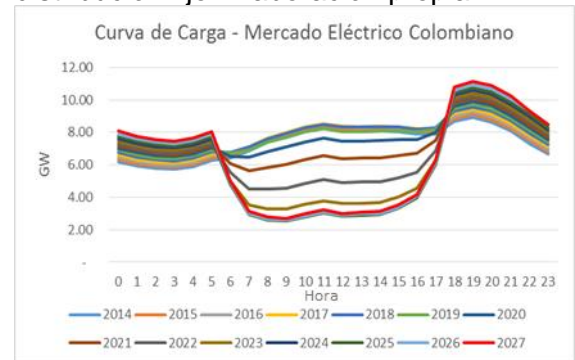


Figura 5-34: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano – P4. Costo de distribución fijo. Elaboración propia.



Los resultados de P4, muestran que una política sobre los costos de distribución, aunque no altera significativamente la curva de difusión ni los efectos en la curva de carga, si regula los efectos en la tarifa, la cual se estabiliza al final de la simulación alrededor de los 250 COP/kWh, evitando que el sistema colapse debido a los excedentes de generación en el sistema y su influencia en la tarifa.

5.2.3 Evaluación comparativa del desempeño de las políticas

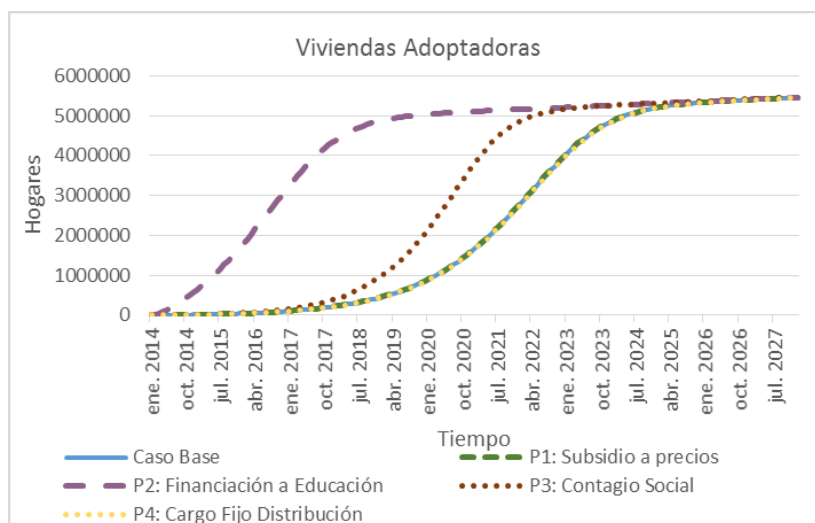
A continuación se presentan los resultados de los indicadores de desempeño para cada una de las políticas implementadas, y una comparación evaluativa de ellas, según los criterios de la Tabla 5-1.

La Tabla 5-2 y la Figura 5-35 presentan los resultados de los indicadores correspondientes a las curvas de difusión cuando se aplican las políticas descritas en la sección 5.2.2.

Tabla 5-2: Resultados comparativos de indicadores de curva de difusión. Elaboración propia

Políticas Indicadores	Caso base	P1: Subsidio a precios	P2: Financiación a educación	P3: Contagio social	P4: Cargo fijo distribución
%HA [%]	34.73%	34.73%	34.75%	34.79%	34.72%
AP [Hogares]	138600	125265	159969	181694	166281
%Ad/P [%]	78.9%	86.7%	79.9%	79.4%	65.7%
Tp [mes/Año]	Feb/2022	Mar/2022	Jul/2016	Jun/2020	Abr/2022
Velocidad de adopción [años]	8.2	8.3	2.6	6.5	8.3

Figura 5-35: Curvas de difusión con diferentes políticas – Viviendas Adoptadoras. Elaboración propia



De acuerdo con los resultados de los indicadores, la tasa de adopción en el sistema es muy similar con todas las políticas (aproximadamente un 35% de adoptadores respecto al total de hogares en el sistema), es decir al final de la simulación, sin diferencia entre las políticas y el caso base, se obtienen los mismos niveles de adoptadores en el sistema. Sin embargo, la velocidad de ocurrencia de la difusión si varía, siendo mucho mayor cuando se implementa una política de financiación a la educación (en tan sólo 2.8 años se alcanza el máximo de hogares potenciales); debido a que habrá una mayor proporción de hogares con conocimiento de la tecnología y por tanto con características de innovadores.

Finalmente, se resalta que la política que logra mayor proporción de hogares adoptadores respecto a los potenciales es la política de subsidios a los precios, aunque con ella la cantidad máxima de hogares potenciales es la más baja. Lo anterior, puede explicarse debido a que las condiciones de evaluación de los sistemas FV se realiza en un momento en el que hay paridad de red en el territorio colombiano (Jiménez et al., 2014), por lo cual mayores reducciones en los costos FV no serán la motivación más asertiva para fomentar un mayor deseo de adoptar.

A continuación, en la Tabla 5-3 y las Figura 5-36 y Figura 5-37 se presentan los indicadores de los efectos de las diferentes políticas sobre la curva de carga.

Los resultados sobre la curva de carga indican que la mayor cantidad de microgeneración en el sistema ocurre cuando se aplica la política de financiación a la educación en la tecnología FV, lo cual se explica porque con ella la difusión ocurre mucho más rápido (ver Tabla 5-2) y por tanto las viviendas generan con los sistemas FV durante un período más prolongado de tiempo. De igual forma, el hecho de la rápida adopción, ocasiona que el escenario con financiación a la educación sea el que tenga los mayores excedentes de energía durante toda la simulación (ver Tabla 5-3).

Tabla 5-3: Resultados comparativos de indicadores de curva de carga. Elaboración propia

Políticas Indicadores	Caso base	P1: Subsidio a precios	P2: Financiación a educación	P3: Contagio social	P4: Cargo fijo distribución
Microgeneración Total [GW]	5693.5	5702.1	10013.3	7024.8	5674.2
Micro/ Gen. Total [%]	16.74%	16.77%	29.44%	20.65%	16.68%
Excedentes de Generación [GW]	2083.1	2086.7	4271.7	2849.4	2070.6

Figura 5-36: Indicador demanda máxima / demanda Mínima para diferentes políticas – Demanda total del sistema. Elaboración propia.

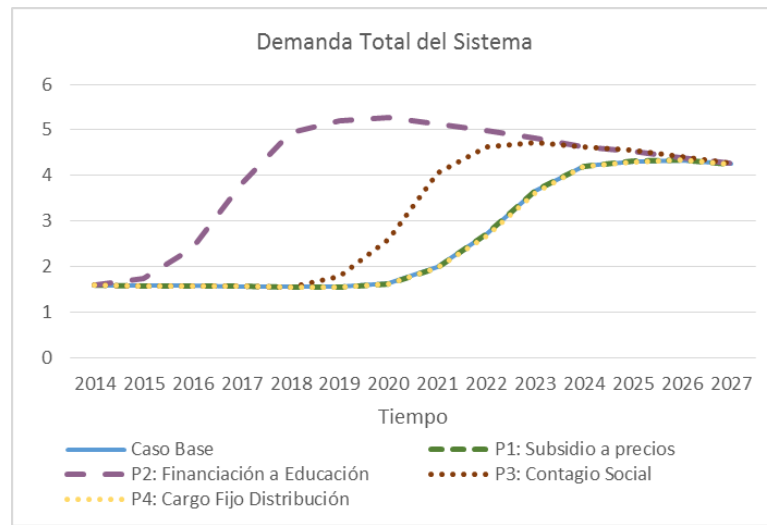
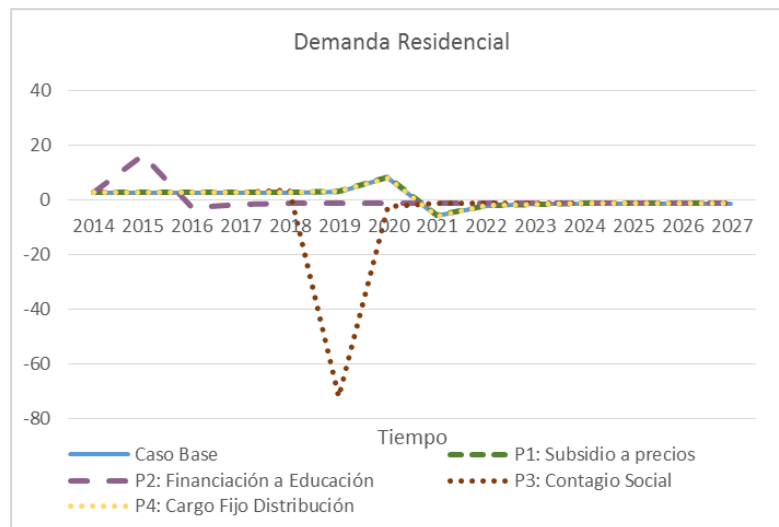


Figura 5-37: Indicador demanda máxima / demanda Mínima para diferentes políticas – Demanda Residencial. Elaboración propia.



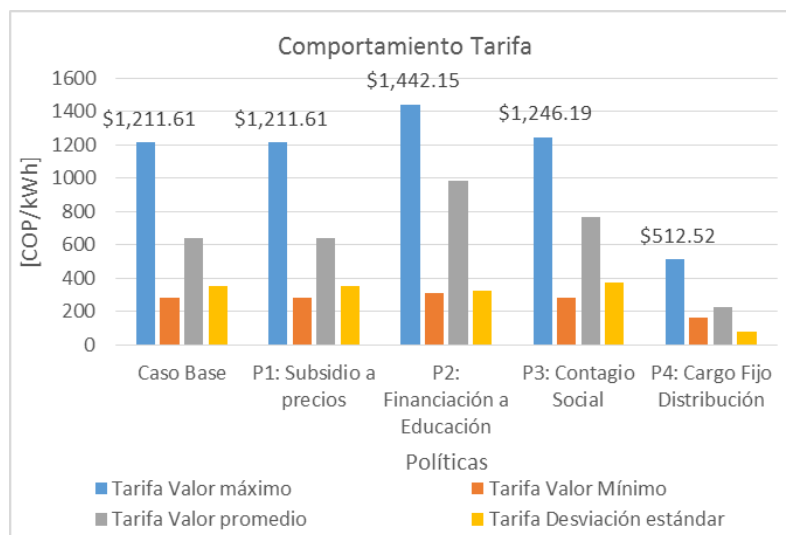
Los indicadores de la relación entre la demanda máxima y la demanda mínima evidencian como los problemas de estabilidad y sostenibilidad del sistema son más acentuados cuando las políticas de financiación a la educación (P2) y de incremento en el contagio social (P3) tienen lugar; puesto que tanto para la demanda total del sistema (Figura 5-36) como para la demanda residencial (Figura 5-37), se va a requerir una capacidad instalada muy grande en el sistema para utilizarse como respaldo sólo en los períodos de la noche, mientras en el día se contará con un sistema subutilizado.

Finalmente, la Tabla 5-4 y la Figura 5-38 presentan los indicadores sobre la tarifa de la red.

Tabla 5-4: Resultados comparativos de indicadores de la tarifa. Elaboración propia

Políticas Indicadores	Caso base	P1: Subsidio a precios	P2: Financiación a educación	P3: Contagio social	P4: Cargo fijo distribución
Valor máximo [COP/kWh]	1,211.61	1,211.61	1,442.15	1,246.19	512.52
Valor Mínimo [COP/kWh]	280.19	280.20	313.15	280.48	165.94
Valor promedio [COP/kWh]	642.11	642.56	980.04	764.39	227.24
Desviación estándar	351.28	351.33	326.91	375.83	79.51

Figura 5-38: Resultados comparativos tarifa de energía. Elaboración propia



Los indicadores sobre la tarifa, muestran que la política de financiación a la educación (P2) es aquella que produce mayores incrementos en las tarifas, mientras que la política de cobrar el cargo fijo de distribución (P4) logra no sólo las tarifas más favorables desde el punto de vista del usuario; sino además logra la mayor estabilidad tarifaria al tener la menor desviación estándar de todas las políticas.

5.3 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se describieron los dos escenarios base de difusión de la tecnología solar FV en el sector residencial colombiano: el caso sin y con baterías. Se encontró que no hay diferencias significativas en la cantidad de hogares adoptadores al final de los años de simulación acercándose para ambos escenarios a los seis millones de adoptadores para principios del año 2028.

Respecto a los efectos en la curva de carga, se identificó que mientras en el escenario con baterías se da una disminución progresiva de la demanda residencial en el tiempo; en el escenario sin baterías los efectos son más caóticos para la estabilidad y sostenibilidad del sistema.

En el escenario sin baterías ocurre que durante las horas del día los hogares generan energía utilizando la luz del sol y a medida que aumentan los hogares adoptadores en el tiempo, se va disminuyendo la demanda residencial a la red hasta el punto de producir excedentes de generación, es decir una producción mayor a lo que el sector residencial demandaría; mientras en las horas de la noche, debido a la ausencia de almacenamiento, la demanda de energía de la red es creciente durante todo el período de simulación; produciendo un uso ineficiente de la red que tendría que tener sobre instalación para atender pocas horas del día.

El efecto en la curva de carga total del sistema podría variar de acuerdo a las políticas definidas por el gobierno: con una política que permita la inyección a la red, los excesos de demanda residencial podrían satisfacer parte de la demanda de los otros sectores, disminuyendo la demanda total del sistema durante las horas del día; pero una política que no permita las ventas a la red, simplemente haría que se reduzca la proporción residencial de curva de carga del sistema durante las horas de luz, desaprovechando los excedentes de generación de los microgeneradores residenciales.

Las tarifas de energía muestran, para ambos escenarios, diferentes efectos resultantes de las dinámicas de sus componentes: en cuanto al precio, se observa que disminuye debido a que se reduce la demanda, por lo cual ésta puede satisfacerse con tecnologías más económicas; mientras que el costo de distribución incrementa dada la baja demanda. Este efecto en la tarifa es más agresivo en el escenario sin baterías, puesto que en el tiempo de simulación llega un momento en que se hace cero la demanda residencial y por tanto el costo de distribución incrementa hasta hacer el sistema inviable.

Para hacer frente al escenario sin baterías del caso base, en este capítulo se evaluaron cuatro políticas: P1. Subsidio a los precios, P2. Financiación a la educación en tecnología fotovoltaica, P3. Incremento del contagio social, y P4. Modificación del costo de distribución; toda ellas evaluadas y comparadas respecto al caso base, utilizando una serie de indicadores sobre la difusión, la curva de carga y la tarifa de electricidad.

Como resultado de esta evaluación se obtuvo que la política de financiación a la educación, que es una política que implicaría una importante inversión estatal, es aquella que logra una difusión más rápida de la tecnología FV, aunque al final de la simulación se obtienen ratios muy similares de adopción al caso base bajo todas las políticas.

Las consecuencias de la rápida difusión ocasionada por la política de financiación a la educación en tecnología FV en la curva de carga, consisten en la mayor microgeneración y por tanto los mayores excedentes de generación en el sistema; además del encarecimiento de las tarifas que vuelven inviable el sistema en el largo plazo.

Por otro lado, se evidenció cómo las políticas de subsidio a los precios de los sistemas FV no alteran la velocidad de difusión, ni los efectos en el sistema en cuanto a los cambios en la curva de carga ni en la tarifa de la red. Lo anterior puede explicarse debido a que en el caso colombiano, para el momento de inicio de la simulación, se contaba con paridad de red, por lo cual sin necesidad de subsidios al precio, ya era viable la inversión en los sistemas FV.

Finalmente, la política del cobro de un cargo fijo de distribución aunque no logran cambios en la velocidad de difusión, ni en los impactos en la curva de carga, si logran mantener la estabilidad del sistema desde el punto de vista de los precios, ya que la tarifa se mantiene baja en proporción con las demás políticas, y con una baja desviación durante toda la simulación.

En el próximo capítulo se reporta el cumplimiento de los objetivos de la tesis y se describen las conclusiones, aportes y recomendaciones de esta tesis.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se reporta el cumplimiento de los objetivos, especificando las principales conclusiones del trabajo realizado y los aportes realizados con esta tesis. Se mencionan algunas recomendaciones y los futuros caminos de investigación; y finalmente se presenta la manera en que los hallazgos de esta tesis han sido divulgados.

6.1 Reporte del cumplimiento de objetivos específicos

A continuación se especifica la forma en que fueron cumplidos los objetivos específicos de esta tesis, que a su vez garantizan el cumplimiento del objetivo general.

6.1.1 Objetivos específicos 1 y 2

1. Desarrollar un modelo de simulación que permita analizar el proceso de difusión de la tecnología solar fotovoltaica para microgeneración en el sector residencial.

2. Desarrollar un modelo de simulación que permita evaluar los efectos en la curva de carga de la penetración de la tecnología de microgeneración solar fotovoltaica en el sector residencial.

Los objetivos 1 y 2 fueron cumplidos a través de los resultados expuestos en el Capítulo 3 y el Capítulo 4. En el Capítulo 3 se realizó una discusión sobre la herramienta metodológica más apropiada para cumplir con estos objetivos, seleccionando la dinámica de sistemas debido a sus ventajas para el estudio de sistemas complejos, la inclusión de retardos, realimentación, y la posibilidad de dar explicaciones de las dinámicas a partir de las relaciones de causalidad entre las variables del sistema.

Por su parte, en el Capítulo 4 se presenta el modelo de simulación desarrollado utilizando dinámica de sistemas para analizar la difusión de la tecnología solar FV para microgeneración en el sector residencial; además se expone el modelo desarrollado para evaluar los efectos en la curva de carga de la penetración de la tecnología FV en el sector residencial.

El modelo especificado en el Capítulo 4 no sólo permite analizar la difusión y los efectos en la curva de carga, sino que de manera adicional, permite identificar los efectos en el mercado eléctrico de la penetración FV a partir de las dinámicas de las tarifas del mercado.

El Capítulo 4 incluye también las especificaciones, supuestos y los argumentos de validación, que permitieran dar confiabilidad al modelo para cumplir con los propósitos que fue desarrollado.

6.1.2 Objetivo específico 3

Evaluar los efectos en el mercado eléctrico de políticas y estrategias relacionadas con la difusión de la tecnología solar fotovoltaica para microgeneración en el sector residencial colombiano.

El cumplimiento del tercer objetivo específico se logró en el Capítulo 5, donde se evaluaron los efectos en el mercado eléctrico de diferentes políticas y estrategias que afectarían la difusión de la tecnología FV en el sector residencial colombiano. Dichas políticas incluían políticas financieras (subsidio a los precios), educativas (financiación a la educación), sociales (incremento del contagio social) y políticas que ayudaran a mitigar los efectos negativos en el mercado (reconfiguración del cobro por concepto de distribución a los usuarios); todas ellas comparadas con el caso base de adopción de sistemas FV sin baterías, sin ninguna política.

La evaluación de políticas se realizó a través de un conjunto de trece indicadores especialmente diseñados para medir los efectos en la difusión, la curva de carga, y, de forma adicional, la tarifa del mercado.

De la evaluación de las políticas propuestas se encontró que los factores financieros no modifican los ratios de adopción de forma significativa en el caso colombiano, debido principalmente a la paridad de red de la tecnología FV. Se encontró además que son políticas de carácter más institucional como la financiación a la educación y el contagio social, las que logran cambios significativos en la velocidad de difusión de la tecnología renovable en Colombia; siendo la política de financiación a la educación en tecnología FV aquella que logra mejores resultados en cuanto a la velocidad de difusión.

Sin embargo, se identificó que las políticas que modifican la velocidad de la difusión sólo precipitan o postergan los problemas de mercado (en cuanto a la tarifa y la curva de carga) sin dar solución a los problemas de estabilidad que la difusión sin baterías traerá al mercado.

Finalmente, se mostró cómo el reemplazar el costo de distribución variable por un mecanismo fijo, logra mayores impactos en la estabilidad del mercado, respecto a las demás políticas, y regula las variaciones tarifarias permitiendo solucionar el problema de viabilidad de la red.

6.2 Conclusiones y aportes específicos de la tesis

A continuación se enlistan los aportes obtenidos con la realización de esta tesis de maestría:

- Se formuló una estructura causal que permite comprender y explicar la difusión de la tecnología solar FV en el sector residencial colombiano, dicho aporte se encuentra en las secciones 4.2 y 4.3 de este documento.
- Se desarrolló un modelo utilizando la metodología de dinámica de sistemas que permite estudiar, comprender y analizar el proceso de difusión de la tecnología solar FV en el sector residencial colombiano. Este modelo se describe en el Capítulo 4.
- Se desarrolló un modelo utilizando la metodología de dinámica de sistemas que permite evaluar los efectos en la curva de carga y en las tarifas del mercado eléctrico colombiano, de la penetración de la tecnología solar FV en el sector residencial colombiano. Este modelo se describe en el Capítulo 4.
- Se describieron y analizaron dos escenarios base de difusión de la tecnología solar FV en el sector residencial colombiano en la sección 5.1: el caso con y sin baterías; así como sus principales resultados. Se encontró que a pesar de no haber diferencias significativas en la cantidad de hogares adoptadores al final de los años de simulación los efectos en la curva de carga y en la tarifa son más severos en el caso sin baterías, pues hace en el mediano plazo insostenible el sistema con tarifas cercanas a 1200 COP/kWh, y los requerimientos de una capacidad instalada muy grande para atender sólo los picos de consumo en la noche, mientras en el día se subutilizaría el sistema debido a excesos de capacidad por la generación residencial.
- Se encontró que los efectos en la curva de carga del sistema están supeditados a las políticas y regulaciones definidas por el gobierno colombiano, ya que, por ejemplo, con una política que permita la inyección a la red los excesos de demanda residencial podrían satisfacer parte de la demanda de los otros sectores, disminuyendo la demanda total del sistema durante las horas del día; pero una política que no permita las ventas a la red, simplemente haría que se reduzca la proporción residencial de curva de carga del sistema durante las horas de luz, desaprovechando los excedentes de generación de los microgeneradores residenciales. Estos resultados se presentan en la sección 5.1.2.
- Se encontró que bajo un escenario de adopción sin baterías, y sin políticas, la distribución en el sector residencial se vuelve inviable, debido a que el valor de la tarifa llega a superar los 1000 COP/kWh. Estos resultados se presentan en la sección 5.1.
- En la sección 5.2 se analizaron y evaluaron cuatro políticas específicas para el caso colombiano relacionadas con la difusión de la tecnología solar fotovoltaica para microgeneración en el sector residencial colombiano. Dichas políticas consideraron factores financieros, educativos y sociales; y políticas sobre el rediseño del cobro del cargo por distribución.

- En la sección 5.2 se encontró que la política enfocada a los aspectos financieros (subsidio a los precios) no altera la dinámica de difusión de la tecnología ni los efectos en el mercado; lo cual fue atribuido a la paridad de red existente en el caso colombiano.
- Se identificó, en la sección 5.2, que las políticas sociales y de educación son las que contribuyen a una difusión más rápida de la tecnología FV en el sector residencial. Lo cual, tiene efectos adversos en el sistema, ya que dichas políticas aceleran los efectos en la curva de carga y la tarifa, volviendo el sistema insostenible de forma acelerada.
- Se evidenció en la sección 5.2, como políticas que modifiquen el cobro de distribución de un cálculo volumétrico a uno fijo para los usuarios, evitan el encarecimiento de las tarifas y ayudan a controlar la viabilidad de la red cuando la difusión de sistemas FV sin baterías tiene lugar.

6.3 Recomendaciones y trabajo futuro

Como posibles caminos de investigación futura, y recomendaciones para ampliar los alcances del trabajo presentado, a continuación se enlistan los siguientes:

- Se sugiere relajar el supuesto de homogeneidad en los usuarios del sector residencial; de tal manera que a partir de una estratificación de la población se obtengan diferentes dinámicas considerando los factores diferenciadores de cada grupo poblacional, por ejemplo, ingresos económicos y niveles educativos.
- Considerar la posibilidad de adquisición de la tecnología FV para microgeneración en sectores industrial, comercial y otros, ya que estos sectores representan un 60% de la demanda total del sistema; y los cambios en su demanda podrían traer efectos significativos en la curva de carga del mercado eléctrico colombiano.
- Analizar la forma en que los consumidores modifican sus hábitos de consumo cuando se vuelven microgeneradores, y considerar esto como una condición importante que tendría efectos en el mercado a partir de los ratios de adopción de la tecnología FV, relajando así uno de los supuestos del modelo desarrollado.
- Profundizar en las motivaciones que conllevan a los usuarios a decidir adoptar una tecnología renovable de microgeneración, ya que, como conclusión de esta tesis, se evidenció que el precio de la tecnología no es un factor determinante de los cambios en la difusión.
- Profundizar en los diferentes diseños tarifarios que podrían evitar colapsos en el sistema debidos a la alta difusión de la tecnología FV.

6.4 Divulgación de resultados

Los resultados de esta tesis han servido de insumo para un proyecto de investigación vinculado con el sector real titulado “*Instituciones y políticas en el camino hacia una economía baja en carbono*”, y un proyecto de jóvenes investigadores en la convocatoria 645; adicionalmente han permitido la escritura de varios artículos y la presentación oral en diferentes congresos académicos nacionales e internacionales que se detallan a continuación:

Artículos:

- (Artículo publicado) Jiménez, M., Cadavid, L., & Franco, C. (2014). Scenarios of photovoltaic grid parity in Colombia. *Dyna*, 188(81), 237–245. doi:10.15446/dyna.v81n188.42165.
- (Artículo publicado) Cadavid, L., Jiménez, M., & Franco, C. J. (2015). Financial Analysis of Photovoltaic Configurations for Colombian Households. *IEEE Latin America Transactions*, 13(12), 3832–3837. doi:10.1109/TLA.2015.7404916.
- (Artículo en evaluación) Jiménez, M., Franco, C., & Dyner, I. Diffusion of renewable energy technologies: the need for policy. *Energy*
- Tres artículos en desarrollo.

Ponencias en eventos nacionales:

- Difusión de Micro generación Fotovoltaica y sus efectos en el Mercado Eléctrico Colombiano. Photovoltaic Micro generation Diffusion and its implications in the Colombian Market. Autores: Maritza Jiménez Zapata, Carlos Jaime Franco Cardona. XII Congreso Colombiano de Dinámica de Sistemas. 27-29 de Agosto de 2014. Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia.

Ponencias en eventos internacionales:

- Análisis de la Adopción de Tecnologías bajo un esquema Institucional: el caso Colombiano. Autores: Maritza Jiménez, Isaac Dyner, Claudia Álvarez, Carlos Franco. XII Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. 09-11 de diciembre de 2014. INCAE Business School, Alajuela, Costa Rica.
- Análisis de la Difusión de Microgeneración Fotovoltaica en Colombia. Autores: Maritza Jiménez y Carlos Franco. XII Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. 09-11 de diciembre de 2014. 09-11 de diciembre de 2014. INCAE Business School, Alajuela, Costa Rica.
- Generación solar fotovoltaica residencial: análisis de viabilidad financiera con diferentes configuraciones de la solución solar para el caso Colombia. Autores: Lorena Cadavid, Maritza Jiménez, Carlos Jaime Franco. 5to Encuentro Latinoamericano de Economía de la Energía. 15-18 de marzo de 2015. Hotel Intercontinental, Medellín, Colombia.

- Análisis Institucional de la Adopción de Tecnologías Renovables de Generación de Energía. Autores: Maritza Jiménez, Claudia Álvarez, Oscar Fernández, Carlos Franco, Isaac Dyer. 5to Encuentro Latinoamericano de Economía de la Energía. 15-18 de marzo de 2015. Hotel Intercontinental, Medellín, Colombia.
- Diffusion of solar generation on rooftops: A system dynamics-based approach in Colombia. Autores: Maritza Jiménez, Carlos Jaime Franco, Isaac Dyer. The 33rd International Conference of the System Dynamics Society. 19-23 de Julio de 2015. Hyatt Regency Cambridge hotel. Cambridge, Massachusetts, USA.
- Assessing alternative institutional arrangements for the diffusion of renewable energy technology. Autores: Isaac Dyer, Maritza Jiménez, Claudia Álvarez, Oscar Fernández, Carlos Franco. Second WINIR Conference. Institutions, Development & Globalization. 10-13 de Septiembre de 2015. Hotel Windsor Atlantica, Copacabana, Rio de Janeiro, Brasil.

Ponencias aceptadas en próximos eventos internacionales:

- Myths and realities of the utility death spiral. Autores: Monica Castaneda, Maritza Jimenez, Sebastián Zapata, Carlos Jaime Franco, Isaac Dyer. The 34th International Conference of the System Dynamics Society. 17-21 de Julio de 2016. Delft, Netherlands.

Finalmente, se realizó una pasantía en investigación en el Imperial College en Londres Inglaterra, entre los meses de Septiembre y Diciembre de 2015.

A. Anexo: Ecuaciones del modelo de simulación

A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas en el modelo de simulación descrito en el Capítulo 4

Variable	Ecuación/Valor	Unidad
Tasa de Incremento Poblacional	Población*'Crecimiento Poblacional'	persona/yr
Población	'Población actual'	personas
Nuevos hogares	'Tasa de Incremento Poblacional'/'Personas por hogar'	Hogares/yr
Hogares Totales	'Hogares actuales'	Hogares
Tasa_2	'Nuevos hogares'*'%de Hogares con Casa'	Hogares/yr
Hogares_Sin_Conocimiento	'Hogares actuales'*'%de Hogares con Casa'	Hogares
Beneficio_Percibido_Bass	$(\text{Hogares_Sin_Conocimiento} * p + (q-p) * \text{Hogares con conocimiento} - q / \text{Hogares_Sin_Conocimiento} * \text{Hogares con conocimiento}^2) / 1$	Hogares/mo
Hogares Potenciales	1	Hogares
Cc_Adopción	$\text{Hogares Potenciales} * (\text{Costo FV auxiliar}^{\wedge} \text{Gamma} / (\text{Costo FV auxiliar}^{\wedge} \text{Gamma} + \text{Tarifa- Auxiliar}^{\wedge} \text{Gamma})) / 1$	Hogares/mo
Hogares Adoptadores	1	Hogares
Hogares con Conocimiento	'Hogares Adoptadores'+ 'Hogares Potenciales'	Hogares
Costo FV auxiliar	'Costo FV'*1 <<kW*ho/\$>>	
Microgeneración total del sistema	$(\text{Microgeneración FV_Base} * 1 <<\text{kWh/kW}>> * \text{Hogares Adoptadores}) * 1 <<\text{ho}>>$	kWh
Demanda Residencial al Sistema	$(\text{Requerimiento Horario por hogar} * (\text{Hogares Totales}) - \text{Microgeneración total del sistema})$	kWh
Requerimiento Horario por hogar	$\text{FOR}(i=1..24 \text{Requerimiento mensual por hogar_kWh}[i] * \% \text{Uso_Horario_Base}[i]) / 30 <<1/\text{mo}>>$	kWh/hogar
Requerimiento mensual por hogar_kWh	'kWh por vivienda'/'Hogares por vivienda'	kWh/(mo*Hogar)
Incremento Capacidad Instalada	$\text{GRAPH}(\text{YEAR}(), 2014, 1, \text{Plan de Expansión}) / 1 <<\text{yr}>>$	kW/yr

Variable	Ecuación/Valor	Unidad
Capacidad Instalada	14585500<<kW>>	kW
Generación Potencial	Capacidad_Instalada*0.7 <<kWh/kW>>	kWh
Gen pot en MWh	'Generación potencial'/1000<<kWh/MWh>>	MWh
Margen- Horario	IF('Demanda Total del Sistema - Horaria'<=0<<MWh>>,80,('Gen pot en Mwh'- 'Demanda Total del Sistema - Horaria')/'Demanda Total del Sistema - Horaria')	
Precio	FOR(i=1..24 GRAPH('Margen- Horario'[i],0.13,0.3,{440,244,140,80//Min:0;Max:440//})<<\$>>))	\$/kWh
Distribución	MIN(MAX(7790336037.64903 <<\$>>/ARRSUM('Demanda Residencial al Sistema'), 0<<\$>>), 1000<<\$>>))	\$/kWh
Transmisión	3670296825.14578 <<(\$>>/ARRSUM('Demanda Total del Sistema - Horaria')/1000<<kWh/MWh>>	\$/kWh
Comercialización	36.474 <<\$>>))	\$/kWh
Pérdidas	25.223 <<\$>>))	\$/kWh
Restricciones	4.606 <<\$>>))	\$/kWh
Tarifa	FOR(i=1..24 Precio[i]+Transmisión+Distribución+ Comercialización+Pérdidas+Restricciones)	\$/kWh
Tarifa- Auxiliar	ARRSUM(Tarifa)/24*1<<kWh/\$>>	
Capacidad Instalada	IF(C_2=1.5, 1.5<<kW>>, IF(C_2=2,2<<kW>>,3<<kW>>))	kW
Generación total de un Sistema FV en su vida útil	$\sum_{1=1}^{20} \text{capacidad instalada}$ <ul style="list-style-type: none"> * (1 – Factor de desgaste anual)^t * Factor de carga promedio dirio_Colombia * Horas al año 	kW*ho
Costo de los paneles	IF(C_2=1.5,4759250<<\$>>)*'Curva aprendizaje- paneles', IF(C_2=2,7654250<<\$>>)*'Curva aprendizaje- paneles',10069250<<\$>>)*'Curva aprendizaje- paneles')	\$
Costo FV	('Costo de los paneles'+'VPN_Costo Baterías')/'Generación total de un Sistema FV en su vida útil'	\$/kWh*ho)
Curva aprendizaje- paneles	GRAPH(Auxiliar_año,2014,1,{1,0.96,0.94,0.92,0.91,0.90,0.89,0.86,0.85,0.82,0.80,0.79,0.78,0.75,0.75,0.75,0.75,0.75,0.75//MIN:0;MAX:1//})	
Auxiliar_año	YEAR()	yr
VPN_Costo Baterías	'Costo de las Baterías'+ 'Costo de las Baterías'*(1+i_Tasa descuento)^(-5)+ 'Costo de las Baterías'*(1+i_Tasa descuento)^(-10)+ 'Costo de las Baterías'*(1+i_Tasa descuento)^(-15)+ 'Costo de las Baterías'*(1+i_Tasa descuento)^(-20)	\$
Costo de las Baterías	IF(C_1=0,200000<<\$>>,0<<\$>>)*'Curva aprendizaje Baterías'	\$

Variable	Ecuación/Valor	Unidad
Curva aprendizaje Baterías	GRAPH(Auxiliar_año,2014,1,{0.994,0.86,0.76,0.68,0.62,0.606,0.6,0.59,0.59,0.59,0.59,0.58,0.57,0.56,0.56,0.56,0.56,0.56,0.56,0.56//Min:0;Max:1;Zoom//})	
Microgeneración FV_Base	'Capacidad instalada'*'Eficiencia Promedio de los paneles'*'% Radiación solar_hora'/1<<ho*Hogar>>	kW/(ho*Hogar)
% Radiación solar_hora	IF(C_1=0,'% Radiación solar auxiliar_CB','% Radiación solar auxiliar_SB')	
Crecimiento de la demanda	GRAPH(YEAR(),2014,1,'Tasa de Crecimiento Demanda de Energía No residencial'/12) * 'Nivel Demanda No residencial del Sistema' * 1<<1/mo>>	MWh/mo
Nivel Demanda No residencial del Sistema	38142600<<MWh>>	MWh
Demanda No Residencial	'Nivel Demanda No residencial del Sistema'*'% Horario de Demanda No residencial'/365	MWh
Demanda Total del Sistema – Horaria	IF(C_3=0,IF('Demanda Residencial al Sistema'<0<<kWh>>,'Demanda No Residencial', 'Demanda No Residencial'+'Demanda Residencial al Sistema'/1000<<kWh/MWh>>), 'Demanda No Residencial'+'Demanda Residencial al Sistema'/1000<<kWh/MWh>>)	MWh
C_1	Variable de control Escenarios	
C_2	Variable de Control Capacidad Instalada	
C_3	Variable de Control Inyección a la red	

B. Anexo: Difusión de sistemas de 0.5 kW

A continuación se presentan los resultados de la difusión de sistemas de 0.5 kW sin baterías.

Figura B-1: Hogares Potenciales y Hogares Adoptadores – 0.5 kW- sin baterías- Elaboración propia.

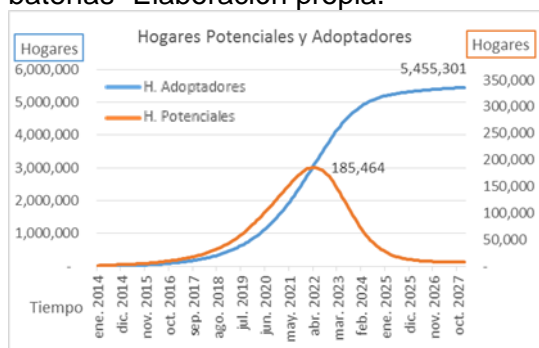


Figura B-2: Tarifa de la red – 0.5 kW- sin baterías- Elaboración propia.

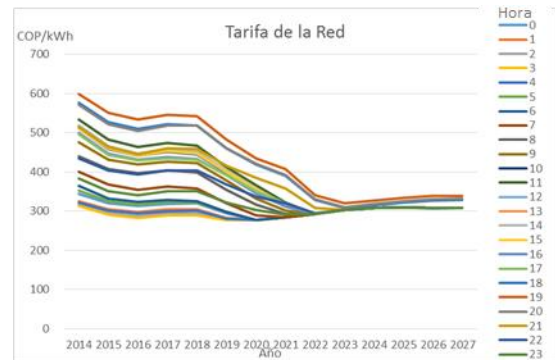


Figura B-3: Curva de carga del sector residencial – 0.5 kW- sin baterías- Elaboración propia.

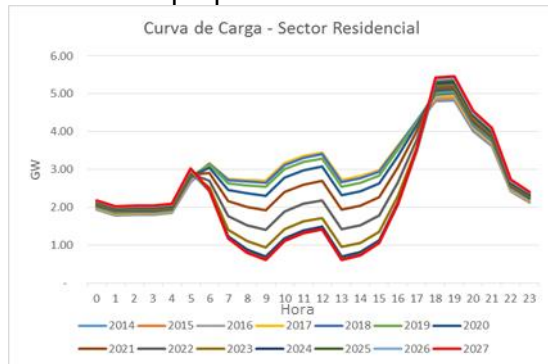
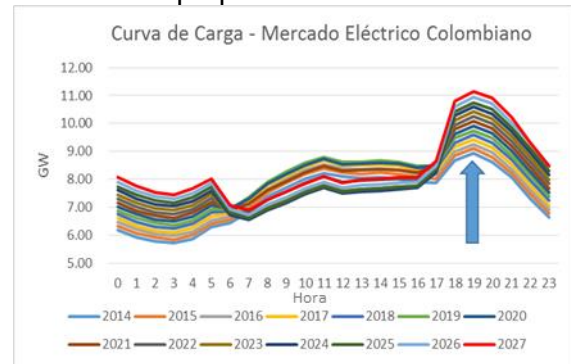


Figura B-4: Curva de carga del mercado eléctrico colombiano – 0.5 kW- sin baterías- Elaboración propia.



Los indicadores de estos resultados se presentan en la Tabla B-1

Tabla B-1: Indicadores escenario de instalación 0.5 kW

Políticas	Caso base	Instalación 0.5 kW – Sin baterías
Indicadores		
%HA [%]	34.73%	34.71%
AP [Hogares]	138600	185464
%Ad/P [%]	78.9%	59.1%
 Tp [mes/Año]	Feb/2022	abr 2022
Velocidad de adopción [años]	8.2	8.3
Microgeneración Total [GW]	5693.5	1887.03
Micro/ Gen. Total [%]	16.74%	5.55%
Excedentes de Generación [GW]	2083.1	0
Valor máximo [COP/kWh]	1,211.61	622.81
Valor Mínimo [COP/kWh]	280.19	274.05
Valor promedio [COP/kWh]	642.11	352.00
Desviación estándar	351.28	73.13

Los resultados de la instalación de sistemas de 0.5 kW, muestran que, aunque los ratios de adopción se mantienen constantes, la microgeneración total del sistema es mucho más baja y no se producen excedentes de generación en el mercado; lo que ocasiona que éste no colapse durante el tiempo de simulación, manteniendo una tarifa máxima que no supera los 700 COP/kWh

Referencias

- Agterbosch, S., Meertens, R. M., & Vermeulen, W. J. V. (2009). The relative importance of social and institutional conditions in the planning of wind power projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 393–405. doi:10.1016/j.rser.2007.10.010
- Arango, S., Franco, C., Olaya, Y., Naranjo, M., Alcaráz, S., & Gutiérrez, F. (2012). *Análisis de diseño de esquemas de subsidios en los servicios públicos colombianos por medio de economía experimental y simulación* (1st ed.). Medellín: Universidad Nacional de Colombia (Medellín).
- Balcombe, P., Rigby, D., & Azapagic, A. (2013). Motivations and barriers associated with adopting microgeneration energy technologies in the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 655–666. doi:10.1016/j.rser.2013.02.012
- Balcombe, P., Rigby, D., & Azapagic, A. (2014). Investigating the importance of motivations and barriers related to microgeneration uptake in the UK. *Applied Energy*, 130, 403–418. doi:10.1016/j.apenergy.2014.05.047
- Balcombe, P., Rigby, D., & Azapagic, A. (2015). Environmental impacts of microgeneration: Integrating solar PV, Stirling engine CHP and battery storage. *Applied Energy*, 139, 245–259. doi:10.1016/j.apenergy.2014.11.034
- Banco de la República. (2015). Tasas de captación semanales y mensuales.
- 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
- Baskaran, R., Managi, S., & Bendig, M. (2013). A public perspective on the adoption of microgeneration technologies in New Zealand: A multivariate probit approach. *Energy Policy*, 58, 177–188. doi:10.1016/j.enpol.2013.02.047
- Bass, F. M. (1969). A NEW PRODUCT GROWTH FOR MODEL CONSUMER. *Management Science*, 15(5), 215–227. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2628128>
- Behrangrad, M. (2015). A review of demand side management business models in the electricity market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 270–283. doi:10.1016/j.rser.2015.03.033
- Bergman, N., & Eyre, N. (2011). What role for microgeneration in a shift to a low carbon domestic energy sector in the UK? *Energy Efficiency*, 4(3), 335–353. doi:10.1007/s12053-011-9107-9
- Borchers, A. M., Xiarchos, I., & Beckman, J. (2014). Determinants of wind and solar energy system adoption by U.S. farms: A multilevel modeling approach. *Energy Policy*, 69, 106–115. doi:10.1016/j.enpol.2014.02.014

- Branker, K., Pathak, M. J. M., & Pearce, J. M. (2011). A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4470–4482. doi:10.1016/j.rser.2011.07.104
- Bunn, D. W., & Larsen, E. R. (1992). Sensitivity of reserve margin to factors influencing investment behaviour in the electricity market of England and Wales. *Energy Policy*, 20(5), 420–429. doi:10.1016/0301-4215(92)90063-8
- Cadavid, L. (2015). *Aproximación metodológica al análisis de la difusión de innovaciones en productos que utilizan tecnologías limpias considerando elecciones individuales de adopción*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/47098/>
- Castaño, N. (2013). *Una aproximación a la adopción de medidores inteligentes en el mercado eléctrico colombiano y su influencia en la demanda*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Retrieved from <http://http://www.bdigital.unal.edu.co/9393/>
- Cherrington, R., Goodship, V., Longfield, A., & Kirwan, K. (2013). The feed-in tariff in the UK: A case study focus on domestic photovoltaic systems. *Renewable Energy*, 50, 421–426. doi:10.1016/j.renene.2012.06.055
- Chowdhury, S., Sumita, U., Islam, A., & Bedja, I. (2014). Importance of policy for energy system transformation: Diffusion of PV technology in Japan and Germany. *Energy Policy*, 68, 285–293. doi:10.1016/j.enpol.2014.01.023
- Claudy, M. C., Michelsen, C., & O'Driscoll, A. (2011). The diffusion of microgeneration technologies – assessing the influence of perceived product characteristics on home owners' willingness to pay. *Energy Policy*, 39(3), 1459–1469. doi:10.1016/j.enpol.2010.12.018
- Claudy, M. C., Michelsen, C., O'Driscoll, A., & Mullen, M. R. (2010). Consumer awareness in the adoption of microgeneration technologies: An empirical investigation in the Republic of Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2154–2160. doi:10.1016/j.rser.2010.03.028
- Congreso de la República de Colombia. Ley 142 de 1994. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones. (1994). Colombia. Retrieved from http://www.minminas.gov.co/documents/10180/667537/Ley_143_1994.pdf/c2cfbda4-fe12-470e-9d30-67286b9ad17e
- Congreso de la República de Colombia. Ley 143 de 1994. Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia ener (1994). Colombia. Retrieved from http://www.minminas.gov.co/documents/10180/667537/Ley_143_1994.pdf/c2cfbda4-fe12-470e-9d30-67286b9ad17e
- Congreso de la República de Colombia. Ley 1715. Por la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional (2014). Colombia. Retrieved from http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/LEY_1715_DEL_13_DE_MAYO_DE_2014.pdf
- CREG. Resolución 056 de 2007 (2007). Colombia. Retrieved from

- <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resolución-2007-CREG056-2007#>.
- CREG. Resolución 097 de 2008 (2008). Colombia. Retrieved from <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/d1dba6c9018b37ce0525785a007a709b?OpenDocument>
- DANE. (2010). *Boletín. Censo General 2005. Perfil Colombia*. Bogotá. Retrieved from http://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/00000T7T000.PDF
- DANE. (2014). *Encuesta Nacional de Calidad de vida- 2014*. Bogotá. Retrieved from <http://www.dane.gov.co/index.php/esp/estadisticas-sociales/calidad-de-vida-ecv/160-uncategorised/6014-encuesta-nacional-de-calidad-de-vida-2014>
- del Río González, P. (2008). Ten years of renewable electricity policies in Spain: An analysis of successive feed-in tariff reforms. *Energy Policy*, 36(8), 2917–2929. doi:10.1016/j.enpol.2008.03.025
- der Veen, R. A. C., & De Vries, L. J. (2009). The impact of microgeneration upon the Dutch balancing market. *Energy Policy*, 37(7), 2788–2797. doi:10.1016/j.enpol.2009.03.015
- Dyner, I. (2000). Energy modelling platforms for policy and strategy support. *Journal of the Operational Research Society*, 51(2), 136–144.
- Dyner, I., Franco, C., & Arango, S. (2008). *El mercado mayoristas de electricidad colombiano* (1st ed.). Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.
- Dyner, I., & Franco, C. J. (2004). Consumers' bounded rationality: the case of competitive energy markets. *Systems Research and Behavioral Science*, 21(4), 373–389. doi:10.1002/sres.644
- Eid, C., Reneses Guillén, J., Frías Marín, P., & Hakvoort, R. (2014). The economic effect of electricity net-metering with solar PV: Consequences for network cost recovery, cross subsidies and policy objectives. *Energy Policy*, 75, 244–254. doi:10.1016/j.enpol.2014.09.011
- El Chaar, L., Lamont, L. A., & El Zein, N. (2011). Review of photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2165–2175. doi:10.1016/j.rser.2011.01.004
- EPIA. (2014). *Global Market Outlook for Photovoltaics*. Brussels, Belgium. Retrieved from http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/44_epia_gmo_report_ver_17_mr.pdf
- Ford, A. (1983). Using simulation for policy evaluation in the electric utility industry. *Simulation*. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0020720256&partnerID=tZOtx3y1>
- Franco, C. J., Castaneda, M., & Dyner, I. (2015). Simulating the new British Electricity-Market Reform. *European Journal of Operational Research*. doi:10.1016/j.ejor.2015.02.040
- Genus, A. (2012). Changing the rules? Institutional innovation and the diffusion of microgeneration. *Technology Analysis & Strategic Management*, (September 2014), 37–41. doi:10.1080/09537325.2012.705122
- Gilbert, N., & Troitzsch, K. G. (2005). *Simulation for the Social Scientist* (Second). Mc Graw-Hill Education.

- Hayward, J. A., & Graham, P. W. (2013). A global and local endogenous experience curve model for projecting future uptake and cost of electricity generation technologies. *Energy Economics*, *40*, 537–548. doi:10.1016/j.eneco.2013.08.010
- Hledik, R. (2014). Rediscovering Residential Demand Charges. *The Electricity Journal*, *27*(7), 82–96. doi:10.1016/j.tej.2014.07.003
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2014). Calculation of Solar Insolation. Retrieved June 3, 2015, from <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/calculation-of-solar-insolation>
- Hsu, C.-W. (2012). Using a system dynamics model to assess the effects of capital subsidies and feed-in tariffs on solar PV installations. *Applied Energy*, *100*, 205–217. doi:10.1016/j.apenergy.2012.02.039
- IDEAM. (n.d.). Promedios Climatológicos 1981-2010. Retrieved February 14, 2014, from <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/812>
- IEA. (2014a). *Medium-Term Renewable Energy Market Report 2014* (2014th ed.). Paris: International Energy Agency. doi:10.1787/renewmar-2014-en
- IEA. (2014b). *Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy* (2014th ed.). Paris: International Energy Agency. Retrieved from http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf
- Islam, T. (2014). Household level innovation diffusion model of photo-voltaic (PV) solar cells from stated preference data. *Energy Policy*, *65*, 340–350. doi:10.1016/j.enpol.2013.10.004
- Jacobsson, S., & Lauber, V. (2006). The politics and policy of energy system transformation—explaining the German diffusion of renewable energy technology. *Energy Policy*, *34*(3), 256–276. doi:10.1016/j.enpol.2004.08.029
- Jiménez, M., Cadavid, L., & Franco, C. (2014). Scenarios of photovoltaic grid parity in Colombia. *Dyna*, *188*(81), 237–245. doi:10.15446/dyna.v81n188.42165
- Joshi, A. S., Dincer, I., & Reddy, B. V. (2009). Performance analysis of photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(8), 1884–1897. doi:10.1016/j.rser.2009.01.009
- Karakaya, E., Hidalgo, A., & Nuur, C. (2015). Motivators for adoption of photovoltaic systems at grid parity: A case study from Southern Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *43*, 1090–1098. doi:10.1016/j.rser.2014.11.077
- Keirstead, J. (2007). Behavioural responses to photovoltaic systems in the UK domestic sector. *Energy Policy*, *35*(8), 4128–4141. doi:10.1016/j.enpol.2007.02.019
- Laciana, C. E., Rovere, S. L., & Podestá, G. P. (2013). Exploring associations between micro-level models of innovation diffusion and emerging macro-level adoption patterns. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *392*(8), 1873–1884. doi:10.1016/j.physa.2012.12.023
- Larsen, E. R., Dyner, I., Bedoya, L., & Franco, C. J. (2004). Lessons from deregulation in Colombia: successes, failures and the way ahead. *Energy Policy*, *32*(15), 1767–1780. doi:10.1016/S0301-4215(03)00167-8

- Luthander, R., Widén, J., Nilsson, D., & Palm, J. (2015). Photovoltaic self-consumption in buildings : A review. *Applied Energy*, *142*, 80–94. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.028
- Maribu, K. M., Firestone, R. M., Marnay, C., & Siddiqui, A. S. (2007). Distributed energy resources market diffusion model. *Energy Policy*, *35*(9), 4471–4484. doi:10.1016/j.enpol.2007.03.005
- Mills, B., & Schleich, J. (2012). Residential energy-efficient technology adoption, energy conservation, knowledge, and attitudes: An analysis of European countries. *Energy Policy*, *49*, 616–628. doi:10.1016/j.enpol.2012.07.008
- Movilla, S., Miguel, L. J., & Blázquez, L. F. (2013). A system dynamics approach for the photovoltaic energy market in Spain. *Energy Policy*, *60*, 142–154. doi:10.1016/j.enpol.2013.04.072
- Naill, R. F. (1992). A system dynamics model for national energy policy planning. *System Dynamics Review*, *8*(1), 1–19. doi:10.1002/sdr.4260080102
- Nakata, T., Silva, D., & Rodionov, M. (2011). Application of energy system models for designing a low-carbon society. *Progress in Energy and Combustion Science*, *37*(4), 462–502. doi:10.1016/j.pecs.2010.08.001
- NREL. (2015). Best Research-Cell Efficiencies. Retrieved from http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
- Ochoa, C., Dyer, I., & Franco, C. J. (2013). Simulating power integration in Latin America to assess challenges, opportunities, and threats. *Energy Policy*, *61*, 267–273. doi:10.1016/j.enpol.2013.07.029
- Peters, M., Schmidt, T. S., Wiederkehr, D., & Schneider, M. (2011). Shedding light on solar technologies-A techno-economic assessment and its policy implications. *Energy Policy*, *39*(10), 6422–6439. doi:10.1016/j.enpol.2011.07.045
- Pfenninger, S., Hawkes, A., & Keirstead, J. (2014). Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *33*, 74–86. doi:10.1016/j.rser.2014.02.003
- Provance, M., Donnelly, R. G., & Carayannis, E. G. (2011). Institutional influences on business model choice by new ventures in the microgenerated energy industry. *Energy Policy*, *39*(9), 5630–5637. doi:10.1016/j.enpol.2011.04.031
- Rahmandad, H., & Sterman, J. (2008). Heterogeneity and Network Structure in the Dynamics of Diffusion: Comparing Agent-Based and Differential Equation Models. *Management Science*, *54*(5), 998–1014. doi:10.1287/mnsc.1070.0787
- Sauter, R., & Watson, J. (2007). Strategies for the deployment of micro-generation: Implications for social acceptance. *Energy Policy*, *35*(5), 2770–2779. doi:10.1016/j.enpol.2006.12.006
- Scarpa, R., & Willis, K. (2010). Willingness-to-pay for renewable energy: Primary and discretionary choice of British households' for micro-generation technologies. *Energy Economics*, *32*(1), 129–136. doi:10.1016/j.eneco.2009.06.004
- Serpa, P., & Zilles, R. (2007). The diffusion of photovoltaic technology in traditional communities: the contribution of applied anthropology. *Energy for Sustainable Development*, *11*(1), 78–87. doi:10.1016/S0973-0826(08)60566-9

- Simpson, G., & Clifton, J. (2015). The emperor and the cowboys: The role of government policy and industry in the adoption of domestic solar microgeneration systems. *Energy Policy*, *81*, 141–151. doi:10.1016/j.enpol.2015.02.028
- Solangi, K., Islam, M., & Saidur, R. (2011). A review on global solar energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(4), 2149–2163. doi:10.1016/j.rser.2011.01.007
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. United States: McGraw-Hill Higher Education.
- SUI. (2014). Sistema Único de Información de Servicios Públicos (SUI). Retrieved from http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=ele_com_096
- SUI. (2016). Sistema Único de Información de Servicios Públicos (SUI). Retrieved February 29, 2016, from http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=ele_com_095
- Thiam, D. R. (2011). An energy pricing scheme for the diffusion of decentralized renewable technology investment in developing countries. *Energy Policy*, *39*(7), 4284–4297. doi:10.1016/j.enpol.2011.04.046
- Toledo, O. M., Oliveira Filho, D., & Diniz, A. S. A. C. (2010). Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(1), 506–511. doi:10.1016/j.rser.2009.08.007
- Troitzsch, K. G. (2013). Historical Introduction. In B. Edmonds & R. Meyer (Eds.), *Simulating Social Complexity* (pp. 13–21). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-93813-2
- Tyagi, V. V., Rahim, N. A. A., Rahim, N. A., & Selvaraj, J. A. /L. (2013). Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *20*, 443–461. doi:10.1016/j.rser.2012.09.028
- UPME. (2008). *Proyección de demanda de energía eléctrica y potencia. Revisión marzo de 2008*. Bogotá. Retrieved from http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/proyecci%C3%B3n_demanda_ee_mar_2008.pdf
- UPME. (2015a). Plan de Expansión de Referencia Generación-Transmisión 2014-2028. Bogotá. Retrieved from http://www.upme.gov.co/Docs/Plan_Expansion/2015/Plan_GT_2014-2028.pdf
- UPME. (2015b). Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2015. Bogotá. Retrieved from http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN_IdearioEnergetico2015.pdf
- UPME. Resolución 281 del 2015 (2015). Bogotá. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=8vsYFEo4GPg&list=PLpuDUUpB0osJmZQ0a3n6imXirSu0QAZlqF&index=181>
- Watson, J., Sauter, R., Bahaj, B., James, P., Myers, L., & Wing, R. (2008). Domestic micro-generation: Economic, regulatory and policy issues for the UK. *Energy Policy*, *36*(8), 3095–3106. doi:10.1016/j.enpol.2008.04.028
- Widén, J. (2014). Improved photovoltaic self-consumption with appliance scheduling in 200 single-family buildings. *Applied Energy*, *126*, 199–212.

- doi:10.1016/j.apenergy.2014.04.008
- Wirth, S. (2014). Communities matter: Institutional preconditions for community renewable energy. *Energy Policy*, 70, 236–246. doi:10.1016/j.enpol.2014.03.021
- Wirth, S., Markard, J., Truffer, B., & Rohracher, H. (2013). Informal institutions matter: Professional culture and the development of biogas technology. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 8, 20–41. doi:10.1016/j.eist.2013.06.002
- WMO. (2008). Part I. Measurement of Meteorological Variables. In *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (7th ed., Vol. I & II, pp. 1.8–1 to 1.9–1). Geneva 2: Chairperson, Publications Board.
- Xm. (2015a). Demanda de Energía 2014. Retrieved August 15, 2015, from <http://www.xm.com.co/Pages/DemandaEnergia-2014.aspx>
- Xm. (2015b). Descripción del Sistema Eléctrico Colombiano. Retrieved from <http://www.xm.com.co/>
- Xm. (2015c). Información Inteligente. Retrieved January 1, 2015, from <http://informacioninteligente10.xm.com.co/pages/default.aspx>
- Zapata, M. (2014). *Políticas para la autogestión de electricidad en el sector residencial urbano de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Zhang, Y., Song, J., & Hamori, S. (2011). Impact of subsidy policies on diffusion of photovoltaic power generation. *Energy Policy*, 39(4), 1958–1964. doi:10.1016/j.enpol.2011.01.021