



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Evaluación de políticas para la autogestión de la electricidad en el sector comercial no regulado en Colombia: caso supermercados.**

**Nathalie Ramírez Giraldo**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la decisión Medellín,  
Colombia  
2018

# **Evaluación de políticas para la autogestión de la electricidad en el sector comercial no regulado en Colombia: caso supermercados.**

**Nathalie Ramírez Giraldo**

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

Director:

Carlos Jaime Franco Cardona, Ph. D.

Co-directora:

Laura Milena Cárdenas Ardila, Ph. D.

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la decisión Medellín,  
Colombia  
2018

## Agradecimientos

Una tesis es un trabajo de construcción colectiva, es por esto que agradezco especialmente a las siguientes personas y entidades que con sus aportes permitieron el desarrollo exitoso de esta tesis:

- A mis padres y hermano por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, quienes nunca dudaron que podía lograrlo.
- Al profesor Carlos Jaime Franco y Laura Milena Cárdenas, por sus orientaciones y lineamientos acertados y oportunos.
- A Mauricio Bedoya por la ayuda y orientación brindada durante este proceso.
- A Walter Matínez y al equipo de Azimut energía por la disposición y apoyo en temas de eficiencia energética.
- Al Seminario CeIBA y los miembros del grupo de investigación Sistemas e Informática por los aportes en el proceso de elaboración de esta tesis.
- A la Universidad Nacional de Colombia quien no solo me abrió sus puertas, sino que me dio la oportunidad de financiar económicamente mi posgrado a través de su programa “Beca de facultad”.
- A la Facultad de Minas y su programa de movilidad por facilitar presentar el trabajo en otros espacios y acoger sugerencias oportunas.

Gracias a todos por ayudarme a llegar hasta aquí.

## Resumen

Dentro del sector comercial, los supermercados tienen una de las tasas más altas de consumo de energía por metro cuadrado (EIA, 2018). Se trata de un subsector con una evidente expansión comercial, un destacado crecimiento en el consumo de energía y la generación de gases de efecto invernadero. La posibilidad de ahorrar y mejorar la eficiencia energética en este subsector es indudable. Los supermercados tienen altas posibilidades de contribuir a la mitigación del cambio climático debido a la reducción de sus emisiones como resultado del desarrollo de fuentes alternativas para la generación de energía eléctrica, la eficiencia energética y la conservación de la energía.

Los esfuerzos de los países por enfrentar los efectos del cambio climático, han hecho que las fuentes no convencionales de energías renovables y las prácticas de eficiencia energética, reciban mayor atención por parte de los gobiernos, industrias y tomadores de decisión. Sin embargo, en Colombia se hace necesario conocer sobre los procesos de difusión de estas tecnologías y la efectividad de políticas para acelerar su adopción en el mercado. Esta investigación emplea la herramienta dinámica de sistemas para analizar políticas que incentiven la difusión de autogestión en el subsector comercial como son los supermercados en Colombia. Se desarrollaron simulaciones para diferentes tipos de estrategias: fiscales, financieras, de comunicación y difusión. Los resultados arrojados señalan que las políticas dirigidas a eliminar las barreras de entrada, impulsan un mercado de autogestión de baja intensidad de carbono en Colombia y que la ejecución combinada de estrategias de autogestión es más eficaz que la aplicación aislada de cada una.

**Palabras claves:** Dinámica de sistemas; Simulación; Modelado; Difusión; Supermercados; Sector comercial; Autogestión; Microgeneración; Eficiencia energética; Conservación de la energía; Análisis de políticas.

## Abstract

Within the commercial sector, supermarkets have one of the highest rates of energy consumption per square meter (EIA, 2018). It is a subsector with an evident commercial expansion, an outstanding growth in the consumption of energy and the generation of greenhouse gases. The possibility of saving and improving energy efficiency in this subsector is unquestionable. Supermarkets have a high potential to contribute to the mitigation of climate change by reducing their emissions as a result of the development of alternative sources for the generation of electric power, energy efficiency and energy conservation.

The countries efforts to confront the effects of climate change have meant that unconventional sources of renewable energies and energy efficiency practices receive greater attention from governments, industries and decision makers. However, in Colombia it is necessary to know about the diffusion processes of these technologies and the effectiveness of policies to accelerate their adoption in the market. This research uses the dynamic systems tool to analyze policies that encourage the dissemination of self-management in the commercial subsector such as supermarkets in Colombia. Simulations were developed for different types of strategies: fiscal, financial, communication and dissemination. The results found indicate that policies aimed at eliminating barriers to entry drive a low-carbon self-management market in Colombia and that the joint implementation of self-management strategies is more effective than the isolated application of each one.

**Keywords:** Systems dynamics; Simulation; Modeling; Diffusion; Supermarkets; Commercial section; Self-management; Self-generation; Energy efficiency; Energy conservation; Policy analysis.

## CONTENIDO

Resumen.....	4
Lista de gráficos.....	9
Lista de tablas.....	13
Lista de abreviaturas .....	15
Introducción .....	16
Capítulo 1. Marco teórico.....	18
1.1. Términos y definiciones técnicas .....	18
1.2. Autogestión de la electricidad.....	20
1.2.1. Microgeneración eléctrica.....	20
1.2.1.1. Penetración de tecnología FV en el mundo .....	22
1.2.1.2. Penetración de tecnología FV en Colombia .....	24
1.2.2. Eficiencia energética.....	26
1.2.2.1. Penetración eficiencia energética en el mundo .....	26
1.2.2.2. Penetración eficiencia energética en Colombia .....	30
1.2.3. Conservación de energía eléctrica .....	31
1.2.3.1. Penetración conservación de energía eléctrica en el mundo .....	32
1.2.3.2. Penetración conservación de energía eléctrica en Colombia .....	33
1.3. Políticas de autogestión sector comercial.....	34
1.3.1. Políticas microgeneración a nivel mundial.....	34
1.3.2. Políticas de eficiencia energética en el mundo .....	36
1.3.3. Políticas de Conservación de energía eléctrica en el mundo .....	38
1.4. Contexto regulatorio Colombiano.....	39
1.4.1. Políticas de Microgeneración con FV en Colombia .....	39
1.4.2. Políticas de Eficiencia energética en Colombia .....	43
1.4.1. Políticas de conservación de energía eléctrica en Colombia .....	47
1.5. Conclusiones del capítulo.....	47
Capítulo 2. Estado del arte .....	48
2.1. Revisión de literatura .....	48
2.2. Objetivos .....	64
2.2.1. Objetivo general .....	64
2.2.2. Objetivos específicos .....	64
2.3. Alcance .....	65
2.4. Conclusiones del capítulo.....	65
Capítulo 3. Metodología.....	66

3.1.	Dinámica de sistemas.....	66
3.2.	Etapas metodológicas .....	67
3.3.	Conclusiones del capítulo.....	68
Capítulo 4. Modelo de simulación.....		69
4.1.	Reglas de decisión del modelo .....	69
4.2.	Propósito del modelo .....	70
4.3.	Hipótesis dinámica microgeneración .....	70
4.4.	Análisis por ciclos de realimentación microgeneración .....	71
4.5.	Diagrama de flujos y niveles microgeneración.....	73
4.5.1.	Intensidad energética de la red.....	75
4.5.2.	Intensidad energética arreglo solar.....	76
4.5.3.	Costo nivelado de energía.....	73
4.5.4.	Modelo de adopción de sistemas de generación.....	76
4.6.	Hipótesis dinámica eficiencia energética .....	77
4.7.	Análisis por ciclos de realimentación eficiencia energética .....	78
4.8.	Diagrama de flujos y niveles eficiencia energética .....	80
4.8.1.	Intensidad energética tipo de tecnología (iluminación, ventilación y refrigeración) ...	80
4.8.2.	Costo mensual equivalente eficiencia energética.....	81
4.8.3.	Modelo de sustitución de tecnologías ineficientes.....	81
4.9.	Hipótesis dinámica conservación de la energía .....	82
4.10.	Análisis por ciclos de realimentación conservación de la energía .....	83
4.11.	Diagrama de flujos y niveles conservación de la energía .....	85
4.11.1.	Intensidad energética con prácticas de conservación de la energía.....	86
4.11.2.	Costo mensual equivalente conservación de la energía .....	89
4.11.3.	Modelo de aplicación de prácticas de conservación de la energía .....	89
4.12.	Supuestos y especificaciones .....	90
4.13.	Validación .....	94
4.13.1.	Pruebas directas a la estructura.....	95
4.13.2.	Pruebas de la estructura orientadas al comportamiento .....	97
4.14.	Conclusiones del capítulo.....	102
Capítulo 5. Resultados del modelo.....		103
5.1.	Análisis del caso base .....	103
5.2.	Evaluación de políticas microgeneración .....	104
5.3.	Evaluación comparativa del desempeño de las políticas para microgeneración.....	106
5.4.	Evaluación de políticas de eficiencia energética .....	107

5.5.	Evaluación comparativa del desempeño de las políticas para eficiencia energética .....	109
5.6.	Evaluación de políticas de conservación de la energía .....	115
5.7.	Evaluación comparativa del desempeño de las políticas para conservación de la energía	116
5.8.	Combinación de estrategias .....	122
5.9.	Conclusiones del capítulo.....	124
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones .....		126
6.1.	Reporte del cumplimiento de objetivos.....	126
6.1.1	Objetivos específicos 1 y 2 .....	126
6.1.2	Objetivo específico 3 .....	126
6.1.3	Objetivo general .....	127
6.2.	Conclusiones y aportes específicos de la tesis .....	127
6.3.	Recomendaciones y trabajo futuro .....	128
6.4.	Divulgación de resultados .....	128
Referencias .....		130
A.	Anexo: Modelo de simulación PowerSim Studio.....	137
B.	Anexo: Ecuaciones del modelo de simulación.....	143

## Lista de gráficos

Gráfico 1 Capacidad Global de Solar FV, adiciones anuales, 2007-2017 .....	23
Gráfico 2 Capacidad Global de Solar FV, por países o regiones, 2007-2017 .....	23
Gráfico 3 Uso global de energía final con y sin eficiencia energética, 2000-17 .....	27
Gráfico 4 Descomposición del uso final de energía en las principales economías del mundo .....	27
Gráfico 5 Cambio en la demanda global de energía primaria, 2011-17 .....	28
Gráfico 6 Emisiones de gases de efecto invernadero en el NPS y EWS, 2000-40 .....	28
Gráfico 7 Emisiones de contaminantes del aire en el EWS, 2015-40 .....	29
Gráfico 8 Usos de la electricidad del subsector supermercados .....	30
Gráfico 9 Consumo energético y pérdidas por sectores económicos .....	31
Gráfico 10 Proyectos de FNCER recibidos en Colombia .....	42
Gráfico 11 Intervalo de potencia por tipo de fuente .....	42
Gráfico 12 Capacidad instalada por tipo de fuente .....	42
Gráfico 13 Sector al que va dirigido el proyecto de FNCER .....	43
Gráfico 14 Solicitudes de Proyectos de eficiencia energética y gestión de las energías recibidas .....	46
Gráfico 15 Etapas metodológicas Sterman (2000) .....	67
Gráfico 16 Marco general de toma de decisiones del consumidor .....	69
Gráfico 17 Hipótesis dinámica de la adopción de tecnología solar FV en el subsector comercial supermercados de Colombia. Elaboración propia .....	71
Gráfico 18 Diagrama causal microgeneración. Ciclo B1. Elaboración propia .....	71
Gráfico 19 Diagrama causal microgeneración. Ciclo R1. Elaboración propia .....	72
Gráfico 20 Diagrama causal microgeneración. Ciclo R2. Elaboración propia .....	72
Gráfico 21 Diagrama causal microgeneración. Ciclo R3. Elaboración propia .....	73
Gráfico 22 Curva de carga supermercados usuarios no regulados .....	74
Gráfico 23 Hipótesis dinámica difusión de tecnología eficiente en el subsector comercial supermercados de Colombia. Elaboración propia .....	78
Gráfico 24 Diagrama causal EE. Ciclo B1. Elaboración propia .....	78
Gráfico 25 Diagrama causal EE. Ciclo R1. Elaboración propia .....	79
Gráfico 26 Diagrama causal EE. Ciclo R2. Elaboración propia .....	79
Gráfico 27 Diagrama causal EE. Variables exógenas. Elaboración propia .....	80
Gráfico 28 Hipótesis dinámica difusión de prácticas conservación de la energía en el subsector comercial supermercados de Colombia. Elaboración propia .....	83
Gráfico 29 Diagrama causal conservación de la energía. Ciclo B1. Elaboración propia .....	84
Gráfico 30 Diagrama causal conservación de la energía. Ciclo R1. Elaboración propia .....	84
Gráfico 31 Diagrama causal conservación de la energía. Ciclo R2. Elaboración propia .....	85
Gráfico 32 Diagrama causal conservación de la energía. Variables exógenas. Elaboración propia .....	85
Gráfico 33 Potencial de costo – ahorro de la implementación de sensores de luz diurna .....	88
Gráfico 34 Consumo de energía eléctrica por sectores económicos año 2016 .....	91
Gráfico 35 Proporción de consumo de energía eléctrica desagregada sector comercial año 2016 .....	91
Gráfico 36 Proporción del consumo de energía eléctrica usuarios no regulados subsector supermercados año 2016 .....	92

Gráfico 37 Demanda total de supermercados sin crecimiento del PIB y con cero supermercados. Elaboración propia .....	98
Gráfico 38 Supermercados que conocen y adoptan la tecnología sin crecimiento del PIB y con cero supermercados. Elaboración propia .....	98
Gráfico 39 Supermercados totales y supermercados conocen y adoptan con el precio de la electricidad de la red igual a cero. Elaboración propia.....	99
Gráfico 40 Sensibilidad al método de integración. Elaboración propia.....	99
Gráfico 41 Sensibilidad al tiempo de paso. Elaboración propia.....	100
Gráfico 42 Análisis de sensibilidad de supermercados conocen y adoptan al parámetro de influencias externas ( $\rho$ ). Elaboración propia.....	101
Gráfico 43 Análisis de sensibilidad de supermercados conocen y adoptan al parámetro de influencias internas ( $q$ ). Elaboración propia.....	101
Gráfico 44 Análisis de sensibilidad de supermercados conocen y adoptan a variaciones en el costo del arreglo solar. Elaboración propia .....	102
Gráfico 45 Supermercados que adoptan tecnología solar FV, EE y conservación de la energía caso base. Elaboración propia .....	103
Gráfico 46 Supermercados que no adoptan tecnología solar FV, EE y conservación de la energía caso base. Elaboración propia.....	103
Gráfico 47 Emisiones supermercados que adoptan y no tecnología solar FV, EE y conservación de la energía caso base. Elaboración propia.....	104
Gráfico 48 Demanda supermercados que adoptan y no tecnología solar FV, EE y conservación de la energía caso base. Elaboración propia.....	104
Gráfico 49 Supermercados que adoptan microgeneración para diferentes políticas. Elaboración propia .....	106
Gráfico 50 Supermercados que no adoptan microgeneración para diferentes políticas. Elaboración propia .....	106
Gráfico 51 Emisiones evitadas supermercados con microgeneración para diferentes políticas. Elaboración propia .....	106
Gráfico 52 Demanda de energía solar FV supermercados con microgeneración para diferentes políticas. Elaboración propia .....	106
Gráfico 53 Supermercados que adoptan tecnología LED para diferentes políticas. Elaboración propia .....	110
Gráfico 54 Supermercados que no adoptan tecnología LED para diferentes políticas. Elaboración propia .....	110
Gráfico 55 Emisiones supermercados con tecnología LED para diferentes políticas. Elaboración propia .....	110
Gráfico 56 Demanda de energía supermercados con tecnología LED para diferentes políticas. Elaboración propia .....	110
Gráfico 57 Supermercados que adoptan tecnología Chiller condensado por agua para diferentes políticas. Elaboración propia .....	112
Gráfico 58 Supermercados que no adoptan tecnología Chiller condensado por agua para diferentes políticas. Elaboración propia .....	112

Gráfico 59 Emisiones supermercados con tecnología Chiller condensado por agua para diferentes políticas. Elaboración propia .....	112
Gráfico 60 Demanda de energía supermercados con tecnología Chiller condensado por agua para diferentes políticas. Elaboración propia.....	112
Gráfico 61 Supermercados que adoptan tecnología Rack de media con tecnología VRF para diferentes políticas. Elaboración propia .....	114
Gráfico 62 Supermercados que no adoptan tecnología Rack de media con tecnología VRF para diferentes políticas. Elaboración propia.....	114
Gráfico 63 Emisiones supermercados con tecnología Rack de media con tecnología VRF para diferentes políticas. Elaboración propia .....	114
Gráfico 64 Demanda de energía supermercados con tecnología Rack de media con tecnología VRF para diferentes políticas. Elaboración propia.....	114
Gráfico 65 Supermercados que adoptan sensores de iluminación para diferentes políticas. Elaboración propia .....	117
Gráfico 66 Supermercados que no adoptan sensores de iluminación para diferentes políticas. Elaboración propia .....	117
Gráfico 67 Demanda de energía supermercados con sensores de iluminación para diferentes políticas. Elaboración propia .....	117
Gráfico 68 Emisiones supermercados con sensores de iluminación para diferentes políticas. Elaboración propia .....	117
Gráfico 69 Supermercados que no aplican control de la temperatura del sistema de aire acondicionado. Elaboración propia .....	118
Gráfico 70 Supermercados que aplican control de la temperatura del sistema de aire acondicionado. Elaboración propia .....	118
Gráfico 71 Emisiones supermercados que aplican control de la temperatura del sistema de aire. Elaboración propia .....	119
Gráfico 72 Demanda de energía supermercados que aplican control de la temperatura del sistema de aire acondicionado. Elaboración propia.....	119
Gráfico 73 Supermercados que no usan cortinas de refrigeración nocturna para diferentes políticas. Elaboración propia .....	120
Gráfico 74 Supermercados que usan cortinas de refrigeración nocturna para diferentes políticas. Elaboración propia .....	120
Gráfico 75 Demanda de energía supermercados que usan cortinas de refrigeración nocturna para diferentes políticas. Elaboración propia.....	121
Gráfico 76 Emisiones supermercados que usan cortinas de refrigeración nocturna para diferentes políticas. Elaboración propia .....	121
Gráfico 77 Emisiones supermercados totales que adoptan y no tecnologías y prácticas de autogestión. Elaboración propia .....	123
Gráfico 78 Demanda de energía supermercados totales que adoptan y no tecnologías y prácticas de autogestión. Elaboración propia .....	123
Gráfico 79 Diagrama de flujos y niveles. Sección de costo nivelado de energía del sistema solar FV. Elaboración propia .....	137

Gráfico 80 Diagrama de flujos y niveles. Sección de energía generada del arreglo solar. Elaboración propia ..... 137

Gráfico 81 Diagrama de flujos y niveles. Sección de modelo de difusión Bass microgeneración. Elaboración propia ..... 138

Gráfico 82 Diagrama de flujos y niveles. Sección de función logit microgeneración. Elaboración propia ..... 138

Gráfico 83 Diagrama de flujos y niveles. Sección de Customer Choice microgeneración. Elaboración propia ..... 139

Gráfico 84 Diagrama de flujos y niveles. Sección de modelo de difusión Bass EE. Elaboración propia ..... 139

Gráfico 85 Diagrama de flujos y niveles. Sección de función logit EE. Elaboración propia..... 140

Gráfico 86 Diagrama de flujos y niveles. Sección de Customer Choice EE. Elaboración propia ..... 140

Gráfico 87 Diagrama de flujos y niveles. Sección de modelo de difusión Bass conservación de la energía. Elaboración propia ..... 141

Gráfico 88 Diagrama de flujos y niveles. Sección de función logit conservación de la energía. Elaboración propia ..... 141

Gráfico 89 Diagrama de flujos y niveles. Sección de Customer Choice conservación de la energía. Elaboración propia ..... 142

## Lista de tablas

Tabla 1 Subsectores del sector comercial, público y de servicios.....	18
Tabla 2 Subsectores del sector comercial, público y de servicios de acuerdo al código CIU.....	18
Tabla 3 Tecnologías de microgeneración de electricidad .....	21
Tabla 4 Principales barreras para la adopción de tecnología solar FV en Colombia.....	25
Tabla 5 Políticas y mecanismos de apoyo a las energías renovables.....	35
Tabla 6 Políticas y mecanismos de apoyo a la eficiencia energética .....	37
Tabla 7 Subprogramas de eficiencia energética para el sector comercial, público y servicios.....	44
Tabla 8 Factores que afectan la adopción de microgeneración con tecnología solar FV, la eficiencia energética y la conservación de la energía en el sector comercial.....	48
Tabla 9 Efectos de la implementación de políticas sobre la microgeneración con tecnología solar FV, eficiencia energética y conservación de la energía en el sector comercial a través de modelos de simulación .....	51
Tabla 10 Análisis de estudios que incorporen elementos de racionalidad limitada para explicar el fenómeno de difusión de tecnología solar FV, eficiencia energética y conservación de la energía.....	61
Tabla 11 Ecuación modelo de Bass microgeneración .....	76
Tabla 12 Ecuación Customer choice microgeneración.....	77
Tabla 13 Ecuación modelo de Bass eficiencia energética .....	81
Tabla 14 Ecuación Customer choice eficiencia energética .....	82
Tabla 15 Revisión de literatura prácticas más empleadas en el sector comercial para el ahorro de energía eléctrica .....	86
Tabla 16 Ecuación modelo de Bass conservación de la energía .....	89
Tabla 17 Ecuación Customer choice conservación de la energía.....	90
Tabla 18 Especificaciones de los parámetros del modelo. Elaboración propia. ....	95
Tabla 19 . Comparativo de la cantidad de supermercados que adoptan y no tecnología de microgeneración solar FV, EE y conservación de la energía durante el periodo de simulación.....	104
Tabla 20 Resultados comparativos de las políticas implementadas para la adopción de microgeneración. Elaboración propia .....	107
Tabla 21 Consolidado política PE3 EE para iluminación, ventilación y refrigeración. Elaboración propia .....	109
Tabla 22 Resultados comparativos de las políticas implementadas para la adopción de tecnologías eficientes en iluminación. Elaboración propia .....	111
Tabla 23 Resultados comparativos de las políticas implementadas para la adopción de tecnologías eficientes en ventilación. Elaboración propia .....	113
Tabla 24 Resultados comparativos de las políticas implementadas para la adopción de tecnologías eficientes en refrigeración. Elaboración propia .....	115
Tabla 25 Consolidado política PC2 conservación de la energía para iluminación y refrigeración. Elaboración propia .....	116
Tabla 26 Resultados comparativos de las políticas implementadas para la aplicación de prácticas de conservación de la energía en iluminación. Elaboración propia.....	118
Tabla 27 Resultados comparativos de las políticas implementadas para la aplicación de prácticas de conservación de la energía en ventilación. Elaboración propia.....	119

Tabla 28 Resultados comparativos de las políticas implementadas para la aplicación de prácticas de conservación de la energía en refrigeración. Elaboración propia.....	121
Tabla 29 Consolidado demanda de energía y emisiones escenario base y mejores políticas de microgeneración, EE y conservación de la energía. Elaboración propia.....	123

## Lista de abreviaturas

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

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
GEI	Gases Efecto Invernadero
EE	Eficiencia energética
IRENA	International Renewable Energy Agency
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
SIN	Sistema Interconectado Nacional
FV	Fotovoltaico
CIU	Clasificación Industrial Internacional Uniforme
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
FNCER	Fuentes No Convencionales de Energía Renovable
IEA	International Energy Agency
REN21	Renewable Energy Policy Network for the 21st Century
EWS	Efficient World Scenario
PIB	Producto Interno Bruto
LCOE	Levelized Cost of Energy - Costo Nivelado de Energía

## Introducción

La energía contribuye a la mejora del estilo de vida de las personas, en la medida que aporta a los indicadores de desarrollo socioeconómico, sin embargo, la producción y el consumo de energía son responsables del 45% de las emisiones de Gases Efecto Invernadero – GEI a nivel mundial (IRENA, 2017b). En el caso de Colombia, el sector energético contribuye en un 10% a las emisiones de GEI nacionales (IDEAM, 2016).

Pese a que el país cuenta con una matriz de generación mayoritariamente limpia (63,3% de capacidad instalada son hidroeléctricas (XM, 2019)), esta presenta una alta incertidumbre frente al cambio climático, lo cual conlleva a utilizar en ciertos periodos del año, una mayor proporción de los recursos no renovables. A pesar de considerar la generación hidráulica una fuente de emisiones cero, diversos estudios plantean que la descomposición de la vegetación y las entradas de carbono de la cuenca son un impacto recientemente identificado en las represas de almacenamiento (de Sousa Brandão, y otros, 2019; Räsänen, Varis, Scherer, & Kummu, 2018; Yang, y otros, 2014; World Commission On Dams, 2000). Una primera estimación sugiere que las emisiones brutas de los reservorios pueden representar entre el 1% y el 28% del potencial de calentamiento global de las emisiones de GEI, especialmente de generación de metano (CH<sub>4</sub>) (World Commission On Dams, 2000).

Adicionalmente, este tipo de proyectos hidroeléctricos es un claro ejemplo del impacto ambiental, económico y social que provoca la mano del hombre en el ecosistema, especialmente en los sistemas acuáticos. Las consecuencias de este tipo de obras generan alteración del hábitat de los peces dado que las presas obstruyen su movimiento natural; obstrucción del flujo de nutrientes derivados de los sedimentos a los ríos y planicies de inundación, retenidos por los muros de contención, lo que implica la disminución de peces y la pesca; destrucción de los acuíferos encargados de equilibrar el ecosistema, nutrir de agua los hábitats húmedos, como lagos y suelos, y abastecer a las comunidades; una transformación evidente del paisaje y hábitats de los ríos a lo largo del tiempo (Vargas Nieto, 2018; Fog Corradine, 2018; Angarita, y otros, 2018; Jaramillo Cortés, 2018; Mejía Gaviria, 2018).

Por otra parte, el rápido crecimiento del uso mundial de la energía ya ha generado preocupación por las dificultades de suministro, el agotamiento de los recursos energéticos y los fuertes impactos ambientales (U.S Department of Energy, 2017). Esto principalmente porque el sistema energético mundial actual está dominado por los combustibles fósiles, y los principales contribuyentes a esta tendencia es el incremento de la demanda de energía asociada con un rápido crecimiento económico y el aumento de la población.

Igualmente, el sector comercial en Colombia consume el 20% de la energía del Sistema Interconectado Nacional - SIN (UPME, 2015b) a través de tres grandes usos como son la iluminación, ventilación y refrigeración, además de ser el responsable del 3% del total de las emisiones de GEI nacionales (IDEAM, 2016).

Por otra parte, el Acuerdo de París que se llevó a cabo en diciembre del año 2015, cuenta con la colaboración de 195 países que se comprometieron a mantener el aumento de la temperatura media mundial a un máximo de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales (Conference of the Parties, 2015). Adicional a los compromisos adquiridos en el Acuerdo de París, de reducir el 20% de las emisiones al 2030; Colombia de acuerdo con el Índice de Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático, elaborado por el Banco de Desarrollo de América Latina, tiene un índice de vulnerabilidad ALTO, ubicándose en el número 16 y un índice de exposición MEDIO, ubicándose en el número 20, respecto a los 33 países de América Latina (Banco de Desarrollo de América Latina, 2014). Evidencia de la vulnerabilidad frente al fenómeno del cambio climático son los últimos fenómenos de La Niña (2010-2011) y El Niño (2015-2016), que trajeron grandes pérdidas al país.

Todas estas cifras implican la necesidad de un diseño eficiente y políticas de construcción orientadas a la sostenibilidad, cuando el objetivo es alcanzar una temperatura global promedio no mayor a los 2 °C, la adopción de políticas de mitigación ya no es una opción. La forma más eficaz de lograr este objetivo es promoviendo tres acciones en el sector comercial: generación de energías renovables, una mayor eficiencia en los equipos y la conservación de la energía (Wood & Newborough, 2003), herramientas fundamentales que reducen el consumo de energía para las operaciones (calefacción, refrigeración, iluminación, entre otros) sin afectar salud y comodidad de los ocupantes y la mitigación de los impactos de la generación de emisiones y el consumo desmedido de recursos.

El presente documento evalúa el efecto combinado de la difusión de la generación de energía a partir de la tecnología solar fotovoltaica - FV, la eficiencia energética - EE y la conservación de electricidad en el sector comercial en Colombia.

El documento está organizado de la siguiente manera: En el capítulo 1 se describe el problema que se está abordando y se examina el estado actual de la tecnología solar FV, la EE y la conservación de la energía a nivel mundial y nacional, así como las diferentes políticas públicas que han permitido a diversos países superar obstáculos en materia de reducción de emisiones. El capítulo 2 hace referencia a la revisión de literatura sobre los trabajos más recientes que se han adelantado con relación a la autogestión de la energía. El capítulo 3 explica la metodología a utilizar, el capítulo 4 muestra el modelamiento de la autogestión, el capítulo 5 los resultados obtenidos, y finalmente el capítulo 6 las conclusiones y recomendaciones.

## Capítulo 1. Marco teórico

El presente capítulo muestra el panorama de las tecnologías de autogestión en el mundo y en Colombia, las políticas de autogestión dirigidas al sector comercial en el mundo y el contexto regulatorio de la autogestión en Colombia.

### 1.1. Términos y definiciones técnicas

A continuación se presentan algunas definiciones claves para el presente trabajo.

**Sector comercial, público y de servicios:** De acuerdo con el Banco de la República, este sector comprende todas aquellas actividades que no elaboran un producto en sí, pero que son indispensables para el funcionamiento de la economía (Subgerencia Cultural del Banco de la República, 2015). Este sector se considera más heterogéneo que los edificios residenciales debido a que de él se desprenden los siguientes subsectores:

Tabla 1 Subsectores del sector comercial, público y de servicios

Subsectores	Establecimientos
Salud	Hospitales
	Centros de salud
Hospedaje y recreación	Hoteles
	Moteles
Servicios	Bomberos
	Estaciones de servicio
Educación	Colegios
	Universidades
Seguridad	Batallones
	Estaciones de policía
Financiero	Bancos
Centros comerciales	
Grandes establecimientos	

Fuente: (UPME, 2007)

Cada uno de estos subsectores comerciales es único en su estructura de mercado, uso de energía e intensidad energética. De acuerdo con el Plan de acción indicativo de EE 2017-2022, el sector incluye los subsectores correspondientes al código CIU 45 al 96, de acuerdo con la revisión 4 adaptada para Colombia. La Tabla 2 presenta los subsectores:

Tabla 2 Subsectores del sector comercial, público y de servicios de acuerdo al código CIU

Grupo	CIU	Subsector
G	45	Comercio, mantenimiento y reparación de vehículos automotores y motocicletas, sus partes, piezas y accesorios.
	46	Comercio al por mayor y en comisión o por contrato, excepto el comercio de vehículos automotores y motocicletas.

Grupo	CIU	Subsector
	47	Comercio al por menor (incluso el comercio al por menor de combustibles), excepto el comercio de vehículos automotores y motocicletas.
H	52	Almacenamiento y actividades complementarias al transporte.
	53	Correo y servicios de mensajería.
I	55	Alojamiento.
	56	Actividades de servicios de comidas y bebidas.
J	60	Actividades de programación, transmisión y distribución.
	61	Telecomunicaciones
K	64	Actividades de servicios financieros, excepto las de seguros y pensiones.
	65	Seguros, seguros sociales y fondos de pensiones, excepto la seguridad social.
	66	Actividades auxiliares de las actividades de servicios financieros.
L	68	Actividades inmobiliarias.
M	70	Actividades de administración empresarial; actividades de consultoría de gestión.
	72	Investigación y desarrollo.
N	77	Actividades de alquiler y arrendamiento.
	79	Actividades de las agencias de viajes, operadores turísticos, servicios de reserva y actividades relacionadas.
O	84	Administración pública y defensa; planes de seguridad social de afiliación obligatoria.
P	85	Educación
Q	86	Actividades de atención de la salud humana.
	87	Actividades de atención residencial medicalizada.
	88	Actividades de asistencia social sin alojamiento.
R	90	Actividades creativas, artísticas y de entretenimiento.
	91	Actividades de bibliotecas, archivos, museos y otras actividades culturales.
	92	Actividades de juegos de azar y apuestas.
	93	Actividades deportivas y actividades recreativas y de esparcimiento.
S	94	Actividades de asociaciones.
	95	Mantenimiento y reparación de computadores, efectos personales y enseres domésticos.
	96	Otras actividades de servicios personales

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ministerio de Minas y Energía, 2017) y (DANE, 2012)

**Autogestión:** De acuerdo con los autores (Cárdenas, Zapata, Franco, & Dyner, 2017), la autogestión es la capacidad del usuario final de tomar decisiones autónomas en la gestión del consumo de energía eléctrica. Para la autogestión del consumo de electricidad se definen tres técnicas principales de reducción del consumo de energía: microgeneración, EE y conservación de la energía.

**Microgeneración o autogeneración a pequeña escala:** De acuerdo con la ley 1715 del 2014 la autogeneración a pequeña escala es aquella actividad realizada por personas naturales o jurídicas que producen energía eléctrica principalmente, para atender sus propias necesidades, que por sus características de pequeña escala, su potencia máxima no supera el límite establecido por la UPME de 10 MW. (Congreso de Colombia, 2014).

**Eficiencia energética:** Es la relación entre la energía aprovechada y la total utilizada en cualquier proceso de la cadena energética. A través de la EE, se quiere alcanzar el mejor aprovechamiento de la energía, durante cualquier actividad de producción, transformación, transporte, distribución y consumo de las diferentes formas de energía (Congreso de Colombia, 2014).

**Conservación de la energía:** Implica la reducción en el consumo de energía (Demirel, 2012), específicamente cuando está asociada a estilos de vida racionales que incluyen formas de autorregulación o cambios espontáneos de las preferencias de los consumidores, lo que resulta en cambios de comportamiento (M.Sarkis, 2017).

**Respuesta de la demanda:** Cambios en el consumo de energía eléctrica por parte del consumidor, con respecto a un hábito común de consumo, debido a los altos precios de la electricidad o incentivos diseñados para promover bajos consumos (Congreso de Colombia, 2014).

**Generación distribuida:** Es la producción de energía eléctrica, cerca de los centros de consumo, conectada a un Sistema de Distribución Local – SDL (Congreso de Colombia, 2014).

**Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER):** Son aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FNCER la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares (Congreso de Colombia, 2014).

## **1.2. Autogestión de la electricidad**

De acuerdo con Kirshen & Member (2003), los consumidores, en la mayoría de los casos, tienen poca participación en el diseño de mercados de electricidad competitivos, las razones posiblemente se deben a la falta de incentivos financieros y experiencia necesaria. Es por esto que las decisiones son tomadas por los grandes generadores, las empresas de transmisión y distribución, minoristas y reguladores. Como consecuencia, hay una pobre participación del lado de la demanda que hace que los mercados de electricidad sean poco eficientes y menos competitivos.

De manera que si buscamos un mercado eléctrico competitivo, necesitaríamos mayor participación de los consumidores a través de la autogestión. Para la autogestión del consumo de electricidad se definen tres técnicas principales de reducción del consumo de energía de red: microgeneración, EE y conservación de la energía (Zapata, Franco, & Dyner, 2014). A continuación se presenta una breve descripción de las técnicas.

### **1.2.1. Microgeneración eléctrica**

La microgeneración es un término creado inicialmente en el Reino Unido, el cual es definido en el Energy Act 2004 Sección 82 del Parlamento del Reino Unido, como una forma de suministro descentralizado o distribuido de la energía, donde la generación de electricidad de fuentes renovables o de cogeneración no supera los 50 kW o la producción de calor no supera la capacidad térmica de 45 kW (HMSO, 2004).

Muchos grupos han promovido la microgeneración como una alternativa viable frente a la generación centralizada por razones ambientales como la reducción de emisiones de GEI y el aumento en la diversidad y seguridad del suministro energético (Greenpeace, 2005). Además de que la microgeneración permite la participación del consumidor en la cadena de suministro de energía, creando consumidores más conscientes del uso de la energía y sus impactos, fomentando así la gestión de la demanda (Haas, Ornetzeder, Hametner, Wroblewski, & Hübner, 1999).

A continuación, la Tabla 3 expone las principales tecnologías de microgeneración:

Tabla 3 Tecnologías de microgeneración de electricidad

<b>Tecnologías microgeneración</b>	Celdas FVs
	Aerogeneradores
	Calefacción solar térmica
	Pequeños aprovechamientos hídricos (PCH)
	Calderas de combustible a base de biomasa
	Microcombinación de calor y electricidad (CHP)
	Bombas de calor geotérmicas

Fuente: (Praetorius, Martiskainen, Sauter, & Watson, 2011; Bergman & Eyre, 2011)

De acuerdo con las tecnologías mencionadas, el presente trabajo se enfocará en el análisis de la tecnología de celdas FVs debido al gran potencial que tiene el país, como su ubicación geográfica, con buena radiación solar que tiene pocas variaciones durante todo el año y promedios mensuales diarios que varían de región a región entre 4 kWh/m<sup>2</sup>/año y 6 kWh/m<sup>2</sup>/año (CORPOEMA & UPME, 2010), la competitividad de costos con la tarifa de la red (Jiménez, Franco & Dyner, 2016a) y los beneficios en términos económicos, ambientales y técnicos que han sobresalido en instalaciones de pequeña y gran escala.

Todas las diferentes tecnologías que utilizan el recurso del sol como fuente de generación de energía son alternativas que permiten abastecer los requerimientos de energía de la población y no aportan emisiones de GEI. Particularmente la tecnología solar FV convierte la radiación del sol en corriente eléctrica de forma directa y se hace a partir del uso de un generador FV, el cual están formado por varios módulos conectados en serie y/o paralelo, y a su vez cada módulo está formado por unidades básicas llamadas celdas FVs (Messenger & Ventre, 2005).

Hoy en día, la tecnología solar dominante utiliza silicio cristalino (multicristalino y monocristalino) como material semiconductor. Sin embargo, las tecnologías solares que utilizan materiales avanzados como el Silicio amorfo (a-Si), el Seleniuro de galio e Indio de galio (CIGS) o el Teluro de cadmio (CdTe) son cada vez más atractivos debido a una mayor eficiencia en diferentes condiciones climáticas y menores costos de producción (Bruna, Wehrli, & Fent, 2016).

A pesar de esta diversidad de tecnologías fotovoltaicas, las células de silicio cristalino siguen siendo dominantes en el mercado FV con una proporción de alrededor del 90%. La distribución del mercado se encuentra de esta manera: 57% es silicio monocristalino con un rendimiento que varía entre 15% y

20%, 30% es policristalino con un rendimiento que varía entre 15% y 20%, 3% es silicio amorfo con rendimientos de 4% a 8% y el resto son tecnologías de película delgada con menos del 10% (Tyagi V. , Rahim, Rahim, & Selvaraj, 2013; El Chaar Lamont LA & El Zein, 2011; Akinyele, Rayudu, & Nair, 2015).

Debido a que las celdas FVs producen energía sólo cuando están iluminadas, además que la cantidad de energía que generan es directamente proporcional a la irradiación solar que incide sobre su superficie, los sistemas FVs usan a menudo un mecanismo de almacenamiento de energía para que la energía eléctrica capturada pueda estar disponible en un momento posterior. Más comúnmente, el mecanismo de almacenamiento consiste en baterías recargables, pero también es posible emplear mecanismos de almacenamiento más exóticos (Messenger & Ventre, 2005).

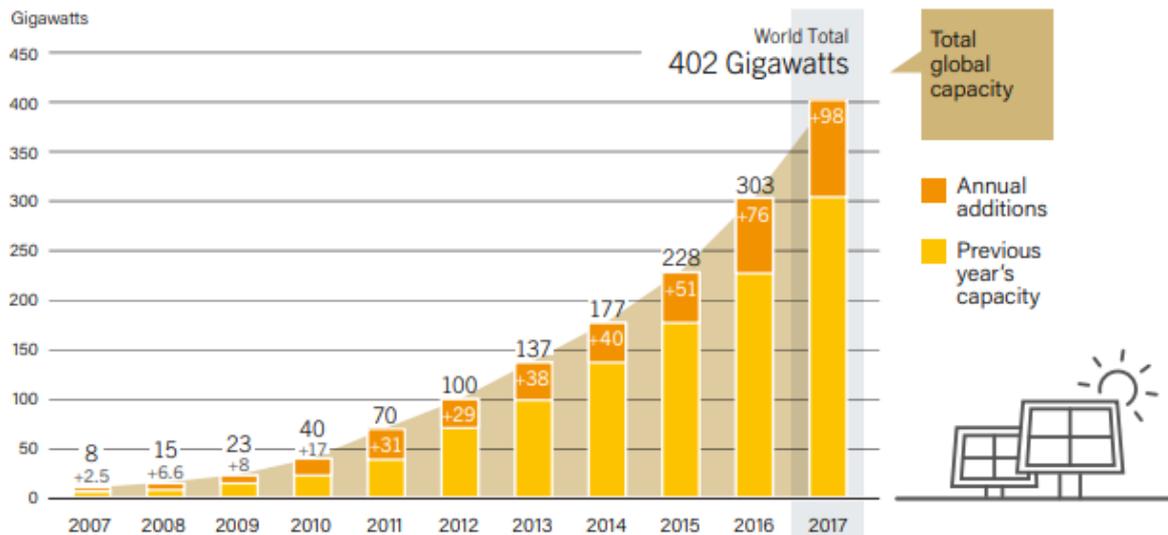
Además del sistema de almacenamiento de energía como las baterías de acumulación, los sistemas FVs están conformados por reguladores de carga que controlan el proceso de carga y descarga de las baterías, protegiéndolas de sobrecargas o sobredescargas excesivas que pueden acortar la vida útil de las mismas, evitando daños al sistema y asegurando que trabajen a su máxima eficiencia (Del Sol & Cabrera Fernández, 2008).

Los inversores son otra parte esencial del sistema FV si se quiere un sistema conectado a la red, los inversores transforman la corriente continua o directa (dc) entregada por las celdas FVs en corriente alterna (ac) para los requerimientos eléctricos de la demanda (Del Sol & Cabrera Fernández, 2008).

#### **1.2.1.1. Penetración de tecnología FV en el mundo**

Realizando una revisión de la evolución de la tecnología solar FV en el mundo, se tiene que el mercado eléctrico en el 2017 agregó más capacidad que de cualquier otro tipo de tecnología de generación de energía. A nivel mundial, se instalaron al menos 98 GW de capacidad de energía solar fotovoltaica (dentro y fuera de la red), aumentando la capacidad total en casi un tercio, para un total acumulado de aproximadamente 402 GW (Ver Gráfico 1). En promedio, se instaló el equivalente a más de 40.000 paneles solares cada hora del año (REN21, 2018).

Gráfico 1 Capacidad Global de Solar FV, adiciones anuales, 2007-2017

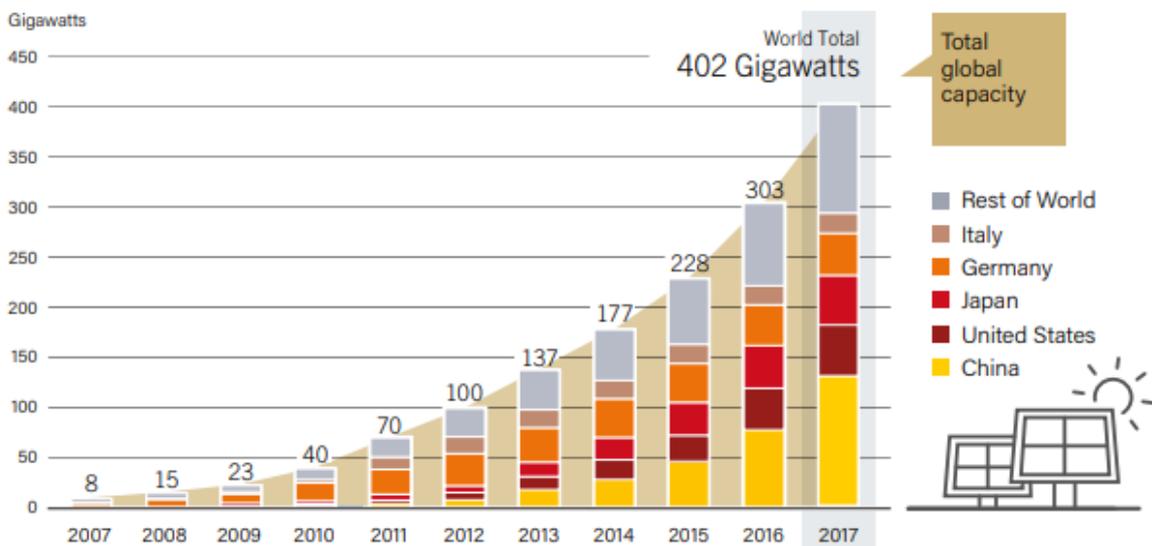


Note: Data are provided in direct current (DC). Totals may not add up due to rounding.

Fuente: (REN21, 2018)

China, Estados Unidos, India, Japón y Turquía fueron los países responsables de casi el 84% de la capacidad recién instalada; los siguientes cinco fueron Alemania, Australia, la República de Corea, el Reino Unido y Brasil (Ver Gráfico 2). En cuanto a la capacidad acumulada, los principales países fueron China, Estados Unidos, Japón, Alemania e Italia, con la India no muy lejos. A finales de 2017, todos los continentes habían instalado al menos 1 GW y al menos 29 países tenían 1 GW o más de capacidad (REN21, 2018).

Gráfico 2 Capacidad Global de Solar FV, por países o regiones, 2007-2017



Note: Data are provided in direct current (DC).

Fuente: (REN21, 2018)

De acuerdo con la IEA para el año 2050, los sistemas solares FV podrían generar hasta un 16% de la electricidad mundial, mientras que la electricidad solar térmica de las plantas de energía podría proporcionar un 11% adicional. Combinadas, estas tecnologías solares podrían evitar la emisión de más de 6 mil millones de toneladas de dióxido de carbono por año para 2050, es decir, más que todas las emisiones de CO<sub>2</sub> actuales relacionadas con la energía de los Estados Unidos o casi todas las emisiones directas del sector del transporte en todo el mundo (IEA, 2014).

Finalmente muchos estudios consideran que los procesos de aprendizaje de esta tecnología han ocasionado la disminución de los costos de los productos FV, reduciendo los precios de la electricidad y haciéndose competitivos con relación a los suministrados por la red en muchos países del mundo, siendo un factor importante en la difusión de este tipo de tecnología limpia (Trappey, y otros, 2016).

Sin embargo, a pesar de las importantes mejoras derivadas de la madurez tecnológica FV y disminución en costos de inversión que ha venido presentando, aún no se ha demostrado la competitividad económica en los mercados liberalizados de energía. Como resultado, en la gran mayoría de los sistemas alrededor del mundo su uso depende de la implementación de una política de subsidios que proporcione a los inversionistas apoyo adicional para garantizar un retorno razonable de sus inversiones.

#### **1.2.1.2. Penetración de tecnología FV en Colombia**

Colombia aún cuenta con una participación muy baja de las FNCER, con una capacidad instalada total al 2017 de 9,9 MW de energía solar FV en sistemas aislados o aplicaciones profesionales y 19,9 MW en energía eólica con el parque eólico Jepírachi ubicado en la Guajira (XM, 2018). Se espera que para el año 2018 entren en operación 337 MW de energía solar FV y 127 MW en el año 2019 (XM, 2018).

Dentro de los proyectos más grandes de energía solar FV del país, está la Granja solar de la empresa de energía Celsia en la ciudad de Yumbo, Valle del Cauca. Su construcción, cuenta con 35.000 módulos instalados y 9 inversores, tiene una capacidad instalada de 9,8 MW y generará cerca de 16,5 GWh de energía al año, equivalentes al consumo de 8 mil hogares (Celsia, 2018).

Para finales del año 2018, Celsia tendrá lista la construcción de su segunda granja solar en el municipio de Santa Rosa de Lima, en el departamento de Bolívar. Ésta, tendrá una capacidad instalada de generación de 8,8 MW y se estima generará 15.542 MWh al año. Para su construcción se utilizarán 32.000 módulos FVs y 2 centrales de inversores (Celsia, 2018). Igualmente para finales del año, la empresa internacional Enel Green Power instalará 261.360 módulos FVs, con capacidad instalada de 67,92 MW, estimando una generación de 172,6 GWh al año, proyecto que se realizará en El Paso, en el departamento del Cesar (Enel Green Power, 2017).

La principal razón para el poco desarrollo de las FNCER en Colombia radica en que, se cuenta con unos costos de inversión altos, un contexto energético de una amplia participación de la energía

hidroeléctrica, sumado a falta de voluntad política, debido a la inexistencia de políticas que apoyen y promuevan el desarrollo y utilización de estas fuentes (UPMEc, 2015).

Las principales barreras con las que cuenta el país para la aceleración de este tipo de tecnología son:

Tabla 4 Principales barreras para la adopción de tecnología solar FV en Colombia

Institucionales	Económicas	Regulatorias	Tecnológicas
Intervención de muchas instituciones	Percepción de altos costos	Definición de CxC	Falta de personal capacitado
Desarticulación institucional	Remuneración (CxC)	Reglamentación de contratos de largo plazo	Falta de madurez tecnológica
Falta de liderazgo institucional	Dificultad de financiamiento (riesgos)	Reglamentación de desviaciones	Infraestructura de transporte
Falta de interés por conectar a terceros	Condiciones de mercado	Generación distribuida	Mejores estudios de potencial de recursos
	No valoración de externalidades positivas	Licencias ambientales complejas	
		Medición bidireccional	

Fuente: (Enersinc, 2017)

No obstante, el 12 de octubre del 2018 se publicó el proyecto resolución CREG 123, el cual se encuentra en consulta, y por el cual se hacen modificaciones y adiciones transitorias al Reglamento de Operación para permitir la conexión y operación de las plantas solares fotovoltaicas y eólicas en el SIN. En resumen, el proyecto abarca los aspectos técnicos y los temas comerciales.

Respecto a los aspectos técnicos, el proyecto resolución desarrolla los siguientes temas para plantas solares y eólicas:

- Equipos de protección.
- Modelos de simulación preliminares y post-operativos.
- Aspectos de supervisión y control; Medición de variables eléctricas y su calidad.
- Programas de mantenimiento.
- Rango de operación de frecuencia.
- Aspectos técnicos de regulación primaria.
- Respuesta rápida en frecuencia para plantas eólicas.
- Control de voltaje y respuesta rápida de inyección de reactivos.
- Ramas de arranque y parada.
- Pruebas necesarias a las funcionalidades y equipos.
- Necesidad de equipos para medición de variables meteorológicas en el sitio de la planta.

En cuanto a los temas comerciales, el proyecto resolución define una medida provisional mientras se pasa a un despacho vinculante y mercado intradiario. Esta medida consiste en definir los incentivos económicos para que las plantas de generación variable, como las solares FV, eólicas y las plantas hidráulicas con embalse cuya capacidad de almacenar agua es menor a un día (PCH), puedan

aprovechar al máximo el recurso renovable (sol, viento y agua), de tal manera que los usuarios finales del sistema se beneficiasen de esta energía a un costo eficiente (CREG, 2018). Con la entrada del proyecto resolución en mención se espera se eliminen las principales barreras económicas y regulatorias que existen actualmente en el mercado eléctrico en el país para las generación solar FV.

Adicionalmente, Colombia es un país que depende de sus recursos hidroeléctricos (capacidad instalada 63,3% (XM, 2019)), lo que pone en riesgo periódico de escasez del recurso y altos precios de la energía, cuando se presentan fenómenos climáticos extremos como El Niño. El último fenómeno se presentó en el año 2015-2016, siendo uno de los más fuertes de los últimos tiempos, este dejó grandes pérdidas para el país y generó un aumento en el precio de la energía al encarecerse el recurso hídrico.

Debido a este riesgo latente que tiene el país, es necesario reducir la dependencia de sus embalses y plantas de generación hidroeléctrica y diversificar la matriz de generación a través de la generación con FNCER que no se vean afectados por eventos extremos.

## **1.2.2. Eficiencia energética**

El desarrollo económico y el consumo de energía están comúnmente relacionados; un mayor nivel de desarrollo económico corresponde a un mayor consumo de energía. Es así como la EE se reconoce como una estrategia clave para el desarrollo sostenible de la energía y una herramienta principal para abordar tres desafíos relacionados con la energía: el cambio climático, la seguridad energética y el desarrollo económico, al menor costo para la sociedad (Bukarica & Tomšić, 2017).

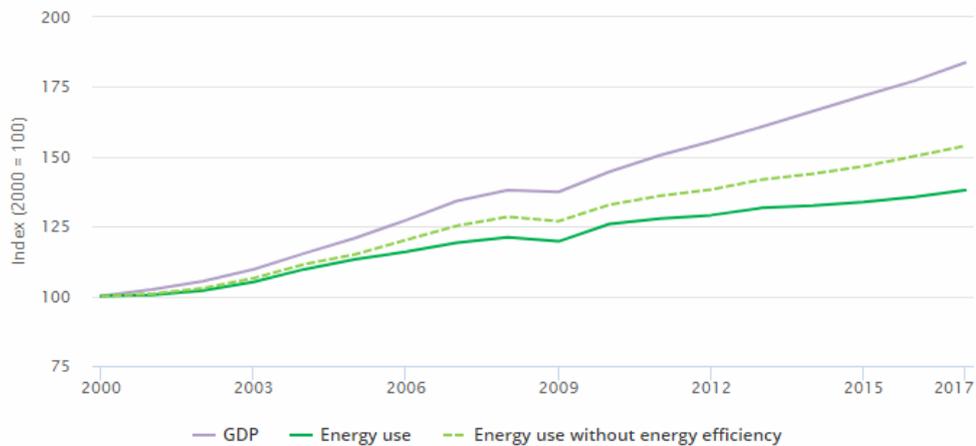
Las potencialidades de utilizar la energía de manera más eficiente incluyen no sólo la reducción de las emisiones de GEI y el mejoramiento de la calidad del aire local, sino también la reducción de las inversiones en infraestructuras energéticas, la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles, el aumento de la competitividad y el bienestar del consumidor (Lopes, Antunes, & Martins, 2012).

### **1.2.2.1. Penetración eficiencia energética en el mundo**

A nivel mundial, los niveles de EE han mejorado en los últimos años. La economía mundial se está volviendo cada vez menos intensa en energía, pero los progresos deben acelerarse para poner el sistema energético mundial en una ruta sostenible.

El impacto de las políticas de eficiencia ha sido significativo en las últimas décadas. A nivel mundial, el aumento de la eficiencia desde el año 2000 impidió un 12% más de uso de energía de lo que hubiera sido el caso en 2017 (ver Gráfico 3). La EE es un factor importante para desacoplar el consumo de energía del desarrollo económico.

Gráfico 3 Uso global de energía final con y sin eficiencia energética, 2000-17



Fuente: (IEA, 2018)

Desde el año 2000, estas mejoras en las principales economías del mundo han compensado más de un tercio del aumento en las actividades de uso intensivo de energía. Pero el impacto positivo de las políticas de eficiencia ha sido superado por las actividades económicas de rápido crecimiento en los países emergentes que impulsan la demanda de energía (ver Gráfico 4).

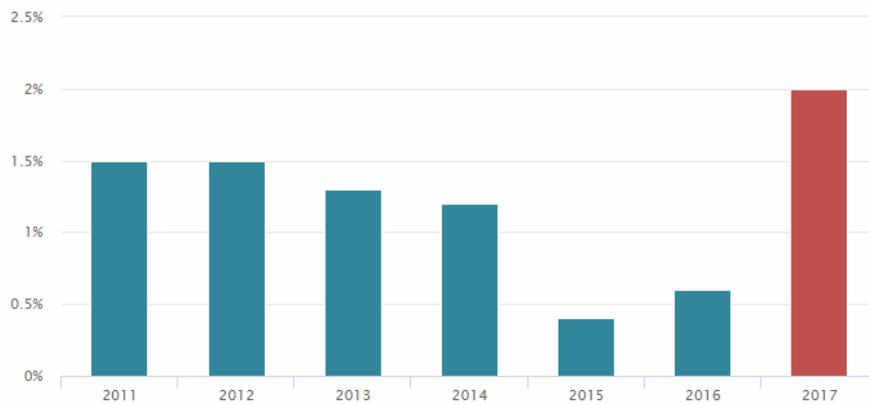
Gráfico 4 Descomposición del uso final de energía en las principales economías del mundo



Fuente: (IEA, 2018)

De acuerdo con la IEA, la demanda mundial de energía aumentó un 1,9% en 2017, el incremento anual más rápido desde 2010 (Ver Gráfico 5). El aumento de la demanda energética producto del crecimiento económico, superó el progreso en EE. Como resultado, la intensidad energética (uso de energía primaria por unidad de PIB) se redujo en solo un 1,7% en 2017, la tasa de mejora más lenta de esta década (IEA, 2018).

Gráfico 5 Cambio en la demanda global de energía primaria, 2011-17



Fuente: (IEA, 2018)

Sin embargo, al aplicar medidas de EE ampliamente disponibles en la actualidad, la intensidad energética mejoraría en alrededor del 3% por año, desde ahora hasta 2040 (IEA, 2018).

El escenario mundial eficiente (EWS - Efficient World Scenario) generaría un pico en las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la energía antes de 2020, seguido de una caída del 12% en 2040 en comparación con el día de hoy, equivalente a más del 40% de la reducción requerida para estar en línea con los objetivos de París (ver Gráfico 6).

Gráfico 6 Emisiones de gases de efecto invernadero en el NPS y EWS, 2000-40



Fuente: (IEA, 2018)

El EWS también reduciría los contaminantes del aire clave como el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno y las partículas en un tercio en comparación con los actuales. En particular, una cocción más eficiente podría ayudar a reducir las muertes prematuras por contaminación del aire en los hogares en casi 1 millón por año en 2040 en comparación con el Escenario de nuevas políticas (NPS - New Policies Scenario) de la IEA (ver Gráfico 7).

Gráfico 7 Emisiones de contaminantes del aire en el EWS, 2015-40



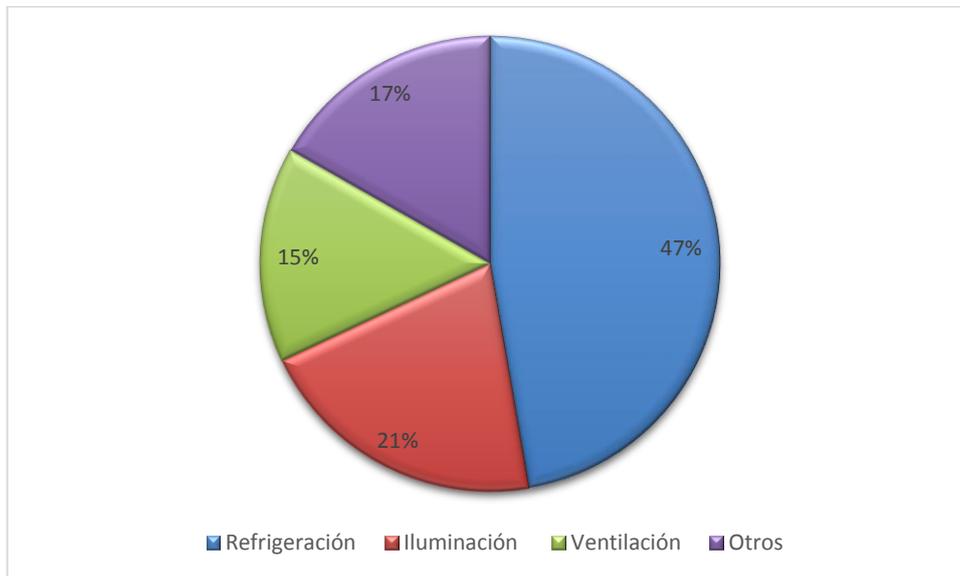
Fuente: (IEA, 2018)

Por otro lado, el nivel de interés y la importancia de la EE varían enormemente con la combinación de generación de electricidad existente en los países. Cuando los países tienen abundantes fuentes de energía renovable, su enfoque de la energía es claramente diferente de los países que carecen de tales recursos, o aún están luchando con la integración de fuentes renovables en su red eléctrica.

Debido a que los supermercados se encuentran entre los edificios más intensivos en energía, y un alto porcentaje del consumo de energía está asociado al uso de equipos electrónicos, las medidas en mejorar el rendimiento energético aplicadas a este subsector tienen un gran potencial de reducción de energía (Energy Star, 2007).

De acuerdo con E Source Companies, (2010); Timma, Skudritis, & Blumberga, (2016); Mylona, Kolokotroni, & Tassou, (2017), los principales usos de la electricidad en el subsector son: refrigeración 47%, iluminación 21%, ventilación 15% y otros 17%. Estos consumos se muestran en el Gráfico 8.

Gráfico 8 Usos de la electricidad del subsector supermercados



Fuente: Elaboración propia a partir de (E Source Companies, 2010; Timma, Skudritis, & Blumberga, 2016; Mylona, Kolokotroni, & Tassou, 2017)

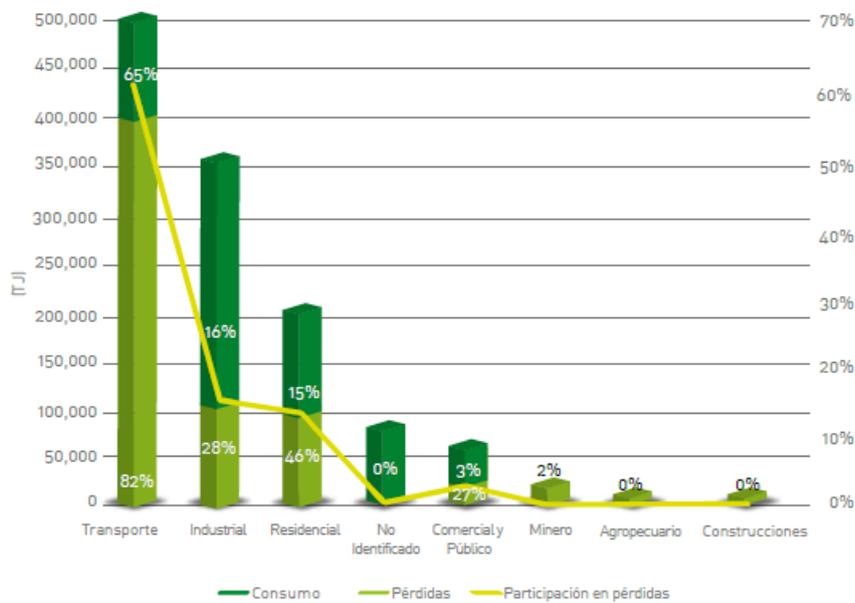
En cierto sentido, los supermercados son un subsector ideal para la EE y la reducción de GEI. Los altos niveles de energía necesarios para la refrigeración, iluminación y ventilación, además de las largas y complejas cadenas de suministro significan que hay muchos costos que ahorrar y muchas emisiones por evitar (Fernández & Roqueñí, 2018).

De acuerdo con estos datos, el presente trabajo centrará su atención en la sustitución de equipos ineficientes y prácticas de conservación de la energía para los tres grandes usos de la energía eléctrica en los supermercados: refrigeración, iluminación y ventilación.

#### 1.2.2.2. Penetración eficiencia energética en Colombia

De acuerdo con El Ministerio de Minas y Energía (2017), en el año 2015 la proporción de energía útil fue de 48% y las pérdidas en la matriz energética nacional fue de 52%, esto da un indicio claro sobre el potencial significativo de Colombia para mejorar la EE. El Gráfico 9 muestra el consumo de energía y las pérdidas por sector económico.

Gráfico 9 Consumo energético y pérdidas por sectores económicos



Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2017)

Mejorar la eficiencia en el consumo energético es de suma importancia para el país, es así como el país ha venido trabajando en la promoción de estas iniciativas a través de diferentes instrumentos normativos (ver numeral 1.4.2) e iniciativas como la implementación de Distritos Térmicos, para mejorar la EE de los edificios y sustitución de sistemas de enfriamiento que funcionen con sustancias agotadoras de ozono y sustancias de alto impacto ambiental (Ministerio de Minas y Energía, 2017).

El proyecto de Distritos Térmicos se tiene para cinco ciudades del país Bogotá, Medellín, Cali, Bucaramanga y Cartagena, donde se están identificando y caracterizando zonas potenciales para la conceptualización de un distrito térmico por ciudad.

A su vez, en el marco de la Estrategia Colombiana de Desarrollo en Bajo Carbono, se formularon 8 planes sectoriales de mitigación (PAS), compuestos de políticas, programas y medidas que contribuyen al desarrollo bajo en carbono y al crecimiento verde. Dentro de los programas se encuentran medidas de EE para los diferentes sectores económicos: agricultura, energía, transporte, desarrollo urbano, industria, residuos, vivienda y forestal (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012).

### 1.2.3. Conservación de energía eléctrica

El uso creciente de energía excesiva y las afectaciones al ambiente asociado con esta tendencia, hacen que se enfatice en la conservación de energía. Existe una necesidad urgente de educar sobre el uso de la energía, y entender que su mal uso conlleva a efectos sobre el medio ambiente.

La conservación de la energía se define típicamente como una disminución en la cantidad total de energía usada. Por lo tanto, la conservación de la energía puede o no estar asociada con un aumento

en la EE, dependiendo de cómo cambien los servicios de energía. Es decir, el consumo de energía se puede reducir con o sin un aumento en la EE, y el consumo de energía puede aumentar junto con un aumento en la EE (Gillingham, Newell, & Palmer, 2009).

En última instancia, la EE y la conservación de la energía dentro del sector de la electricidad intentan alcanzar el mismo resultado, el consumo de electricidad reducido, sin embargo, cada mecanismo intenta lograr esto de dos maneras separadas, pero interrelacionadas (Croucher, 2011).

Si bien la conservación de la energía permite reducir el consumo de energía es necesario un cambio de comportamiento en los consumidores para lograr la reducción. Los ejemplos incluyen apagar las luces y desconectar aparatos que no se estén usando, ajustar los termostatos del sistema de aires acondicionados, y cambiar los procesos de negocio en una oficina (Mallinson, 2013).

Vedung (1995) afirma que hay buenas razones para creer que los instrumentos de política informativa se han vuelto cada vez más comunes a medida que la sociedad se mueve hacia la desregulación y la privatización. La información y la educación son condiciones previas elementales y necesarias para lograr un uso más eficiente de la energía.

En el sector eléctrico, se estima que la conservación de la energía a través del cambio tecnológico y de comportamiento tiene un potencial de ahorro de 123 millones de toneladas métricas de carbono por año, lo que representa el 20% de las emisiones directas de los hogares de Estados Unidos (Dietz, Gardner, Gilligan, Stern, & Vandenberghe, 2009).

El comportamiento del consumidor y las opciones de estilo de vida están fuertemente relacionados con el concepto de uso racional de la energía. Este concepto implica a menudo un aspecto más moral de la conducta, más que un aspecto estrictamente económico, ya que se requiere un esfuerzo del lado de los usuarios finales para participar en el ahorro de energía (Oikonomou, Becchis, Steg, & Russolillo, 2009).

Sin embargo, la conservación de la energía puede ser mejorada a través de cambios en el contexto (incluyendo regulaciones y aumentos de precios de la energía) y cambios en las motivaciones de las personas (incluyendo preocupaciones ambientales y sentimientos de obligación moral de reducir el consumo de energía) (Oikonomou, Becchis, Steg, & Russolillo, 2009).

#### **1.2.3.1. Penetración conservación de energía eléctrica en el mundo**

El ahorro de la energía eléctrica ha sido protagonista en el mundo durante más de 40 años, a partir de la primera crisis del precio del petróleo en 1973, cuando la reducción de la demanda de energía fue vista como una ruta hacia una mayor seguridad energética en muchos países desarrollados (Geller H., Harrington, Rosenfeld, Tanishima, & Unander, 2006).

Muchas de las políticas que se han implementado en el mundo con relación a la eficiencia energética, buscan una disminución del consumo de la energía a partir de intervenciones tecnológicas sin generar un cambio de hábitos del consumidor. Sin embargo, el éxito de muchas de estas iniciativas depende del comportamiento del consumidor y de las prácticas de consumo de energía para lograr sus objetivos (EEA, 2013).

De acuerdo con la Agencia Europea de Medio Ambiente (2013), los consumidores necesitan marcos de referencia adecuados para determinar si su consumo de energía es excesivo. La manera de hacerlo es a través de retroalimentación directa e indirecta de los proveedores de energía. La retroalimentación directa podría incluir información recibida a través de la computadora del consumidor, a través de medidores inteligentes combinados con pantallas. La retroalimentación indirecta podría incluir facturas más informativas y frecuentes que contengan información histórica y / o comparativa sobre el consumo de energía (EEA, 2013).

La Agencia Europea de Medio Ambiente sugiere que los formuladores de políticas se centran más en el instrumento en sí mismo que en el comportamiento y la práctica de consumo que debe verse afectada (EEA, 2013).

### **1.2.3.2. Penetración conservación de energía eléctrica en Colombia**

El gobierno ha venido trabajando en diferentes campañas educativas, de innovación y desarrollo tecnológico. Planes pilotos de EE y uso de FNCER en colegios públicos y privados con la Fundación Educativa Rochester en el año 2015, que incluían un diagnóstico ambiental y energético; un diagnóstico curricular sobre energía con prueba a pequeña escala; un programa de capacitación a docentes y estudiantes líderes para las jornadas o talleres pedagógicos demostrativos; una evaluación de los resultados del piloto; unas recomendaciones a los cambios de infraestructura y al currículo de cada uno de los colegios escogidos como pilotos, y una implementación a gran escala, en casos seleccionados, de las recomendaciones de infraestructura y del currículo que quedaría establecido en cada colegio (Ministerio de Minas y Energía, 2017).

Otra de las acciones realizadas por el gobierno para dar una mayor difusión sobre el tema de conservación de la energía y EE, se dan a través de los innumerables eventos energéticos y ambientales organizados por Ministerio de Minas y Energía, UPME, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Transporte, Ministerio de Vivienda, Corporaciones Ambientales, gremios como ANDI (a través de sus diferentes Cámaras), Andesco, Cotelco, Cámaras de Comercio, Universidades, la Cámara Colombiana de Energía y el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, entre muchos otros (Ministerio de Minas y Energía, 2017).

Adicionalmente, se cuenta con el Premio a la Eficiencia Energética del cual ya se han realizado cuatro versiones, el cual busca reconocer el compromiso y las acciones adelantadas en materia de EE a nivel institucional (UPME, 2018). El Ministerio de Minas, la UPME, Findeter y Andesco son los organizadores del evento, el cual cuenta con las siguientes categorías:

- Categoría Empresas de Servicios Públicos y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
- Categoría Industria, comercio y servicios
- Categoría Entidades Públicas y Entes Territoriales
- Categoría Academia
- Categoría ONG, centros de investigación, y empresas de consultoría y servicios energéticos

### 1.3. Políticas de autogestión sector comercial

#### 1.3.1. Políticas microgeneración a nivel mundial

La IEA (2010) planteó cuatro acciones importantes que los gobiernos de cada país deben hacer para lograr una expansión de la tecnología FV:

1. Creación de un marco de políticas para el despliegue del mercado, incluyendo esquemas de incentivos personalizados para acelerar la competitividad del mercado.
2. Mejorar productos y componentes, modelos de financiamiento y capacitación y educación para fomentar la facilitación y transformación del mercado.
3. Apoyar el desarrollo continuo de la tecnología y los esfuerzos sostenidos de investigación y desarrollo para avanzar en las mejoras de costos y eficiencia.
4. Mejorar la colaboración internacional para permitir un aprendizaje acelerado y la transferencia de conocimientos a países emergentes y en desarrollo.

Con respecto a estas acciones, actualmente muchos países han implementado algunos mecanismos para apoyar la generación de energía a partir de FNCER. Algunos de estos mecanismos son:

**Subastas o licitaciones**, se define una cierta cantidad de energía renovable procedente de una determinada fuente tecnológica, garantizando que el ganador de la subasta o licitación es el generador con la oferta más económica (Commission of the European Communities, 2008).

**Obligación renovable o Cuota**, los gobiernos imponen a los consumidores, proveedores o productores la obligación de obtener un determinado porcentaje de su electricidad a partir de energía renovable. Esta obligación suele ser facilitada por los certificados verdes negociables (TGC). En consecuencia, los productores de electricidad renovable venden la electricidad al precio de mercado, pero también pueden vender certificados verdes, lo que demuestra la fuente renovable de la electricidad. Los proveedores demuestran que cumplen su obligación comprando estos certificados verdes, o pagan una multa al gobierno (Commission of the European Communities, 2008).

**Mercado de certificados verdes o TGC (Tradable Green Certificate)**, son certificados emitidos por cada MWh de electricidad proveniente de energías renovables, lo que permite a los generadores obtener ingresos adicionales para la venta de electricidad. La demanda de certificados verdes proviene generalmente de una obligación de los distribuidores de electricidad de entregar una serie de certificados como parte de su consumo anual (cuota). De lo contrario, pagarían una multa. El precio

de los certificados depende fuertemente de varios factores, incluyendo el nivel de la cuota y la pena y la duración de la obligación (IEA, 2008a).

**Feed in Tariff (FIT) y Premium**, ambos mecanismos son utilizados en 18 estados miembros de la Unión Europea. Se conceden a los generadores renovables por la electricidad que suministran a la red. Las tarifas "feed-in" consisten en un precio fijo por la electricidad generada en lugar del precio de la electricidad, mientras que las tarifas "premium" reciben un precio fijo por la electricidad generada más una prima, esta prima puede variar entre un límite superior e inferior (Commission of the European Communities, 2008).

Existen otro tipo de incentivos a las energías renovables como son las subastas, subsidios a la inversión, incentivos fiscales, derechos de emisión, entre otros (Energía y sociedad, 2014).

Usualmente los diversos mecanismos de apoyo no son aplicados de forma aislada sino de manera conjunta, esto se puede visualizar en la Tabla 5 en la cual la mayoría de los países aplican dos o más mecanismos simultáneamente.

Tabla 5 Políticas y mecanismos de apoyo a las energías renovables

	Subastas	Cuotas	TGC	FIT	Subvenciones	Incentivos fiscales
<b>Europa</b>						
Alemania	X			X	X	X
Bélgica		X	X		X	X
Suecia		X	X		X	
Reino Unido	X	X	X	X	X	X
Países bajos		X		X	X	X
Portugal	X	X		X	X	X
España*				X	X	
<b>Norte América</b>						
Estados Unidos	X	X		X	X	X
México	X				X	X
Canadá	X	X		X	X	X
<b>Sudamérica</b>						
Colombia	**					X
Argentina	X			X	X	X
Brasil	X				X	X
Chile	X	X			X	X
Perú	X		X	X		X
<b>Australia</b>						
Australia				X		X

\*El sistema de FIT en España quedó suspendido a principios de 2012 para las nuevas instalaciones de régimen especial y fue eliminado para las instalaciones existentes con la aprobación del Real Decreto-ley 9/2013. Actualmente solo existe un sistema de desgravaciones fiscales para la inversión (Energía y sociedad, 2014).

\*\* A partir de las Resoluciones 41307 y 41314 del 2018 del Ministerio de Minas y Energía, la entidad convocó oficialmente a la primera subasta de energía eléctrica de contratación a largo plazo, que se llevó a cabo el 26 de febrero de 2019, la cual busca diversificar e impulsar la competitividad de la matriz energética del país.

X políticas a nivel estado (provincia)

Fuente: Elaboración propia a partir de (IRENA, 2013; Energía y sociedad, 2014; REN21, 2016; Álvarez Pelegry & Ortiz Martínez, 2016)

### 1.3.2. Políticas de eficiencia energética en el mundo

De acuerdo con la IEA (2016), los formuladores de políticas utilizan cinco grandes categorías de instrumentos para cumplir objetivos de eficiencia:

#### 1. Normas obligatorias (por ejemplo, MEPS y BEC);

**Minimum Energy Performance Standards (MEPS)**, representa los estándares mínimos de desempeño energético, es uno de los tres tipos de estándares de EE utilizados en la regulación del uso de energía en un país. Funciona restringiendo la venta de productos que son menos eficientes que el nivel mínimo (el consumo de energía anual excede el consumo máximo de energía permitido para un volumen ajustado específico). La eficiencia mínima se basa en un protocolo de prueba especificado, como ISO e IEC (Brunei National Energy Research Institute, 2016).

**Building Energy Codes (BEC)**, o códigos energéticos de construcción son el instrumento clave utilizado por los gobiernos para reducir el consumo de energía de los edificios. Dichos códigos consisten en un conjunto de requisitos mínimos obligatorios de rendimiento energético diseñados para regular el uso de energía en edificios. Cubren tanto edificios nuevos como edificios existentes en proceso de renovación o alteración (IEA, 2008b).

#### 2. Objetivos y obligaciones de ahorro energético ineludibles (por ejemplo, sistemas de certificados blancos u objetivos energéticos obligatorios en la industria);

**Los Certificados de Ahorro Energético (CAE)**, llamados ‘certificados blancos’, son un instrumento que fijan las autoridades gubernamentales para establecer un objetivo obligatorio de ahorro energético que los agentes del mercado energético deben cumplir mediante la aplicación de medidas de EE en sectores de uso final predefinidos durante un período de tiempo determinado. Cuando se consiguen ahorros de energía se acreditan con certificados por una autoridad independiente y el sistema se combina con una opción de negociación (Bertoldi, y otros, 2010).

#### 3. Etiquetado e información (por ejemplo, etiquetas que certifiquen que los productos cumplen un determinado nivel de rendimiento o campañas de sensibilización del consumidor);

**Programa de etiquetados**, proporcionar al consumidor una elección informada sobre el ahorro de energía y por lo tanto el potencial de ahorro de costos del producto comercializado relevante. Los programas de etiquetado de EE están destinados a reducir el consumo de energía del aparato sin disminuir los servicios que proporciona a los consumidores (IEA, 2016).

4. Incentivos financieros (por ejemplo, subvenciones para productos o prácticas de EE, subastas o licitaciones);
5. Desincentivos financieros (por ejemplo, impuestos sobre la energía o precios del carbono).

La Tabla 6 muestra el consolidado de países que aplican diferentes políticas y mecanismos para apoyar la eficiencia energética. El mecanismo que todos los países han implementado en materia de eficiencia energética son las normas obligatorias, por el contrario los Certificados de Ahorro Energético son el mecanismo menos utilizado por los países analizados.

Tabla 6 Políticas y mecanismos de apoyo a la eficiencia energética

	NO	CAE	E	IF	DI
<b>Europa</b>					
Alemania	X		X	X	X
Bélgica	X		X	X	
Suecia	X				X
Reino Unido	X	X	X	X	X
Países bajos	X				
Portugal	X				
España	X		X	X	
<b>Norte América</b>					
Estados Unidos	X	X	X	X	
México	X		X	X	X
Canadá	X		X	X	X
<b>Sudamérica</b>					
Colombia	X		X	X	X
Argentina	X		X	X	
Brasil	X		X	X	
Chile	X		X	X	X
Perú	X		X		
<b>Australia</b>					
Australia	X	X	X		X

Fuente: Elaboración propia a partir de (Geller H. , Harrington, Rosenfeld, Tanishima, & Unander, 2006; CEPAL, 2017; RISE, 2017)

Donde:

NO: Normas obligatorias

CAE: Certificado de Ahorro Energético

E: Etiquetado

IF: Incentivos financieros

DI: Desincentivos financieros

Por otra parte, la Unión Europea -UE se ha fijado un objetivo de ahorro energético del 20% para 2020 (en comparación con el uso de energía proyectado para 2020), lo que equivale aproximadamente a apagar 400 centrales eléctricas. Más específicamente, tiene una gama de políticas para exigir a los Estados miembros (EM) que mejoren la eficiencia energética:

- Ecodiseño (2009/125 / EC) que cubre la eficiencia energética de los productos;

- Rendimiento energético de los edificios (EPBD - 2010/31 / EU) que cubre aspectos del uso de energía en edificios, y;
- Directiva de eficiencia energética (EED - 2012/27 / EU) que establece objetivos nacionales de eficiencia energética vinculantes hasta 2020, e incluye requisitos de políticas adicionales y herramientas que ayudan a los Estados miembros a alcanzar sus objetivos.

El 30 de noviembre de 2016, la Comisión propuso una actualización de la Directiva de EE que incluye un nuevo objetivo de EE del 30% para 2030, y medidas para actualizar la Directiva a fin de garantizar que se cumpla el nuevo objetivo.

El 14 de junio de 2018, la Comisión, el Parlamento y el Consejo alcanzaron un acuerdo político que incluye un objetivo vinculante de EE para la UE para 2030 del 32,5%, con una cláusula para una revisión al alza para 2023. Este acuerdo político ahora debe traducirse a todos los idiomas de la UE y adoptarse formalmente por el Parlamento Europeo y el Consejo, y luego publicarse en el Diario Oficial de la UE (Comisión Europea, 2018).

### **5.3.3 Políticas de Conservación de energía eléctrica en el mundo**

Las políticas de conservación de la energía evidencian dos enfoques. El primero se basa en el aumento de los costos de energía, lo que genera que el consumidor reduzca su consumo y el segundo enfoque se basa en el conocimiento que tiene el consumidor y que puede desempeñar en la reducción del uso de energía (OECD/IEA, 2006).

Las medidas de conservación de energía no sólo consisten en la compra de electrodomésticos más eficientes, sino que también incluyen un cambio en los hábitos de consumo. Es así como aparecen otro tipo de políticas como es la información, sensibilización y creación de capacidad. Estas políticas ayudan al aumento en la toma de decisiones de compra de los consumidores y dan a los fabricantes el incentivo para producir productos más eficientes (OECD/IEA, 2006).

En EE.UU. se cuenta con la Ley de independencia y seguridad energética de 2007 – EISA, es la legislación federal más reciente para ampliar y fortalecer las políticas, los programas y las prácticas de conservación y eficiencia energética. Específicamente, EISA y su reciente predecesor, la Ley de Política Energética de 2005 (EPAct05), contienen casi 200 títulos con nuevas disposiciones para la conservación de energía y eficiencia dirigidas a mejorar la economía de combustible de los vehículos. Estas acciones han comenzado a contribuir a nuevas políticas, programas y prácticas federales, estatales y locales en todo EE. UU. (EPA, 2016).

Por su parte, la UE cuenta con una serie de políticas energéticas (EEA, 2013) con relevancia directa para cambiar el comportamiento del consumidor en general y el despliegue de medidores inteligentes en particular. Dichas políticas son:

- Directiva 2005/89 / CE sobre seguridad del suministro: alienta la adopción de la gestión de la demanda en tiempo real.

- Directiva 2006/32 / CE sobre servicios energéticos de uso final: alienta la introducción de contadores inteligentes.
- Tercer paquete de liberalización: requiere transparencia en la información de facturación de energía y alienta la introducción de medidores inteligentes. Entró en vigor en septiembre de 2009 e incluye varias directivas y reglamentos.

En cuanto a América Latina y el Caribe, de acuerdo con el informe elaborado por el Banco de Desarrollo de América Latina, muchos de estos países están implementando varios proyectos relacionados con la EE, con diferentes niveles de prioridad, alcance y éxito (Corporación Andina de Fomento, 2013). Como resultado, algunos indicadores denotan una tendencia hacia la reducción de la intensidad energética.

## 1.4. Contexto regulatorio Colombiano

### 1.4.1 Políticas de Microgeneración con FV en Colombia

Para lograr el despegue de la tecnología solar FV en el país, el Congreso de la República publicó el 13 de mayo de 2014 la Ley 1715 por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Esta ley busca promover el uso de FNCER como la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la EE como la respuesta de la demanda y el desarrollo de la generación distribuida y la microgeneración (Congreso de Colombia, 2014).

De acuerdo con la ley se tienen unos mecanismos para promocionar la microgeneración a pequeña escala (capacidad  $\leq$  1MW) y a gran escala (capacidad  $>$  1MW), así como la generación distribuida (Capacidad  $\leq$  0,1MW). Los mecanismos son:

1. Entrega de excedentes a la red de distribución.

La Ley 1715 de 2014, le confirió a la CREG la facultad de definir las normas, para la remuneración de los excedentes que generen autogeneradores de pequeña y gran escala, que utilicen FNCER, los cuales se reconocerán mediante un esquema bidireccional como créditos de energía.

Para el caso de la microgeneración a gran escala se expidió la Resolución 024 del 2015, donde:

- Los autogeneradores deben de efectuar un contrato de conexión entre el transmisor o distribuidor, para garantizar las condiciones de conexión y medida,
- Un contrato de respaldo con el operador de red o transportador, para garantizar las condiciones de respaldo y suministro de energía,
- Y deben estar representados por un generador en el mercado mayorista.

Para el caso de la microgeneración a pequeña escala se expidió la Resolución 030 de 2018, donde:

- Se debe verificar en la página web del operador de red, que la red a la cual desea conectarse tenga disponibilidad y cumpla con los parámetros definidos en la resolución.
- Solicitar la conexión a un sistema de distribución local en el nivel de tensión 1, a través de los Formatos de solicitud de conexión simplificada y estudios de conexión simplificados estándar de acuerdo con la potencia instalada.

2. Sistemas de medición bidireccional y mecanismos simplificados de conexión.

Reglamentada en la Resolución 030 de 2018 por la CREG:

- Artículo 10. *Procedimiento simplificado de conexión al Sistema de Transmisión Regional o Sistema de Distribución Local del autogenerador con **potencia instalada menor o igual a 0,1 MW y generación distribuida**, y*
- Artículo 11. **Con potencia instalada mayor a 0,1 MW y menor o igual a 1 MW.**

3. Venta de energía por parte de generadores distribuidos.

Reglamentada en la Resolución 030 de 2018 por la CREG, con las mismas condiciones que los autogeneradores a pequeña escala.

4. Venta de créditos de energía.

Reglamentada en la Resolución 030 de 2018 por la CREG, en el artículo 17. *Reconocimiento de excedentes de autogenerador a pequeña escala que utiliza FNCER.* Al cierre de cada periodo de facturación, los excedentes se reconocerán como créditos de energía al autogenerador que utiliza FNCER de acuerdo con la capacidad instalada.

5. Programas de divulgación masiva.

El objetivo es informar al público en general sobre los requisitos, procedimientos y beneficios de la implementación de soluciones de microgeneración a pequeña escala.

6. Programa de divulgación focalizada.

La UPME realizará investigaciones sobre los posibles nichos en donde sea más probable que se implementen de manera viable las soluciones de microgeneración a pequeña escala, y con base en esto realizará programas de divulgación y capacitación focalizados acerca de estas tecnologías, así como la preparación y publicación de guías técnicas y financieras relacionadas.

Adicional a los mecanismos de promoción, la ley 1715 contempla incentivos tributarios para personas naturales o jurídicas que utilicen FNCER para la microgeneración a pequeña escala, tales incentivos se establecen en el capítulo III como es la reducción de hasta un 50% del impuesto de renta, exclusión de

IVA para equipos, maquinaria y servicios nacionales e importados, exención del pago de los derechos arancelarios de importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos y una tasa de depreciación no mayor al 20% como tasa global anual, aplicable a maquinarias, equipos y obras civiles (Congreso de Colombia, 2014).

A su vez, crea el FENOGGE- Fondo de Energías No Convencionales y Gestión de la Energía en su artículo 10, donde establece que el fondo podrá financiar parcial o totalmente, entre otros programas y proyectos dirigidos al sector residencial de estratos 1, 2 y 3, tanto para la implementación de soluciones en microgeneración a pequeña escala, como para la mejora de EE, igualmente se podrán financiar estudios y auditorías energéticas, adecuaciones locativas, disposición final de equipos sustituidos y costos de administración e interventoría de los programas y/o proyectos (Congreso de Colombia, 2014).

Por otra parte, se crea el Documento CREG 161 de 2016, para evaluar una serie de alternativas regulatorias en torno a FNCER en el mercado de energía mayorista. Alternativas como:

**Prima verde.** Pago adicional por la energía generada con FNCER seleccionadas en la subasta por encima del costo de la energía.

**Contratos pague lo generado a largo plazo.** Los comercializadores están obligados a comprar toda la energía generada por los generadores seleccionados en la subasta, a un precio fijo.

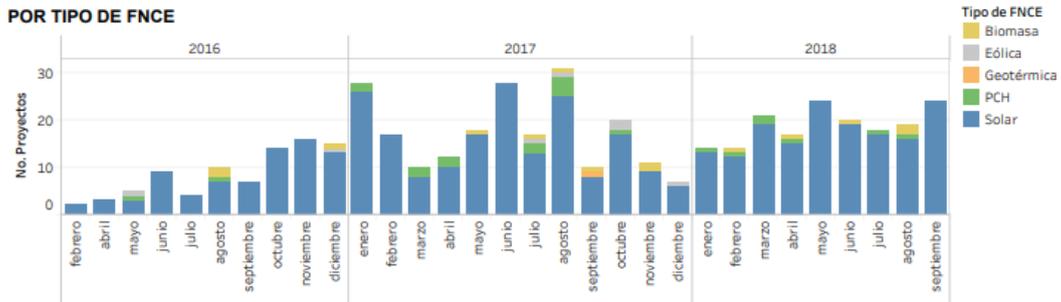
**Contratos de energía media a largo plazo.** El vendedor se compromete a entregar una energía media en el plazo de un año dentro de unas bandas definidas.

**Contratos pague lo contratado a largo plazo.** Se definen un compromiso de entrega horaria para la duración del contrato a precio fijo.

El Decreto 570 de 2018 expedido por el Ministerio de minas y energía, da los lineamientos de política pública para la contratación a largo plazo de proyectos de generación de energía con FNCER y se dictan otras disposiciones.

A raíz de la creación de la ley 1715 de 2014, al 30 de septiembre del 2018, se han recibido 465 solicitudes de certificación de proyectos de FNCER –340 ya cuentan con el aval respectivo–, los cuales suman una capacidad de 1.935 MW, que equivale al 10% de la capacidad instalada del país (ver Gráfico 10).

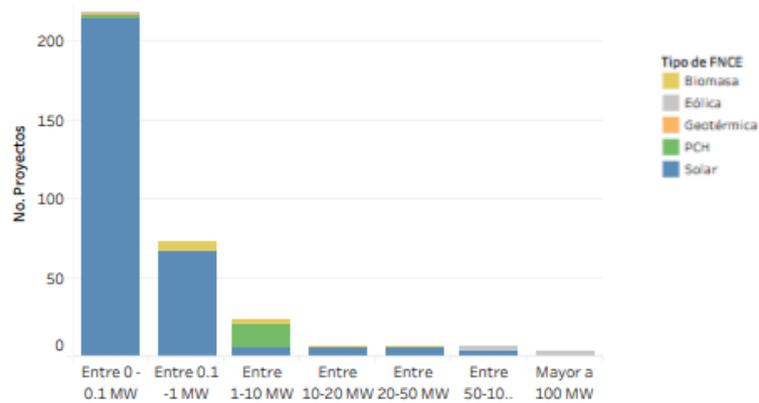
Gráfico 10 Proyectos de FNCEP recibidos en Colombia



Fuente: (UPME, 2018a)

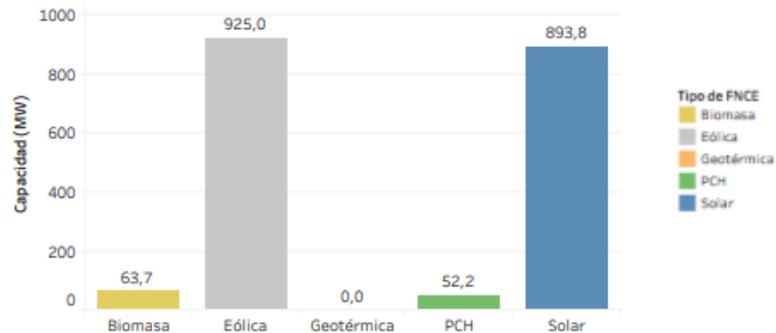
Cabe resaltar que los proyectos con mayor participación son los solares FVs (306 proyectos aprobados con capacidad instalada total de 893,8 MW) con rango entre 0 y 1 megavatios (ver Gráfico 11 y Gráfico 12). Sin embargo, muchos de estos proyectos cuentan con el aval de la UPME más no de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales –ANLA (UPME, 2018a).

Gráfico 11 Intervalo de potencia por tipo de fuente



Fuente: (UPME, 2018a)

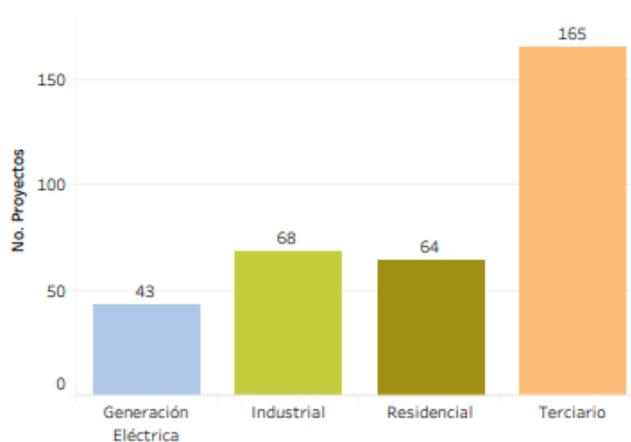
Gráfico 12 Capacidad instalada por tipo de fuente



Fuente: (UPME, 2018a)

De los proyectos aprobados por la UPME el 48% es para suplir las necesidades de energía eléctrica del sector terciario, el 20% del sector industrial, el 18% del sector residencial y el 12% para generación de energía eléctrica al SIN (ver Gráfico 13).

Gráfico 13 Sector al que va dirigido el proyecto de FNCER



Fuente: (UPME, 2018a)

### 1.4.2 Políticas de Eficiencia energética en Colombia

Colombia empieza a hablar del término EE a partir de la expedición de la Ley 697 del año 2001, mediante la cual se fomenta el Uso Racional y Eficiente de la energía (URE) y la utilización de FNCER, estableciendo el marco jurídico para el desarrollo de la normatividad posterior en EE en Colombia (Ministerio de minas y energía, 2001).

Esta ley crea el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía (PROURE), el cual se reglamenta en el Decreto 3683 de 2003 expedido por el Ministerio de minas y energía, y donde además se crea la comisión intersectorial de URE (CIURE). El objeto del

decreto es suministrar progresivamente programas y proyectos para que toda la cadena energética cumpla permanentemente con los niveles mínimos de EE (Ministerio de minas y energía, 2003).

Con la creación del PROURE, la UPME y el ICONTEC –Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación- elaboraron las Normas Técnicas Colombianas, dando paso al “Programa Conoce”, que promovía inicialmente el etiquetado voluntario.

Con la creación de la ley, se establecieron incentivos tributarios para la EE (exclusión de IVA y deducción de renta líquida), bajo el Estatuto Tributario, derivado de los artículos 158-2 (Renta Líquida - RL, por inversiones en control y mejoramiento del medio ambiente) y 424-7 (exclusión de IVA para equipos nacionales o importados). Los decretos reglamentarios 2532 de 2001 (IVA) y 3172 de 2003 (RL), cuentan con una excepción contenida en que mencionan que los equipos para proyectos de EE solo pueden ser objeto de los beneficios si los proyectos corresponden al cumplimiento de metas ambientales concertadas entre los Ministerios de Ambiente y Minas y Energía (República de Colombia, 1989).

Las metas ambientales se concertaron a través de la Resolución 186 de 2012 expedida por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, y tienen vigencia hasta diciembre de 2016. En este escenario, el Estatuto Tributario establece que el *“valor a deducir por este concepto, en ningún caso podrá ser superior al veinte por ciento (20%) de la renta líquida del contribuyente, determinada antes de restar el valor de la inversión.”* (República de Colombia, 1989)

Después de 7 años se adopta el Plan de Acción Indicativo 2010-2015 para desarrollar el PROURE y se definen objetivos específicos, subprogramas estratégicos y prioritarios y metas del ahorro por primera vez. Este plan se encuentra reglamentado de acuerdo a la Resolución 180919 del 1 de junio de 2010 (Ministerio de minas y energía, 2010). De acuerdo con el Plan de Acción Indicativo 2010-2015 el potencial de ahorro a 2015 para el sector comercial, público y servicios era de 4,4% (GWh/año) y la meta de ahorro de 2,7% (Tcal/año) sobre el total del consumo de energía eléctrica en el país.

En la Tabla 7 se presenta el sector comercial, público y servicios con sus respectivos programas de EE y la prioridad establecida. Dentro de este sector, el subprograma de prioridad alta pretende caracterizar el sector y de esta manera identificar usos finales de energía y energéticos, mientras que los de prioridad media están enfocados en sustituir equipos de refrigeración comercial, bombillos en centros hospitalarios y colegios públicos y realizar inventario y fortalecimiento de empresas del sector rural.

Tabla 7 Subprogramas de eficiencia energética para el sector comercial, público y servicios

Sector	Subprograma	Prioridad
Comercial, público y servicios	Difusión sobre tecnologías y buenas prácticas en sistemas de iluminación, refrigeración y aire acondicionado.	Media
	Caracterización, gestión de indicadores y asistencia técnica.	Alta

Sector	Subprograma	Prioridad
	Actualización tecnológica en Alumbrado público.	Media

Fuente: (Prias, 2010)

Como resultado de la Ley 697, se crea:

- **Reglamentos Técnicos para Instalaciones Eléctricas (RETIE)**, el 30 de agosto de 2013 el Ministerio de minas y energía expidió la Resolución 90708 por la cual se crea el nuevo Reglamento, el cual cuenta con requisitos que garantizan los objetivos legítimos de protección contra los riesgos de origen eléctrico (Ministerio de minas y energía, 2013).
- **Reglamento de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP)**, última modificación realizada en la Resolución 40122 de febrero 8 de 2016 por el Ministerio de minas y energía, establece los requisitos y medidas que deben cumplir los sistemas de iluminación y alumbrado público, tendientes a garantizar: Los niveles y calidades de la energía lumínica requerida en la actividad visual, la seguridad en el abastecimiento energético, la protección del consumidor y la preservación del medio ambiente (Ministerio de Minas y Energía, 2016).
- **Reglamento de Etiquetado (RETIQ)** expedido por la Resolución 41012 del 18 de septiembre de 2015 del Ministerio de minas y energía, y con entrada en vigencia el 31 agosto de 2016, exige el porte de etiquetas para equipos de refrigeración doméstica, acondicionadores de aire para recintos, motores monofásicos y trifásicos de inducción, balastos para iluminaciones fluorescentes y lavadoras de ropa. Un año después será exigible el porte de etiquetas para equipos de refrigeración comercial, calentadores de agua eléctricos (tipo acumulación), acondicionadores de aire unitarios, calentadores de agua a gas (Tipo acumulación y de paso) y gasodomésticos para cocción de alimentos (Ministerio de Minas y Energía, 2016; Ministerio de Minas y Energía, 2017).

A su vez, la NTC-ISO 50001 fue ratificada por el consejo directivo en el año 2011, está destinada a disminuir los costos de la energía y reducir las emisiones de GEI y otros impactos ambientales relacionados, a través de la gestión sistemática de la energía. Es aplicable a todo tipo de organizaciones, buscando que la organización desarrolle e implemente una política energética, objetivos, metas y planes de acción que tenga en cuenta los requisitos legales y la información relacionada con el uso significativo de la energía (ICONTEC, 2011).

Por otra parte, la Ley 1715 En el capítulo V Desarrollo y promoción de la gestión eficiente de la energía, artículo 26 se ratifica la necesidad de desarrollar el PROURE a través de planes de acción indicativos, reglamentaciones técnicas y sistemas de etiquetado e información al consumidor. Por otra parte, el artículo 30 expone que el gobierno nacional y el resto de administraciones públicas, establecerán objetivos de EE para los edificios de las administraciones públicas (Congreso de Colombia, 2014).

Adicionalmente, el artículo 11 planteó un nuevo escenario para otorgar el beneficio de deducción de renta líquida a proyectos de gestión eficiente de la energía (EE + respuesta de la demanda), estableciendo que el *“valor a deducir por este concepto, en ningún caso podrá ser superior al 50% de la renta líquida del contribuyente, determinada antes de restar el valor de la inversión.”*

A raíz de la creación de la ley 1715 de 2014, al 30 de septiembre del 2018, se han recibido 53 solicitudes de certificación de proyectos de EE y gestión eficiente de la energía – 29 ya cuentan con el aval respectivo – la mayoría de las solicitudes presentadas son de proyectos del sector terciario: comercial, público y servicios (UPME, 2018b) (ver Gráfico 14).

Gráfico 14 Solicitudes de Proyectos de eficiencia energética y gestión de las energías recibidas



Fuente: (UPME, 2018b)

Los proyectos presentados para el sector terciario en su mayoría son de EE en la energía eléctrica; el sector transporte presenta solicitudes de proyectos de uso de electricidad y gas natural vehicular, y el sector de la industria manufacturera presenta solicitudes de proyectos relacionados con combustibles sólidos, energía eléctrica y gas natural (UPME, 2018b).

En materia de edificaciones sostenibles, el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, bajo la Resolución 549 de 2015, expidió la guía de ahorro de agua y energía, la cual contiene exigencias en materia de reducción de consumos de estos servicios, discriminando el tipo de edificaciones (centros comerciales, oficinas, hoteles, instituciones educativas y hospitales) y el clima (frío, templado, cálido seco y cálido húmedo) (Ministerio de Vivienda, Ciudad y territorio, 2015).

La Resolución establece los porcentajes mínimos de ahorro que las edificaciones nuevas deben cumplir a partir del segundo año de entrada en vigencia de la misma. Los porcentajes de ahorro indicados van desde 10% hasta 45%. Para alcanzar los porcentajes de ahorro, la guía sugiere la implementación de medidas activas (sistemas mecánicos o eléctricos para garantizar condiciones de confort) o pasivas (que consideran el clima, paisaje, localización, orientación, selección de materiales, diseño interior y aprovechamiento de iluminación y ventilación naturales) (Ministerio de Vivienda, Ciudad y territorio, 2015).

Otro instrumento que aporta al mejoramiento de la EE en el sector, lo constituye la Norma Técnica Colombiana 6112 “Etiquetas Ambientales Tipo I. Sello Ambiental Colombiano (SAC) Criterios Ambientales para Diseño y Construcción de Edificaciones Sostenibles con uso diferente a vivienda” publicada en marzo de 2016. Esta norma incluye criterios para ahorro y uso eficiente del agua y la energía, reducción de emisiones durante la construcción y para la selección de materiales, entre otros (ICONTEC, 2016).

#### **1.4.1. Políticas de conservación de energía eléctrica en Colombia**

Con relación a las políticas con las que cuenta el país en materia de conservación de energía son todas las nombradas en el numeral de 1.4.2, puesto que el gobierno nacional enmarcó en el PROURE los temas de conservación de la energía y EE en uno solo, siendo su objetivo prioritario el ahorro de la energía, así como su conservación y uso eficiente.

#### **1.5. Conclusiones del capítulo**

En este capítulo se analizaron los aspectos teóricos de las tecnologías de microgeneración solar FV, eficiencia energética y conservación de la energía en el mundo y en Colombia.

Se realizó una revisión del estado actual de las políticas a nivel mundial y el contexto regulatorio de la autogestión en Colombia, y de esta manera se logró establecer las falencias y necesidades del sector energético en materia de políticas, desarrollo y evolución de la autogestión en el país.

En gran medida, la Ley 1715 de 2014 fortaleció esfuerzos para incentivar la apropiación de la energía de FNCER y la EE, pues concede beneficios a personas naturales o jurídicas que fomenten la investigación, desarrollo e inversión en el ámbito de la producción y utilización de este tipo de energía. Sin embargo, la expedición de regulación complementaria a la Ley es necesaria para definir la forma como los nuevos proyectos entrarán a operar en la canasta energética colombiana.

En los capítulos siguientes se muestra la evolución de la investigación y se analizan los resultados encontrados.

## Capítulo 2. Estado del arte

Este capítulo muestra la revisión de la literatura de los estudios realizados sobre el proceso de adopción de tecnologías de autogestión de la energía, destacando la tecnología solar FV, los equipos eficientes y las acciones de conservación de la energía en el sector comercial, identificando los principales avances y la falta de conocimiento que aún no han sido abordados. De la revisión surgen los objetivos y el alcance de la tesis, que se muestran al terminar el capítulo.

### 2.1. Revisión de literatura

La verificación de estudios realizados sobre autogestión de electricidad en el sector comercial en Colombia, a través de la aplicación de políticas que permitan impulsar la microgeneración, la EE y la conservación de la energía, a través de un modelo de simulación en dinámica de sistemas, se plasmó resaltando tres líneas:

1. Una revisión sobre estudios encaminados a buscar los elementos motivadores o que se convierten en obstáculos para entrada de la microgeneración con tecnología solar FV, la EE y la conservación de la energía en el sector comercial;
2. Una revisión sobre estudios que se enfoquen en el análisis de políticas sobre microgeneración con tecnología solar FV, la EE y la conservación de la energía y sus implicaciones en la difusión en el sector comercial a través de modelos de simulación;
3. Una revisión sobre estudios que incorporen elementos de racionalidad limitada para abordar de la mejor manera el fenómeno de difusión de tecnologías encaminadas a la microgeneración de energía solar FV, EE y conservación de la energía.

La primera línea, relacionada con los elementos que motivan o dificultan la adopción de microgeneración con tecnología solar FV, la EE y la conservación de la energía en el sector comercial, esto con el fin de identificar esos elementos, para diseñar estrategias adecuadas que ayuden a alcanzar los niveles de penetración de las tecnológicas esperados. A continuación la Tabla 8 sintetiza los principales hallazgos en este aspecto:

Tabla 8 Factores que inciden en la adopción de microgeneración con tecnología solar FV, la eficiencia energética y la conservación de la energía en el sector comercial.

Autogestión	Autor y año	País	Barreras (B) / Motivaciones (M)
Microgeneración con tecnología solar FV	(Rathore, Rathore, Pratap Singh, & Agnihotri, 2017)	India	B: La falta de políticas y medidas regulatorias, infraestructura deficiente, falta de financiamiento, tecnología insuficiente y poca transparencia y responsabilidad.
	(Bergek & Mignon, 2017)	Suecia	B: Los motivos económicos y no económicos, motivos ambientales y motivos simbólicos.
	(Rai, Reeves, & Margolis, 2016)	Estados Unidos	M: Los canales de información, especialmente de los vecinos e instaladores que ya cuenta con sistemas FV, en despertar el interés.

Autogestión	Autor y año	País	Barreras (B) / Motivaciones (M)
	(Karakaya & Sriwannawit, 2015)	Suecia	B: Desde el punto de vista económico, el costo de los sistemas FV todavía se percibe generalmente como alto. Con respecto a la dimensión socio-técnica, varios estudios implican que la complejidad de la interacción entre las personas y los sistemas FV puede obstaculizar la adopción. Además, aún existen varias barreras relacionadas con la dimensión de la política y la gestión de la tecnología.
	(Karakaya, Nuur & Hidalgo, 2015)	Alemania	M: La contribución a mejorar el entorno natural y la capacidad de independizarse de los proveedores de electricidad debido al aumento de los precios de la electricidad.
	(Simpson & Clifton, 2015)	Australia	M: El aumento de las tarifas eléctricas, la reducción del costo de capital de los sistemas, la aceptación pública de microgeneración y en particular la disponibilidad de diversos subsidios (paquetes de incentivos). B: El aumento de la calidad y la accesibilidad de la información es un factor muy importante para abordar la insatisfacción de los consumidores con los sistemas de microgeneración solar. Si bien la información de calidad está disponible, esta información es a menudo demasiado técnica, difícil de acceder y desconocida para los consumidores.
	(Ohunakin, Adaramola, Oyewola, & Fagbenle, 2014)	Nigeria	M: Buena radiación solar y la abundancia en toda Nigeria, la ley de reforma del sector energético la cual favorece la generación de energía a partir de recursos renovables; la reducción de emisiones de GEI; el crecimiento de la demanda de energía; la seguridad energética y acceso para la electrificación rural y la posibilidad de no desarrollar conflictos sobre el uso de derechos sobre el recurso. B: La variabilidad e intermitencia de la radiación; la falta de fiabilidad en la red; la falta de conciencia e información sobre los inmensos beneficios socioeconómicos y medioambientales de la tecnología; los altos costos de inversión inicial; los gastos de operación y mantenimiento; la falta de políticas e incentivos del gobierno; el control ineficaz de la calidad de los productos; la inseguridad de la infraestructura debido a la presencia de insurgencia militar y problemas con el uso del suelo.
	(Balcombe, Rigby, & Azapagic, 2013)	Reino Unido	M: Las tarifas de entrada, beneficio medioambiental. B: los costos de capital.
	(Baskaran, Managi, & Bendig, 2013)	Nueva Zelanda	B: Falta de información adecuada.
	(Zhang, Shen, & Chan, 2012)	China	B: Alto costo inicial y de reparación, el largo período de recuperación, el espacio de instalación inadecuado e infraestructura de servicios, la falta de participación de las partes interesadas y las restricciones legales y de regulación.

Autogestión	Autor y año	País	Barreras (B) / Motivaciones (M)
Eficiencia energética	(Olsthoorn, Schleich, & Hirzel, 2017)	Alemania	B: Los espacios alquilados, los costos de inversión y las prioridades de inversión, el riesgo técnico para la producción y el riesgo para la calidad del producto.
	(Wang, Li, Liao, & Fang, 2016)	China	M: La recompensa financiera.
	(Chai & Baudelaire, 2015)	Singapur	M: Altos costos de energía. Ofrecer políticas o asistencia para promover las herramientas de monitoreo y medición del desempeño energético, muestran que es un importante factor moderador entre los efectos de la motivación de los costos y los resultados de EE.
	(Schlomann & Schleich, 2015)	Alemania	B: Los espacios alquilados. M: Aumento de los precios de la energía.
	(Brunke, Johansson, & Thollander, 2014)	Países Europeos	B: Económicas y de comportamiento internas.
	(Liu, Yamamoto, & Suk, 2014)	Japón	M: La voluntad de ahorro de energía, el apoyo de la alta dirección y la capacitación interna en las actividades de ahorro de energía industrial y los aumentos de los precios de la energía.
	(Cagno & Trianni, 2014)	Italia	B: Los costos de inversión, la confiabilidad de la fuente de información y los costos ocultos.
	(Kostka, Moslener, & Andreas, 2013)	China	B: La falta de información.
	(Gaspar & Antunes, 2011)	Portugal	B: El costo y la calidad de los equipos eléctricos. Con relación a las etiquetas de los aparatos, el contenido de la etiqueta podría ser más eficaz si incluye información asociada con características como el consumo de energía, consumo de agua, soporte al cliente y garantía.
	(Balachandra, Ravindranath, & Ravindranath, 2010)	India	B: Altos precios de la energía y las asimetrías informacionales.
	(Chen, Delmas, Locke, & Singh, 2017)	India	B: La falta de información: los individuos carecen de la información o conocimiento relevante para participar en comportamientos de ahorro de energía y la adquisición de dicha información es costosa.
	(Doren, Giezen, Driessen, & Runhaar, 2016)	Países bajos	B: La falta de conciencia, la prioridad y la capacidad de recursos de los actores del lado de la demanda y la asimetría de la información mediante la aplicación de estrategias informativas y cooperativas. M: Mitigar el cambio climático, reducir las emisiones de GEI, creación de empleo, oportunidades de negocio y mayor comodidad, salud y calidad de vida de los ciudadanos.

Autogestión	Autor y año	País	Barreras (B) / Motivaciones (M)
Conservación de la energía	(Asensio & Delmas, 2016)	Estados Unidos	M: La información clara sobre las implicaciones ambientales y de salud del uso de la electricidad.
	(Henriques & Catarino, 2016)	Portugal	B: Limitación de recursos, tanto humanos como financieros.
	(Waechter, Sütterlin, & Siegrist, 2015)	Unión Europea	B: la mala interpretación de las etiquetas de los equipos puede conllevar a la toma de decisiones sesgadas, ya que las personas podrían asumir que comprar bienes más grandes y/o más eficientes ya no es problemático si se les asigna una calificación de alta eficiencia. Posteriormente, podrían comprar aparatos más grandes, usarlos con más frecuencia y/o reemplazar productos con más frecuencia. Por lo tanto, el beneficio esperado de la etiqueta energética podría ser neutralizado, o el consumo de energía absoluta podría incluso ser aumentado.
	(Croucher, 2011)	Estados Unidos	B: Falta de conocimiento sobre los costos de sus decisiones de consumo.

De la búsqueda realizada se evidencia la existencia de múltiples factores que intervienen en las decisiones de adquirir tecnología solar FV para la microgeneración de energía, tecnología más eficiente energéticamente y de cambios de hábito de consumo para lograr ahorros significativos de energía. Dichos factores no solo involucran el aspecto financiero, sino que incluye aspectos políticos, institucionales y de información.

De acuerdo con el criterio de varios autores estudiados, plantean que las políticas favorecen la implementación de tecnologías renovables, facilitan la adquisición de tecnologías más eficientes y generan incentivos que permiten el cambio de hábito de consumo de los usuarios. Se realiza entonces el estudio de la segunda línea, donde la revisión se centra en estudios que modelan políticas y los efectos que tienen en la adopción de las tecnologías de microgeneración solar FV, tecnologías de EE y conservación de la energía en el sector comercial. La Tabla 9 resume los principales descubrimientos:

Tabla 9 Efectos de la implementación de políticas sobre la microgeneración con tecnología solar FV, eficiencia energética y conservación de la energía en el sector comercial a través de modelos de simulación

Autogestión	Autor y año	País	Conclusiones	Metodología empleada
Microgeneración solar FV	(Ramírez, Honrubia-Escribano, Gómez-Lázaro, & Pham, 2017)	Reino Unido Alemania Bélgica Francia España Grecia Italia	El estudio obtuvo como resultados que una combinación de tarifas de alimentación (Feed-In Tariff - FIT) con esquemas de medición de redes (NM) es una opción viable para el desarrollo de sistemas FV en la mayoría de países considerados utilizando los sistemas FV estudiados y adoptando niveles adecuados de precios arancelarios.	Modelo económico

Autogestión	Autor y año	País	Conclusiones	Metodología empleada
			Otro de los resultados es que este sistema de generación de energía renovable no es rentable en la mayoría de los casos sin el apoyo de un esquema de compensación de electricidad. Los resultados son favorables solo una vez que la tasa de precio FIT alcanza un nivel mayor que los costos de electricidad.	
	(Ye, Rodrigues, & Lin, 2017)	China	Las políticas de FIT implementadas en China han estimulado con éxito el mercado nacional de energía FV. Sin embargo, esta política generó un incremento en la demanda de la tecnología lo que desencadenó en el recorte de subsidios de FIT.	Modelo de simulación dinámica de sistemas
	(Orioli & Di Gangi, 2017)	Italia	Italia adopta para el año 2001 un esquema FIT y premium para incentivar la difusión de los sistemas FV donde incluía la posibilidad de vender la electricidad a la red, el uso alternativo de medición neta y una tarifa de electricidad superior para los sistemas FV cuya potencia fuera superior a 1000kW. Par el año 2012 el gobierno italiano decidió cambiar radicalmente la forma de promover la futura instalación de sistemas FV. Se eliminaron los esquemas de FITs y primas y se implementó un programa de crédito fiscal. El nuevo esquema de crédito fiscal, actualmente en vigencia, permitió a los propietarios o arrendatarios de edificios, en el que está instalado el sistema FV, para tener diez reembolsos de impuestos anuales correspondientes a un beneficio global en los costos del sistema.	Evaluación energética, económica y de paridad de red
	(Zhang M. , Zhou, Zhou, & Chen, 2017)	China	La investigación propone un modelo de opciones reales para estimar el subsidio óptimo para el proyecto de generación de energía FV mediante el uso de un proceso estocástico para describir el precio de mercado	Método de simulación Monte Carlo de mínimos cuadrados

Autogestión	Autor y año	País	Conclusiones	Metodología empleada
			de la electricidad, el precio del CO2 y el costo de inversión.	
	(Hafeznia, Aslani, Anwar, & Yousefjamali, 2017)	Irán	El propósito del estudio es el análisis y la evaluación de la efectividad de la política de igualdad de energía renovable en las diferentes regiones de un país. Esta investigación se centra en la idea de si la codificación de las políticas energéticas de acuerdo con las circunstancias locales de cada región puede resultar en una mayor eficiencia de tales políticas.	Software RETScreen
	(Radomes Jr. & Arango, 2016)	Colombia	Los autores analizan la difusión de un sistema FV en Medellín, la segunda ciudad más grande de Colombia. El modelo incorpora políticas de subvención y de tarifa de entrada. Se analizan los escenarios de implementación de políticas y los efectos de las mezclas de políticas.	Modelo de simulación dinámica de sistemas
	(Zhang, Zhou, & Zhou, 2016)	China	Este documento evalúa la inversión en energía solar FV al considerar factores inciertos como el precio del CO2, el costo de la energía no renovable, el costo de inversión y el precio de mercado de la electricidad. Se incorpora un mecanismo de eliminación en el modelo para reflejar los cambios a largo plazo de la política de subsidios. Se aplica el modelo propuesto para evaluar empíricamente el valor de inversión y el momento óptimo para la generación de energía solar FV en China.	Modelo de opciones reales
	(Gallego Castillo & Victoria, 2015)	España	El gobierno español adoptó como medida para el despliegue de fuentes de energía renovable las tarifas FIT teniendo gran éxito y posicionando al país como líder en el desarrollo de energía FV y eólica. No obstante, el crecimiento continuo de energías renovables llevó al país a un notable aumento del componente regulado. Como consecuencia, los FIT han sido recientemente cuestionados, y los beneficios subyacentes que	Efecto de orden de mérito

Autogestión	Autor y año	País	Conclusiones	Metodología empleada
			<p>motivaron su implementación han sido desatendidos. Los autores consideran que es necesario al momento de aplicar políticas que busquen incentivar el uso de tecnologías renovables analizar los costos de inversión y adaptar las políticas de acuerdo a cada una de las situaciones particulares de la región.</p>	
	(Sun & Nie, 2015)	-	<p>El estudio compara dos políticas muy comunes implementadas en varios países del mundo, las tarifas FIT y el estándar de la cartera renovable (RPS), para aumentar la cantidad de energía renovable en un país, examinan desde un punto de vista teórico, las diferencias de entrada de innovación y desarrollo, el precio de mercado, el excedente del consumidor y el bienestar social. Los resultados muestran que las tarifas FIT son más eficientes que RPS en el aumento de la cantidad de energía renovable (capacidad instalada), estimulando la entrada de innovación y desarrollo basada en ahorro de costes. Sin embargo, la política de RPS puede ser más eficiente para reducir las emisiones de carbono y mejorar el excedente del consumidor.</p>	Modelo de producto energético de energía sustituible bajo monopolio
	(Bauner & Crago, 2015)	Estados Unidos	<p>En Estados Unidos los gobiernos estatales, en particular, han introducido varios programas de incentivos en forma de descuentos, incentivos fiscales y mandatos para apoyar la energía solar FV. A pesar de generosos incentivos, las tasas de adopción han sido bajas. Una posible razón para la baja adopción de la tecnología es la presencia de incertidumbre en el pago durante la vida útil del sistema FV. La adopción de tecnología solar FV implica grandes costos iniciales con inciertos beneficios futuros. Además, la inversión es</p>	Modelo de simulación

Autogestión	Autor y año	País	Conclusiones	Metodología empleada
			irreversible o muy costosa de revertir. Para lograr disminuir las incertidumbres que presenta los usuarios se requiere de incentivos políticos eficaces para disminuir los tiempos de adopción, como es pagar los créditos de energía solar renovable (SREC) por adelantado o establecer un horario fijo para la disponibilidad de reembolso.	
	(Dufo-López & Bernal-Agustín, 2015)	España	La medición neta y la facturación neta son políticas eléctricas que permiten a los clientes generadores conectados a la red compensar parte o todo su consumo de electricidad y recibir pagos por exceso de energía inyectado en la red. La política de medición neta en España aplica un cargo de acceso a los créditos energéticos utilizados, es decir, la energía exportada se valora más bajo que la energía importada. Una política de medición neta real (como en muchos estados de los Estados Unidos) donde la energía exportada se valora igual que la energía importada implicaría una rentabilidad mucho mayor para el sistema FV y alentaría el desarrollo de este tipo de tecnología.	Metodología integral para la evaluación de los sistemas de medición neta y facturación neta con políticas de crédito continuado
	(Murakami, 2014)	Japón	El estudio examina la influencia de la política social del gobierno y la comunicación vecina entre los clientes a través de un modelo basados en agentes, junto con un análisis del flujo de energía eléctrica, sobre la adopción de generadores distribuidos de energía solar FV. Los resultados muestran la influencia de la política social y las comunicaciones vecinas en la adopción de sistemas FV.	Modelo de simulación basado en agentes
	(Avril, Mansilla, Busson, & Lemaire, 2012)	Estados Unidos Alemania Francia España Japón	Los investigadores afirman que una política recomendada para la incorporación de tecnología FV comenzaría, como lo hizo Japón, con un enfoque en los programas de demostración	Evaluación financiera

Autogestión	Autor y año	País	Conclusiones	Metodología empleada
			<p>que permiten controlar el desarrollo FV (qué sistemas, dónde, cuántos) en la primera fase cuando la tecnología no está madura y apoyo fuerte en innovación y desarrollo para mejorar las tecnologías.</p> <p>En una segunda fase, cuando la tecnología es más madura, las tarifas de entrada y otras políticas de demanda (reducción de impuestos, etc.) son relevantes para impulsar la penetración en el mercado.</p>	
	(Zhao, Mazhari, Celik, & Son, 2011)	Estados Unidos	<p>El objetivo de esta investigación fue desarrollar una herramienta de apoyo a las decisiones para analizar la efectividad de varias políticas (tanto incentivos como regulaciones) sobre la tasa de crecimiento adecuada de los sistemas FV distribuidos que eviten la inestabilidad del sistema de transición o el fuerte aumento del precio de la electricidad.</p> <p>Como resultados se observa que los clientes potenciales en la Ciudad de Nueva York o en las grandes ciudades son menos sensibles a los cambios de ambos incentivos (Crédito fiscal a la inversión (ITC) y FIT) que los clientes potenciales en Tucson al adoptar sistemas FV.</p>	Modelo de simulación basadas en agentes y dinámica de sistemas
Eficiencia energética	(Girod, Stucki, & Woerter, 2017)	Países europeos	<p>Los subsidios financieros y fiscales (como subvenciones o deducciones fiscales), así como las etiquetas de los productos, tienen un mayor impacto en la adopción de tecnología eficiente.</p> <p>Sin embargo, esto no implica que otras políticas que no sean etiquetas y subsidios no sean útiles; es sólo que son menos eficaces en términos de innovación.</p> <p>Las políticas de incentivos contribuyen a la disponibilidad de alternativas tecnológicas, ya sean más eficientes desde el punto de vista energético o más respetuosas con el clima, constituyendo el requisito tecnológico para implementar</p>	Modelo econométrico

Autogestión	Autor y año	País	Conclusiones	Metodología empleada
			requisitos más estrictos a través de estándares.	
	(Gyamfi, Amankwah Diawuo, Nyarko Kumi, Sika, & Modjinou, 2017)	Ghana	El estudio se centra en la sustitución de electrodomésticos, refrigeradores, acondicionadores de aire e iluminación ineficientes, a partir de programas de gestión del lado de la demanda que cuenta con campañas educativas e incentivos financieros. Los resultados arrojan mejores ahorros de energía con la sustitución de iluminación a tecnología de luces fluorescentes compactas.	Cálculo del índice de rendimiento energético
	(Garg, Maheshwari, Shukla, & Rawal, 2017)	India	El gobierno indio ha instituido varias medidas para reducir los costos de transacción por una mayor penetración de los aparatos eficientes energéticamente, como el Programa de Iluminación Eficiente Doméstica (DELP), esquema obligatorio de Estándares y Etiquetado (S&L) y esquema voluntario para equipos eficientes y códigos de construcción de conservación de energía. El documento evalúa el potencial de ahorro de electricidad, a partir del reemplazo de aparatos eficientes en establecimientos comerciales. El aire acondicionado y las luces LED de bajo consumo de energía ofrecen el mayor potencial de ahorro de energía entre los electrodomésticos.	Cálculo del índice de rendimiento energético
	(Matthew, Nuttall, Mestel, & Dooley, 2017)	Isla San Miguel de Azores	Los autores examinan la dinámica de la demanda de electricidad de un sistema insular aislado en respuesta a los cambios derivados de las políticas de baja emisión de carbono y la evolución socioeconómica a través de un modelo de dinámica de sistemas. El modelo evalúa el impacto del turismo, la EE y la expansión de los vehículos eléctricos, utilizando una serie de escenarios.	Modelo de simulación dinámica de sistemas

Autogestión	Autor y año	País	Conclusiones	Metodología empleada
			Finalmente el modelo concluye que las medidas de EE muestran el impacto más significativo a largo plazo sobre la demanda de electricidad.	
	(Chen, Zhou, & Yang, 2017)	China	En este estudio, se utilizaron datos de la industria energética de las 30 provincias de China de 2005 a 2014, para evaluar la EE de la industria de energía provincial de China bajo restricciones ambientales. Los resultados arrojan que debido a los diferentes niveles de desarrollo económico y posición geográfica de las provincias, la implementación de la política de ahorro de energía debe adaptarse a las condiciones particulares de cada una.	Modelo de eficiencia cruzada
	(Stucki & Woerter, 2016)	Suiza	Los investigadores analizan cómo diferentes tipos de políticas, directamente y en combinación, afectan el número de diferentes tecnologías de energía verde adoptadas por una sola empresa. Utilizando datos de una encuesta dedicada a la difusión de tecnologías de energía verde de 1200 empresas suizas y la aplicación de modelos econométricos bien identificados, se descubre que los impuestos a la energía son un instrumento de política muy eficaz para la difusión empresarial de tecnologías de energía verde. Aún más importante, sin embargo, son las medidas no políticas que muestran el mayor efecto entre todos los instrumentos probados.	Modelo econométrico
	(Asere & Blumberga, 2015)	Letonia	La investigación evalúa el impacto a corto y mediano plazo en la EE de los edificios municipales y gubernamentales y los cambios que se realizan mediante el uso de instrumentos de políticas. Los hallazgos del estudio muestran que la implementación de la política tributaria de CO2 alcanza los mejores resultados al aumentar	Modelo de simulación dinámica de sistemas

Autogestión	Autor y año	País	Conclusiones	Metodología empleada
			la proporción de edificios para alcanzar la eficiencia energética.	
	(Cabalu, Koshy, Corong, Rodriguez, & Endrigo, 2015)	Filipinas	Los autores analizan los efectos de las políticas de cambio climático en Filipinas, como el uso de impuestos sobre el carbono, medidas para mejorar la EE y cambios en la mezcla de generación de electricidad del país. Los resultados indican que una respuesta de política que fomenta medidas de eficiencia y un cambio en la combinación de combustibles utilizados en la generación de electricidad tiene el menor impacto a medio plazo en la economía (hasta 2020) en comparación con la introducción de un impuesto al carbono.	Modelo de equilibrio general computable PHILGEM-E
	(Martínez & Morales, 2013)	Colombia	Los resultados del modelado de políticas que generan mayor adopción de refrigeradores eficientes durante el periodo de simulación, se dio al implementar políticas de eliminación del IVA del costo inicial del equipo y un incentivo de información sobre la eficiencia energética del producto. Por otra parte se identificó que las políticas fiscales que buscan reducir los costos de inversión inicial, no generan una mayor adopción de la tecnología, se considera que un incentivo de este tipo, sería más efectivo si hiciera parte de un programa que también involucrara la parte de la oferta y no sólo la demanda.	Modelo de simulación dinámica de sistemas
Conservación de la energía	(Supasa, Hsiau, Lin, Wongsapai, & Wu, 2016)	Tailandia	Los investigadores realizan un análisis de la efectividad de la implementación de las políticas de conservación de energía en Tailandia desde 1995 a 2010 en algunos sectores de la economía. Se concluye que la mejora en la intensidad energética fue muy poca en algunos sectores, esto se debe principalmente a los insuficientes recursos humanos y de información, que junto con las normas de incertidumbre	Análisis de entrada-salida de energía

Autogestión	Autor y año	País	Conclusiones	Metodología empleada
			<p>obstaculizaron la promoción de políticas. Además, las políticas de subsidio a los combustibles con objetivos y efectos contradictorios fueron considerables obstáculos para las políticas de conservación de la energía. La ineficiencia de los subsidios condujo a un desincentivo para conservar la energía y aumentar el consumo.</p>	
	(de la Rue du Can, Leventis, Phadke, & Gopal, 2014)	Estados Unidos	<p>Los programas de incentivos han sido implementados principalmente por los gobiernos para impulsar el crecimiento a largo plazo de los mercados de productos limpios. Los programas de incentivos ayudan a la tecnología a madurar y estimular la inversión del sector privado. Algunos ejemplos de implementación de programas de incentivos en diferentes países son: crédito fiscal, reembolso de la deducción fiscal, reducción del IVA, ecopuntos, financiamiento de remplazo de factura, reembolso y subvenciones. La investigación encuentra que los programas de incentivos financieros tienen un mayor impacto cuando se dirigen a tecnologías altamente eficientes con una pequeña participación de mercado, y que los diseños de los programas dependen de las barreras de mercado que se abordan, el equipo objetivo y el contexto del mercado local.</p>	Análisis de políticas
	(Kounetas, Skuras, & Tsekouras, 2011)	Grecia	<p>Los incentivos que utiliza Grecia para hacer un uso racional de la energía incluyen las subvenciones para maquinaria, edificios y otros activos, bonificaciones de intereses, primas libres de impuestos, tasas impositivas favorables y cotizaciones sociales más bajas. Los resultados muestran que es necesario superar la barrera de la información para que las demás políticas puedan acelerar la adopción de EE.</p>	Modelo econométrico

De esta revisión puede concluirse que uno de los incentivos más abordados en la literatura para promover el uso de energía renovable es el FIT. En el caso de las políticas para incentivar el uso de tecnología más eficiente están los subsidios financieros y fiscales como las subvenciones o deducciones y para el caso de la conservación de la energía la herramienta más utilizada son las campañas de participación con la comunidad, donde se educa a los usuarios sobre los hábitos de consumo responsable y se incentiva a conseguir ahorros de energía.

A su vez, las metodologías más utilizadas en los estudios son los modelos de simulación de dinámica de sistemas y análisis econométricos. Para el caso del presente estudio se realizará un análisis a partir de dinámica de sistemas, debido a que lo que se quiere analizar es el efecto de la microgeneración solar FV, la EE y la conservación de la energía en el subsector comercial supermercados en Colombia. En el numeral 6 se da más detalle de la metodología a utilizar.

Finalmente, todos los mecanismos políticos buscan la difusión de tecnologías renovables y eficientes y los cambios de hábitos de consumo de los usuarios, presentando efectos positivos en los países implementados. La tercera línea se enfoca en el análisis de estudios que incorporen elementos de racionalidad limitada que explican el fenómeno de adopción de tecnologías encaminadas a la microgeneración de energía solar FV, EE y conservación de la energía. Los principales hallazgos se encuentran en la Tabla 10.

Tabla 10 Análisis de estudios que incorporen elementos de racionalidad limitada para explicar el fenómeno de difusión de tecnología solar FV, eficiencia energética y conservación de la energía

Autogestión	Autor y año	País	Conclusiones
Microgeneración	(Jimenez, Franco, & Dyner, 2016b)	Colombia	La investigación estudia la difusión de la tecnología fotovoltaica y los efectos de su penetración en el mercado eléctrico. Se aborda la problemática a través del desarrollo de un modelo de simulación con dinámica de sistemas. 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.
	(Zeppini, 2015)	Estados Unidos	El estudio propone un modelo de elección discreta de transiciones sostenibles de tecnologías de generación de energía "sucias" a "limpias". Los agentes pueden adoptar una tecnología u otra, bajo la influencia de las interacciones sociales y las externalidades de la red. En lo que respecta a las externalidades tecnológicas de la red, estos factores son los estándares

Autogestión	Autor y año	País	Conclusiones
			<p>tecnológicos y las infraestructuras. Cuando las interacciones sociales también son importantes, si las decisiones se basan en lo que hace la mayoría de los agentes, siempre ganará una tecnología predominante y más rentable.</p> <p>Los canales de política tradicionales, como el impuesto a la contaminación y las tarifas de alimentación tienen un papel auxiliar, aunque importante, en nuestro modelo. En comparación con las tarifas de alimentación, un impuesto sobre la contaminación promueve transiciones más suaves y rápidas.</p>
Microgeneración y eficiencia energética	(Hommes & Zeppini, 2014)	Estados Unidos	<p>El estudio describe los efectos del comportamiento de cambio tecnológico con cambio evolutivo entre innovadores costosos e imitadores libres, y la interacción endógena de las decisiones de innovación, la dinámica de los precios del mercado y el progreso tecnológico.</p> <p>Las simulaciones de modelos se comparan con dos ejemplos de sectores industriales: la industria de neumáticos de EE. UU. Y la tecnología solar global. Una buena coincidencia de ambos conjuntos de series de tiempo se obtiene ajustando la elasticidad precio de la demanda. Esta evidencia muestra cómo la interacción del modelo entre las condiciones del mercado y los comportamientos de los agentes es un mecanismo poderoso para reproducir diferentes patrones de cambio tecnológico.</p>
	(Cárdenas, Franco, & Dyner, 2015)	Colombia	<p>El documento estudia el proceso de adopción de nuevas tecnologías de generación de energía y EE, basado en la teoría de la racionalidad limitada de la toma de decisiones, donde se identifican un grupo de oportunidades y deseos presentes en los consumidores a la hora de autogestionar su consumo.</p>
	(Zapata, Franco, & Dyner, 2014)	Colombia	<p>El estudio evalúa las diferentes políticas para la autogestión de electricidad en el sector residencial urbano de Colombia, por medio de un modelo de simulación en dinámica de sistemas aplicando racionalidad limitada. A la luz de los resultados obtenidos y las políticas estudiadas se considera que son altamente efectivas para la promoción de la autogestión dentro del sector residencial.</p>
Eficiencia energética y conservación de la energía	(Gazheli, Antal, & Bergh, 2015)	España	<p>La investigación examina cómo las ideas modernas sobre la racionalidad limitada, la interacción social y el aprendizaje pueden contribuir a hacer que las políticas de transición sean más efectivas para abordar las barreras y oportunidades para realizar una transición de sostenibilidad en el futuro cercano.</p> <p>Las transiciones son difíciles de fomentar debido a factores de impedimento, como el aumento de los rendimientos a escala y la dependencia de la</p>

Autogestión	Autor y año	País	Conclusiones
			<p>trayectoria, que a menudo se traducen en soluciones subóptimas. Además, el poder de los grupos de interés creados y las anomalías de comportamiento, como la resistencia no racional al cambio, pueden obstaculizar una transición. Varias teorías sociales enfatizan diferentes factores que facilitan y dificultan las transiciones</p>
	(Zeppini, Frenken, & Kupers, 2014)	Reino Unido	<p>El estudio presenta una revisión sistemática de siete modelos de umbral de transiciones tecnológicas de física, biología, economía y sociología. El mismo fenómeno de una transición tecnológica puede explicarse por lógicas muy diferentes, que van desde explicaciones económicas basadas en precio, rendimiento y rendimientos crecientes hasta explicaciones alternativas basadas en recomendaciones de boca en boca, convergencia de expectativas o comportamiento de imitación social.</p> <p>Los estudios históricos han demostrado que las transiciones a menudo no se entienden bien como una simple batalla entre la tecnología antigua y la nueva. Más bien, en el proceso de las transiciones, varias alternativas compiten con nuevas alternativas que surgen de la recombinación.</p>
	(Safarzyńska & Van den Bergh, 2011)	Reino unido	<p>El artículo expone un modelo formal de cambio tecnológico, donde las tecnologías energéticas se difunden a través de la construcción de nuevas centrales eléctricas.</p> <p>Se consideraron dos versiones de modelo: con inversores racionales y racionalmente limitados. Se encuentra que la versión del modelo con inversores racionales es capaz de replicar las características principales de la historia eléctrica del Reino Unido. Esto incluye una rápida difusión del gas en la producción de electricidad, la evolución del tamaño promedio de las plantas recién instaladas y un alto porcentaje de las ventas de electricidad cubiertas por contratos (a futuro) por diferencia. En este ajuste de modelo, las energías nucleares y renovables no tienen oportunidad de difundirse en el mercado.</p> <p>En la versión del modelo con inversionistas limitadamente racionales, la energía nuclear típicamente domina la producción de electricidad. Se discuten las implicaciones de los resultados de modelado para hacer una transición a la electricidad baja en carbono en el futuro.</p>
	(Escudero & Botero, 2009)	Colombia	<p>El estudio presenta el estado del arte de teorías y metodologías de toma de decisión difundidas en la literatura y que abordan temas vinculados con la implementación de sistemas de cogeneración, como son la EE y la adopción de nuevas tecnologías y se analiza cómo estas han tratado de explicar un fenómeno complejo como la brecha energética.</p> <p>Con base en el análisis de estas aproximaciones se plantea una propuesta conceptual que ubica al ente decisor como principal objeto de estudio y al proceso real de toma de decisión como un</p>

Autogestión	Autor y año	País	Conclusiones
			mecanismo que facilita la identificación y posterior comprensión del fenómeno desde los principios de la racionalidad limitada.
	(Franco & Dynner, 2004)	Colombia	En la investigación se estudia el mercado energético desde el punto de vista de la racionalidad del consumidor y la función de los comercializadores y el gobierno. Dentro de este marco se exploran las diferentes corrientes de toma de decisiones, se plantea, una propuesta metodológica novedosa, fundamentada en modelos que incorporan la racionalidad limitada, que pueden contribuir al desarrollo de políticas y estrategias que conduzcan al aprovechamiento eficiente de la energía. La metodología se aplicó a problemas de penetración de bombillos eficiente y gas natural en Colombia y el Reino Unido.

De esta revisión puede concluirse que las decisiones de adoptar una tecnología renovable, eficiente y hábitos de conservación de energía, aborda aspectos más allá del costo o los elementos financieros, incluyendo aspectos sociales y de conocimiento de los beneficios de implementar dicha acción o tecnología. Las limitaciones en la racionalidad del consumidor no desaparecen estableciendo políticas específicas. La creación de políticas debe ir dirigida no solo a mejorar la tecnología eficiente, sino a hacer visible los beneficios de su implementación.

## 2.2. Objetivos

En el capítulo anterior y en el actual, se presentaron los avances a nivel mundial y de país en cuanto a las estrategias actuales que incentivan o se convierten en barreras de entrada para la adopción de microgeneración solar FV, eficiencia energética y conservación de la energía en el subsector comercial: supermercados. A partir de ellos, se establecen los objetivos de investigación que se presentan a continuación.

### 2.2.1 Objetivo general

Evaluar políticas de autogestión de electricidad en el sector comercial en Colombia.

### 2.2.2 Objetivos específicos

- Identificar políticas de microgeneración, EE y conservación de la energía aplicables al sector comercial.
- Describir el contexto regulatorio colombiano para la implementación de microgeneración, EE y conservación de la energía en sector comercial.

- Desarrollar un modelo de simulación que permita evaluar políticas de microgeneración, EE y conservación de la energía para sector comercial no regulado en Colombia para supermercados.

### **2.3. Alcance**

Esta tesis permitirá comprender las políticas que aceleran el proceso de adopción de autogestión de electricidad en el sector comercial en Colombia.

Como resultados directos se obtendrán los siguientes:

- Una identificación de las políticas de microgeneración, EE y conservación de la energía aplicables al sector comercial.
- Una descripción del contexto regulatorio colombiano para la implementación de microgeneración, EE y conservación de la energía en sector comercial.
- Un modelo de simulación que permita evaluar políticas de microgeneración, EE y conservación de la energía para sector comercial no regulado en Colombia para supermercados.

### **2.4. Conclusiones del capítulo**

En este capítulo se realizó una revisión de literatura para analizar la adopción de autogestión de la energía en los supermercados en Colombia, a través de: las barreras de ingreso, las motivaciones, políticas e incentivos existentes. Adicional se plantearon los objetivos que orientaron el desarrollo de la investigación. En los capítulos siguientes se presenta el proceso de la investigación y se interpretan los resultados arrojados.

## Capítulo 3. Metodología

Este capítulo describe la metodología utilizada durante el desarrollo de la tesis, argumentando su elección y las etapas que la componen.

### 3.1. Dinámica de sistemas

La innovación tecnológica es el principal motor del desarrollo económico (Arthur, 2011) y tiene la capacidad de configurar y cambiar la sociedad. Por tanto, las organizaciones adoptan nuevas tecnologías con el objetivo de mejorar los procesos internos, ofrecer mejores servicios y productos al mercado y seguir siendo competitivos. Si las empresas o entes gubernamentales obtienen información sobre el proceso de difusión y comprenden la dinámica del desarrollo de la tecnología, pueden construir modelos más predictivos para apoyar la toma de decisiones más efectivas y oportunas (Tsai & Hung, 2014). El campo de la difusión de la tecnología en sí no solo está relacionado con la evolución de la tecnología, sino también con otros factores, como la sociedad y el medio ambiente.

Varios investigadores han propuesto una variedad de modelos de difusión tecnológica (Meade & Islam, 2006; Robertson, Soopramanien, & Fildes, 2007; Hung & Wang, 2010; Hameed, Counsell, & Swift, 2012). Los modelos se han utilizado para predecir los posibles sucesos en el pasado, sin embargo, estos modelos generalmente han sido modelos de predicción, como los modelos de series de tiempo (Papatheodorou & Song, 2005), modelos econométricos (Algieri, 2006) y redes neuronales (Palmer, Montano, & Sese, 2006). Estos modelos se basan en datos históricos para predecir tendencias futuras con el supuesto de que el mundo de mañana será muy parecido al de hoy. La consecuencia es que cuando las condiciones son inestables, estos modelos se vuelven poco confiables porque las tendencias históricas se convierten en indicadores pobres de las tendencias futuras (Mai & Smith, 2018).

Para abordar los problemas cada vez más complejos de la sociedad, (Sterman, 2000) señala la necesidad de desarrollar una perspectiva de pensamiento sistémico, es decir, la capacidad de ver el mundo como un sistema complejo, en el que entendemos que "no se puede hacer una sola cosa" y que "todo está conectado a todo lo demás". Existen diferentes escuelas de pensamiento y campos de aplicación del pensamiento de sistemas que cubren métodos cualitativos, así como también modelos formales de dinámica de sistemas. La dinámica de sistemas es una metodología introducida por (Forrester, 1958), la cual permite mapear relaciones dentro de sistemas complejos para modelar las no linealidades de los sistemas, los ciclos de retroalimentación y los retrasos y para diseñar intervenciones de políticas. La dinámica de sistemas convierte los resultados obtenidos del estudio empírico en un modelo matemático de difusión de innovaciones para permitir la predicción del comportamiento de un sistema a lo largo del tiempo.

Esta metodología intenta identificar los patrones de comportamiento que muestran las variables importantes del sistema, y luego construye un modelo que puede imitar los patrones. Una vez que el modelo tiene esta capacidad, se puede usar como un laboratorio para probar políticas dirigidas a

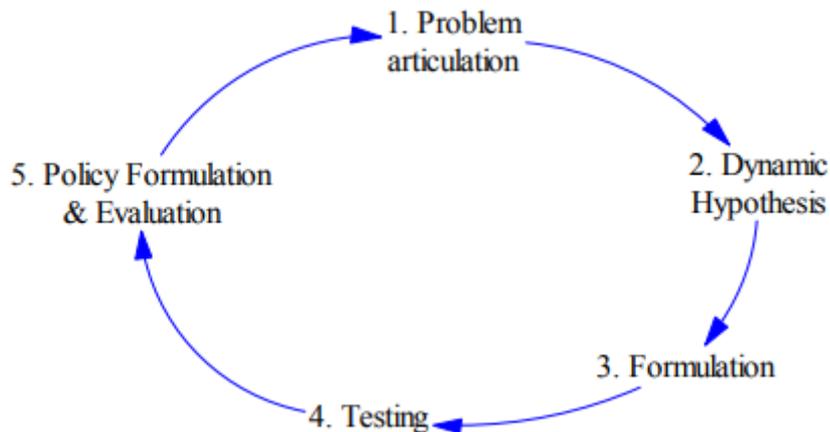
modificar el comportamiento de un sistema de la manera deseada (Abbaspour, Drebenstedt, Badroddin, & Maghaminik, 2018).

Teniendo en cuenta las características ya mencionadas de la dinámica de sistemas, el presente trabajo hace uso de esta herramienta para entender el comportamiento de la demanda de energía del subsector comercial supermercados en Colombia cuando se aplican políticas para la autogestión de la electricidad y las consecuencias que genera un cambio en sus parámetros. Esta herramienta permite representar las relaciones entre los parámetros de una manera evidente y simple.

### 3.2. Etapas metodológicas

De acuerdo con (Sterman, 2000) *“No existe una receta de libro de cocina para un modelado exitoso, no hay un procedimiento que pueda seguir para garantizar un modelo útil. El modelado es inherentemente creativo”*; sin embargo, para guiar el proceso de modelado Sterman propuso cinco etapas: articulación del problema, formulación de la hipótesis dinámica, formulación del modelo de simulación, validación y diseño y evaluación de políticas. Dichas etapas como se exponen en el Gráfico 15 se dan en un proceso de modelado interactivo.

Gráfico 15 Etapas metodológicas Sterman (2000)



Fuente: (Sterman, 2000)

**Etapas de articulación del problema:** Esta etapa se reconoce como el paso más importante en el proceso de modelado. En esta etapa se identifica el problema real y el propósito del modelo, describiendo los parámetros fundamentales y el horizonte de tiempo para el estudio (Sterman, 2000). Para garantizar que el modelo desarrollado sea útil, se debe abordar un problema específico. Todos los modelos útiles tienen una característica común: simplifican la realidad, facilitando así la comprensión. Por lo tanto, un propósito claro contribuye en gran medida a aclarar los elementos que deben incluirse en el modelo y cuáles no.

**Etapas de formulación de la hipótesis dinámica:** La hipótesis dinámica es una teoría que explica cómo el sistema desarrolló su comportamiento observado actual. La hipótesis es dinámica, ya que

proporciona una explicación de la dinámica que caracteriza al sistema en términos de la retroalimentación subyacente (Sterman, 2000). Para la elaboración de la hipótesis dinámica se llevó a cabo la revisión de literatura para examinar los aportes existentes del tema e identificar los elementos vitales para su inclusión en el modelo, de esta manera se puede entender esquemáticamente el problema y las variables que interactúan en el sistema y se formulan los diagramas causales.

**Etapas de formulación del modelo de simulación:** En esta etapa se formula un diagrama de flujos y niveles, los cuales son modelos cuantitativos que representan un sistema con niveles y flujos. Los niveles son acumuladores de dinero, bienes e información, calibrados para caracterizar el estado de un sistema en un momento determinado y para generar la información sobre la cual se basan las decisiones y acciones. Los flujos corresponden al cambio por período de tiempo que aumenta o disminuye los niveles en el sistema. Este tercer paso también incluye el desarrollo de reglas de decisión (ecuaciones matemáticas), la cuantificación de variables y la calibración del modelo utilizando parámetros para definir condiciones iniciales (Sterman, 2000).

**Etapas de validación:** Debido a la importancia de los modelos de simulación en la toma de decisiones estratégicas, es necesario validar si el modelo provee la representación adecuada del sistema real. La prueba del modelo comprende mucho más que una simple replicación de datos históricos. Se realizaron pruebas en el modelo para garantizar la consistencia dimensional, la sensibilidad del modelo en términos de recomendaciones de políticas, así como la incertidumbre en los supuestos. En la validación se comparan los resultados obtenidos con modelos de referencia y se realiza un análisis de sensibilidad frente a parámetros de interés (Sterman, 2000). Estas pruebas son herramientas vitales para identificar fallas en el modelo.

**Etapas de diseño y evaluación de políticas:** Esta última etapa se relaciona con la formulación de nuevas estrategias potenciales y la evaluación de resultados simulados. Este último paso requiere, por un lado, la identificación de escenarios (estrategias alternativas), y por otro lado, el análisis de los resultados simulados generados por el modelo para cada escenario a lo largo del tiempo. Por lo tanto, el modelo de simulación apunta a probar y comparar diferentes escenarios de acciones "ficticias", para predecir los comportamientos futuros del sistema bajo consideración (Sterman, 2000).

### **3.3. Conclusiones del capítulo**

En este capítulo se expone la metodología utilizada para el desarrollo de la investigación, sus características, usos y etapas metodológicas. En el próximo capítulo se describe el modelo de dinámica de sistemas construido para analizar la adopción de microgeneración solar FV, eficiencia energética y conservación de la energía en los supermercados en Colombia.

## Capítulo 4. Modelo de simulación

En este capítulo se describe y valida el modelo de simulación desarrollado para estudiar la adopción de tecnología solar FV, tecnologías eficientes energéticamente y las acciones de conservación de energía en el subsector comercial supermercados en Colombia.

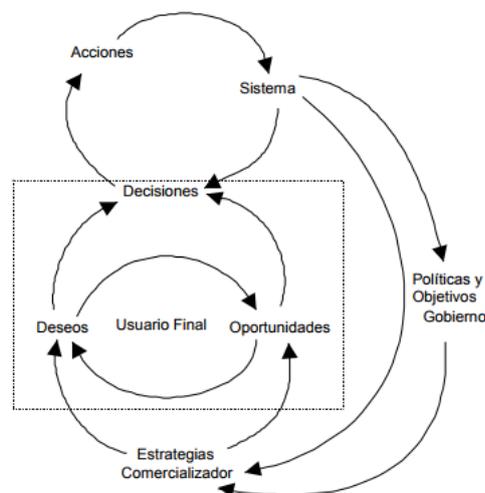
### 4.1. Reglas de decisión del modelo

El proceso de toma de decisiones de un individuo de acuerdo con Simon (2007), se basa en la racionalidad, sin embargo, la racionalidad se asume en un contexto de certeza lo que en la vida real no pasa todo el tiempo, debido a la falta de conocimiento de todas las posibilidades y la imposibilidad de procesar toda la información.

A raíz de la complejidad de la toma de decisiones en un contexto real, se desarrolla la teoría de la racionalidad limitada, la cual admite al hombre como un ser que trata de ser racional con lo que tiene y de esta manera busca formas apropiadas en la toma de decisiones (Simon, 1999). De acuerdo con (Elster, 1990), para que una acción sea tomada como racional debe ser el resultado de tres decisiones: el deseo, las creencias y las evidencias. Los deseos y creencias deben fundamentarse de la mejor manera y tener la mayor cantidad de evidencias necesarias para que sean respaldados. De esta manera la toma de decisiones es un proceso más reflexivo (Elster, 1990).

En el contexto del mercado eléctrico, Dyer & Franco (2004) establecen que los deseos y las oportunidades incitan el proceso de toma de decisiones sobre la electricidad y la racionalidad limitada permite entender gran parte del comportamiento de los individuos en los mercados de electricidad. Ver Gráfico 16.

Gráfico 16 Marco general de toma de decisiones del consumidor



Fuente: (Dyer & Franco, 2004)

De acuerdo con el esquema propuesto, las decisiones de adoptar y sustituir tecnologías más eficientes y respetuosas con el medio ambiente va a depender del conocimiento, los valores y la actitud que tenga el usuario frente al medio ambiente (deseo), de la disponibilidad y del precio de la tecnología (oportunidades) y de las regulaciones y políticas existentes e incentivos (condiciones del sistema). La toma de decisiones del usuario va a ser el resultado de equilibrar las oportunidades y los deseos.

## **4.2. Propósito del modelo**

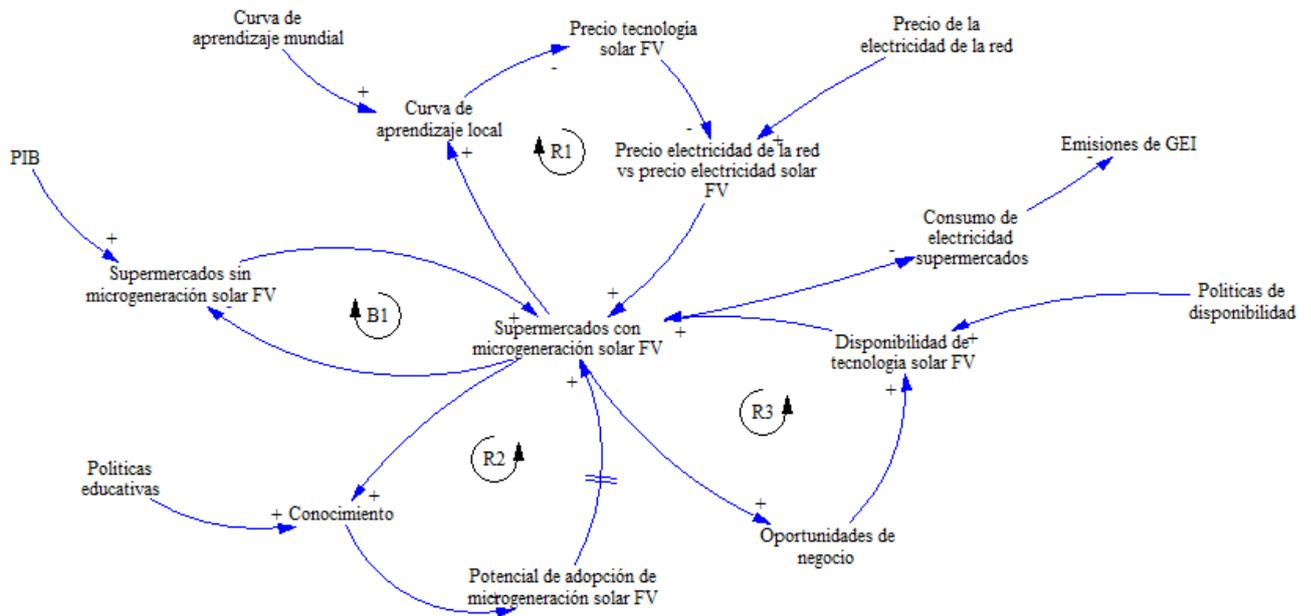
El modelo de simulación se desarrolló utilizando la metodología de dinámica de sistemas y la plataforma de simulación PowerSim Studio 10. El modelo tiene como propósito analizar las políticas de autogestión en el proceso de adopción de la tecnología solar FV, las tecnologías eficientes y la conservación de la energía en el subsector comercial supermercados en Colombia. La descripción detallada del modelo se realiza en las secciones siguientes.

## **4.3. Hipótesis dinámica microgeneración**

El Gráfico 17 muestra la hipótesis dinámica, la cual a través de 4 ciclos de realimentación (1 de balance y 3 de refuerzo) explica las relaciones causales de las variables del sistema.

De manera general, la hipótesis muestra los supermercados que adoptan la tecnología solar FV debido al beneficio percibido por la disminución en el costo de la energía eléctrica comparado con la tarifa de la red, además del conocimiento adquirido de la tecnología a través de políticas de difusión y disponibilidad generadas por el gobierno. A mayor crecimiento del PIB, mayor cantidad de supermercados, lo que produce a su vez mayor cantidad de supermercados con tecnología solar FV, generando una disminución en el consumo de energía eléctrica de la red lo que al mismo tiempo produce una disminución en las emisiones de GEI.

Gráfico 17 Hipótesis dinámica de la adopción de tecnología solar FV en el subsector comercial supermercados de Colombia. Elaboración propia

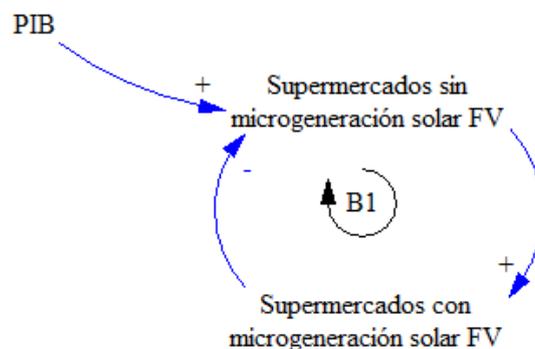


Para una mejor comprensión del diagrama causal, se muestra en el siguiente numeral los ciclos de realimentación que componen el Gráfico 17.

#### 4.4. Análisis por ciclos de realimentación microgeneración

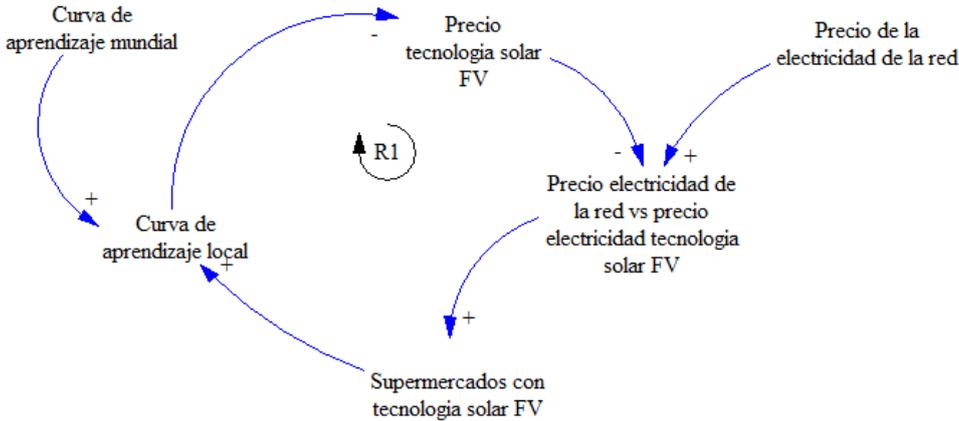
El ciclo B1 muestra como los supermercados aumentan a medida que el PIB aumenta, esto produce que los supermercados con tecnología solar FV aumenten y en la medida que exista más supermercados con microgeneración van a existir menos supermercados sin tecnología.

Gráfico 18 Diagrama causal microgeneración. Ciclo B1. Elaboración propia



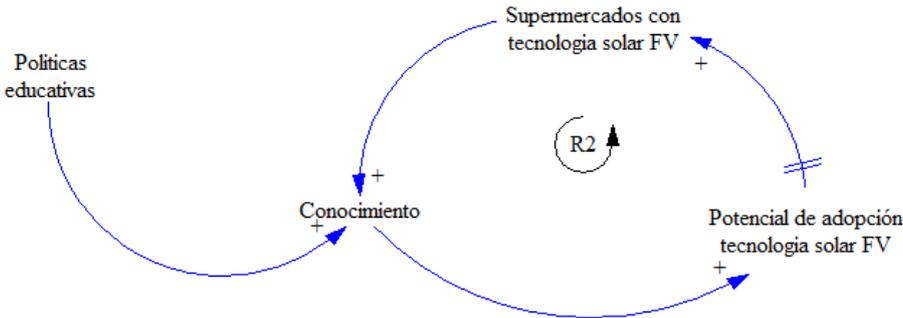
El ciclo R1 expone la relación del precio de la electricidad de la red y el precio de generar electricidad a través de la tecnología solar FV para satisfacer las necesidades de electricidad de un supermercado. A mayor desarrollo de la tecnología solar FV a nivel mundial, habrá un mayor desarrollo de la tecnología en Colombia, lo que crea en el futuro, a una disminución en el precio de la tecnología y un aumento en el número de supermercados autogeneradores.

Gráfico 19 Diagrama causal microgeneración. Ciclo R1. Elaboración propia



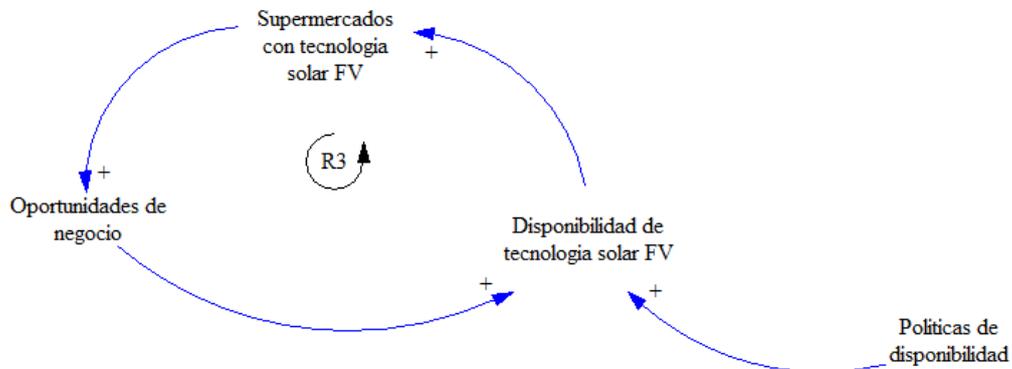
El ciclo R2, evidencia como las políticas educativas implementadas por el gobierno generan mayor conocimiento al consumidor final y esto produce un aumento en la adopción de tecnología solar FV. Mientras mayor sea la comprensión que poseen las personas respecto a los avances tecnológicos y sus ventajas, mayor será el número de supermercados con tecnología solar FV.

Gráfico 20 Diagrama causal microgeneración. Ciclo R2. Elaboración propia



Finalmente, el ciclo de refuerzo R3 representa la influencia de la disponibilidad de la tecnología solar FV. A medida que exista mayor disponibilidad de la tecnología solar FV en el mercado, producto de las políticas públicas y mayores oportunidades de negocio, mayor será el número de supermercados autogeneradores.

Gráfico 21 Diagrama causal microgeneración. Ciclo R3. Elaboración propia



## 4.5. Diagrama de flujos y niveles microgeneración

La hipótesis dinámica descrita en la sección anterior, puede ser representada por medio de un diagrama de flujos y niveles, con el propósito de entender la adopción de tecnología solar FV en supermercados en Colombia. En el anexo A se encuentra el diagrama de flujos y niveles desarrollado en PowerSim Studio 10 para la adopción de microgeneración solar FV.

Para entender el modelo desarrollado es necesario detallar los siguientes parámetros empleados.

### 4.5.1. Costo nivelado de energía

El costo de energía nivelado -LCOE, se define como el costo total de vida del sistema solar FV dividido sobre la energía generada por el arreglo solar (Pearce, 2011). Finalmente se traduce en el precio que vale la energía eléctrica generada por el sistema solar FV, para calcularlo se utilizó la Ecuación 1:

Ecuación 1 Costo nivelado de energía

$$LCOE = \frac{I_t + O \text{ y } M_t}{E_t}$$

Donde:

$I_t$  = Costos de inversión [\\$]

$O$  y  $M_t$  = Costos de operación y mantenimiento [\\$]

$E_t$  = Energía generada [kWh]

Para calcular los componentes de la Ecuación 1 se empleó:

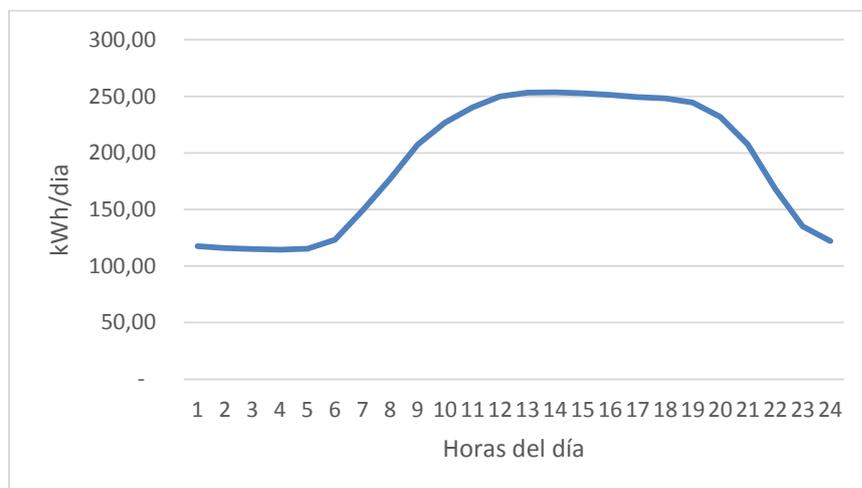
- El costo de inversión ( $I_t$ ) (Costos paneles + inversores + instalación), fue calculado a través del costo por unidad de potencia instalada, información suministrada por la empresa ERCO Energía con un valor de 1,3 USD/W.
- De acuerdo con (Cellura, Di Gangi, Longo, & Orioli, 2012; Van der Zwaan & Rabl, 2004) los costos de operación y mantenimiento ( $O$  y  $M_t$ ) podrán estar alrededor del 1,5-2% respecto al costo total de inversión inicial del sistema. En este trabajo se asumen los costos de operación y mantenimiento un 2% del costo de la inversión total.
- La energía generada ( $E_t$ ) del arreglo solar se calculó teniendo en cuenta un factor de degradación de los paneles del 1% anual ( $d_t$ ) en los 15 años de simulación, capacidad instalada ( $C_i$ ), el número de horas al mes y el número de horas de sol promedio en Colombia ( $F_c$ ) (6 horas (IDEAM, 2018)).

Ecuación 2 Energía generada por el panel solar al mes

$$E_t = d_t * C_i * F_c * 30$$

- La capacidad instalada es definida como la potencia nominal del arreglo solar. Para calcular la capacidad instalada de cada supermercado se tuvo en cuenta la curva de carga (ver Gráfico 22) elaborada a partir de la información suministrada por XM de la demanda de energía por código CIU (XM, 2016a).

Gráfico 22 Curva de carga supermercados usuarios no regulados



Elaboración propia a partir de (XM, 2016a)

Para calcular la capacidad instalada se emplea la siguiente ecuación:

Ecuación 3 Capacidad instalada del arreglo solar

$$C_i = P_{max} * N_{pv}$$

Donde:

$P_{max}$  = Potencia máxima del panel [kW]

$N_{pv}$  = Número de paneles

La Potencia máxima de cada panel va a ser de 250W de acuerdo con las características de un módulo comercial y teniendo en cuenta que el valor pico de la demanda de los supermercados de acuerdo con la Gráfico 22 es de 250 kWh, la cantidad de paneles para suplir la demanda en hora pico se calcula de acuerdo a la Ecuación 4.

Ecuación 4 Número de paneles arreglo solar

$$N_{pv} = \frac{\text{Demanda hora pico}}{P_{max}}$$

Luego, la cantidad de paneles necesario para suplir la demanda en hora pico es de 1000 paneles de 250W cada uno. Sin embargo, asumimos un 20% más de paneles por la degradación de los mismos, la cual es del 1% anual y considerando que nuestro modelo de simulación es de 15 años, por lo que finalmente es un total de 1200 paneles.

Si reemplazamos los datos en la Ecuación 3 obtenemos una capacidad instalada de 300 kW. La capacidad instalada propuesta es suficiente para abastecer la necesidad de energía durante 6 horas de uso. Luego si queremos conocer la capacidad instalada del arreglo solar por día (Ecuación 5), solo basta con multiplicar por el número de horas de sol promedio en Colombia ( $F_c = 6h$ ) obteniendo una capacidad de 1800 kWh.

Ecuación 5 Capacidad instalada del arreglo solar por día

$$C_i = P_{max} * N_{pv} * F_c$$

Finalmente, el costo nivelado de energía es calculado para que el tomador de decisiones del supermercado, tenga la opción de decidir si consume energía de la red o generar su propia energía a partir de tecnología solar FV, al contrarrestar el precio de la energía de la red con el precio de la energía del arreglo solar. De esta manera se espera que la microgeneración solar FV tenga un costo de energía menor con respecto al costo de energía de la red.

#### 4.5.2 Intensidad energética de la red

La intensidad energética se refiere al consumo de electricidad por supermercado. La intensidad energética es definida como la cantidad de MWh consumidos por un supermercado promedio de Colombia durante un mes. Para su cálculo se tomó el valor de la demanda de energía eléctrica de los supermercados y el número de supermercados en Colombia para el año 2016, datos obtenidos por (XM, 2016a). Para alcanzar la intensidad energética de la re se empleó la Ecuación 6:

Ecuación 6 Intensidad energética de la red

$$IE_{red} = \frac{\text{Demanda energía supermercados}}{\text{Número de supermercados}}$$

### 4.5.3 Intensidad energética arreglo solar

Para el cálculo de la intensidad energética del arreglo solar se tiene en cuenta la intensidad energética de la red (ver numeral 4.5.2) y la energía generada por el arreglo solar (ver numeral 4.5.1). Obteniendo la Ecuación 7:

Ecuación 7 Intensidad energética arreglo solar

$$IE_{arreglo} = IE_{red} - E_t$$

Ambas intensidades energéticas (la de la red y el arreglo solar) son empleadas para calcular el consumo de energía de los supermercados que adoptan tecnología solar FV. De esta manera se calcula el nuevo consumo que tienen los supermercados que adoptan la tecnología, el cual disminuye con respecto a la intensidad energética del SIN.

### 4.5.4 Modelo de adopción de sistemas de generación

Los supermercados que adoptarían la tecnología solar FV, deben de pasar por un análisis de decisión de dos etapas, en la primera se emplea el proceso de difusión de tecnologías de Bass (1969), en el cual se caracteriza la difusión como un proceso de contagio derivado de influencias externas (publicidad y mercadeo) e influencias internas (efecto voz a voz). Dichas influencias definen la tasa de conocimiento de la tecnología solar FV y, posteriormente, se evalúa económicamente de acuerdo con una función logit, el precio de la electricidad de la red y el precio de la energía generada por la tecnología solar FV (Costo nivelado de energía – LCOE), de manera que el usuario tenga la posibilidad de escoger la tecnología que mejor precio ofrezca.

- **Modelo Bass:** este modelo determina los supermercados que conocen la tecnología solar FV y quienes no la conocen.

Tabla 11 Ecuación modelo de Bass microgeneración

Formulación y descripción	Unidades
$\frac{dSnC}{dt} = NS$	Supermercado
Los supermercados que no conocen la tecnología ( <i>SnC</i> ) se incrementan con el flujo de entrada del crecimiento de nuevos supermercados ( <i>NS</i> ).	
$\frac{dSC}{dt} = PC$	Supermercado
Los supermercados que conocen la tecnología ( <i>SC</i> ) se incrementan con el flujo de entrada de los supermercados que no conocen la tecnología y se denomina proceso de conocimiento ( <i>PC</i> ).	
$PC = AI_i + AI_e$	Supermercado/mes

El proceso de conocimiento ( $PC$ ) se calcula por la suma entre la adopción por influencias internas ( $AI_i$ ) y la adopción por influencias externas ( $AI_e$ ) (Mahajan, Muller, & Bass, 1990) (Sterman, 2000)	
$AI_i = \frac{q * i * SC * SP}{ST}$	<b>Supermercado/mes</b>
La adopción por influencias internas ( $AI_i$ ), se describe por los supermercados totales ( $ST$ ), los supermercados potenciales ( $SP$ ), la fracción de adopción ( $i$ ), la tasa de contacto ( $q$ ) y los supermercados que conocen ( $SC$ )	
$AI_e = SP * q$	<b>Supermercado/mes</b>
La adopción por influencias externas ( $AI_e$ ), se describe por los supermercados potenciales ( $SP$ ) y el coeficiente de innovación ( $p$ ).	

Fuente: Elaboración propia a partir de (Zapata, Franco, & Dyner, 2014)

- **Customer Choice:** se utilizó para determinar la selección de la tecnología solar FV de acuerdo al precio de la energía.

Tabla 12 Ecuación Customer choice microgeneración

<b>Formulación y descripción</b>	<b>Unidades</b>
$AR_i = \frac{C_i^{-y}}{\sum_j C_j^{-y}}$	%
Donde $i$ = tecnología, $y$ = un parámetro que indica la voluntad de cambiar ( $\gamma > 0$ ), las características de la tecnología $C_i$ = el precio del arreglo solar y $C_j$ = precio de la electricidad de la red (Dyner & Franco, 2004)	
$\frac{dSnC}{dt} = PC$	<b>Supermercado</b>
Los supermercados que conocen pero no seleccionan la microgeneración ( $SCnSM$ ) se incrementan con el flujo de entrada de nuevos supermercados que no seleccionan microgeneración ( $SnSM$ ).	
$\frac{dSM}{dt} = SCCM + SCnCM$	<b>Supermercado</b>
Los supermercados con microgeneración ( $SM$ ) se incrementan con el flujo de entrada de los nuevos supermercados que conocen y creen microgeneración ( $SCCM$ ) y el flujo de nuevos supermercados que conocen pero no creen en la microgeneración ( $SCnCM$ ).	

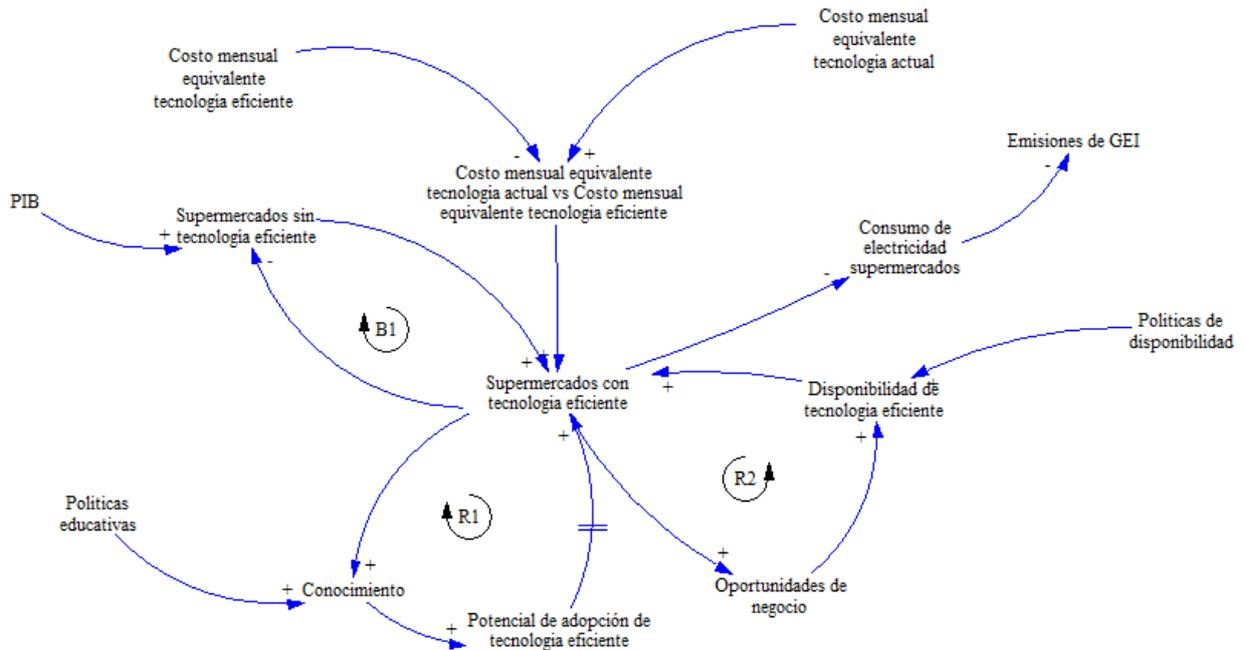
Fuente: Elaboración propia a partir de (Zapata, Franco, & Dyner, 2014)

## 4.6 Hipótesis dinámica eficiencia energética

El Gráfico 23 muestra la hipótesis dinámica desarrollada, la cual a través de 3 ciclos de realimentación (1 de balance y 2 de refuerzo) explica las relaciones causales de las variables del sistema.

De manera general, la hipótesis muestra los supermercados que adoptan tecnología eficiente debido al beneficio percibido por la disminución en el costo de inversión y operación de la tecnología eficiente comparado con el costo de inversión y operación de la tecnología actual, además del conocimiento adquirido de las tecnologías eficientes a través de políticas de difusión y disponibilidad generadas por el gobierno. A mayor crecimiento del PIB, mayor cantidad de supermercados, lo que produce a su vez mayor cantidad de supermercados con tecnologías eficientes, generando una disminución en el consumo de energía eléctrica de la red lo que al mismo tiempo produce una disminución en las emisiones de GEI.

Gráfico 23 Hipótesis dinámica difusión de tecnología eficiente en el subsector comercial supermercados de Colombia. Elaboración propia

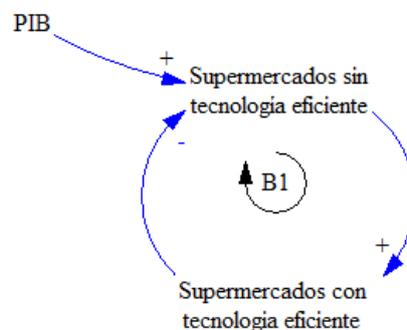


Para una mejor comprensión del diagrama causal, se muestra en el siguiente numeral ciclos de realimentación que componen el Gráfico 23.

#### 4.7 Análisis por ciclos de realimentación eficiencia energética

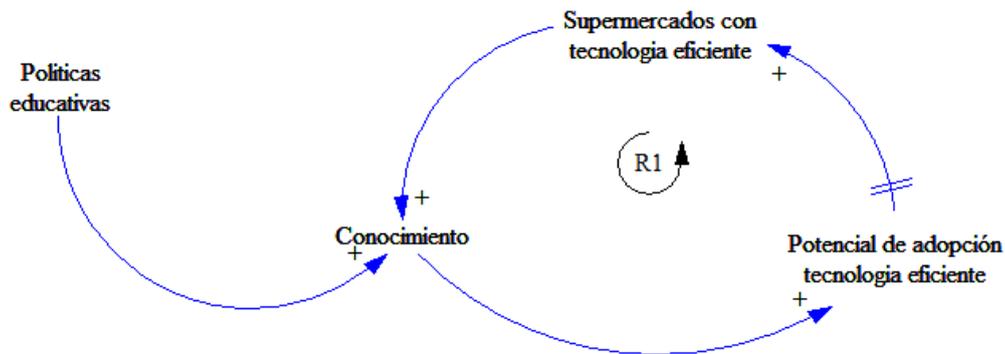
El ciclo B1 muestra como los supermercados aumentan a medida que el PIB aumenta, esto origina que los supermercados con tecnología eficiente aumenten y en la medida que exista más supermercados con tecnología eficiente van a existir menos supermercados sin tecnología eficiente.

Gráfico 24 Diagrama causal EE. Ciclo B1. Elaboración propia



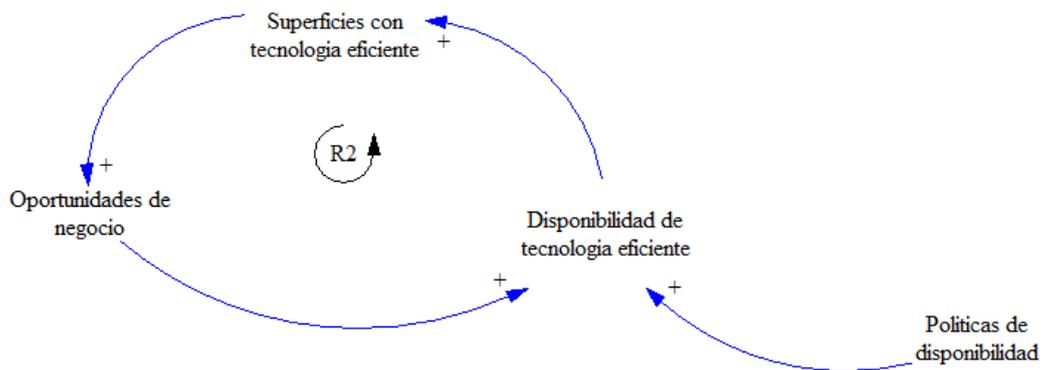
El ciclo R1, evidencia como las políticas educativas creadas por el gobierno propician mayor conocimiento al consumidor final y esto genera un aumento en la adopción de tecnologías eficientes. Mientras mayor sea la comprensión que poseen las personas respecto a los avances tecnológicos y sus ventajas, mayor será el número de supermercados con tecnologías eficientes.

Gráfico 25 Diagrama causal EE. Ciclo R1. Elaboración propia



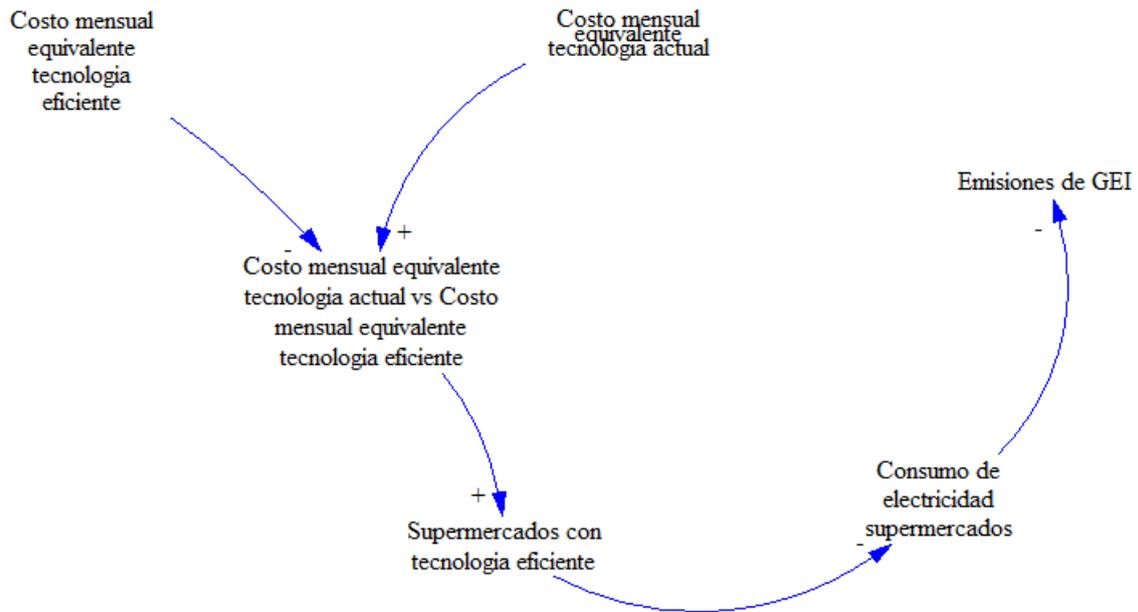
El ciclo de refuerzo R2, representa la influencia de la disponibilidad de las tecnologías eficientes. A medida que exista mayor disponibilidad de las tecnologías eficientes en el mercado, impulsadas por políticas públicas y mayores oportunidades de negocio, mayor será el número de supermercados con tecnologías eficientes.

Gráfico 26 Diagrama causal EE. Ciclo R2. Elaboración propia



Las variables exógenas expuestas en el Gráfico 27, como es el costo mensual equivalente de la tecnología eficiente, contienen la relación de los costos de inversión y operación de las tecnologías actuales y los costos de inversión y operación de las tecnologías eficientes para satisfacer las necesidades de electricidad de un supermercado. A menor costo mensual equivalente de las tecnologías eficientes, mayor número de supermercados que adoptarían las tecnologías, generando un menor consumo de electricidad y una disminución en las emisiones de GEI.

Gráfico 27 Diagrama causal EE. Variables exógenas. Elaboración propia



## 4.8 Diagrama de flujos y niveles eficiencia energética

La hipótesis dinámica descrita en la sección anterior, puede ser representada por medio de un diagrama de flujos y niveles, con el propósito de entender la adopción de tecnología eficiente en los supermercados en Colombia. En el anexo A se encuentra el diagrama de flujos y niveles desarrollado en PowerSim Studio 10 para la adopción de tecnología eficiente.

Para entender el modelo desarrollado es necesario detallar los siguientes parámetros empleados.

### 4.8.2 Intensidad energética tipo de tecnología (iluminación, ventilación y refrigeración)

La intensidad energética para el módulo de eficiencia, se calcula de acuerdo al consumo de energía de la tecnología empleada para suplir las necesidades en iluminación, ventilación y refrigeración de un supermercado en un mes, tanto de la tecnología actual como la tecnología a la que se quiere sustituir. Se emplea la Ecuación 8:

Ecuación 8 Intensidad energética tipo de tecnología

$$IE_{tecnología} = Consumo\ de\ energía\ tecnología * Número\ de\ horas\ de\ uso\ de\ la\ tecnología$$

La intensidad energética por tipo de tecnología es empleada para calcular el consumo de energía de los supermercados que adoptan la tecnología eficiente. De esta manera se calcula el nuevo consumo

que tienen los supermercados que adoptan las tecnologías eficientes, el cual disminuye con respecto a la intensidad energética de las tecnologías actuales.

### 4.8.3 Costo mensual equivalente eficiencia energética

El costo mensual equivalente es la cantidad de dinero por mes del costo de inversión de la tecnología sea la actual o la eficiente, durante la vida útil del activo en meses y el costo de operación de la tecnología en términos de consumo de energía teniendo en cuenta el precio de electricidad de la red (Payán, 2001). Se emplea la Ecuación 9:

Ecuación 9 Costo Mensual Equivalente por tipo de tecnología

$$CME = \frac{\text{Costo de inversión}}{\text{Vida útil}} + \text{Costo de operación}$$

El costo mensual equivalente es usado para que el tomador de decisiones del supermercado, tenga la opción de decidir que tecnología adoptar de acuerdo con el costo mensual equivalente más económico. De esta manera se espera que las tecnologías eficientes tengan un costo mensual equivalente menor con respecto a la tecnología actual.

### 4.8.4 Modelo de sustitución de tecnologías ineficientes

Los supermercados que adoptarían las tecnologías eficientes, deben de pasar por un análisis de decisión de dos etapas, en la primera se emplea el proceso de difusión de tecnologías de Bass (1969), en el cual se caracteriza la difusión como un proceso de contagio derivado de influencias externas (publicidad y mercadeo) e influencias internas (efecto voz a voz). Dichas influencias definen la tasa de conocimiento de la tecnología eficiente y, posteriormente, se evalúa económicamente de acuerdo con una función logit, el costo mensual equivalente de la tecnología actual y el costo mensual equivalente de la tecnología eficiente, de manera que el usuario tenga la posibilidad de escoger la tecnología que mejor costo ofrezca.

- **Modelo Bass:** este modelo determina los supermercados que conocen las tecnologías eficientes y quienes no las conocen.

Tabla 13 Ecuación modelo de Bass eficiencia energética

Formulación y descripción	Unidades
$\frac{dSnC}{dt} = NS$	Supermercado
Los supermercados que no conocen la tecnología ( $SnC$ ) se incrementan con el flujo de entrada del crecimiento de nuevos supermercados ( $NS$ ).	
$\frac{dSC}{dt} = PC$	Supermercado
Los supermercados que conocen la tecnología ( $SC$ ) se incrementan con el flujo de entrada de los supermercados que no conocen la tecnología y se denomina proceso de conocimiento ( $PC$ ).	
$PC = AI_i + AI_e$	Supermercado/mes

El proceso de conocimiento ( $PC$ ) se calcula por la suma entre la adopción por influencias internas ( $AI_i$ ) y la adopción por influencias externas ( $AI_e$ ) (Mahajan, Muller, & Bass, 1990) (Sterman, 2000)	
$AI_i = \frac{q * i * SC * SP}{ST}$	<b>Supermercado/mes</b>
La adopción por influencias internas ( $AI_i$ ), se describe por los supermercados totales ( $ST$ ), los supermercados potenciales ( $SP$ ), la fracción de adopción ( $i$ ), la tasa de contacto ( $q$ ) y los supermercados que conocen ( $SC$ )	
$AI_e = SP * q$	<b>Supermercado/mes</b>
La adopción por influencias externas ( $AI_e$ ), se describe por los supermercados potenciales ( $SP$ ) y el coeficiente de innovación ( $p$ ).	

Fuente: Elaboración propia a partir de (Zapata, Franco, & Dyner, 2014)

- **Customer Choice:** se utilizó para determinar la selección de las tecnologías eficientes de acuerdo al costo mensual equivalente.

Tabla 14 Ecuación Customer choice eficiencia energética

<b>Formulación y descripción</b>	<b>Unidades</b>
$AR_i = \frac{C_i^{-y}}{\sum_j C_j^{-y}}$	%
Donde $i$ = tecnología, $y$ = un parámetro que indica la voluntad de cambiar ( $\gamma > 0$ ), las características de la tecnología $C_i$ = el costo mensual equivalente de la tecnología actual y $C_j$ = costo mensual equivalente de la tecnología eficiente (Dyner & Franco, 2004)	
$\frac{dSnC}{dt} = PC$	<b>Supermercado</b>
Los supermercados que conocen pero no seleccionan la tecnología eficiente ( $SCnSTE$ ) se incrementan con el flujo de entrada de nuevos supermercados que no seleccionan la tecnología eficiente ( $SnSTE$ ).	
$\frac{dSTE}{dt} = SCCTE + SCnCTE$	<b>Supermercado</b>
Los supermercados con tecnología eficiente ( $STE$ ) se incrementan con el flujo de entrada de los nuevos supermercados que conocen y creen en la tecnología eficiente ( $SCCTE$ ) y el flujo de nuevos supermercados que conocen pero no creen en la tecnología eficiente ( $SCnCTE$ ).	

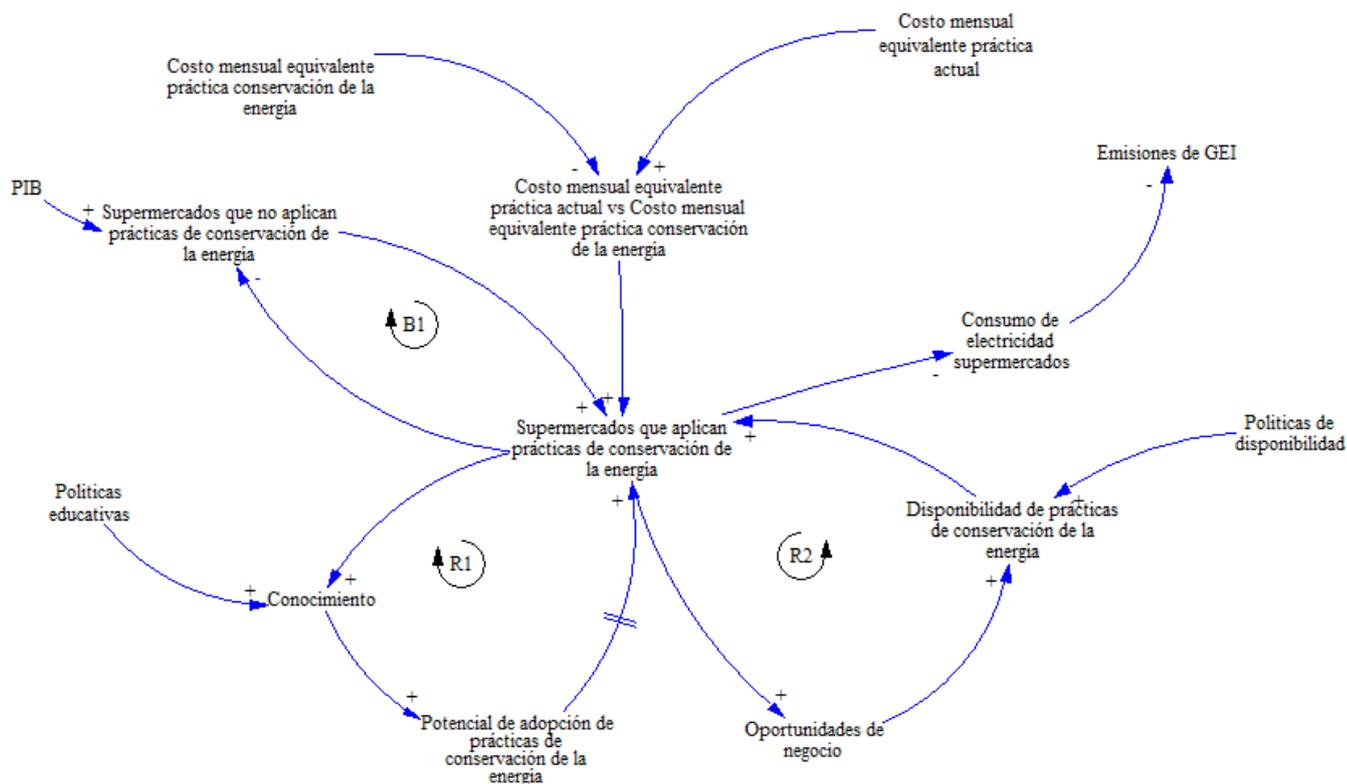
Fuente: Elaboración propia a partir de (Zapata, Franco, & Dyner, 2014)

## 4.9 Hipótesis dinámica conservación de la energía

El Gráfico 28 muestra la hipótesis dinámica desarrollada, la cual a través de 3 ciclos de realimentación (1 de balance y 2 de refuerzo) explica las relaciones causales de las variables del sistema.

De manera general, la hipótesis muestra los supermercados que aplican prácticas de conservación de la energía debido al beneficio percibido por la disminución en el costo de operación en el uso de la energía, además del conocimiento adquirido de las prácticas de conservación a través de políticas de difusión y disponibilidad aplicadas por el gobierno. A mayor crecimiento del PIB, mayor cantidad de supermercados, lo que produce a su vez mayor cantidad de supermercados con prácticas de conservación de la energía, generando una disminución en el consumo de energía eléctrica de la red lo que al mismo tiempo produce una disminución en las emisiones de GEI.

Gráfico 28 Hipótesis dinámica difusión de prácticas conservación de la energía en el subsector comercial supermercados de Colombia. Elaboración propia

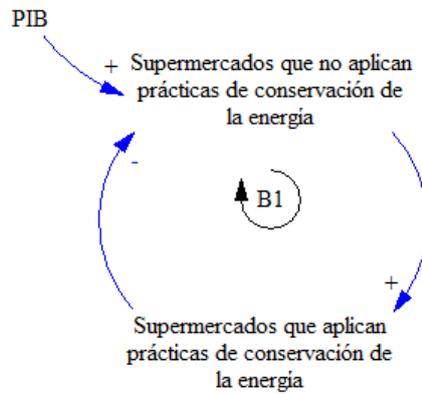


Para una mejor comprensión del diagrama causal, se muestra en el siguiente numeral los ciclos de realimentación que componen el Gráfico 28.

#### 4.10 Análisis por ciclos de realimentación conservación de la energía

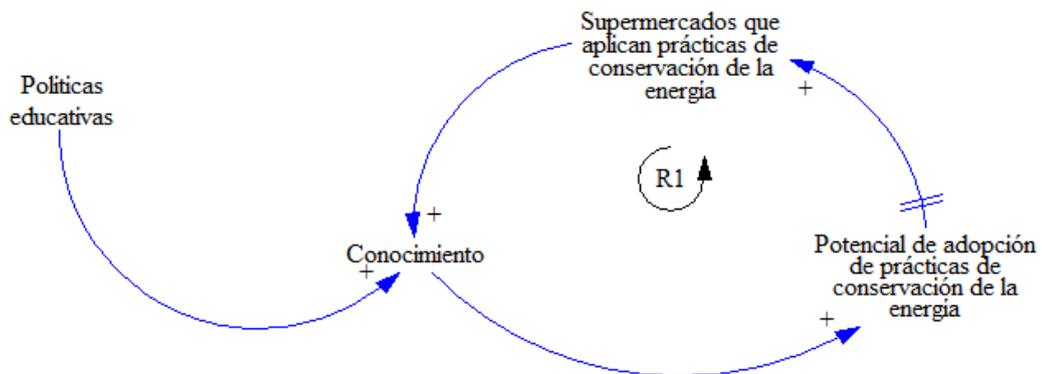
El ciclo B1 muestra como los supermercados aumentan a medida que el PIB aumenta, esto produce que los supermercados con prácticas de conservación de la energía aumenten y en la medida que exista más supermercados con prácticas de conservación de la energía van a existir menos supermercados sin prácticas de conservación de la energía.

Gráfico 29 Diagrama causal conservación de la energía. Ciclo B1. Elaboración propia



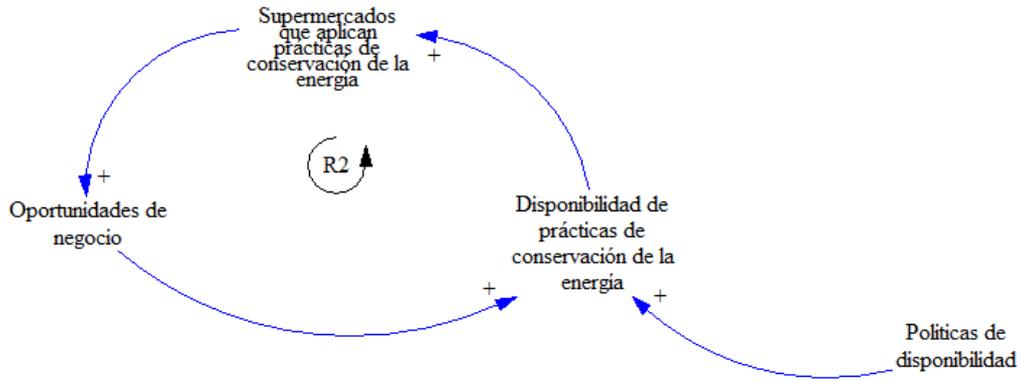
El ciclo R1, evidencia como las políticas educativas creadas por el gobierno ocasionan mayor conocimiento al consumidor final y esto genera un aumento en la aplicación de prácticas de conservación de la energía. Mientras mayor sea la comprensión que poseen las personas respecto a cambios en los hábitos de consumo y sus ventajas, mayor será el número de supermercados con prácticas de conservación de la energía.

Gráfico 30 Diagrama causal conservación de la energía. Ciclo R1. Elaboración propia



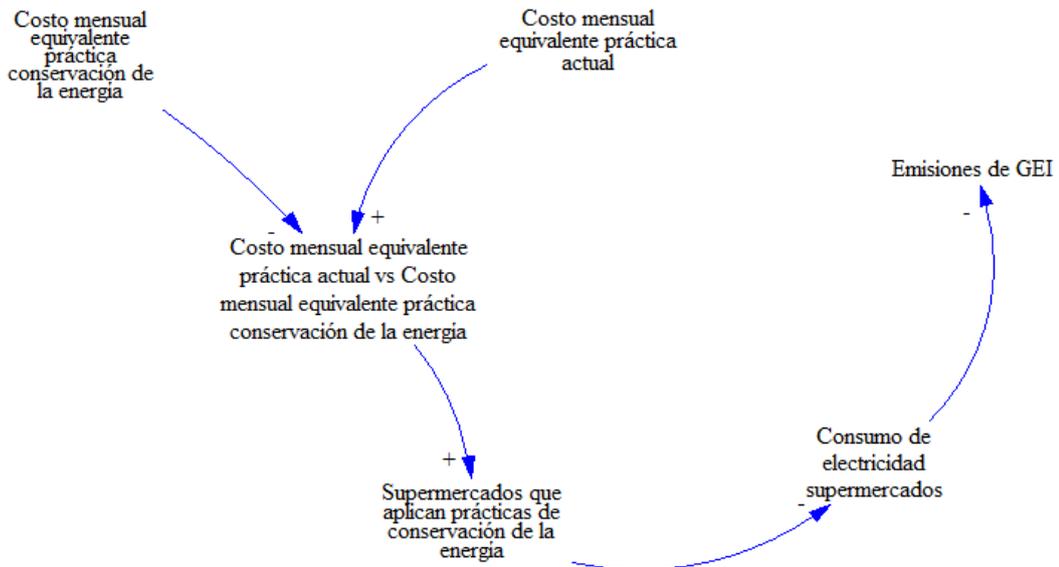
El ciclo de refuerzo R2, representa la influencia de la disponibilidad de las prácticas de conservación de la energía. A medida que exista mayor disponibilidad de las prácticas en el mercado, impulsadas por políticas públicas y mayores oportunidades de negocio, mayor será el número de supermercados con prácticas de conservación de la energía.

Gráfico 31 Diagrama causal conservación de la energía. Ciclo R2. Elaboración propia



Las variables exógenas del costo mensual equivalente expuestas en el Gráfico 32, contienen la relación de los costos de inversión y operación de las prácticas actuales y los costos de inversión y operación de las prácticas eficientes para satisfacer las necesidades de electricidad de un supermercado. A menor costo mensual equivalente de las prácticas de conservación de la energía, mayor número de supermercados que aplicarían hábitos de conservación de la energía, generando un menor consumo de electricidad y una disminución en las emisiones de GEI.

Gráfico 32 Diagrama causal conservación de la energía. Variables exógenas. Elaboración propia



#### 4.11 Diagrama de flujos y niveles conservación de la energía

La hipótesis dinámica descrita en la sección anterior, puede ser representada por medio de un diagrama de flujos y niveles, con el propósito de entender la aplicación de prácticas de conservación

de la energía en los supermercados en Colombia. En el anexo A se encuentra el diagrama de flujos y niveles desarrollado en PowerSim Studio 10 para la aplicación de prácticas de conservación de la energía.

Para entender el modelo desarrollado es necesario detallar los siguientes parámetros empleados.

#### 4.11.2 Intensidad energética con prácticas de conservación de la energía

La intensidad energética para el módulo de conservación, se calcula teniendo en cuenta el porcentaje de ahorro de energía al aplicar alguna práctica de conservación de la energía para iluminación, ventilación o refrigeración, y la intensidad energética por el tipo de tecnología (iluminación, ventilación o refrigeración) calculada en el numeral 4.8.1. Se emplea la Ecuación 10:

Ecuación 10 Intensidad energética conservación de la energía

$$IE_{conservación} = IE_{tecnología} - (IE_{tecnología} * \%Ahorro \text{ de acuerdo al uso})$$

Para el porcentaje de ahorro de energía de acuerdo al uso de la misma, se realizó una revisión de literatura de las prácticas más utilizadas en el sector comercial para ahorrar energía eléctrica y se encontró lo siguiente:

Tabla 15 Revisión de literatura prácticas más empleadas en el sector comercial para el ahorro de energía eléctrica

Tipo de uso	Práctica empleada	% Ahorro promedio	Fuente
Iluminación	Apagar la luz manual	24	(Zhang, Bai, P.Mills, & Pezzey, 2018) ; (Lowry, 2016) ; (Ayoub, Musharavati, Pokharel, & A.Gabbar, 2014)
	Apagar la luz con sensores de movimiento	26	(Fernández & Roqueñí, 2018) ; (Lowry, 2016) ; (Ayoub, Musharavati, Pokharel, & A.Gabbar, 2014)
	Regulación de luz natural	45	(Lowry, 2016) ; (Ayoub, Musharavati, Pokharel, & A.Gabbar, 2014)
Ventilación	Control temperatura termostato aire acondicionado	18,54	(Fernández & Roqueñí, 2018) ; (Zhang, Bai, P.Mills, & Pezzey, 2018) ; (Chedwal, Mathur, Agarwal, & Dhaka, 2015) ; (Ayoub, Musharavati, Pokharel, & A.Gabbar, 2014)

Tipo de uso	Práctica empleada	% Ahorro promedio	Fuente
Refrigeración	Uso de cortinas para refrigeradores	33,8	(Fernández & Roqueñí, 2018) ; (Chaomuang, Flick, & Laguerre, 2017) ; (Ayoub, Musharavati, Pokharel, & A.Gabbar, 2014)

Los porcentajes de ahorro registrados en la Tabla 15 son un valor promedio de todas las cifras arrojadas en cada uno de los estudios, finalmente este trabajo utilizó el valor promedio para determinar el ahorro de energía al implementar prácticas de conservación en los tres grandes usos de la energía del subsector supermercados. Las prácticas de conservación de la energía para supermercados empleadas en este estudio son las siguientes:

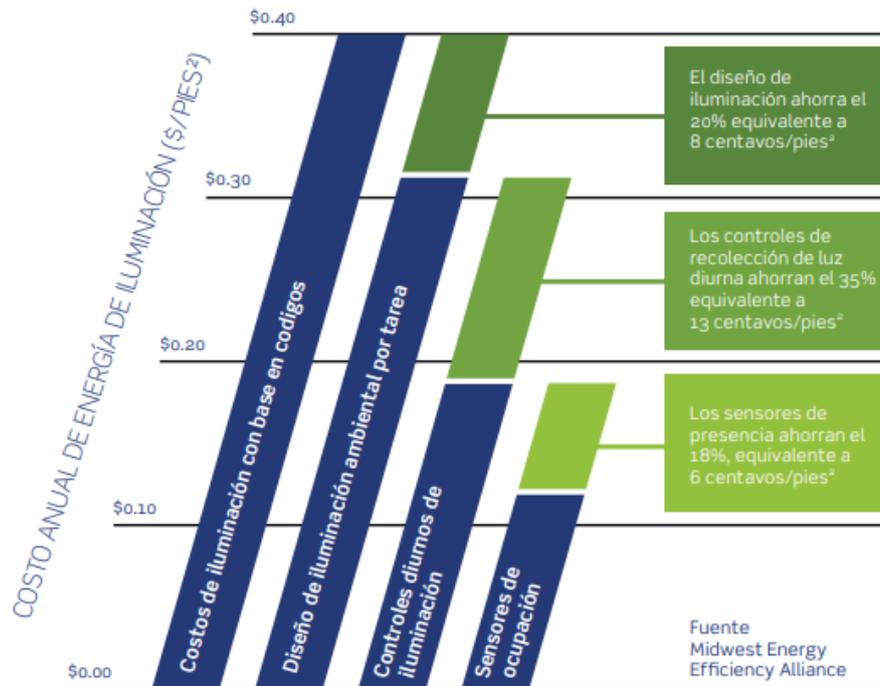
#### Iluminación:

- Uso de sensor de luminosidad, el sensor lee el valor de luminosidad en el área, de tal manera que el sensor gradúa el aporte de luz diurna, incrementando o disminuyendo la atenuación de la carga conectada.

El uso de este tipo de sensores de acuerdo con Leviton (2014) incrementa de manera significativa la longevidad de las lámparas a 6-8 años en comparación con los 3 años de duración de las lámparas que permanecen siempre encendidas, gracias a que no se desperdicia su vida durante las horas de luz o sin ocupación. Otra de las ventajas es la menor frecuencia del reemplazo de lámparas y la disminución asociada en los costos de mantenimiento (Leviton, 2014).

El Gráfico 33 muestra el potencial de costo – ahorro de la implementación de diferentes prácticas de conservación de la energía frente a la práctica de emplear sensores de luz diurna.

Gráfico 33 Potencial de costo – ahorro de la implementación de sensores de luz diurna



Fuente: Midwest Energy Efficiency Alliance a partir de (Leviton, 2014)

- 31 % de ahorro promedio de energía.

#### Ventilación:

- Control de temperatura del sistema de aire acondicionado, esta práctica ayudará a optimizar el ambiente interior del supermercado, por lo que mejorará el rendimiento de control del ambiente interior, mejorando a su vez la eficiencia de la utilización de la energía.

Controlar la temperatura del sistema de aire acondicionado permite tener una regulación correcta de las temperaturas de operación, los parámetros de humedad y la entrada de aire, ya que, por cada grado adicional de aire acondicionado, el consumo de energía aumenta en un 5-8% (Chauhan & Rajput, 2016).

- 19 % de ahorro promedio de energía.

#### Refrigeración:

- Uso de cortinas para refrigeradores nocturna, previenen el desplazamiento de aire frío fuera de la nevera, lo que reduce el consumo de energía requerida para mantener la temperatura adecuada y prolongar la vida útil de la mercancía.
- 34 % de ahorro promedio de energía.

La intensidad energética por prácticas de conservación de energía es empleada para calcular el consumo de energía de los supermercados que aplican prácticas de conservación. De esta manera se

calcula el nuevo consumo que tienen los supermercados que aplican las prácticas de conservación, el cual disminuye con respecto a la intensidad energética de las prácticas actuales.

#### 4.11.3 Costo mensual equivalente conservación de la energía

El costo mensual equivalente es la cantidad de dinero por mes del costo de inversión de la práctica de conservación sea la actual o la que se quiere implementar, durante la vida útil del activo (si hay inversión en tecnología que ayude a lograr la conservación) en meses y el costo de operación de la práctica en términos de consumo de energía teniendo en cuenta el precio de electricidad de la red (Payán, 2001). Se emplea la Ecuación 11:

Ecuación 11 Costo mensual equivalente conservación de la energía

$$CME = \frac{\text{Costo de inversión}}{\text{Vida útil}} + \text{Costo de operación}$$

El costo mensual equivalente es usado para que el tomador de decisiones del supermercado, tenga la opción de decidir que práctica de conservación de la energía aplicar de acuerdo con el costo mensual equivalente más económico. De esta manera se espera que las prácticas de conservación de la energía tengan un costo mensual equivalente menor con respecto a las prácticas actuales.

#### 4.11.4 Modelo de aplicación de prácticas de conservación de la energía

Los supermercados que adoptarían las prácticas de conservación de la energía, deben de pasar por un análisis de decisión de dos etapas, en la primera se emplea el proceso de difusión de tecnologías de Bass (1969), en el cual se caracteriza la difusión como un proceso de contagio derivado de influencias externas (publicidad y mercadeo) e influencias internas (efecto voz a voz). Dichas influencias definen la tasa de conocimiento de las prácticas de conservación y, posteriormente, se evalúa económicamente de acuerdo con una función logit, el costo mensual equivalente de la práctica actual y el costo mensual equivalente de la práctica eficiente, de manera que el usuario tenga la posibilidad de escoger la práctica que mejor costo ofrezca.

- **Modelo Bass:** este modelo determina los supermercados que conocen las las prácticas de conservación de la energía y quienes no las conocen.

Tabla 16 Ecuación modelo de Bass conservación de la energía

Formulación y descripción	Unidades
$\frac{dSnC}{dt} = NS$	Supermercado
Los supermercados que no conocen las prácticas de conservación ( $SnC$ ) se incrementan con el flujo de entrada del crecimiento de nuevos supermercados ( $NS$ ).	
$\frac{dSC}{dt} = PC$	Supermercado

Los supermercados que conocen las prácticas de conservación ( <b>SC</b> ) se incrementan con el flujo de entrada de los supermercados que no conocen las prácticas de conservación y se denomina proceso de conocimiento ( <b>PC</b> ).	
$PC = AI_i + AI_e$	Supermercado/mes
El proceso de conocimiento ( <b>PC</b> ) se calcula por la suma entre la adopción por influencias internas ( <b>AI<sub>i</sub></b> ) y la adopción por influencias externas ( <b>AI<sub>e</sub></b> ) (Mahajan, Muller, & Bass, 1990) (Sterman, 2000)	
$AI_i = \frac{q * i * SC * SP}{ST}$	Supermercado/mes
La adopción por influencias internas ( <b>AI<sub>i</sub></b> ), se describe por los supermercados totales ( <b>ST</b> ), los supermercados potenciales ( <b>SP</b> ), la fracción de adopción ( <b>i</b> ), la tasa de contacto ( <b>q</b> ) y los supermercados que conocen ( <b>SC</b> )	
$AI_e = SP * q$	Supermercado/mes
La adopción por influencias externas ( <b>AI<sub>e</sub></b> ), se describe por los supermercados potenciales ( <b>SP</b> ) y el coeficiente de innovación ( <b>p</b> ).	

Fuente: Elaboración propia a partir de (Zapata, Franco, & Dyner, 2014)

- **Customer Choice:** se utilizó para determinar la selección de las prácticas de conservación de la energía de acuerdo al costo mensual equivalente.

Tabla 17 Ecuación Customer choice conservación de la energía

Formulación y descripción	Unidades
$AR_i = \frac{C_i^{-y}}{\sum_j C_j^{-y}}$	%
Donde <i>i</i> = tecnología, <i>y</i> = un parámetro que indica la voluntad de cambiar ( $\gamma > 0$ ), las características de la práctica de conservación $C_i$ = el costo mensual equivalente de la práctica actual y $C_j$ = costo mensual equivalente de la práctica eficiente (Dyner & Franco, 2004)	
$\frac{dSnC}{dt} = PC$	Supermercado
Los supermercados que conocen pero no seleccionan la práctica de conservación ( <b>SnSCE</b> ) se incrementan con el flujo de entrada de nuevos supermercados que no aplican la práctica de conservación ( <b>SnSCE</b> ).	
$\frac{dSTE}{dt} = SCCCE + SCnCCE$	Supermercado
Los supermercados con prácticas de conservación ( <b>SCE</b> ) se incrementan con el flujo de entrada de los nuevos supermercados que conocen y creen en las prácticas de conservación ( <b>SCCCE</b> ) y el flujo de nuevos supermercados que conocen pero no creen en las prácticas de conservación ( <b>SCnCCE</b> ).	

Fuente: Elaboración propia a partir de (Zapata, Franco, & Dyner, 2014)

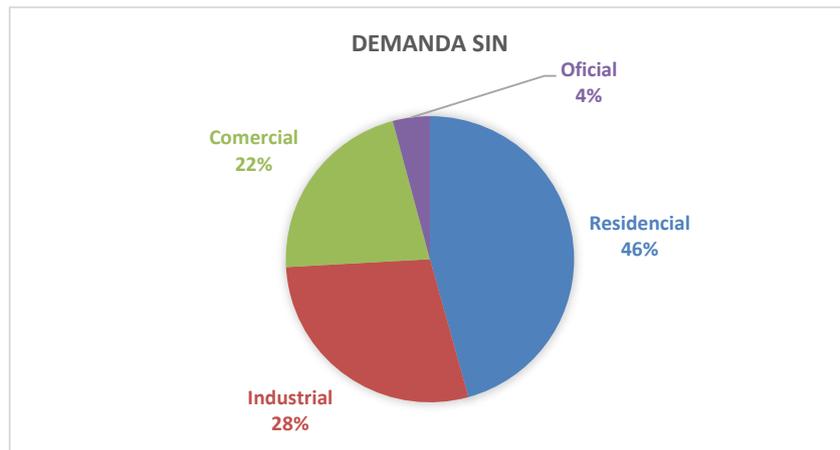
## 4.12 Supuestos y especificaciones

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

- El horizonte del tiempo del modelo son 15 años, comenzando la simulación en 2018 y finalizando en el 2034, con un paso de simulación mensual.
- La adopción de la tecnología eficiente sólo se da en el subsector comercial: supermercados. Adicionalmente, se asume que ningún supermercado en Colombia cuenta con tecnología solar FV, tecnología eficiente y prácticas de conservación de la energía implementada.

- Se tomaron las grandes superficies del código CIU 4711 clasificadas como usuario no regulado, las cuales contratan el suministro de energía en el mercado competitivo.
- Los valores de la demanda de energía eléctrica nacional (66.318 GWh) desagregados por cada sector económico fueron tomados del año 2016 por Expertos en Mercados (XM). Cuya distribución de la demanda presenta la siguiente participación. Ver Gráfico 34.

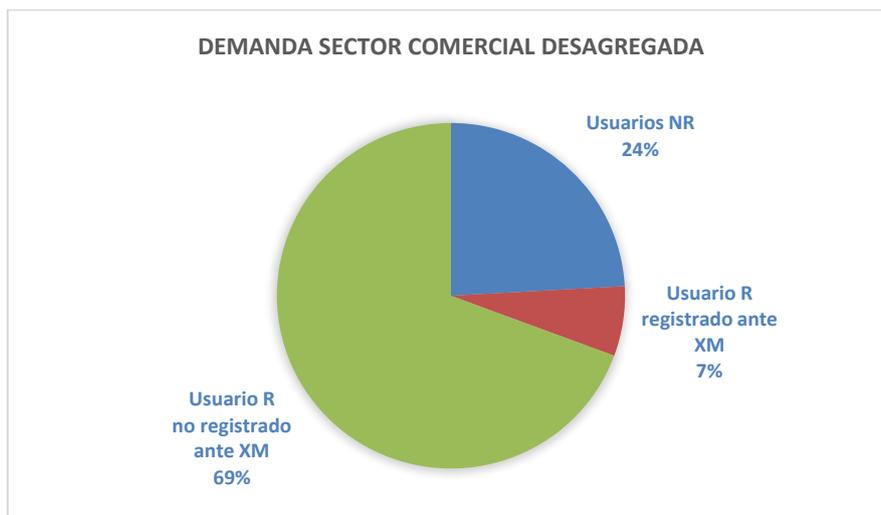
Gráfico 34 Consumo de energía eléctrica por sectores económicos año 2016



Fuente: Elaboración propia a partir de (UPME, 2016) y (XM, 2016b)

Si desagregamos la demanda de energía eléctrica del sector comercial, tendremos la siguiente participación:

Gráfico 35 Proporción de consumo de energía eléctrica desagregada sector comercial año 2016.



Elaboración propia a partir de (XM, 2016a)

Donde:

Usuarios NR (No Regulados): Persona natural o jurídica, con una demanda máxima superior a 0,1 MW o 55 MWh-mes por instalación legalizada, cuyas compras de electricidad se realizan a precios acordados libremente (CREG, 2009).

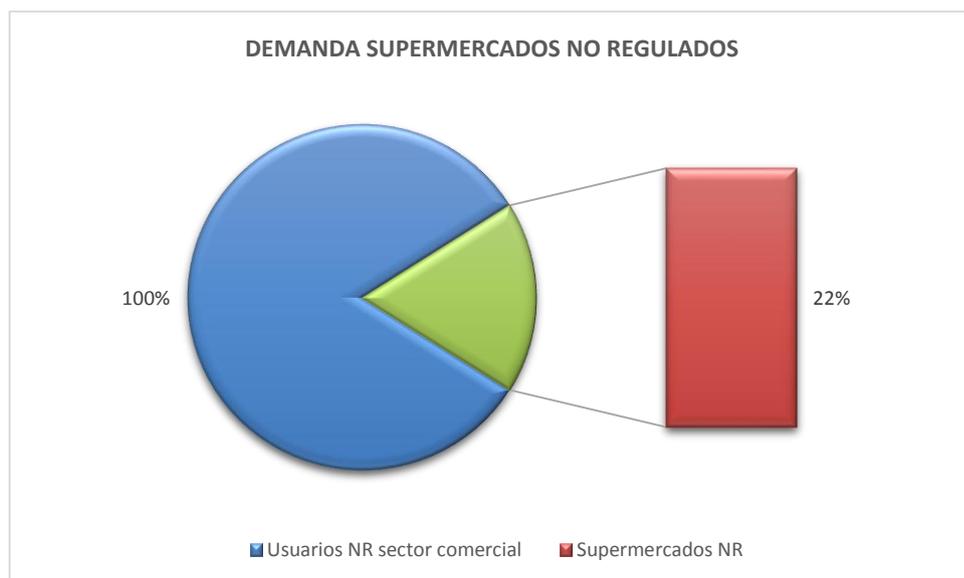
Usuarios R (Regulados): Persona natural o jurídica cuyas compras de electricidad están sujetas a tarifas establecidas por la CREG. Todo usuario regulado que decida cambiarse de comercializador debe de registrarse ante XM, es por esto que en el Gráfico 35 existen dos tipos de usuarios regulados.

El comercializador de energía tiene como función comprar energía eléctrica en el mercado mayorista y venderla al usuario final, actuando como intermediario entre los agentes que producen y transportan la energía y el cliente (CREG, 2009).

Cualquier usuario sea Regulado o No Regulado, puede elegir libremente el comercializador que se encargará de suministrar la energía eléctrica a una tarifa pactada sujeta a regulación, esto de acuerdo con la resolución CREG 108 de 1997 artículo 15 y resolución CREG 156 de 2011 artículos 53 a 59.

- El presente trabajo estudia los usuarios No Regulados del sector comercial debido a que son los usuarios que mayor consumo de energía eléctrica presentan. De estos usuarios los que mayor consumo presentan son los usuarios No Regulados del subsector supermercados representando un 22% del consumo de energía total de usuarios No Regulados.

Gráfico 36 Proporción del consumo de energía eléctrica usuarios no regulados subsector supermercados año 2016.



Elaboración propia a partir de (XM, 2016a)

- Se visitaron dos de las cadenas de supermercados más grandes de Colombia, el grupo Éxito (Viva Envigado) y Cencosud (Jumbo de la 65), ubicados en el Valle de Aburrá donde obtuvimos

información sobre las tecnologías más utilizadas dentro de sus cadenas de supermercados para los tres grandes usos (refrigeración, iluminación y ventilación). De esta manera se obtuvo un mejor panorama para proponer el cambio de tecnologías eficientes y obtener un mayor potencial de ahorro de energía.

#### Iluminación:

- Actualmente la mayoría de supermercados de ambas cadenas utilizan luminarias fluorescentes T5 de 28 W, eficiencia: 93 lm/W, vida útil: 20000 h, se propone sustituir la tecnología a luminarias LED T5 de 25W, eficiencia: 136 lm/W, vida útil: 50000 h.
- La tecnología de iluminación de diodos emisores de luz - LED ha avanzado hasta el punto en que es la mejor opción para casi todas las aplicaciones de iluminación (Pattison, Hansen, & Y.Tsao, 2018). La mayor eficiencia y la vida útil prolongada de los productos LED les otorgan un menor costo de vida de propiedad en comparación con los productos de iluminación convencionales, además de presentar un mejor rendimiento de color, distribución óptica, factor de forma y control avanzado (Pattison, Hansen, & Y.Tsao, 2018).

Uno de los factores más importantes de este tipo de tecnología es su larga vida útil, lo que hace que los costos de mantenimiento sean más bajos. Otro aspecto positivo, además de su menor consumo de energía es la ausencia de transferencia de calor al medio ambiente, lo que evita aumentos en el consumo de los sistemas de aire acondicionado en los períodos más cálidos del año (Energy Star, 2017).

- Para el cálculo de la cantidad de lámparas se utilizaron los valores de iluminancia promedio establecidos por el RETILAP para supermercados con un valor de 750 lx (Ministerio de Minas y Energía, 2016).
- Los precios de las lámparas fluorescentes y LED fueron tomados como referencia de Sylvania.

#### Ventilación:

- Actualmente la mayoría de supermercados de ambas cadenas utilizan sistema de aire acondicionado Chiller condensado por aire de 250 Ton, eficiencia: 3,7 COP (COP: coeficiente de rendimiento energético), se propone sustituir a Chiller condensado por agua de 250 Ton, eficiencia: 6,5 COP.
- Los Chiller condensados por agua posee una mayor capacidad de enfriamiento que está dada por la tasa de transferencia de calor del agua, es recomendable en grandes edificaciones (Lee, Lam, Lee, & Chan, 2016). Son más eficientes porque la temperatura de condensación está relacionada con la temperatura del bulbo húmedo, que es más baja que la temperatura del bulbo seco (Wang, Jin, & Zhu, 2018), y por consiguiente presenta consumos eléctricos más bajos y menores emisiones de GEI en la producción de electricidad. Adicionalmente, presenta menor nivel sonoro, su ubicación es en el interior del establecimiento y no necesita insonorización (Yang, Chan, Wu, Yu, & Yang, 2012).
- Para el cálculo de la cantidad de Chiller se utilizaron los valores de área establecidos y requerimientos energéticos de acuerdo a la información suministrada por el grupo Éxito y Cencosud.

- Los precios de los Chiller condensado por aire y agua fueron tomados como referencia de Mitsubishi electric.

#### Refrigeración:

- Actualmente la mayoría de supermercados de ambas cadenas utilizan neveras industriales con rack de media, eficiencia: 3,7 COP, se propone sustituir a rack de media con tecnología VRF, eficiencia: 6,6 COP.
- Los rack de media con tecnología VRF (Sistemas de Caudal Variable de Refrigerante, en inglés: Variable Refrigerant Flow) son un sistema de enfriamiento desarrollado para anticipar y minimizar los costos de operación y mantenimiento. VRF es un sistema avanzado de acondicionamiento de aire que se desarrolla para gestionar la variabilidad de la carga mediante el control de la velocidad del compresor y la apertura de la válvula de expansión (Mundo HVACR, 2011).

El principal beneficio de un sistema VRF es que permite el control individual de la temperatura ambiente variando el flujo de refrigerante que circula en cada evaporador individualmente en función del cambio de carga en el área correspondiente (Wu, Xingxi, & Shiming, 2005), lo que garantiza el confort térmico en el lugar con la cantidad adecuada de caudal de refrigerante. Además, la velocidad del compresor VRF aumenta gradualmente para adaptarse a la tasa de evaporación del refrigerante, en lugar de cambiar repentinamente a la carga operativa completa como en el caso de las unidades divididas convencionales. Los rack de media con tecnología VRF, reducen significativamente la potencia de compresión y, por lo tanto, el consumo de electricidad (Saab, Quabeh, & Ali, 2018).

- Para el cálculo de la cantidad de rack se utilizaron los valores de área establecidos y requerimientos energéticos de acuerdo a la información suministrada por el grupo Éxito y Cencosud.
- Los precios de los rack fueron tomados como referencia de Mitsubishi electric.

### **4.13 Validación**

La validación de modelos es un aspecto importante, de cualquier metodología basada en modelos en general, y de la dinámica del sistema en particular (Barlas, 1996). El objetivo final de la validación del modelo de dinámica del sistema es generar confianza con los resultados arrojados por el modelo.

La precisión de la reproducción del comportamiento del modelo real también se evalúa, pero esto es significativo solo si ya tenemos suficiente confianza en la estructura del modelo. Por lo tanto, el orden lógico general de validación es, primero, probar la validez de la estructura y luego comenzar a probar la precisión de la estructura orientada al comportamiento, solo después de que la estructura del modelo se considere adecuada (Barlas, 1996).

#### 4.13.2 Pruebas directas a la estructura

Esta prueba busca evaluar la validez de la estructura del modelo mediante una comparación directa con el conocimiento sobre la estructura real del sistema. (Forrester & Senge, 1980) ofrecen ejemplos de pruebas de confirmación de estructura y parámetros y prueba de consistencia dimensional.

##### a. Consistencia dimensional

Para todas las relaciones de niveles, flujos, variables y parámetros del modelo, se realizó una revisión detallada de las ecuaciones para asegurar su consistencia y evitar que los niveles se volvieran negativos. Posteriormente con ayuda de PowerSim Studio 10, se realiza la verificación debido a que el Software tiene como requisito para realizar las simulaciones la consistencia dimensional del modelo (remítase al Anexo B). Consecuentemente, se concluye que el modelo supera la prueba de consistencia dimensional.

##### b. Confirmación de parámetros y variables exógenas

Los parámetros usados en el modelo fueron obtenidos o estimados de fuentes de información confiables, dentro de las cuales está el grupo Éxito y Cencosud, la Tabla 18 exhibe los parámetros y las fuentes utilizadas.

Tabla 18 Especificaciones de los parámetros del modelo. Elaboración propia.

Parámetro	Valor	Significado	Fuente
Demanda nacional	66.318 GWh	Demanda energía eléctrica nacional año 2016	(XM, 2016b)
Demanda Comercial	14.412 GWh	Demanda energía eléctrica sector comercial año 2016	(XM, 2016b)
Demanda supermercados usuarios no regulados	758,3 GWh	Demanda energía eléctrica subsector supermercados usuarios no regulados año 2016	(XM, 2016a)
Cantidad de Supermercados usuarios no regulados	461 supermercados	Total de supermercados que son usuarios no regulados en Colombia año 2016	(XM, 2016a)
Área supermercado	10.000 m <sup>2</sup>	Considerado Supermercado grande o hipermercado a partir de los 2500 m <sup>2</sup>	(Rincón Moreno, Niño, & Gómez Rodríguez, 2017)
Tasa de crecimiento de los supermercados	3% anual	Tasa de crecimiento en función del PIB, con un crecimiento promedio anual	(Expansión, 2018).
Influencias externas (p)	0,00162	Parámetro de innovadores. De acuerdo al modelo de difusión de Bass	Calibración
Influencias internas (q)	0,00395	Parámetro de imitadores. De acuerdo al modelo de difusión de Bass	Calibración
Fracción de adopción (i)	0,001/0,03	Corresponde a valores de la adopción cuando existe una	(Sterman, 2000)

Parámetro	Valor	Significado	Fuente
		débil (0.001) o fuerte (0.03) influencia interna. Estos valores son iguales para microgeneración, eficiencia y conservación.	
Gama conocen y no creen	-0,5	Parámetro modelo Logit	(Dyner & Franco, 2004)
Gama conocen y creen	-3	Parámetro modelo Logit	(Dyner & Franco, 2004)
Intensidad energética energía de la red	137,08 MWh/supermercado	Demanda supermercados usuarios no regulados sobre número de supermercados	Cálculos propios con datos de (XM, 2016a)
Costo por unidad de potencia instalada	1,3 USD/W	Costo de inversión = Costos paneles + inversores + instalación	(ERCO Energía, 2018)
Horas de sol en Colombia	6 horas	Número de horas de sol promedio en Colombia	(IDEAM, 2018)
Precio energía eléctrica para usuarios no regulados	395 \$/kWh	Precio energía eléctrica para usuarios no regulados sector comercial en Colombia	(Cencosud, 2018)
Costo nivelado de energía microgeneración	\$ 123,93	Precio energía eléctrica del sistema solar FV	Cálculos propios con datos de (ERCO Energía, 2018) y (XM, 2016a)
Factor de emisión del SIN	0,1913 kgCO <sub>2</sub> /kWh	Promedio de los factores de emisión del año 2009 al 2015 del SIN	(UPME, 2016)
Iluminancia promedio supermercados	750 lx	Iluminancia promedio supermercados de acuerdo con el RETILAP	(Ministerio de Minas y Energía, 2016)
Precio lámpara T5 Sylvania fluorescente	\$ 7.400	Precio comercial lámpara fluorescente T5 Sylvania	(Sylvania, 2018)
Precio lámpara T5 Sylvania LED	\$ 36.256	Precio comercial lámpara LED T5 Sylvania	(Sylvania, 2018)
Intensidad energética iluminación fluorescente	29,03 MWh/supermercado	Consumo iluminación fluorescente total por supermercado	(Sylvania, 2018)
Intensidad energética iluminación LED	19,85 MWh/supermercado	Consumo iluminación LED total por supermercado	(Sylvania, 2018)
Precio Chiller condensado por aire	\$ 47'250.000	Precio comercial Chiller condensado por aire 35 Ton Mitsubishi Electric	(Mitsubishi Electric, 2018a)
Precio Chiller condensado por agua	\$ 61'250.000	Precio comercial Chiller condensado por agua 35 Ton Mitsubishi Electric	(Mitsubishi Electric, 2018a)
Intensidad energética ventilación Chiller aire	21,81 MWh/supermercado	Consumo ventilación Chiller aire total por supermercado	(Mitsubishi Electric, 2018a)

Parámetro	Valor	Significado	Fuente
Intensidad energética ventilación Chiller agua	19,20 MWh/supermercado	Consumo ventilación Chiller agua total por supermercado	(Mitsubishi Electric, 2018a)
Precio Rack de media	\$ 27'000.000	Precio comercial Rack de media 20 Ton Mitsubishi Electric	(Mitsubishi Electric, 2018b)
Precio Rack de media con tecnología VRF	\$ 35'000.000	Precio comercial Rack de media con tecnología VRF 20 Ton Mitsubishi Electric	(Mitsubishi Electric, 2018b)
Intensidad energética refrigeración rack	66,09 MWh/supermercado	Consumo refrigeración rack de media total por supermercado	(Mitsubishi Electric, 2018b)
Intensidad energética refrigeración rack con VRF	50,40 MWh/supermercado	Consumo iluminación LED refrigeración rack de media con tecnología VRF total por supermercado	(Mitsubishi Electric, 2018b)
Precio sensor de luminosidad	\$ 120.000 sensor por lámpara	Precio sensor de luminosidad ODCOP-D0W Leviton	(Leviton Manufacturing Co., Inc, 2018)
Intensidad energética conservación iluminación	20,032 MWh/supermercado	Consumo iluminación fluorescente total por supermercado al aplicar sensores de iluminación	Cálculos propios con datos de Tabla 15
Intensidad energética conservación ventilación	17,67 MWh/supermercado	Consumo ventilación Chiller aire total por supermercado al aplicar control temperatura sistema de aire acondicionado	Cálculos propios con datos de Tabla 15
Precio cortina refrigerador	\$ 413.100 por corta de 78 pulgadas de largo	Precio cortina de refrigeración nocturna serie 7000 Econofrost	(Econofrost, 2018)
Intensidad energética conservación refrigeración	43,62 MWh/supermercado	Consumo refrigeración rack de media total por supermercado al aplicar cortinas de refrigeración nocturna	Cálculos propios con datos de Tabla 15

#### 4.13.3 Pruebas de la estructura orientadas al comportamiento

La prueba confirma la veracidad de la estructura, de acuerdo con (Forrester & Senge, 1980) se deben aplicar ciertas pruebas de comportamiento, las cuales son: la prueba de límites del modelo, de condiciones extremas, errores de integración y análisis de sensibilidad.

##### a. Límites del modelo

Se analizan las variables endógenas y exógenas utilizadas en el modelo, para establecer si es necesario adicionar o descartar conexiones entre las variables.

Las variables endógenas del modelo son los supermercados con conocimiento de la tecnología, supermercados potenciales, supermercados que conocen y adoptan, la demanda de supermercados

del sistema, las emisiones de GEI de los supermercados y las intensidades energéticas de la energía de la red, de la iluminación, la ventilación y la refrigeración.

A su vez, se consideraron exógenas variables como: el precio de la energía eléctrica de la red para usuarios no regulados, la tasa de crecimiento de los supermercados y el factor de emisión del SIN.

Los límites del modelo son coherentes con los supuestos, por lo que es posible concluir que la prueba es consistente con el modelo.

#### b. Condiciones extremas

La prueba de condiciones extremas asigna valores extremos a parámetros seleccionados y compara el comportamiento arrojado por el modelo con el comportamiento observado del sistema real bajo la misma "condición extrema" (Forrester & Senge, 1980). El modelo fue evaluado bajo valores extremos de las siguientes variables: cantidad de supermercados, crecimiento de supermercados (PIB) y precio energía eléctrica de la red.

Los resultados se presentan a continuación:

- Cantidad de supermercados en el sistema iguales a cero y crecimiento del PIB igual a cero

Como resultado de la falta de supermercados, la demanda eléctrica de supermercados al sistema debería permanecer igual a cero (ver Gráfico 37) y no debería haber supermercados conocen y adoptan en el sistema (ver Gráfico 38).

Gráfico 37 Demanda total de supermercados sin crecimiento del PIB y con cero supermercados. Elaboración propia

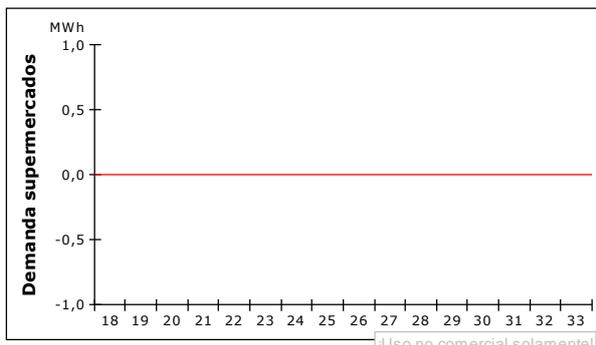
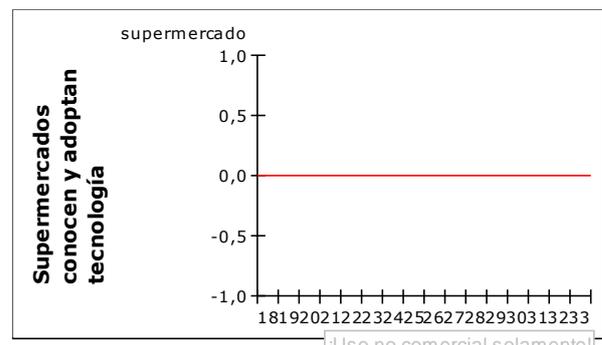


Gráfico 38 Supermercados que conocen y adoptan la tecnología sin crecimiento del PIB y con cero supermercados. Elaboración propia

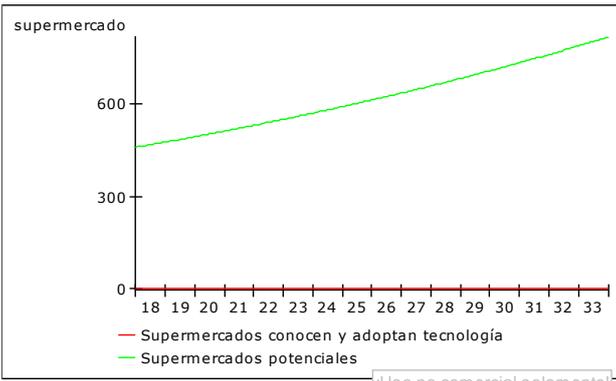


Los Gráfico 37 y Gráfico 38 muestran que los resultados presentados por el modelo en la prueba realizada son consecuentes con los resultados esperados.

- Precio de la electricidad de la red a cero

Con un precio de la electricidad de la red igual a cero, se espera que no existan supermercados que adopten las tecnologías eficientes, puesto que la energía de la red sería gratis, la energía generada por los sistemas FV tendrían un costo mucho mayor y los consumos de energía en los supermercados por iluminación, ventilación y refrigeración serían cero, sin necesidad de sustitución de tecnología eficiente ni hábitos de conservación de la energía.

Gráfico 39 Supermercados totales y supermercados conocen y adoptan con el precio de la electricidad de la red igual a cero. Elaboración propia



El Gráfico 39 muestra un incremento en el número de supermercados totales debido a que ningún supermercado adoptaría ningún tipo de tecnología bajo esta condición. Los resultados son coherentes con los resultados esperados.

c. Errores de integración

La prueba de errores de integración evalúa si los resultados del modelo son sensibles a la selección del tiempo de paso y del método de integración. Se realizaron corridas variando el método de integración de Euler de primer orden a métodos Runge-Kutta de segundo, tercero y cuarto orden.

Gráfico 40 Sensibilidad al método de integración. Elaboración propia.



A su vez, se realizaron corridas variando el tiempo de paso del modelo de 30 días, 15 días, 8 días y 4 días.

Gráfico 41 Sensibilidad al tiempo de paso. Elaboración propia.



Se encontró que el comportamiento de las variables modeladas es poco sensible a cambios en el método de integración y el tiempo de paso.

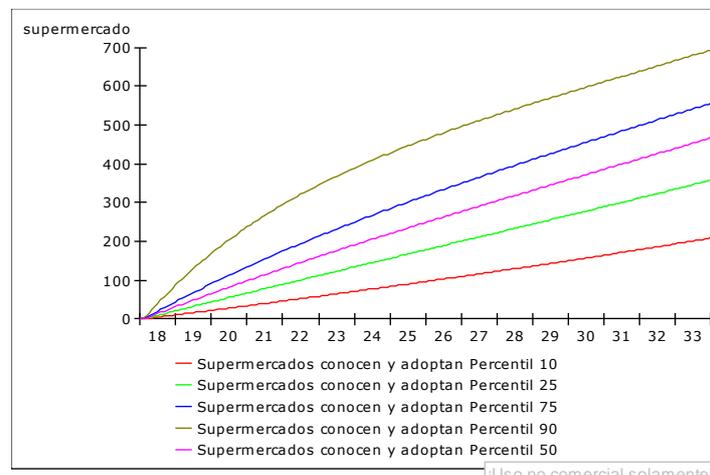
#### d. Análisis de sensibilidad

La prueba de sensibilidad del comportamiento consiste en determinar los parámetros a los que el modelo es altamente sensible y preguntar si el sistema real exhibirá una sensibilidad alta similar a los parámetros correspondientes (Forrester & Senge, 1980).

Se realizaron pruebas de sensibilidad sobre tres parámetros importantes: el costo de los sistemas Fotovoltaicos, el parámetro de influencias externas ( $p$ ) y el parámetro de influencias internas ( $q$ ), buscando encontrar la sensibilidad del modelo en la variable supermercados conocen y adoptan ante los cambios en los parámetros mencionados.

- Sensibilidad de la variable supermercados conocen y adoptan ante variaciones en el parámetro de influencias externas  $p$ , suponiendo una distribución uniforme del parámetro entre 0,002 y 0,02:

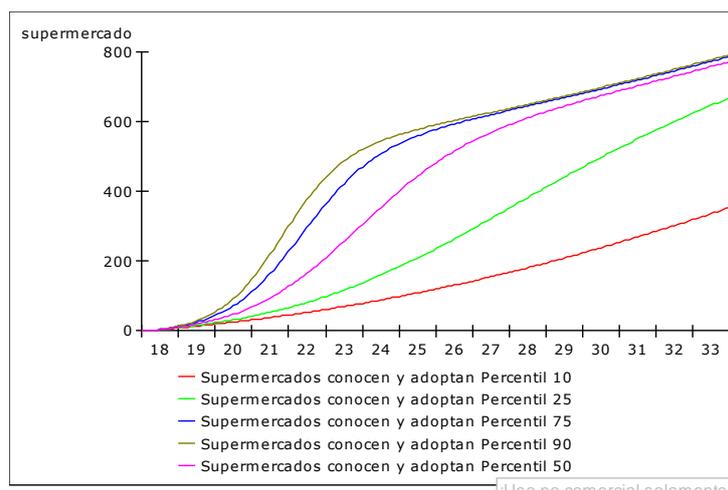
Gráfico 42 Análisis de sensibilidad de supermercados conocen y adoptan al parámetro de influencias externas (p).  
Elaboración propia.



Se observa que la variable supermercados que conocen y adoptan la tecnología tiene una sensibilidad alta al parámetro de influencias externas (p), evidenciando que los valores más pequeños de p (Percentil 10,  $p = 0,0021$ ) la adopción es más lenta que frente a valores más grandes de p (Percentil 90,  $p = 0,019$ ).

- Sensibilidad de la variable supermercados conocen y adoptan ante variaciones en el parámetro de influencias internas q, suponiendo una distribución uniforme del parámetro entre 0,01 y 0,1:

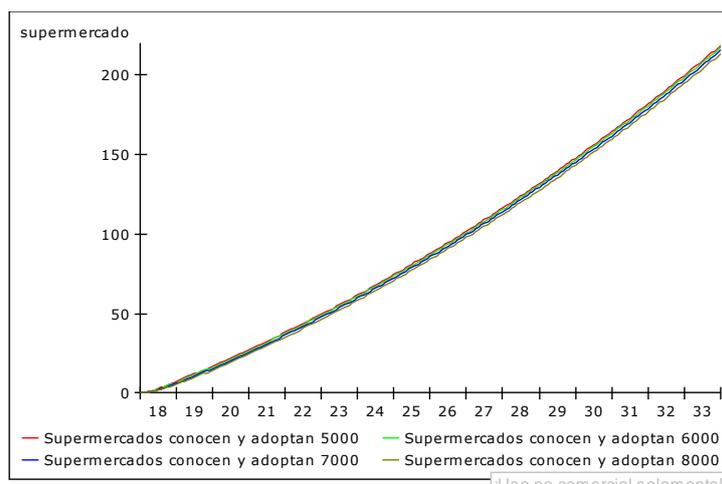
Gráfico 43 Análisis de sensibilidad de supermercados conocen y adoptan al parámetro de influencias internas (q).  
Elaboración propia.



Se observa que la variable supermercados que conocen y adoptan la tecnología tiene una sensibilidad alta al parámetro de influencias internas (q), evidenciando que los valores más pequeños de q (Percentil 10,  $q = 0,011$ ) la adopción es más lenta que frente a valores más grandes de q (Percentil 90,  $q = 0,099$ ).

- Sensibilidad de la variable supermercados conocen y adoptan ante variaciones en el costo de la tecnología (solar FV o tecnologías eficientes), para efectos de la validación se toma el costo del arreglo solar con valores entre 5000 Y 8000 USD/kW para un sistema de 1,8 MWh.

Gráfico 44 Análisis de sensibilidad de supermercados conocen y adoptan a variaciones en el costo del arreglo solar.  
Elaboración propia



Se observa que la variable supermercados que conocen y adoptan la tecnología tiene una sensibilidad baja a las variaciones en el precio del arreglo solar, sin embargo entre más alto sea el costo del arreglo solar (8000 USD/kW) menores supermercados adoptarían la tecnología.

#### 4.14 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se desarrolló un modelo de simulación que evalúa el comportamiento de los supermercados al momento de adoptar tecnologías limpias y eficientes, permitiendo entender los procesos de decisión y las interacciones entre las variables que rigen su proceder. Adicionalmente, se valida la robustez del modelo a través de un análisis de sensibilidad ante algunos parámetros clave, aportando seguridad en el modelo desarrollado.

En el siguiente capítulo se expondrán los resultados del modelo aplicado, al implementar diferentes estrategias que aceleren el proceso de adopción de autogestión en los supermercados en Colombia.

# Capítulo 5. Resultados del modelo

Este capítulo describe el escenario base y presenta los resultados del modelo de simulación descrito en el capítulo anterior. A su vez, se describen y evalúan las políticas propuestas para el subsector supermercados con el fin de reducir el consumo de electricidad y las emisiones de GEI dando cumplimiento al tercer objetivo específico de este trabajo investigativo.

## 5.1. Análisis del caso base

El análisis del caso base es aquel donde no se cuenta con ningún tipo de política gubernamental para que los supermercados conozcan más allá de los beneficios de generar su propia energía a partir de una fuente de energía renovable como el sol, ni de implementar tecnologías eficientes, ni hábitos de ahorro de energía. Este escenario muestra el proceso de penetración de la tecnología solar FV, las tecnologías eficientes y las prácticas de conservación de la energía tanto en iluminación, ventilación y refrigeración y sus efectos en la demanda y emisiones del subsector; asumiendo que los supermercados que adopten tecnología solar FV igual van a requerir de utilizar la red como alternativa de respaldo en las horas donde no hay brillo solar y por ende no hay generación FV.

En el Gráfico 46 se presenta el comportamiento de los supermercados que no adoptan y en el Gráfico 45 se presenta el comportamiento de los supermercados que adoptan en un escenario donde no se cuenta con ningún tipo de política que incentive la aceptación de microgeneración solar FV, tecnologías eficientes, ni hábitos de ahorro de energía en los tres grandes usos de la energía: iluminación, ventilación y refrigeración. Los supermercados a medida que van pasando los años de simulación, van adquiriendo conocimiento de las tecnologías de una manera muy lenta, lo que genera un aumento en el tiempo de los supermercados autogeneradores y eficientes, alcanzando un porcentaje de adopción de 20,3% al año 2033, sin embargo, la tasa de crecimiento supera la tasa de adopción por lo que los supermercados que no adquieren las tecnologías siguen creciendo más rápidamente con un porcentaje de rechazo de 79,7% al año 2033 (Ver Tabla 19), esto probablemente se debe a la permanencia de otro tipo de tecnologías tradicionales.

Gráfico 46 Supermercados que no adoptan tecnología solar FV, EE y conservación de la energía caso base. Elaboración propia

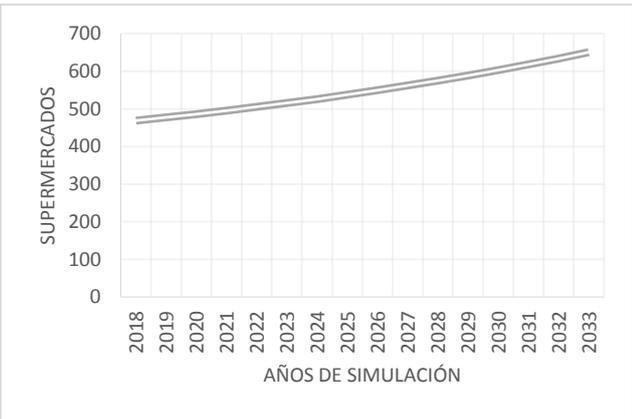


Gráfico 45 Supermercados que adoptan tecnología solar FV, EE y conservación de la energía caso base. Elaboración propia

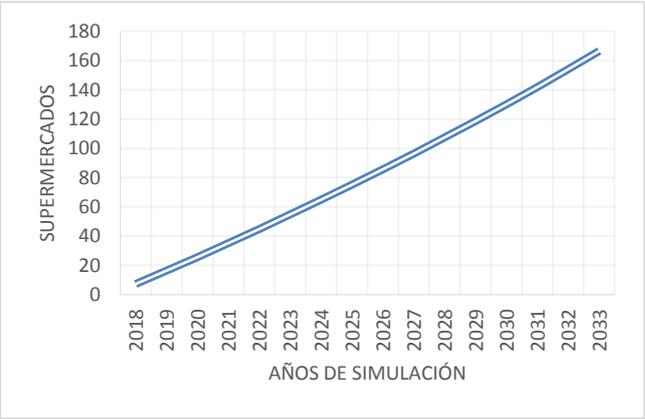


Tabla 19 . Comparativo de la cantidad de supermercados que adoptan y no tecnología de microgeneración solar FV, EE y conservación de la energía durante el periodo de simulación

	Inicio simulación 2018		Fin simulación 2033	
	Cantidad	% de adopción	Cantidad	% de adopción
<b>Supermercados que adoptan</b>	0	0%	166	20,3%
<b>Supermercados que no adoptan</b>	461	100%	650	79,7%

En el Gráfico 48 se muestra el comportamiento de la demanda de energía eléctrica de los supermercados que adoptan y quienes no lo hacen, y en el Gráfico 47 las emisiones de GEI de los supermercados que adoptan y quienes no la tecnología solar FV, tecnologías eficientes y hábitos de ahorro de energía. Los supermercados que adoptan las tecnologías a medida que van pasando los años de simulación van generando una disminución tanto en la demanda como en las emisiones de GEI del subsector supermercados, alcanzando para el año 2033 una disminución de la demanda de energía de la red de 14.289 MWh y unas emisiones evitadas de 2.733 TonCO<sub>2</sub>e.

Gráfico 48 Demanda supermercados que adoptan y no tecnología solar FV, EE y conservación de la energía caso base. Elaboración propia

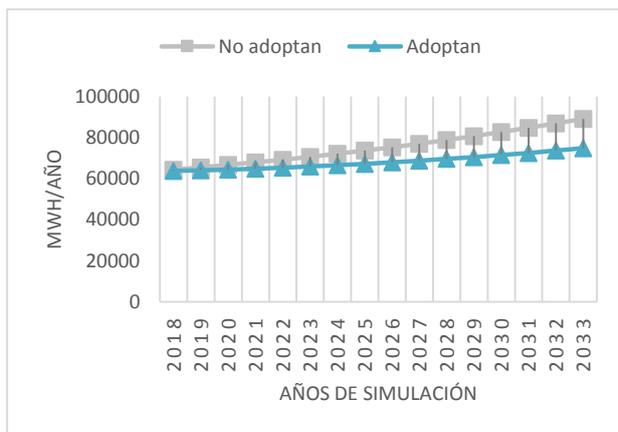
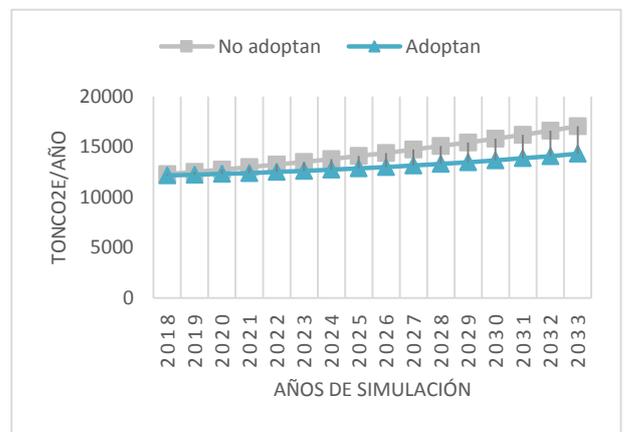


Gráfico 47 Emisiones supermercados que adoptan y no tecnología solar FV, EE y conservación de la energía caso base. Elaboración propia



## 5.2. Evaluación de políticas microgeneración

En esta sección, se evaluarán diferentes políticas dirigidas a acelerar la adopción de tecnología solar FV, como son políticas de difusión y financieras.

### PM1: Política de difusión

De acuerdo con la revisión de literatura realizada en el numeral 2.1, diversos autores coinciden en que la falta de información adecuada sobre los beneficios ambientales y económicos de la tecnología solar FV, son barreras importantes en la adopción de tecnologías de microgeneración (Karakaya &

Sriwannawit, 2015; Simpson & Clifton, 2015; Ohunakin, Adaramola, Oyewola, & Fagbenle, 2014; B Ohunakin, Adaramola, Oyewola, & Fagbenle, 2014).

La política PM1, está encaminada a la financiación de la educación sobre la tecnología solar FV; se pretende que el gobierno destine presupuesto para financiar programas de educación al sector comercial particularmente al subsector supermercados, a través de medios de comunicación masivos, eventos corporativos y pruebas pilotos. Al generar financiación, se espera que la tasa de adopción de tecnología solar FV aumente, puesto que los supermercados van a empezar a ver los beneficios de esta innovación, y por tanto un incremento en el coeficiente de influencias externas.

### **PM2: Política de exclusión de IVA y deducción de renta**

La política PM2, es una política de incentivos tributarios para disminuir los costos de inversión inicial del sistema solar FV. Como se mencionó en el numeral 1.4.1 actualmente Colombia cuenta con la Ley 1715 del 2014, que reglamenta los incentivos tributarios por inversión en FNCER, sin embargo, dicha ley aún es poco conocida y presenta diferentes trámites que vuelven engorroso el proceso a la hora de solicitar los incentivos. Es por esto que decidimos en el presente trabajo tomar esta política como un escenario diferente al escenario base, debido al poco conocimiento que se tiene frente a la normativa.

Proponer esta política se fundamenta en las barreras de entrada de la tecnología solar FV estudiadas en el numeral 2.1, donde los diferentes autores concuerdan que los altos costos de inversión inicial del sistema solar FV evitan el crecimiento de la adopción (Ohunakin, Adaramola, Oyewola, & Fagbenle, 2014; Balcombe, Rigby, & Azapagic, 2013; Zhang, Shen, & Chan, 2012). Por tanto, con la evaluación de esta política se pretende identificar si la disminución en los costos de inversión inicial del sistema aumenta el número de supermercados que adoptarían la tecnología, y por ende la demanda del subsector y las emisiones.

### **PM3: Política impuesto precio electricidad de la red**

La política PM3, es una política que busca incentivar el uso de energía de FNCER, por lo que se le coloca un impuesto al precio de la energía eléctrica proveniente de fuentes convencionales de energía y fuentes fósiles, de esta manera el precio de la electricidad de la red no es competitivo con el precio de la energía solar FV. Se estableció que con el impuesto el precio de la electricidad pasaría de 395 \$/kWh a 711\$/kWh compitiendo con el precio del sistema FV de 123.93 \$/kWh.

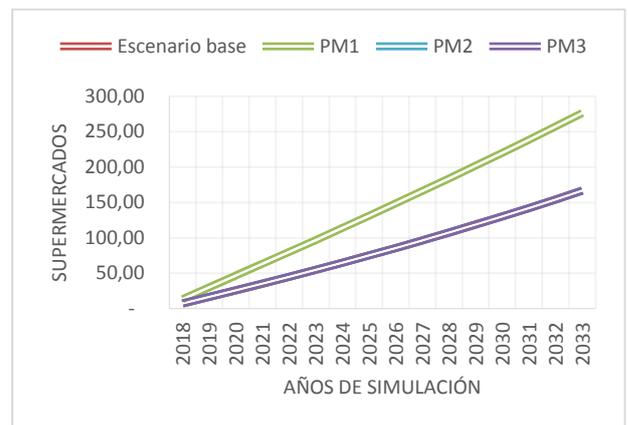
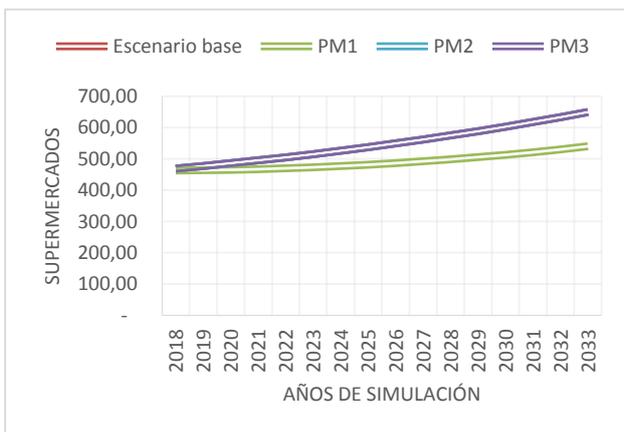
La política se basa en la motivación de los usuarios de adoptar microgeneración, al momento que el precio de la electricidad aumenta (Karakaya, Nuur, & Hidalgo, 2015). Se espera que con el aumento en el precio de la electricidad, aumenten los supermercados que quieran adoptar tecnología solar FV.

### 5.3. Evaluación comparativa del desempeño de las políticas para microgeneración

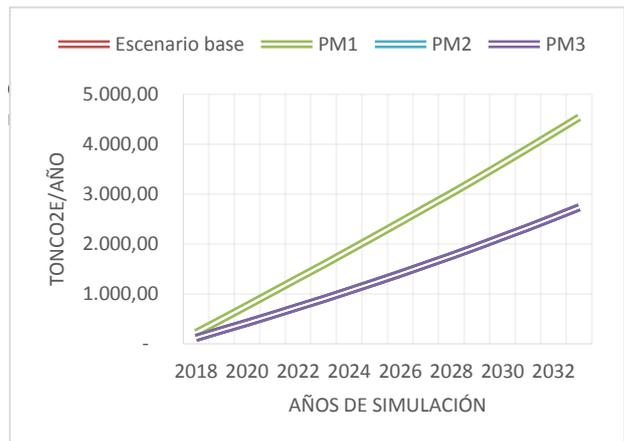
El Gráfico 50 muestra los supermercados que no adoptan tecnología solar FV y el Gráfico 49 muestra los supermercados que adoptan tecnología solar FV al implementar diferentes políticas para acelerar la adopción de la tecnología. Se observa como la política PM1: política de difusión, genera un aumento en el número de supermercados que adoptan microgeneración en el tiempo y al mismo tiempo disminuyen quienes no adoptan la tecnología comparado con las demás políticas. Tanto el escenario base como la política PM2 no se logran visualizar en los gráficos debido a que la diferencia en la adopción es tan mínima que no se logra distinguir.

Gráfico 50 Supermercados que no adoptan microgeneración para diferentes políticas. Elaboración propia

Gráfico 49 Supermercados que adoptan microgeneración para diferentes políticas. Elaboración propia



El Gráfico 52 muestra la demanda de energía solar FV al aplicar las diferentes políticas para acelerar el proceso de adopción de tecnología solar FV y el Gráfico 51 muestra las emisiones evitadas al aplicar las diferentes políticas para acelerar el proceso de adopción de tecnología solar FV. Ambos gráficos nos muestran como la política de difusión PM1 al generar un aumento en los supermercados microgeneradores, la demanda de energía solar FV y las emisiones evitadas de estos supermercados aumenta con respecto a las demás políticas. Tanto el escenario base como la política PM2 no se logran



visualizar en los gráficos debido a que la diferencia en la demanda y emisiones es tan mínima que no se logra distinguir.

Con la política de difusión PM1 se alcanza para el año 2033 una disminución del 11% tanto en la demanda de energía de la red (23.731 MWh menos) como de emisiones evitadas (4.539 TonCO<sub>2</sub>e) respecto a la demanda total (85.987 MWh) y emisiones totales (16.458 TonCO<sub>2</sub>e) de los supermercados en el escenario base, debido a la generación de energía a partir de una FNCER como es el sol.

A continuación se presentan los resultados de las políticas implementadas en microgeneración, al final del año de simulación.

Tabla 20 Resultados comparativos de las políticas implementadas para la adopción de microgeneración. Elaboración propia

Microgeneración	Escenario base	PM1	PM2	PM3
Supermercados con microgeneración solar FV	166	276	167	167
Demanda supermercados (MWh)	14.289,89	23.731,70	14.297,89	14.295,67
Emisiones evitadas (TonCO <sub>2</sub> e)	2.733,66	4.539,87	2.735,19	2.734,76

De acuerdo con los resultados de las políticas, el escenario donde mayor cantidad de supermercados adoptan tecnología solar FV al final de la simulación es con la política PM1: Política de difusión, esto puede deberse a la falta de conocimiento sobre los beneficios ambientales y económicos de la implementación de la tecnología solar FV, lo que genera poca motivación por parte de los supermercados para invertir.

Citando a (Rogers, 1995), quien modela la decisión humana sobre la adopción de la innovación como un proceso que incluye cinco etapas: conocimiento, persuasión, decisión, implementación y confirmación; la etapa de conocimiento requiere de un conocimiento previo de la tecnología para pasar a la etapa de persuasión, etapa importante en el proceso de decisión puesto que (Rogers, 1995) afirma que las relaciones sociales juegan de manera positiva en la adopción de tecnología en contraste con las consideraciones económicas. Por tanto, y a pesar de que las condiciones económicas para la generación de energía a partir de tecnología solar FV soy muy favorables, es posible afirmar que falta experticia y exposición de experiencias positivas por parte de otros agentes del sector para generar el despliegue necesario de la tecnología.

#### 5.4. Evaluación de políticas de eficiencia energética

En esta sección, se evaluarán diferentes políticas dirigidas a acelerar la adopción de tecnologías eficientes para luminarias: sustitución de lámparas fluorescentes a lámparas LED; para ventilación: sustitución de Chiller condensado por aire a Chiller condensado por agua; para refrigeración: sustitución de Rack de media a Rack de media con tecnología VRF. Las políticas evaluadas son políticas de difusión, financieras y prohibición de uso de tecnologías ineficientes.

### **PE1: Política de difusión**

De acuerdo con la revisión de literatura realizada en el numeral 2.1, diversos autores coinciden en que la falta de información inhibe las mejoras en eficiencia energética (Kostka, Moslener, & Andreas, 2013; Gaspar & Antunes, 2011; Balachandra, Ravindranath, & Ravindranath, 2010).

La política PE1, está encaminada a la financiación de la educación sobre las tecnologías eficientes; se pretende que el gobierno destine presupuesto para financiar programas de educación al sector comercial, particularmente al subsector supermercados, a través de medios de comunicación masivos, eventos corporativos y pruebas pilotos. Al generar financiación, se espera que la tasa de adopción de tecnologías eficientes aumente, puesto que los supermercados van a empezar a ver los beneficios ambientales y económicos del ahorro de energía a partir de las tecnologías eficientes, y por tanto un incremento en el coeficiente de influencias externas.

### **PE2: Política de exclusión de IVA y deducción de renta**

La política PE2, es una política de incentivos tributarios para disminuir los costos de inversión inicial de las tecnologías eficientes. Como se mencionó en el numeral 1.4.1, actualmente Colombia cuenta con la Ley 1715 del 2014, que reglamenta los incentivos tributarios por inversión en eficiencia energética, sin embargo, dicha ley aún es poco conocida y presenta diferentes trámites que vuelven engorroso el proceso a la hora de solicitar los incentivos. Es por esto que decidimos en el presente trabajo tomar esta política como un escenario diferente al escenario base, debido al poco conocimiento que se tiene frente a la normativa.

Proponer esta política se fundamenta en las barreras de entrada de la eficiencia energética estudiadas en el numeral 2.1, donde los diferentes autores concuerdan que los altos costos de inversión inicial de las tecnologías eficientes evitan el crecimiento de la adopción (Olsthoorn, Schleich, & Hirzel, 2017; Brunke, Johansson, & Thollander, 2014; Cagno & Trianni, 2014; Gaspar & Antunes, 2011). Por tanto, con la evaluación de esta política se pretende identificar si la disminución en los costos de inversión inicial de la tecnología eficiente aumenta el número de supermercados que adoptarían la tecnología, y por ende la demanda del subsector y las emisiones.

### **PE3: Política impuesto tecnología ineficiente**

La política PE3, es una política que busca incentivar el uso de tecnologías eficientes, por lo que se le coloca un impuesto del 30% de más al costo de inversión de la tecnología ineficiente, de esta manera el costo mensual equivalente no es competitivo con el costo mensual equivalente de la tecnología eficiente. Se estableció que con el impuesto al costo de la tecnología ineficiente, el costo mensual equivalente para cada una quedaría así:

Tabla 21 Consolidado política PE3 EE para iluminación, ventilación y refrigeración. Elaboración propia

	<b>CME tecnología ineficiente sin impuesto</b>	<b>CME tecnología ineficiente con impuesto</b>	<b>CME tecnología eficiente</b>
Iluminación	\$ 13.023.617,51	\$ 13.490.380,18	\$ 9.459.458,65
Ventilación	\$ 13.785.288,75	\$ 15.335.679,38	\$ 14.283.218,75
Refrigeración	\$ 27.136.045,00	\$ 27.444.482,50	\$ 21.242.375,00

La política se basa en la motivación de los usuarios de adoptar tecnologías eficientes, para ahorrar energía eléctrica y disminuir el costo de la factura, debido a los altos costos de la electricidad de la red (Schloman & Schleich, 2015; Chai & Baudelaire, 2015; Liu, Yamamoto, & Suk, 2014). Se espera que con el aumento en el costo mensual equivalente de la tecnología ineficiente, aumenten los supermercados que quieran adoptar tecnología eficiente.

#### **PE4: Política prohibición lámparas fluorescentes**

La política PE4, es una política que solo será analizada para el uso de la energía en iluminación, puesto que la sustitución de los demás equipos en ventilación y refrigeración requiere de inversiones mucho más altas y complejas que el cambio de luminarias.

En Colombia se cuenta con el Decreto 3450 del 2008 expedido por el Ministerio de minas y energía, el cual prohíbe la importación, distribución, comercialización y utilización de fuentes de iluminación de baja eficiencia lumínica a partir del primero de enero del año 2011. La política PE4, busca el mismo fin pero con las lámparas fluorescentes y de esta manera acelerar la adopción de las lámparas LED para la mejora en eficiencia energética en este uso de la energía. La política de prohibición se implementaría a partir del año 2025, permitiendo que el usuario desde el año 2018 empiece a realizar la transición de la tecnología, logrando la eliminación de todas las lámparas fluorescentes para el año 2033.

## **5.5. Evaluación comparativa del desempeño de las políticas para eficiencia energética**

### **Iluminación**

El Gráfico 54 muestra los supermercados que no adoptan tecnología LED y el Gráfico 53 muestra los supermercados que adoptan tecnología LED al implementar diferentes políticas para acelerar la adopción de la tecnología. Se observa como la política PE4: Política de prohibición de lámparas fluorescentes, genera un aumento abrupto en el número de supermercados que adoptan tecnología LED a partir del año 2025, momento en que se da la prohibición de las lámparas fluorescentes y al mismo tiempo disminuyen quienes no adoptan la tecnología LED comparado con las demás políticas.

Gráfico 54 Supermercados que no adoptan tecnología LED para diferentes políticas. Elaboración propia

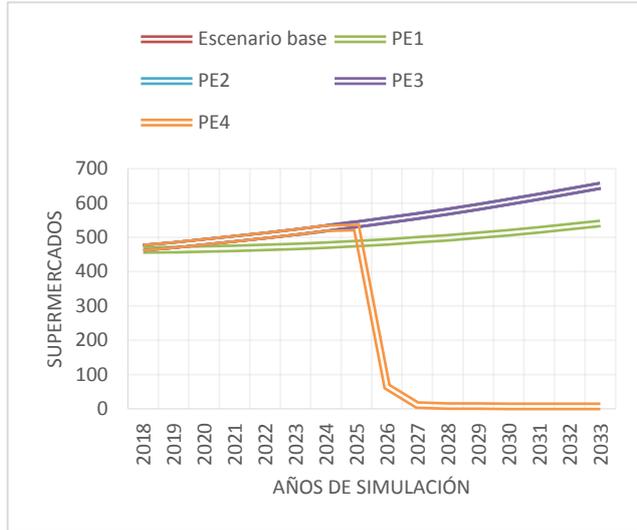
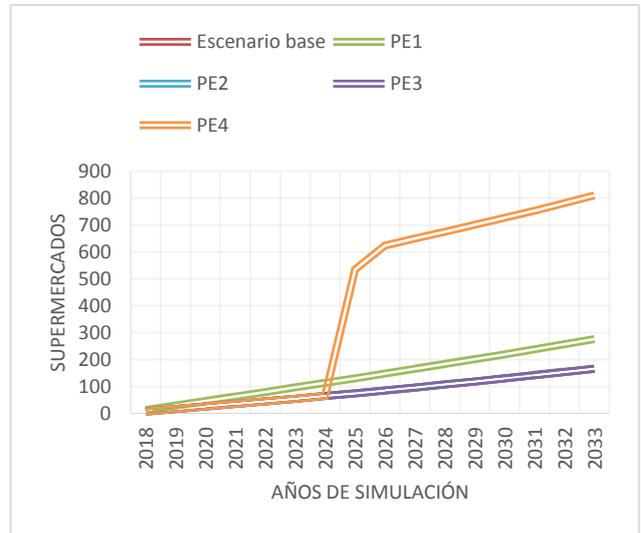


Gráfico 53 Supermercados que adoptan tecnología LED para diferentes políticas. Elaboración propia



El Gráfico 56 muestra la demanda de energía eléctrica al aplicar las diferentes políticas para acelerar el proceso de adopción de tecnología LED y el Gráfico 55 muestra las emisiones al aplicar las diferentes políticas para acelerar el proceso de adopción de tecnología LED.

Gráfico 56 Demanda de energía supermercados con tecnología LED para diferentes políticas. Elaboración propia

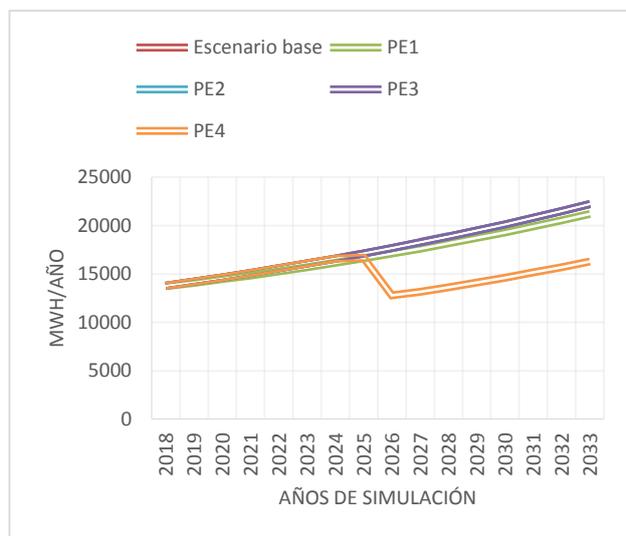
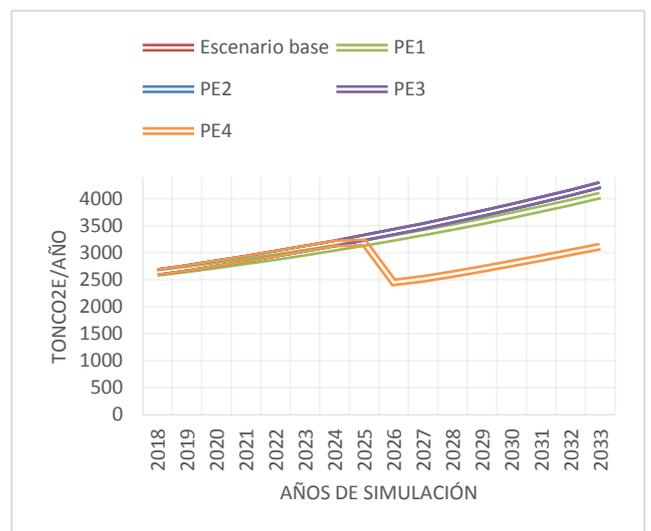


Gráfico 55 Emisiones supermercados con tecnología LED para diferentes políticas. Elaboración propia



Ambos gráficos nos muestran como la política PE4: prohibición de lámparas fluorescentes, al generar un aumento en los supermercados con tecnología LED, la demanda de energía de la red y las emisiones de estos supermercados disminuyen con respecto a las demás políticas. Tanto el escenario base como

la política PE2 no se logran visualizar en los gráficos debido a que la diferencia en la demanda y emisiones es tan mínima que no se logra distinguir.

Con la política de prohibición de lámparas fluorescentes PE4, se alcanza para el año 2033 una disminución del 7% tanto en la demanda de energía (5.943 MWh menos) como de emisiones evitadas (1.136 TonCO<sub>2e</sub>) respecto a la demanda total (85.987 MWh) y emisiones totales (16.458 TonCO<sub>2e</sub>) de los supermercados en el escenario base, debido a la disminución de consumo de energía eléctrica del SIN.

A continuación se presentan los resultados para cada una de las políticas implementadas de EE en iluminación, al final del año de simulación.

Tabla 22 Resultados comparativos de las políticas implementadas para la adopción de tecnologías eficientes en iluminación.  
Elaboración propia

<b>Iluminación</b>	<b>Escenario base</b>	<b>PE1</b>	<b>PE2</b>	<b>PE3</b>	<b>PE4</b>
Supermercados con lámparas LED	166	276	166	166	811
Demanda supermercados (MWh)	22220,4	21206,8	22220,2	22220,1	16276,9
Emisiones supermercados (TonCO <sub>2e</sub> )	4250,7	4056,8	4250,7	4250,7	3113,7

De acuerdo con los resultados de las políticas para iluminación, el escenario donde mayor cantidad de supermercados adoptan tecnología LED al final de la simulación es con la política PE4: Política de prohibición de lámparas fluorescentes, esto se debe a la falta de posibilidades de los usuarios para escoger otro tipo de tecnología. Se puede concluir que la política PE4 es una forma efectiva para reducir rápidamente el consumo de electricidad por iluminación de los supermercados. Es un excelente ejemplo en el que la regulación directa fuerza la transición.

## **Ventilación**

El Gráfico 58 muestra los supermercados que no adoptan tecnología Chiller condensado por agua y el Gráfico 57 muestra los supermercados que adoptan tecnología Chiller condensado por agua al implementar diferentes políticas para acelerar la adopción de la tecnología. Se observa como la política PE1: Política de difusión, genera un mayor aumento en el número de supermercados que adoptan tecnología Chiller condensado por agua durante el tiempo de simulación y al mismo tiempo disminuyen quienes no adoptan la tecnología Chiller condensado por agua comparado con las demás políticas.

Gráfico 57 Supermercados que no adoptan tecnología Chiller condensado por agua para diferentes políticas. Elaboración propia

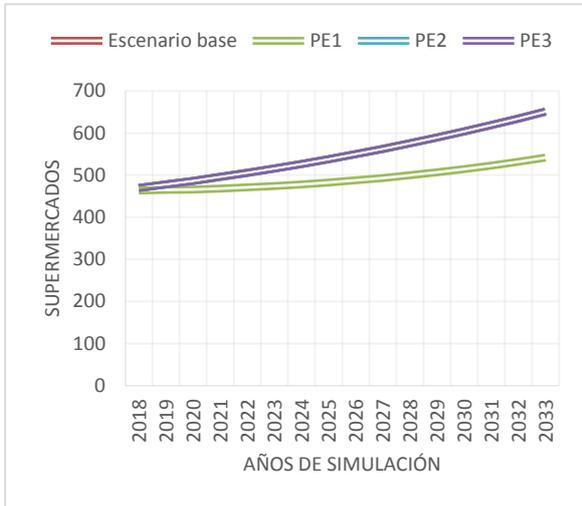
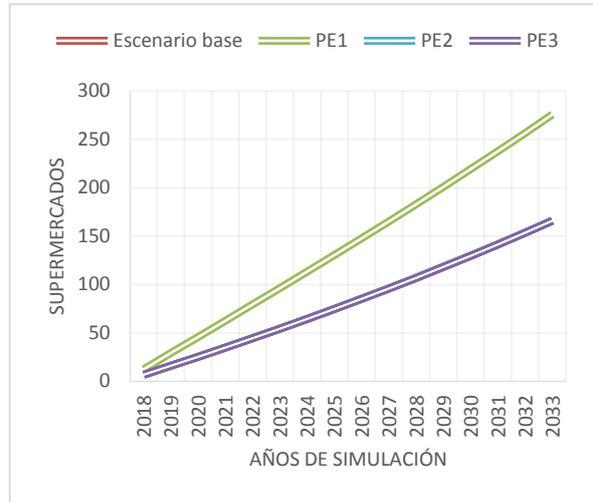


Gráfico 58 Supermercados que adoptan tecnología Chiller condensado por agua para diferentes políticas. Elaboración propia



El Gráfico 60 muestra la demanda de energía eléctrica al aplicar las diferentes políticas para acelerar el proceso de adopción de tecnología Chiller condensado por agua y el Gráfico 59 muestra las emisiones al aplicar las diferentes políticas para acelerar el proceso de adopción de tecnología Chiller condensado por agua. Ambos gráficos no permiten visualizar de forma muy clara la diferencia de las políticas con el escenario base, sin embargo la política PE1: Política de difusión, es la que genera una disminución en la demanda de energía a la red y las emisiones de los supermercados que adoptan la tecnología Chiller condensado por agua.

Gráfico 60 Demanda de energía supermercados con tecnología Chiller condensado por agua para diferentes políticas. Elaboración propia

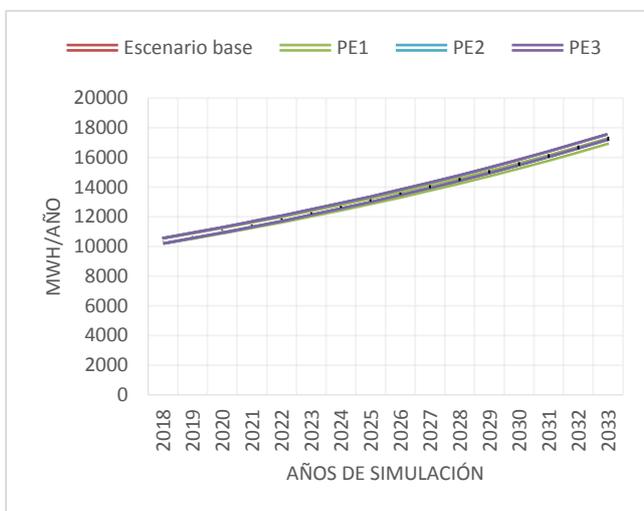
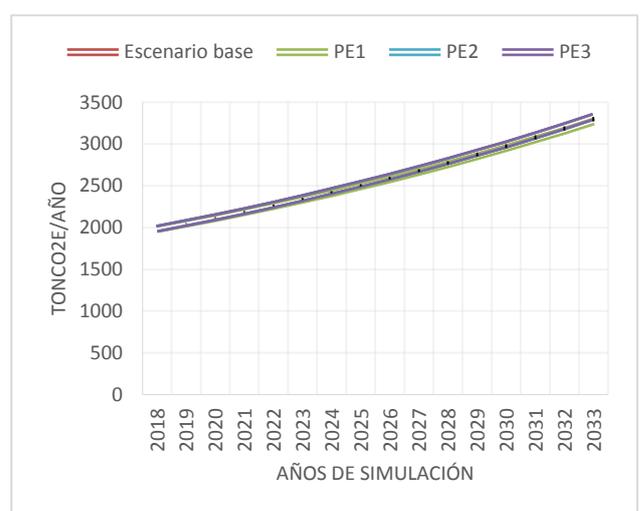


Gráfico 59 Emisiones supermercados con tecnología Chiller condensado por agua para diferentes políticas. Elaboración propia



Con la política de difusión PE1 se alcanza para el año 2033 una disminución del 0,3% tanto en la demanda de energía (287 MWh menos) como de emisiones evitadas (54,9 TonCO2e) respecto a la demanda total (85.987 MWh) y emisiones totales (16.458 TonCO2e) de los supermercados en el escenario base, debido a la disminución de consumo de energía eléctrica del SIN.

A continuación se presentan los resultados para cada una de las políticas implementadas de EE en ventilación, al final del año de simulación.

Tabla 23 Resultados comparativos de las políticas implementadas para la adopción de tecnologías eficientes en ventilación.  
Elaboración propia

Ventilación	Escenario base	PE1	PE2	PE3
Supermercados con Chiller condensado por agua	166	276	166	166
Demanda supermercados (MWh)	17387,964	17100,973	17387,547	17387,804
Emisiones supermercados (TonCO2e)	3326,318	3271,416	3326,238	3326,287

De acuerdo con los resultados de las políticas para ventilación, el escenario donde mayor cantidad de supermercados adoptan tecnología Chiller condensado por agua al final de la simulación es con la política PE1: Política de difusión, esto puede deberse a la falta de conocimiento previo de la tecnología eficiente, probablemente los tomadores de decisiones de los supermercados no perciben las ventajas relativas de reemplazar la tecnología actual, lo que genera un menor nivel de adopción. La ventaja relativa puede ser financiera o no financiera (Rogers, 1995). El alcance de la ventaja puede medirse en términos económicos, de prestigio social, de comodidad y de placer. Sin embargo, la ventaja relativa es subjetiva y dependerá de las percepciones individuales y las necesidades del supermercado.

De igual manera, la tecnología Chiller condensado por agua a pesar de contar con beneficios de rendimiento adicionales, el costo unitario es mucho más alto en comparación con la tecnología existente, lo que hace que la mayoría de supermercados no sean atraídos inicialmente por el cambio tecnológico.

## Refrigeración

El Gráfico 61 muestra los supermercados que no adoptan tecnología Rack de media con tecnología VRF y el Gráfico 62 muestra los supermercados que adoptan tecnología Rack de media con tecnología VRF al implementar diferentes políticas para acelerar la adopción de la tecnología. Se observa como la política PE1: Política de difusión, genera un mayor aumento en el número de supermercados que adoptan tecnología Rack de media con tecnología VRF durante el tiempo de simulación y al mismo tiempo disminuyen quienes no adoptan la tecnología Rack de media con tecnología VRF comparado con las demás políticas.

Gráfico 62 Supermercados que no adoptan tecnología Rack de media con tecnología VRF para diferentes políticas. Elaboración propia

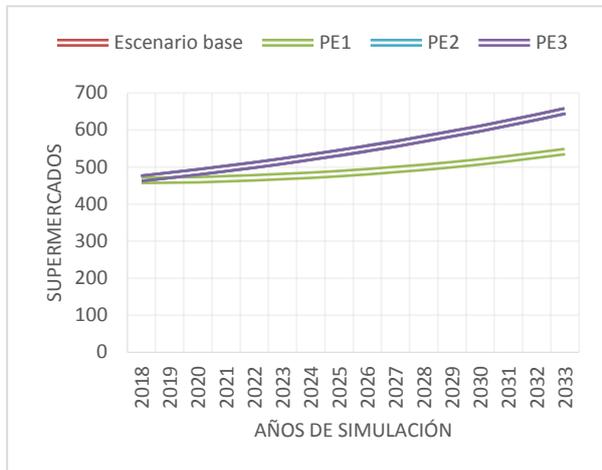
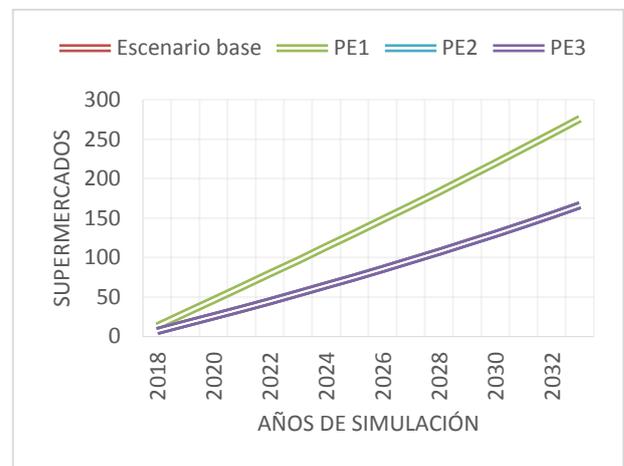


Gráfico 61 Supermercados que adoptan tecnología Rack de media con tecnología VRF para diferentes políticas. Elaboración propia



El Gráfico 64 muestra la demanda de energía eléctrica al aplicar las diferentes políticas para acelerar el proceso de adopción de tecnología Rack de media con tecnología VRF y el Gráfico 63 muestra las emisiones al aplicar las diferentes políticas para acelerar el proceso de adopción de tecnología Rack de media con tecnología VRF. Ambos gráficos no permiten visualizar de forma muy clara la diferencia de las políticas con el escenario base, sin embargo la política PE1: Política de difusión, es la que genera una disminución en la demanda de energía a la red y las emisiones de los supermercados que adoptan la tecnología Rack de media con tecnología VRF.

Gráfico 64 Demanda de energía supermercados con tecnología Rack de media con tecnología VRF para diferentes políticas. Elaboración propia

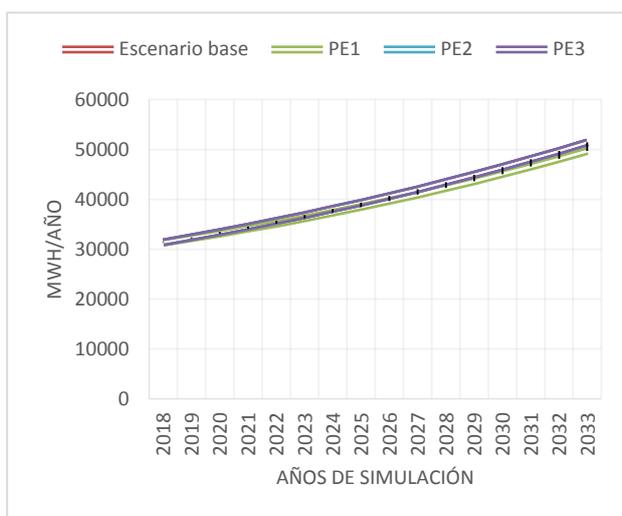
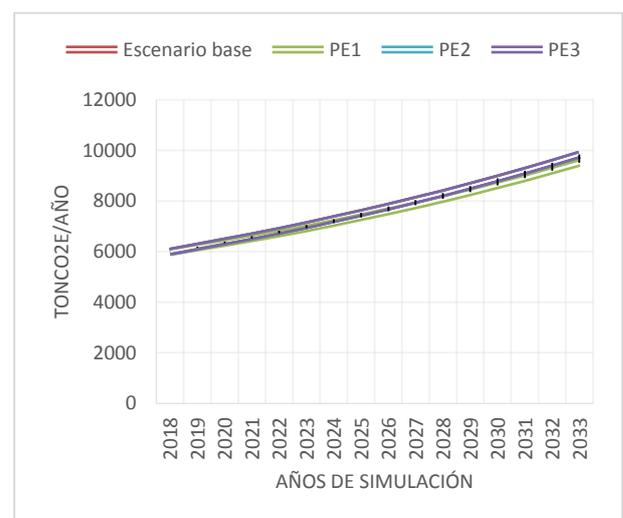


Gráfico 63 Emisiones supermercados con tecnología Rack de media con tecnología VRF para diferentes políticas. Elaboración propia



Con la política de difusión PE1, se alcanza para el año 2033 una disminución del 2% tanto en la demanda de energía (1.724 MWh menos) como de emisiones evitadas (329 TonCO2e) respecto a la

demanda total (85.987 MWh) y emisiones totales (16.458 TonCO<sub>2</sub>e) de los supermercados en el escenario base, debido a la disminución de consumo de energía eléctrica del SIN.

A continuación se presentan los resultados para cada una de las políticas implementadas de EE en refrigeración, al final del año de simulación.

Tabla 24 Resultados comparativos de las políticas implementadas para la adopción de tecnologías eficientes en refrigeración. Elaboración propia

Refrigeración	Escenario base	PE1	PE2	PE3
Supermercados con rack de media con tecnología VRF	166	276	166	166
Demanda supermercados (MWh)	51429,574	49705,483	51429,179	51428,624
Emisiones supermercados (TonCO <sub>2</sub> e)	9838,478	9508,659	9838,402	9838,296

De acuerdo con los resultados de las políticas para refrigeración, el escenario donde mayor cantidad de supermercados adoptan tecnología rack de media con tecnología VRF al final de la simulación es con la política PE1: Política de difusión, esto se enmarca en que la decisión del supermercado de adoptar o rechazar la tecnología rack de media con tecnología VRF debe comenzar con un conocimiento de la misma y luego se forma una actitud hacia ella basada en su percepción. La nueva tecnología además de ser atractiva para el tomador de decisiones tanto económica como competitivamente, debe ser consistente con los valores, creencias, experiencias pasadas y necesidades existentes. Lo que se espera después de implementar nuevas políticas y procedimientos de difusión, es que los supermercados puedan ser más fácilmente convencidos para que acepten el cambio.

## 5.6. Evaluación de políticas de conservación de la energía

En esta sección, se evaluarán diferentes políticas dirigidas a acelerar la adopción de prácticas de conservación de la energía para luminarias: utilización de sensores de iluminación; para ventilación: control de la temperatura del sistema de aire acondicionado; para refrigeración: implementación de cortinas para refrigeradores nocturnas. Las políticas evaluadas son políticas de difusión y financieras.

### PC1: Política de difusión

De acuerdo con la revisión de literatura realizada en el numeral 2.1, diversos autores coinciden en que la falta de información inhibe las prácticas de conservación de la energía (Chen, Delmas, Locke, & Singh, 2017; Doren, Giezen, Driessen, & Runhaar, 2016; Asensio & Delmas, 2016; Waechter, Sütterlin, & Siegrist, 2015; Croucher, 2011).

La política PC1, está encaminada a la financiación de la educación sobre las prácticas de conservación de la energía; se pretende que el gobierno destine presupuesto para financiar programas de educación al sector comercial particularmente al subsector supermercados, a través de medios de comunicación masivos, eventos corporativos y pruebas pilotos. Al generar financiación, se espera que la tasa de adopción de tecnologías para aplicar prácticas de conservación de la energía aumente, puesto que los

supermercados van a comprender mejor cuándo y cómo utilizan la electricidad y ayudarles a mejorar las decisiones sobre el uso de la energía, y por tanto un incremento en el coeficiente de influencias externas.

## **PC2: Política de subsidio a la práctica de conservación de la energía**

La política PC2, es una política que busca incentivar el uso de prácticas de conservación de la energía en los supermercados, por lo que se propone disminuir los costos de inversión inicial de las tecnologías para aplicar prácticas de conservación de la energía aplicando un subsidio del 30% del valor de la inversión de la tecnología, de esta manera el costo mensual equivalente de la práctica actual no es competitivo con el costo mensual equivalente de la práctica eficiente, debido a los ahorros en el costo de operación.

La política PC2 solo será aplicada al uso de la energía en iluminación y refrigeración puesto que como se explicó en el numeral 4.11.1, la práctica de conservación de la energía en ventilación no va a requerir de ningún tipo de inversión inicial, por lo que su CME solo va a ser producto del costo de operación. Se estableció que con el subsidio a la tecnología para aplicar prácticas de conservación de la energía en iluminación y refrigeración, el costo mensual equivalente para cada una quedaría así:

Tabla 25 Consolidado política PC2 conservación de la energía para iluminación y refrigeración. Elaboración propia

	<b>CME práctica actual</b>	<b>CME práctica eficiente sin subsidio</b>	<b>CME práctica eficiente con subsidio</b>
Iluminación	\$ 11.467.741,94	\$ 10.792.926,27	\$ 9.928.870,97
Refrigeración	\$ 26.107.920	\$ 17.274.258,45	\$ 17.261.349,08

Proponer esta política se fundamenta en las barreras de entrada de la conservación de la energía estudiadas en el numeral 2.1, donde Henriques & Catarino (2016) afirman que los obstáculos de conservación de la energía en la mayoría de las pequeñas y medianas empresas, se relaciona con sus limitados recursos, tanto humanos como financieros. Por tanto, con la evaluación de esta política se pretende identificar si la disminución en los costos de inversión inicial de la tecnología para aplicar prácticas de conservación de la energía aumenta el número de supermercados que adoptarían la práctica, y por ende la demanda del subsector y las emisiones.

## **5.7. Evaluación comparativa del desempeño de las políticas para conservación de la energía**

### **Iluminación**

El Gráfico 65 muestra los supermercados que no adoptan sensores de iluminación y el Gráfico 66 muestra los supermercados que adoptan sensores de iluminación al implementar diferentes políticas para acelerar la adopción de la tecnología. Se observa como la política PC1: Política de difusión, genera un mayor aumento en el número de supermercados que adoptan sensores de iluminación durante el

tiempo de simulación y al mismo tiempo disminuyen quienes no adoptan la tecnología sensores de iluminación comparado con la política PC2.

Gráfico 66 Supermercados que no adoptan sensores de iluminación para diferentes políticas. Elaboración propia

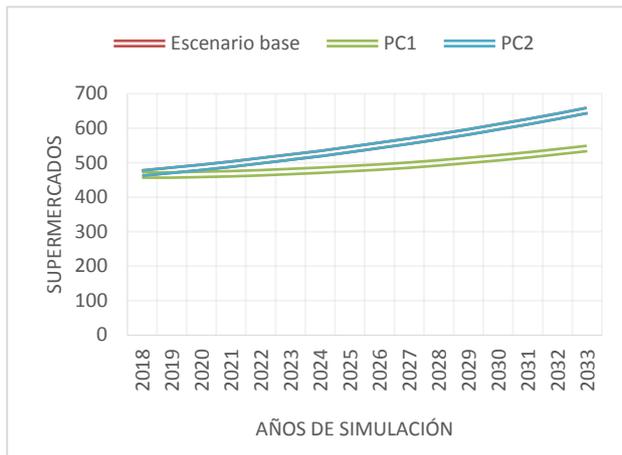
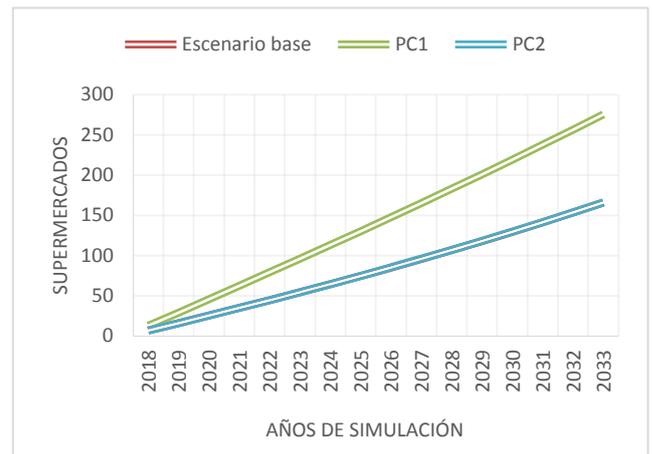


Gráfico 65 Supermercados que adoptan sensores de iluminación para diferentes políticas. Elaboración propia



El Gráfico 67 muestra la demanda de energía eléctrica al aplicar las diferentes políticas para acelerar el proceso de adopción de sensores de iluminación y el Gráfico 68 muestra las emisiones al aplicar las diferentes políticas para acelerar el proceso de adopción de sensores de iluminación. Ambos gráficos nos muestran como la política PC1: Política de difusión, genera una pequeña disminución de la demanda de energía y las emisiones de los supermercados que adoptan sensores de iluminación con respecto a la política PC2. El escenario base no se logra visualizar en los gráficos debido a que la diferencia en la demanda y emisiones con la política PC2 es tan mínima que no se logra distinguir.

Gráfico 67 Demanda de energía supermercados con sensores de iluminación para diferentes políticas. Elaboración propia

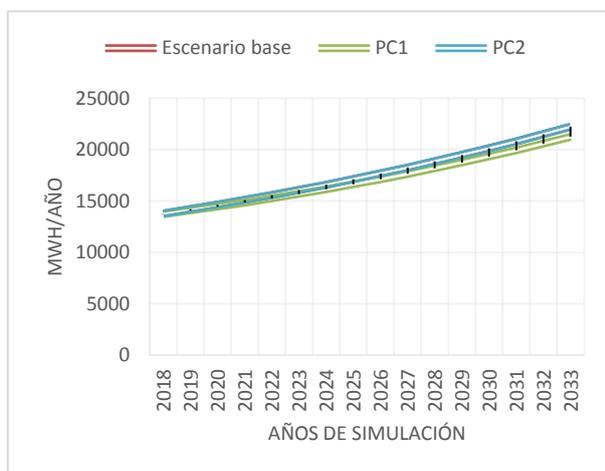
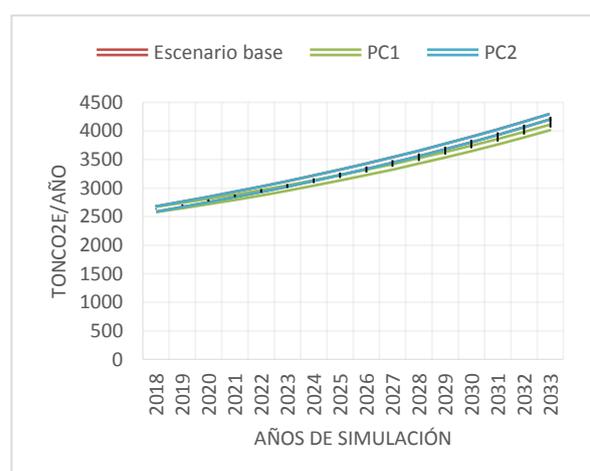


Gráfico 68 Emisiones supermercados con sensores de iluminación para diferentes políticas. Elaboración propia



Con la política de difusión PC1, se alcanza para el año 2033 una disminución del 1% tanto en la demanda de energía (987 MWh menos) como de emisiones evitadas (188 TonCO2e) respecto a la

demanda total (85.987 MWh) y emisiones totales (16.458 TonCO2e) de los supermercados en el escenario base, debido a la disminución de consumo de energía eléctrica del SIN.

A continuación se presentan los resultados para cada una de las políticas implementadas de conservación de la energía en iluminación, al final del año de simulación.

Tabla 26 Resultados comparativos de las políticas implementadas para la aplicación de prácticas de conservación de la energía en iluminación. Elaboración propia

Iluminación	Escenario base	PC1	PC2
Supermercados con sensores de iluminación	166	276	166
Demanda supermercados (MWh)	22.223,8	21.236,4	22.222,8
Emisiones supermercados (TonCO2e)	4251,4	4062,5	4251,2

De acuerdo con los resultados de las políticas para implementación de prácticas de conservación de la energía en iluminación, el escenario donde mayor cantidad de supermercados adoptan sensores de iluminación al final de la simulación es con la política PC1: Política de difusión, esto puede deberse a que existe un desinterés de los consumidores por las prácticas de conservación de la energía, algunos de ellos temen los cambios (no quieren complicar sus vidas) o necesitan más información, otros no han pasado mucho tiempo considerando varias opciones disponibles en el mercado o incluso no son conscientes de su existencia.

## Ventilación

El Gráfico 70 muestra los supermercados que no regulan la temperatura del sistema de aires acondicionados y el Gráfico 69 muestra los supermercados que regulan la temperatura del sistema de aires acondicionados al implementar la política de difusión para acelerar la adopción de la práctica.

Gráfico 69 Supermercados que no aplican control de la temperatura del sistema de aire acondicionado. Elaboración propia

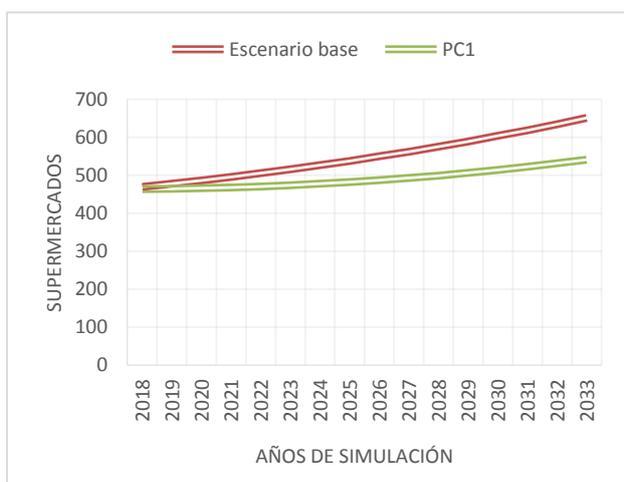
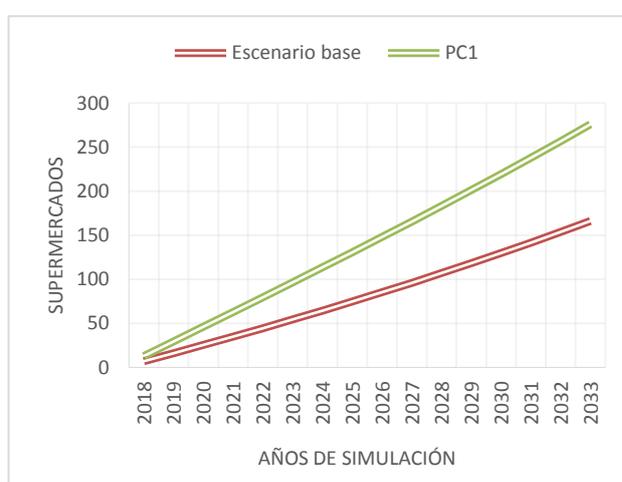


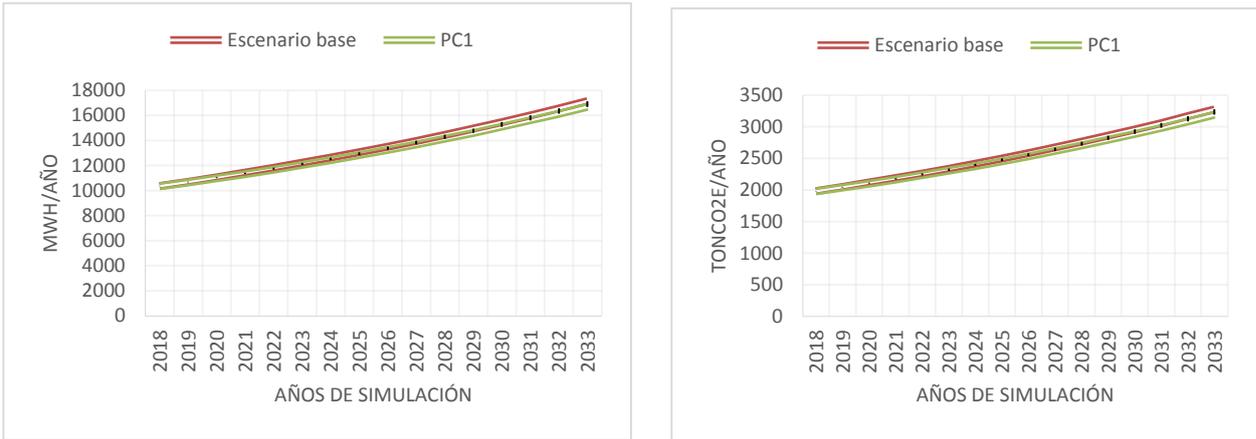
Gráfico 70 Supermercados que aplican control de la temperatura del sistema de aire acondicionado. Elaboración propia



Se observa como la política PC1: Política de difusión, genera un mayor aumento en el número de supermercados que adoptan la práctica de regular la temperatura del sistema de aires acondicionados durante el tiempo de simulación y al mismo tiempo disminuyen quienes no adoptan la práctica comparado con el escenario base.

El Gráfico 72 muestra la demanda de energía eléctrica al aplicar la política de difusión para acelerar el proceso de aplicación de regular la temperatura del sistema de aires acondicionados y el Gráfico 71 muestra las emisiones al aplicar la política de difusión para acelerar el proceso de aplicación de regular la temperatura del sistema de aires acondicionados. Ambos gráficos nos muestran como la política PC1: Política de difusión, genera una pequeña disminución de la demanda de energía y las emisiones de los supermercados que aplican la práctica de regular la temperatura del sistema de aires acondicionados con respecto al escenario base.

Gráfico 72 Demanda de energía supermercados que aplican control de la temperatura del sistema de aire acondicionado. Gráfico 71 Emisiones supermercados que aplican control de la temperatura del sistema de aire. Elaboración propia



Con la política de difusión PC1, se alcanza para el año 2033 una disminución del 1% tanto en la demanda de energía (455 MWh menos) como de emisiones evitadas (87 TonCO2e) respecto a la demanda total (85.987 MWh) y emisiones totales (16.458 TonCO2e) de los supermercados en el escenario base, debido a la disminución de consumo de energía eléctrica del SIN.

A continuación se presentan los resultados de la implementación de la política de difusión de conservación de la energía en ventilación, con respecto al escenario base al final del año de simulación. Cabe recordar, que para este uso de la energía solo se propuso la política de difusión, porque la práctica de regular la temperatura del sistema de aires acondicionados no implica una inversión inicial, por lo que no se requiere de políticas de apoyo financiero.

Tabla 27 Resultados comparativos de las políticas implementadas para la aplicación de prácticas de conservación de la energía en ventilación. Elaboración propia

Ventilación	Escenario base	PC1
Supermercados con control de temperatura sistema aire acondicionado	166	276

Ventilación	Escenario base	PC1
Demanda supermercados (MWh)	17.133,6	16.678,4
Emisiones supermercados (TonCO2e)	3.277,7	3.190,6

De acuerdo con los resultados de las políticas para implementación de prácticas de conservación de la energía en ventilación, la política PC1: Política de difusión genera un escenario donde una mayor cantidad de supermercados aplican la práctica de regular la temperatura del sistema de aires acondicionados al final de la simulación.

Es necesario generar una buena difusión de esta práctica de conservación de energía, sin embargo, la difusión exitosa está condicionada por un cambio significativo en la actitud y el comportamiento de los supermercados hacia el ahorro de la energía y reducción de emisiones.

## Refrigeración

El Gráfico 73 muestra los supermercados que no usan de cortinas de refrigeración nocturna y el Gráfico 74 muestra los supermercados que usan de cortinas de refrigeración nocturna al implementar diferentes políticas para acelerar la aplicación de la práctica. Se observa como la política PC1: Política de difusión, genera un mayor aumento en el número de supermercados que usan de cortinas de refrigeración nocturna durante el tiempo de simulación y al mismo tiempo disminuyen quienes no usan de cortinas de refrigeración nocturna comparada con la política PC2.

Gráfico 73 Supermercados que no usan cortinas de refrigeración nocturna para diferentes políticas. Elaboración propia

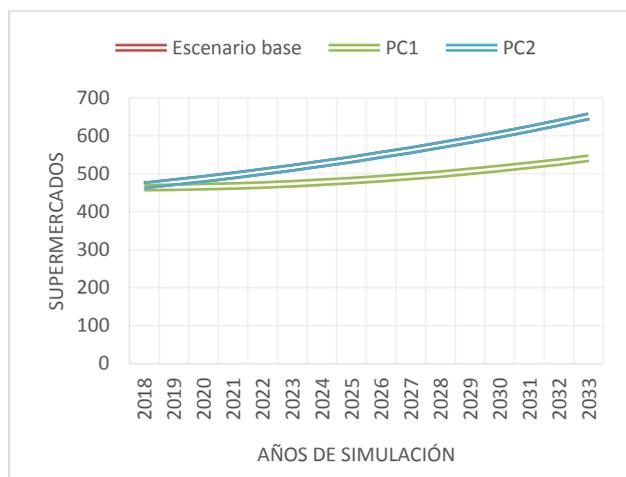
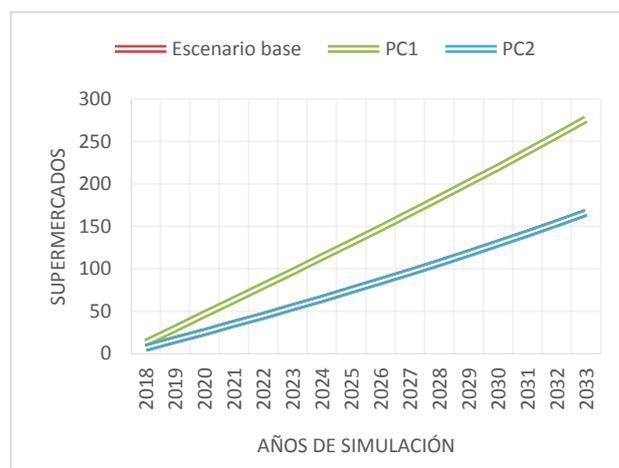


Gráfico 74 Supermercados que usan cortinas de refrigeración nocturna para diferentes políticas. Elaboración propia



El Gráfico 75 muestra la demanda de energía eléctrica al aplicar las diferentes políticas para acelerar el proceso de aplicación de cortinas de refrigeración nocturna y el Gráfico 76 muestra las emisiones al aplicar las diferentes políticas para acelerar el proceso de aplicación de cortinas de refrigeración nocturna. Ambos gráficos nos muestran como la política PC1: Política de difusión, genera una pequeña

disminución de la demanda de energía y las emisiones de los supermercados que usan cortinas de refrigeración nocturna con respecto a la política PC2. El escenario base no se logra visualizar en los gráficos debido a que la diferencia en la demanda y emisiones con la política PC2 es tan mínima que no se logra distinguir.

Gráfico 75 Demanda de energía supermercados que usan cortinas de refrigeración nocturna para diferentes políticas. Elaboración propia

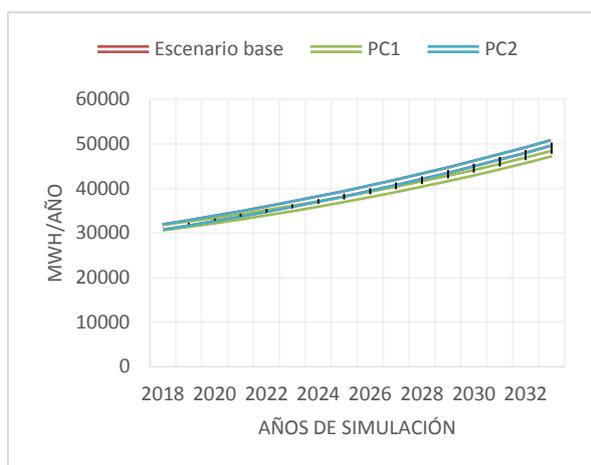
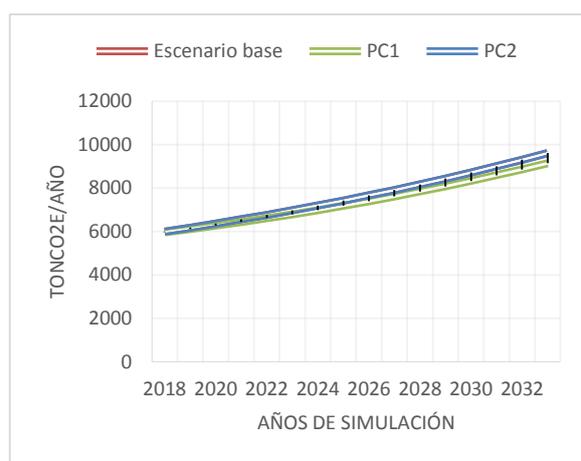


Gráfico 76 Emisiones supermercados que usan cortinas de refrigeración nocturna para diferentes políticas. Elaboración propia



Con la política de difusión PC1, se alcanza para el año 2033 una disminución del 3% tanto en la demanda de energía (2469 MWh menos) como de emisiones evitadas (472 TonCO2e) respecto a la demanda total (85.987 MWh) y emisiones totales (16.458 TonCO2e) de los supermercados en el escenario base, debido a la disminución de consumo de energía eléctrica del SIN.

A continuación se presentan los resultados para cada una de las políticas implementadas de conservación de la energía en refrigeración al final del año de simulación.

Tabla 28 Resultados comparativos de las políticas implementadas para la aplicación de prácticas de conservación de la energía en refrigeración. Elaboración propia

Refrigeración	Escenario base	PC1	PC2
Supermercados con cortinas para refrigeradores nocturnas	166	276	166
Demanda supermercados (MWh)	50.259,7	47.790,3	50.259,7
Emisiones supermercados (TonCO2e)	9.614,7	9.142,28	9.614,7

De acuerdo con los resultados de las políticas para implementación de prácticas de conservación de la energía en refrigeración, el escenario donde mayor cantidad de supermercados aplican la práctica del uso de cortinas de refrigeración nocturna al final de la simulación es con la política PC1: Política de difusión, esto posiblemente se deba a una falta de interés por parte del supermercado en adoptar esta práctica. Perciben más obstáculos y desventajas que los beneficios de la adopción.

Primero, los supermercados deben estar convencidos de que esta práctica de conservación de la energía tienen un impacto en la eficiencia y la sostenibilidad del sistema de energía. Aquí, la educación y la publicidad desempeñar un papel vital. En segundo lugar, deben estar seguros de que la práctica les brinda beneficios (ganancias - ahorros financieros), no solo costos y dificultades (cambio de hábitos, incomodidad de uso). Solo así, los efectos serán lo suficientemente fuertes como para aumentar el crecimiento de supermercados que adopten esta práctica.

## 5.8. Combinación de estrategias

El propósito de este numeral es verificar si la aplicación conjunta de cada una de las estrategias de autogestión implementadas individualmente, produce mejores resultados que la aplicación aislada de cada una.

Para el cálculo de la demanda de energía total de supermercados al final del año de simulación, se tiene en cuenta el uso de la energía eléctrica y se resta por los ahorros generados por la microgeneración y las prácticas de conservación de la energía, lo que aporta a la disminución de la demanda de energía.

Ecuación 12 Calculo demanda total supermercados

$$Demanda\ total\ supermercados = (D_I + D_V + D_R + D_O) - (A_M + A_{CE})$$

Donde:

$D_I$  : Demanda iluminación al aplicar EE

$D_V$  : Demanda ventilación al aplicar EE

$D_R$  : Demanda refrigeración al aplicar EE

$D_O$  : Demanda otros usos

$A_M$  : Ahorro de energía por microgeneración solar FV

$A_{CE}$  : Ahorro de energía por prácticas de conservación de la energía en iluminación, ventilación y refrigeración

La demanda de cada uso de la energía se calcula a partir de la intensidad energética y el número de supermercados que adopta y no las diferentes tecnologías. Luego, se obtiene la demanda total de supermercados con el escenario base y la demanda total de supermercados con las mejores políticas que acelera el proceso de adopción de tecnologías y prácticas eficientes.

En cuanto a las emisiones totales de los supermercados, se toma la demanda de cada uno de los usos de la energía y se multiplica por el factor de emisión de la energía eléctrica, obteniendo las toneladas de CO2 equivalente producto del consumo de energía del SIN.

Luego, el Gráfico 77 muestra la demanda total de los supermercados en el escenario base y en el escenario de mejores políticas de cada uno de los usos de la energía, y el Gráfico 78 muestra las emisiones totales de los supermercados en el escenario base y en el escenario de mejores políticas de cada uno de los usos de la energía.

Gráfico 77 Demanda de energía supermercados totales que adoptan y no tecnologías y prácticas de autogestión. Elaboración propia

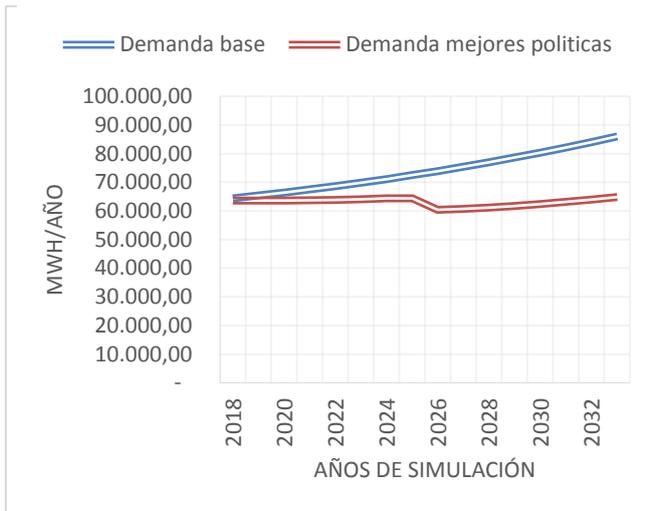
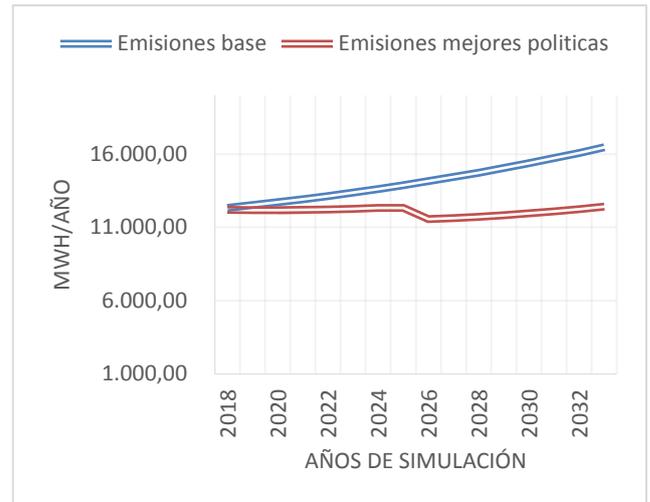


Gráfico 78 Emisiones supermercados totales que adoptan y no tecnologías y prácticas de autogestión. Elaboración propia



Los resultados nos muestran que al aplicar en conjunto todas las estrategias de autogestión se logra una disminución de la demanda de energía eléctrica del subsector supermercados en un 25%, pasando de 85,9 GWh en el escenario base a 64,8 GWh en los escenarios con mejores políticas en el año 2033. Igualmente, las emisiones de GEI disminuyen un 25% al año 2033, pasando de 16.458 ToCO<sub>2</sub>e en el escenario base a 12.414 ToCO<sub>2</sub>e en los escenarios con mejores políticas.

La Tabla 29 muestra el consolidado de la demanda de energía y emisiones de los escenarios base y escenarios con la mejor política que aceleran la adopción de tecnología en microgeneración, EE, y conservación de la energía.

Tabla 29 Consolidado demanda de energía y emisiones escenario base y mejores politicas de microgeneración, EE y conservación de la energía. Elaboración propia

	Uso de la energía: Iluminación al aplicar EE	Uso de la energía: Ventilación al aplicar EE	Uso de la energía: Refrigeración al aplicar EE	Otros usos	Ahorro de energía por microgeneración	Ahorro de energía por conservación de la energía	Demanda total supermercados
<b>Escenario base</b>							
<b>Consumo de energía (MWh/año)</b>	22.220	17.387	51.429	15.156	14.289	5916	85.987

	Uso de la energía: Iluminación al aplicar EE	Uso de la energía: Ventilación al aplicar EE	Uso de la energía: Refrigeración al aplicar EE	Otros usos	Ahorro de energía por microgeneración	Ahorro de energía por conservación de la energía	Demanda total supermercados
<b>Emisiones (TonCO2e/año)</b>	4.250	3.326	9.838	2.908	2.733	1.131	16.458
<b>Escenario mejores políticas</b>							
<b>Consumo de energía (MWh/año)</b>	16.276	17.100	49.705	15.322	23.731	9.828	64.845
<b>Emisiones (TonCO2e/año)</b>	3.113	3.271	9.508	2.940	4.539	1.880	12.413

## 5.9. Conclusiones del capítulo

De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible concluir que la política de difusión es la estrategia que genera la tasa de adopción de tecnología más rápida, pasando por encima de políticas financieras que le apuntan a la reducción de costos de inversión inicial. Esto se debe principalmente a que si un individuo no cuenta con ningún tipo de información sobre la tecnología o práctica eficiente, no posee las herramientas suficientes para tomar decisiones, a pesar de existir condiciones en el mercado que favorezcan la inversión. A su vez, las percepciones de un individuo son dinámicas y cambian con el tiempo a medida que están expuestos a la publicidad y conocen de casos exitosos de supermercados satisfechos e insatisfechos, por consiguiente todo tipo de información produce influencias sobre las decisiones individuales. Luego, la creación de políticas debe ir dirigida no solo a mejorar la tecnología eficiente, sino a hacer visible los beneficios de su implementación.

Vale la pena considerar que la demanda de electricidad en Colombia es bastante inelástica, lo que significa que los consumidores no responden de manera significativa a las señales de precios. La falta de capacidad de respuesta limita los beneficios potenciales de aplicar autogestión en el sector de los supermercados.

La dificultad percibida de la adopción debe reducirse para alentar a los supermercados a interesarse en la autogestión. La influencia social en las redes sociales de los supermercados y la publicidad en los medios de comunicación masivos, deberían utilizarse de manera efectiva para impulsar la difusión de las tecnologías de autogestión.

Finalmente, se espera que el tomador de decisiones del supermercado después de contar con información sobre las tecnologías de autogestión, tenga criterios suficientes para su proceso de elección y mediante una combinación de incentivos, herramientas regulatorias y normas, adopte las tecnologías que promueven una transición sostenible.

Al revisar los resultados es posible notar que la aplicación conjunta de las medidas produce mejores resultados que la aplicación independiente de cada una de ellas, obteniendo un ahorro de energía y

emisiones de un 25% de la demanda total de supermercados, comparado con los resultados individuales se obtuvo lo siguiente:

- La microgeneración solar FV por si sola obtiene un 11% de disminución de la demanda y emisiones totales de supermercados,
- Seguido de la sustitución de lámparas fluorescentes como medida de eficiencia energética al generar su prohibición en el año 2025 con un 7% de disminución de la demanda y emisiones totales de supermercados, y
- Finalmente la práctica de conservación de la energía del uso de cortinas para refrigeradores nocturnas genera ahorros del 3% de la demanda y emisiones totales de supermercados.

## **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 que deja esta tesis. Se mencionan algunas recomendaciones y futuros trabajos 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**

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**

*Objetivo 1: Identificar políticas de microgeneración, EE y conservación de la energía aplicables al sector comercial.*

*Objetivo 2: Describir el contexto regulatorio colombiano para la implementación de microgeneración, EE y conservación de la energía en sector comercial.*

Los objetivos 1 y 2 fueron cumplidos a través de los resultados expuestos en el Capítulo 1, donde se realizó un análisis de la evolución de las tecnologías de autogestión a nivel mundial y nacional y las políticas y contextos regulatorios de la autogestión del sector comercial en Colombia y en el mundo.

A su vez, el capítulo 2 presenta la revisión de literatura de la línea 2 sobre los estudios que evaluaban diferentes políticas a nivel mundial para acelerar la adopción de tecnología de microgeneración solar FV, EE y conservación de la energía en el sector comercial.

#### **6.1.2 Objetivo específico 3**

*Objetivo 3: Desarrollar un modelo de simulación que permita evaluar políticas de microgeneración, EE y conservación de la energía para sector comercial no regulado en Colombia para supermercados.*

El objetivo 3 fue cumplido a través del capítulo 2, capítulo 3 y capítulo 4.

En el capítulo 2 se realizó la revisión de literatura sobre las políticas implementadas a nivel mundial para acelerar la adopción de tecnología de microgeneración solar FV, EE y conservación de la energía en el sector comercial. A partir de este análisis se concluye que las políticas para acelerar la adopción de este tipo de tecnologías deben abordar aspectos más allá del costo o los elementos financieros, incluyendo aspectos sociales y de conocimiento de los beneficios de implementar dicha acción o tecnología.

En el capítulo 3 se sustentó por qué la elección de dinámica de sistemas, la cual es la más oportuna para el estudio de sistemas complejos, la entrada de retardos y realimentación, y la posibilidad de explicar las interacciones a partir de las relaciones de causalidad entre las variables del sistema.

Finalmente, en el capítulo 4 se presenta el modelo de simulación desarrollado utilizando dinámica de sistemas para analizar las políticas propuestas que aceleran la adopción de las tecnologías solar FV, EE y prácticas de conservación de la energía en el subsector comercial supermercados. Este capítulo incluye también las especificaciones, supuestos y los argumentos de validación, que permitieron dar confiabilidad al modelo para cumplir con el propósito que fue desarrollado.

### **6.1.3 Objetivo general**

*Objetivo general: Evaluar políticas de autogestión de electricidad en el sector comercial en Colombia*

Este objetivo se cumplió en el capítulo 5 a través del análisis de resultados de la implementación de las políticas propuestas.

## **6.2. Conclusiones y aportes específicos de la tesis**

A continuación se nombran los diferentes aportes alcanzados con la realización de esta tesis de maestría:

- Se realizó una revisión de literatura sobre estudios orientados a responder preguntas sobre los elementos que son motivadores o que se convierten en barreras de entrada para la microgeneración con tecnología solar FV, la EE y la conservación de la energía en el sector comercial. Esta revisión se describe en el Capítulo 2.
- Se realizó una revisión de literatura sobre las distintas políticas implementadas sobre la microgeneración con tecnología solar FV, la EE y la conservación de la energía y sus implicaciones en la difusión en el sector comercial. Esta revisión se describe en el Capítulo 2.
- Se realizó una revisión de literatura sobre estudios que incorporen elementos de racionalidad limitada para explicar de forma adecuada el fenómeno de difusión de tecnologías encaminadas a la microgeneración de energía solar FV, EE y conservación de la energía. Esta revisión se describe en el Capítulo 2.
- Se realizó una revisión de literatura de estudios que se concentren en el análisis de modelos de simulación utilizados para evaluar políticas de microgeneración con tecnología solar FV, EE y conservación de la energía en el sector comercial. Esta revisión se describe en el Capítulo 2.
- Se formuló una estructura causal que permite comprender y explicar la adopción de la tecnología solar FV, tecnologías eficientes y prácticas de conservación de la energía en el subsector comercial supermercados de Colombia, dicho aporte se encuentra en las secciones 4.3 y 4.4 microgeneración, 4.6 y 4.7 eficiencia energética y 4.9 y 4.10 conservación de la energía de este documento.
- Se desarrolló un modelo utilizando dinámica de sistemas que permite estudiar, comprender y analizar el proceso de adopción de la tecnología solar FV, tecnologías eficientes y prácticas de

conservación de la energía en el subsector comercial supermercados de Colombia. 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 demanda de energía y emisiones de GEI del subsector comercial supermercados de Colombia. Este modelo se describe en el Capítulo 4.
- En el capítulo 5 se analizaron y evaluaron diferentes políticas específicas para el caso colombiano relacionadas con la difusión de las tecnologías solar FV, tecnologías eficientes y prácticas de conservación de la energía en el subsector comercial supermercados de Colombia. Dichas políticas consideraron factores fiscales, financieros y educativos.
- En la capítulo 5 se encontró que las políticas enfocada a los aspectos fiscales (exclusión de IVA y renta) y financieros (impuesto al precio de la electricidad de la red o subsidio a las tecnologías eficientes) no alteran la dinámica de adopción de tecnologías solar FV, tecnologías eficientes y prácticas de conservación de la energía; lo cual se atribuye a la falta de información por parte del usuario final de los beneficios tanto económicos como ambientales de adquirir este tipo de tecnologías y prácticas.

### **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:

- Evaluar la posibilidad de que los supermercados autogeneren completamente su consumo de energía a partir de la generación solar FV, aplicando un sistema con baterías y vendiendo los excedentes de energía a la red.
- Considerar la posibilidad de adquisición de las tecnologías solar FV, tecnologías eficientes y prácticas de conservación de la energía en los demás subsectores del sector comercial.
- Profundizar en las motivaciones que conllevan a los usuarios a decidir adoptar las tecnologías solar FV, tecnologías eficientes y prácticas de conservación de la energía, ya que, como conclusión de este trabajo investigativo, se evidenció que el precio de la tecnología no es un factor determinante de los cambios en la difusión.
- Internalizar los costos de las políticas de manera que se tenga en cuenta cuánto es el costo que debe asumir el gobierno para aplicar las políticas.

### **6.4. Divulgación de resultados**

Ponencias en eventos nacionales:

- Eficiencia energética en grandes superficies: Adopción lámparas LED. Autores: Nathalie Ramírez Giraldo, Carlos Jaime Franco y Laura Milena Cárdenas. XVI Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas 2018. Ponente. 29 al 31 de agosto. 2018. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

- Proceso de adopción de paneles solares en edificios comerciales. Autores: Nathalie Ramírez Giraldo, Carlos Jaime Franco y Laura Milena Cárdenas. XV Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas 2017. Ponente. 30 de agosto al 1 de septiembre. 2017. Universidad de Cartagena.

Ponencias en eventos internacionales:

- Eficiencia energética en grandes superficies: Adopción de iluminación LED y sistemas de aires acondicionados eficientes. Autores: Nathalie Ramírez Giraldo, Carlos Jaime Franco y Laura Milena Cárdenas. XVI Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas 2018. Ponente. 17 al 19 de octubre. 2018. Tecnológico de Monterrey sede Puebla, México.
- Proceso de adopción de paneles solares en almacenes de cadena. Autores: Nathalie Ramírez Giraldo, Carlos Jaime Franco y Laura Milena Cárdenas. XV Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. Ponente. 18 al 20 de octubre. 2017. Facultad economía y negocios. Universidad de Chile.

Artículos:

- (Artículo en evaluación) Ramírez, N., Franco, C., &Cárdenas, L. Policies And Regulatory Practices For Self-generation Of Renewable Energies And Energy Efficiency. *IEEE Latin América*.



- Cellura, M., Di Gangi, A., Longo, S., & Orioli, A. (2012). Photovoltaic electricity scenario analysis in urban contexts: An Italian case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2041–2052.
- Celsia. (2018). *Celsia*. Obtenido de <https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia>
- Cencosud. (15 de Junio de 2018). Precio energía eléctrica SIN. (N. R. Giraldo, Entrevistador)
- CEPAL. (2017). *Efectos potenciales de un impuesto al carbono sobre el producto interno bruto en los países de América Latina*. Santiago: Publicación de las Naciones Unidas.
- Chai, K.-H., & Baudelaire, C. (2015). Understanding the energy efficiency gap in Singapore: a Motivation, Opportunity, and Ability perspective. *Journal of Cleaner Production*, 224-234.
- Chaouang, N., Flick, D., & Laguerre, O. (2017). Experimental and numerical investigation of the performance of retail refrigerated display cabinets. *Trends in Food Science & Technology*, 95-104.
- Chauhan, S. S., & Rajput, S. (2016). Parametric analysis of a combined dew point evaporative-vapour compression based air conditioning system. *Alexandria Engineering Journal*, 2333-2344.
- Chedwal, R., Mathur, J., Agarwal, G. D., & Dhaka, S. (2015). Energy saving potential through Energy Conservation Building Code and advance energy efficiency measures in hotel buildings of Jaipur City, India. *Energy and Buildings*, 282-295.
- Chen, V., Delmas, M., Locke, S., & Singh, A. (2017). Information strategies for energy conservation: A field experiment in India. *Energy Economics*.
- Chen, W., Zhou, K., & Yang, S. (2017). Evaluation of China's electric energy efficiency under environmental constraints: A DEA cross efficiency model based on game relationship. *Journal of Cleaner Production*, 38-44.
- Comisión Europea. (2018). *Comisión Europea*. Obtenido de <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency>
- Commission of the European Communities. (2008). *The support of electricity from renewable energy sources. Commission staff working document*. Brussels.
- Conference of the Parties. (2015). *Adoption of the Paris Agreement*. Paris: United Nations.
- Congreso de Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014*. Bogotá: Diario Oficial 49150 de mayo 13 de 2014.
- CORPOEMA & UPME. (2010). *Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE). Volumen 1. Plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE)*. Bogotá.
- Corporación Andina de Fomento. (2013). *Energía: Una visión sobre los retos y oportunidades en América Latina y el Caribe*. Obtenido de [https://www.caf.com/\\_custom/static/agenda\\_energia/assets/caf\\_agenda\\_energiat5\\_eficiencia.pdf](https://www.caf.com/_custom/static/agenda_energia/assets/caf_agenda_energiat5_eficiencia.pdf)
- CREG. (2009). *CREG 138 Revisión de límite de usuario no regulado de energía eléctrica*. Bogotá.
- CREG. (2018). *Proyecto Resolución 123*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- Croucher, M. (2011). Potential problems and limitations of energy conservation and energy efficiency. *Energy Policy*, 5795-5799.
- DANE. (2012). *Clasificación industrial internacional uniforme de todas las actividades económicas - Revisión 4 adaptada para Colombia*. Bogotá.
- de Faria Jr., H., Trigos, F., & Cavalcanti, J. (2017). Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 469-475.
- de la Rue du Can, S., Leventis, G., Phadke, A., & Gopal, A. (2014). Design of incentive programs for accelerating penetration of energy-efficient appliances. *Energy Policy*, 56-66.
- de Sousa Brandão, I. L., Mannaerts, C. M., de Sousa Brandão, I. W., Barbosa Queiroz, J. C., Verhoef, W., Fonseca Saraiva, A. C., & Dantas Filho, H. A. (2019). Conjunctive use of in situ gas sampling and chromatography with geospatial analysis to estimate greenhouse gas emissions of a large Amazonian hydroelectric reservoir. *Science of The Total Environment*, 394-407.
- Del Sol, N. E., & Cabrera Fernández, E. R. (2008). Sistemas fotovoltaicos. *Photovoltaic Systems*, 5(1), 21-26.
- Demirel, Y. (2012). *Energy - Green Energy and Technology*. London: Springer .
- Dietz, T., Gardner, G. T., Gilligan, J., Stern, P. C., & Vandenbergh, M. P. (2009). Household actions can provide a behavioral wedge to rapidly reduce US carbon emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 18452–18456.
- Doren, D. V., Giezen, M., Driessen, P., & Runhaar, H. (2016). Scaling-up energy conservation initiatives: Barriers and local strategies. *Sustainable Cities and Society*, 227-239.
- Dufo-López, R., & Bernal-Agustín, J. (2015). A comparative assessment of net metering and net billing policies. Study cases for Spain. *Energy*, 684-694.
- Dyner, I., & Franco, C. (2004). Consumers' bounded rationality: the case of competitive energy markets. *Systems Research and Behavioral Science*, 373-389.
- E Source Companies. (2010). *Managing energy costs in grocery stores*.
- Econofrost. (2018). *Cotización cortinas de refrigeración nocturna serie 7000. 9000 y 9600*.
- EEA. (2013). Achieving energy efficiency through behaviour change: what does it take? *EEA Technical report*, 1725-2237.
- EIA. (2018). *U.S. Energy Use Intensity by Property Type*.
- El Chaar Lamont LA, & El Zein, N. (2011). Review of photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2165-2175.
- Elster, J. (1990). *When Rationality Fails. In Limits of rationality*. Chicago: University of Chicago Press.
- Enel Green Power. (16 de Agosto de 2017). *Consejo Nacional de Operación*. Obtenido de [https://www.cno.org.co/sites/default/files/archivosAdjuntos/enel\\_fotovoltaico\\_el\\_paso.pdf](https://www.cno.org.co/sites/default/files/archivosAdjuntos/enel_fotovoltaico_el_paso.pdf)
- Energía y sociedad. (22 de Julio de 2014). *Energía y sociedad*. Recuperado el 4 de Junio de 2018, de <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/3-4-mecanismos-de-apoyo-a-las-energias-renovables/>
- Energy Star. (2007). *Supermarkets: An Overview of Energy Use and Energy Efficiency Opportunities* .
- Energy Star. (2017). *Learn About LED Lighting*. Obtenido de [https://www.energystar.gov/products/lighting\\_fans/light\\_bulbs/learn\\_about\\_led\\_bulbs](https://www.energystar.gov/products/lighting_fans/light_bulbs/learn_about_led_bulbs)

- Energinc. (2017). *FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA RENOVABLE (FNCER) Análisis de oferta y demanda de energía para la misión de crecimiento verde*. Obtenido de [https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/comite/sesion%205/2017\\_11\\_17%20-%20Presentaci%C3%B3n%20Diagnostico%20ENERSINC.pdf](https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/comite/sesion%205/2017_11_17%20-%20Presentaci%C3%B3n%20Diagnostico%20ENERSINC.pdf)
- EPA. (2016). *Summary of the Energy Independence and Security Act*. Obtenido de <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-energy-independence-and-security-act>
- ERCO Energía. (11 de Abril de 2018). Costo instalación arreglo solar. (N. R. Giraldo, Entrevistador)
- Escudero, A., & Botero, S. (2009). Estado del arte y una propuesta integradora para el estudio de la brecha energética en la implementación de la cogeneración en el sector industrial. *Energética*, 63-72.
- European Commission. (2012). *Directiva 2012/27/UE*.
- European Commission. (2015). *The Paris Protocol – A blueprint for tackling global climate change beyond 2020*. Brussels.
- Expansión. (2018). *PIB de Colombia*. Obtenido de <https://datosmacro.expansion.com/pib/colombia>
- Fernández, J. C., & Roqueñí, N. (2018). Analysis of the potential of Spanish supermarkets to contribute to the mitigation of climate change. *Sustainable Production and Consumption*, 122-128.
- Fog Corradine, L. (23 de Mayo de 2018). *Pontificia Universidad Javeriana*. Obtenido de <https://www.javeriana.edu.co/pesquisa/efectos-de-hidroelectricas-urge-una-vision-integral/>
- Forrester, J. W. (1958). Industrial dynamics: a major breakthrough for decision makers. *Harvard business review*, 37-66.
- Forrester, J. W. (1992). *System Dynamics, Systems Thinking, and Soft OR*. 1-14.
- Forrester, J., & Senge, P. (1980). *Tests for Building Confidence in System Dynamics Models*.
- Franco, C., & Dyner, I. (2004). *Racionalidad limitada del consumidor en mercados energéticos desregulados y la función del comercializador y el gobierno*. Medellín.
- Gallego Castillo, C., & Victoria, M. (2015). Cost-free feed-in tariffs for renewable energy deployment in Spain. *Renewable Energy*, 411-420.
- Garg, A., Maheshwari, J., Shukla, P., & Rawal, R. (2017). Energy appliance transformation in commercial buildings in India under alternate policy scenarios. *Energy*, 952-965.
- Gaspar, R., & Antunes, D. (2011). Energy efficiency and appliance purchases in Europe: Consumer profiles and choice determinants. *Energy Policy*, 7335-7346.
- Gazheli, A., Antal, M., & Bergh, J. v. (2015). The behavioral basis of policies fostering long-run transitions: Stakeholders, limited rationality and social context. *Futures*, 14-30.
- Geller, H., Harrington, P., Rosenfeld, A. H., Tanishima, S., & Unander, F. (2006). Policies for increasing energy efficiency: Thirty years of experience in OECD countries. *Energy Policy*, 34(5), 556-573.
- Geller, H., Harrington, P., Rosenfeld, A., Tanishima, S., & Unander, F. (2006). Policies for increasing energy efficiency: Thirty years experience in OECD countries. *Energy Policy*, 556-573.
- Gillingham, K., Newell, R., & Palmer, K. (2009). *Energy Efficiency Economics and Policy*. Washington: Resources.
- Girod, B., Stucki, T., & Woerter, M. (2017). How do policies for efficient energy use in the household sector induce energy-efficiency innovation? An evaluation of European countries. *Energy Policy*, 223-237.
- Greenpeace. (2005). *Decentralising power: an energy revolution for the 21st century*. London.
- Gyamfi, S., Amankwah Diawuo, F., Nyarko Kumi, E., Sika, F., & Modjinou, M. (2017). The energy efficiency situation in Ghana. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Haas, R., Eichhammer, W., Huber, C., Langniss, O., Lorenzoni, A., Madlener, R., & Menanteau, P. (2004). How to promote renewable energy systems successfully and effectively. *Energy Policy*, 32(6), 833-839.
- Haas, R., Ornetzeder, M., Hametner, K., Wroblewski, A., & Hübner, M. (1999). Socio-economic aspects of the Austrian 200kWp photovoltaic-rooftop programme. *Solar Energy*, 66(3), 183-191.
- Hafeznia, H., Aslani, A., Anwar, S., & Yousefjamali, M. (2017). Analysis of the effectiveness of national renewable energy policies: A case of photovoltaic policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 669-680.
- Hall, L. M., & Buckley, A. R. (2016). A review of energy systems models in the UK: Prevalent usage and categorisation. *Applied Energy*, 607-628.
- Hameed, M. A., Counsell, S., & Swift, S. (2012). A conceptual model for the process of IT innovation adoption in organizations. *Journal of Engineering and Technology Management*, 358-390.
- Henriques, J., & Catarino, J. (2016). Motivating towards energy efficiency in small and medium enterprises. *Journal of Cleaner Production*, 42-50.
- HMSO. (2004). *Energy Act 2004, Section 82*. United Kingdom. Obtenido de [http://www.legislation.gov.uk/ukpga/2004/20/pdfs/ukpga\\_20040020\\_en.pdf](http://www.legislation.gov.uk/ukpga/2004/20/pdfs/ukpga_20040020_en.pdf)
- Hommes, C., & Zeppini, P. (2014). Innovate or Imitate? Behavioural technological change. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 308-324.
- Hung, S., & Wang, A. (2010). Examining the small world phenomenon in the patent citation network - A case study of the Radio Frequency Identification (RFID) network. *Scientometrics*, 121-134.
- ICONTEC. (2011). *NTC-ISO 50001*. Bogotá.
- ICONTEC. (2016). *Norma Técnica Colombiana 6112*. Bogotá.
- IDEAM. (2016). *Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero - Colombia*. Bogotá: Zetta Comunicadores.
- IDEAM. (2018). *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*. Obtenido de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP & CANCELLERÍA. (2016). *Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero – Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá D.C.
- IEA. (2008a). *Deploying renewables*. Paris.

- IEA. (2008b). *Energy efficiency requirements in building codes*. France.
- IEA. (2010b). *Technology Roadmap - Solar photovoltaic energy*. France: IEA Publications.
- IEA. (2012). *Energy Technology Perspectives 2012*. Paris: OECD/IEA.
- IEA. (2013). *Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050*. Paris: IEA.
- IEA. (29 de septiembre de 2014). *How solar energy could be the largest source of electricity by mid-century*. Obtenido de <https://www.iea.org/newsroom/news/2014/september/how-solar-energy-could-be-the-largest-source-of-electricity-by-mid-century.html>
- IEA. (2015). *Energy and climate change*. Paris: IEA.
- IEA. (2016). *Energy efficiency - Market report 2016*. Paris.
- IEA. (2018). *Energy Efficiency*. Obtenido de <https://www.iea.org/efficiency2018/>
- IEA. (2018). *International Energy Agency*. Obtenido de <https://www.iea.org/topics/energyefficiency/>
- IRENA. (2013). *Renewable Energy Auctions in Developing Countries*.
- IRENA. (2017b). *Perspectives for the Energy Transition: Investment Needs for a Low-Carbon Energy System*. Abu Dhabi.
- Jaramillo Cortés, R. A. (2018). *Costo económico de los impactos ambientales y el tamaño óptimo de los megaproyectos hidroeléctricos*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Jimenez, M., Franco, C., & Dyrer, I. (2016a). Diffusion of renewable energy technologies: The need for policy in Colombia. *Energy*, 111, 818-829.
- Jimenez, M., Franco, C., & Dyrer, I. (2016b). *Evaluación de los efectos de la penetración fotovoltaica en la curva de carga del sector residencial: el caso colombiano*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Karakaya, E., & Sriwannawit, P. (2015). Barriers to the adoption of photovoltaic systems: The state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60-66.
- Karakaya, E., Nuur, C., & Hidalgo, A. (2015). Motivators for adoption of photovoltaic systems at grid parity: A case study from Southern Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1090-1098.
- Kirschen, D. S., & Member, S. (2003). Demand-Side View of Electricity Markets. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, 18(2), 520-527.
- Korcaj, L., Hahnel, U., & Spada, H. (2015). Intentions to adopt photovoltaic systems depend on homeowners' expected personal gains and behavior of peers. *Renewable Energy*, 407-415.
- Kostka, G., Moslener, U., & Andreas, J. (2013). Barriers to increasing energy efficiency: evidence from small-and medium-sized enterprises in China. *Journal of Cleaner Production*, 59-68.
- Kounetas, K., Skuras, D., & Tsekouras, K. (2011). Promoting energy efficiency policies over the information barrier. *Information Economics and Policy*, 72-84.
- Kumar, R., & Agarwala, A. (2016). Renewable energy technology diffusion model for techno-economics feasibility. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1515-1524.
- Laciana, C., Rovere, S., & Podestá, G. (2013). Exploring associations between micro-level models of innovation diffusion and emerging macro-level adoption patterns. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 1873-1884.
- Lee, P., Lam, P., Lee, W., & Chan, E. (2016). Analysis of an air-cooled chiller replacement project using a probabilistic approach for energy performance contracts. *Applied Energy*, 415-428.
- Leviton. (2014). *Sensores de presencia*. Obtenido de <http://www.dilight.mx/catalogos/LEVITON/SENSORES.pdf>
- Leviton Manufacturing Co., Inc. (2018). *Cotización sensor de microondas de alta frecuencia ODCOP-DOW*. Medellín.
- Liu, X., Yamamoto, R., & Suk, S. (2014). A survey analysis of energy saving activities of industrial companies in Hyogo, Japan. *Journal of Cleaner Production*, 288-300.
- Lopes, M., Antunes, C., & Martins, N. (2012). Energy behaviours as promoters of energy efficiency: A 21st century review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 4095-4104.
- Lowry, G. (2016). Energy saving claims for lighting controls in commercial buildings. *Energy and Buildings*, 489-497.
- M.Sarkis, A. (2017). A comparative study of theoretical behaviour change models predicting empirical evidence for residential energy conservation behaviours. *Journal of Cleaner Production*, 141, 526-537.
- Macal, C. M., & North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 151-162.
- Mahajan, V., Muller, E., & Bass, F. (1990). New product diffusion models in marketing: a review and directions for research. *Journal Of Marketing*, 1-26.
- Mai, T., & Smith, C. (2018). Scenario-based planning for tourism development using system dynamic modelling: A case study of Cat Ba Island, Vietnam. *Tourism Management*, 336-354.
- Mallinson, R. (2013). *Electricity Conservation Policy in Ontario: Assessing a System in Progress*. York University.
- Martínez, J. R., & Morales, Y. O. (2013). *Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Matthew, G., Nuttall, W., Mestel, B., & Dooley, L. (2017). A dynamic simulation of low-carbon policy influences on endogenous electricity demand in an isolated island system. *Energy Policy*, 121-131.
- Meade, N., & Islam, T. (2006). Modelling and forecasting the diffusion of innovation – a 25-year review. *International Journal of Forecasting*, 519-545.
- Mejía Gaviria, K. D. (2018). *Impactos sociales y el tamaño óptimo de los megaproyectos hidroeléctricos*. 2018: Universidad Nacional de Colombia.
- Messenger, R. A., & Ventre, J. (2005). *Photovoltaic systems engineering - second edition*. New York: CRC PRESS.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono*. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Estrategia\\_Colombiana\\_de\\_Desarrollo\\_Bajo\\_en\\_Carbono/FOLLETO\\_DE\\_PRESENTACION\\_ECDBC.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Estrategia_Colombiana_de_Desarrollo_Bajo_en_Carbono/FOLLETO_DE_PRESENTACION_ECDBC.pdf)
- Ministerio de minas y energía. (2001). *Ley 697 del 2001*. Bogotá: Registro Distrital 44573 del 5 de octubre de 2001.
- Ministerio de minas y energía. (2003). *Decreto 3683 de 2003*. Bogotá: Diario Oficial 45409 de diciembre 22 de 2003.
- Ministerio de minas y energía. (2010). *Resolución 180919 de 2010*. Bogotá: Diario Oficial 47.728 de junio 2 de 2010.
- Ministerio de minas y energía. (2013). *Resolución 90708. Por la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE*. Bogotá, D.C.
- Ministerio de Minas y Energía. (2016). *Resolución 40122. Por la cual se adiciona y modifica el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público - RETILAP*. Bogotá, D.C.
- Ministerio de Minas y Energía. (2016). *Resolución 41012 - Reglamento Técnico de Etiquetado - RETIQ*. Bogotá, D.C. Recuperado el 4 de Junio de 2018, de <https://www.minminas.gov.co/retiq>
- Ministerio de Minas y Energía. (2017). *Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022*. Bogotá.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y territorio. (2015). *Resolución 549*. Bogotá.
- Mitsubishi Electric. (2018a). *Cotización Chiller condensado por aire y agua 25 Ton*. Medellín.
- Mitsubishi Electric. (2018b). *Cotización Rack de media y Rack de media con tecnología VRF*. Medellín.
- Müller, B., Gardumi, F., & Hülk, L. (2018). Comprehensive representation of models for energy system analyses: Insights from the Energy Modelling Platform for Europe (EMP-E) 2017. *Energy Strategy Reviews*, 82-87.
- Mundo HVACR. (2011). *Racks: Sistemas de refrigeración ideales en autoservicios*. Obtenido de <https://www.mundohvacr.com.mx/2010/11/racks-sistemas-de-refrigeracion-ideales-en-autoservicios/>
- Murakami, T. (2014). Agent-based simulations of the influence of social policy and neighboring communication on the adoption of grid-connected photovoltaics. *Energy Conversion and Management*, 158-164.
- Mylona, Z., Kolokotroni, M., & Tassou, S. A. (2017). Frozen food retail: Measuring and modelling energy use and space environmental systems in an operational supermarket. *Energy and Buildings*, 129-143.
- Nakata, T., Silva, D., & Rodionov, M. (2011). Application of energy system models for designing a low-carbon society. *Progress in Energy and Combustion Science*, 462-502.
- Nguyen, T. A., & Aiello, M. (2013). Energy intelligent buildings based on user activity: a survey. *Energy and Buildings*, 244-257.
- OECD/IEA. (2006). *Policies for Energy-efficient Lighting*. Paris: Head of Publications Service.
- Office of Energy Efficiency. (2008). *Energy Efficiency Trends in Canada 1990-2005*. Ottawa: 580 Booth Street, 18th Floor.
- Ohunakin, O., Adaramola, M., Oyewola, O., & Fagbenle, R. (2014). Solar energy applications and development in Nigeria: Drivers and barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 294-301.
- Oikonomou, V., Becchis, F., Steg, L., & Russolillo, D. (2009). Energy saving and energy efficiency concepts for policy making. *Energy Policy*, 4787-4796.
- Olsthoorn, M., Schleich, J., & Hirzel, S. (2017). Adoption of Energy Efficiency Measures for Non-residential Buildings: Technological and Organizational Heterogeneity in the Trade, Commerce and Services Sector. *Ecological Economics*, 240-254.
- Orioli, A., & Di Gangi, A. (2017). Six-years-long effects of the Italian policies for photovoltaics on the grid parity of grid-connected photovoltaic systems installed in urban contexts. *Energy*, 55-75.
- Palmer, A., Montano, J., & Sese, J. A. (2006). Designing an artificial neural network for forecasting tourism time series. *Tourism Management*, 781-790.
- Papatheodorou, A., & Song, H. (2005). International tourism forecasts: Time-series analysis of world regional data. *Tourism Economics*, 11-23.
- Pattison, P. M., Hansen, M., & Y.Tsao, J. (2018). LED lighting efficacy: Status and directions. *Comptes Rendus Physique*, 134-145.
- Payán, C. Á. (2001). Costo Aaual Equivalente. En C. Á. Payán, *Evaluación económica de alternativas de inversión, con aplicación en el sector agropecuario* (pág. 67). Palmira: Universidad Nacional de Colombia.
- Pearce, J. M. (2011). A Review of Solar Photovoltaic Levelized Cost of Electricity. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 4470-4482.
- Pires, J. C. (2017). COP21: The algae opportunity? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 867-877.
- Praetorius, B., Martiskainen, M., Sauter, R., & Watson, J. (2011). Microgeneration in the UK and Germany from a Technological Innovation Systems Perspective. *Sustainability Innovations in the Electricity Sector*, 117-140.
- Prias, O. F. (2010). *Plan de acción PROURE 2010-2015*. Bogotá.
- Radomes Jr., A., & Arango, S. (2016). Renewable energy technology diffusion: an analysis of photovoltaic-system support schemes in Medellín, Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 152-161.
- Rai, V., Reeves, D. C., & Margolis, R. (2016). Overcoming barriers and uncertainties in the adoption of residential solar PV. *Renewable Energy*, 498-505.
- Ramírez, F., Honrubia-Escribano, A., Gómez-Lázaro, E., & Pham, D. (2017). Combining feed-in tariffs and net-metering schemes to balance development in adoption of photovoltaic energy: Comparative economic assessment and policy implications for European countries. *Energy Policy*, 440-452.
- Räsänen, T., Varis, O., Scherer, L., & Kumm, M. (2018). Greenhouse gas emissions of hydropower in the Mekong River Basin. *Environmental Research Letters*, 1-11.
- Rathore, P., Rathore, S., Pratap Singh, R., & Agnihotri, S. (2017). Solar power utility sector in india: Challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- REN21. (2016). *renewables 2016 global status report*. Paris.

- REN21. (2018). *renewables 2018 global status report*.
- República de Colombia. (1989). *Decreto 624*. Bogotá.
- Rincón Moreno, H. M., Niño, F. L., & Gómez Rodríguez, D. T. (2017). Retail en Colombia 2010 - 2015: Un estudio a partir del análisis financiero integral como elemento de soporte para la toma de decisiones. *Espacios*, 38(42), 20. Obtenido de <http://www.revistaespacios.com/a17v38n42/a17v38n42p20.pdf>
- Ringler, P., Keles, D., & Fichtner, W. (2016). Agent-based modelling and simulation of smart electricity grids and markets – A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 205-215.
- RISE. (2017). *Regulatory Indicators for Sustainable Energy*. Recuperado el 4 de Junio de 2018, de <http://rise.worldbank.org/indicators#pillar-energy-efficiency>
- Robertson, A., Soopramanien, D., & Fildes, R. (2007). Segmental new-product diffusion of residential broadband services. *Telecommunications Policy*, 265-275.
- Rogers, E. (1995). *Diffusion of innovations*. New York: Fourth edition.
- Saab, R., Quabeh, H. A., & Ali, M. I. (2018). Variable refrigerant flow cooling assessment in humid environment using different refrigerants. *Journal of Environmental Management*, 243-251.
- Safarzynska, K., & Van den Bergh, J. C. (2011). Industry evolution, rational agents and the transition to sustainable electricity production. *Energy Policy*, 6440-6452.
- Schlomann, B., & Schleich, J. (2015). Adoption of low-cost energy efficiency measures in the tertiary sector—An empirical analysis based on energy survey data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1127-1133.
- Shen, L., He, B., Jiao, L., Song, X., & Zhang, X. (2016). Research on the development of main policy instruments for improving building energy-efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 1789-1803.
- Simon, H. (1999). Bounded rationality in social science: Today and tomorrow. *Mind & Society*, 25-39.
- Simon, H. (2007). A Behavioral Model of Rational Choice. *The Quarterly Journal of Economics*, 99-118.
- 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*, 141–151.
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. United States: McGraw-Hill Higher Education.
- Stucki, T., & Woerter, M. (2016). Intra-firm diffusion of green energy technologies and the choice of policy instruments. *Journal of Cleaner Production*, 545-560.
- Subgerencia Cultural del Banco de la República. (2015). *Banco de la República*. Obtenido de [http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/economia/sectores\\_economicos](http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/economia/sectores_economicos)
- Subramanyam, V., Ahiduzzaman, M., & Kumar, A. (2017). Greenhouse gas emissions mitigation potential in the commercial and institutional sector. *Energy and Buildings*, 295–304.
- Sun, P., & Nie, P.-y. (2015). A comparative study of feed-in tariff and renewable portfolio standard policy in renewable energy industry. *Renewable Energy*, 255-262.
- Supasa, T., Hsiau, S.-S., Lin, S.-M., Wongsapai, W., & Wu, J.-C. (2016). Has energy conservation been an effective policy for Thailand? An input–output structural decomposition analysis from 1995 to 2010. *Energy Policy*, 210-220.
- Sylvania. (2018). *Lista de precios LED*.
- Timma, L., Skudritis, R., & Blumberga, D. (2016). Benchmarking Analysis of Energy Consumption in Supermarkets. *Energy Procedia*, 435-438.
- Trappey, A., Trappey, C., Tan, H., Liu, P., Li, S.-J., & Lin, L.-C. (2016). The determinants of photovoltaic system costs: an evaluation using a hierarchical learning curve model. *Journal of Cleaner Production*, 1709-1716.
- Tsai, J.-M., & Hung, S.-W. (2014). A novel model of technology diffusion: System dynamics perspective for cloud computing. *Journal of Engineering and Technology Management*, 47-62.
- Tyagi, V. V., Rahim, N. A., Rahim, N. A., & Selvaraj, A. J. (2013). Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 443-461.
- Tyagi, V., Rahim, N., Rahim, N., & Selvaraj, J. (2013). Progress in solar PV technology: research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 443-461.
- U.S Department of Energy. (2017). *Building Energy Data Book*.
- United Nations Environment Programme. (2009). *Buildings and Climate Change. Summary for Decision-Makers. Sustainable Buildings & Climate Initiative*. Francia: UNEP.
- UPME. (2007). *Caracterización energética de los sectores residencial, comercial y terciario*. Bogotá.
- UPME. (2015a). *PLAN ENERGETICO NACIONAL COLOMBIA: IDEARIO ENERGETICO 2050*. Bogotá.
- UPME. (2015b). *Proyección de Demanda de Energía Eléctrica y Potencia Máxima en Colombia*. Bogotá.
- UPME. (2016). *Calculadora FECOC*. Obtenido de [http://www.upme.gov.co/calculadora\\_emisiones/aplicacion/calculadora.html](http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html)
- UPME. (2016). *Plan de expansión de referencia generación y transmisión 2016-2030*. Bogotá.
- UPME. (2016). *Proyección regional de demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia*. Obtenido de [http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/UPME\\_Proyeccion\\_demanda\\_regional\\_energia\\_electrica\\_Julio\\_2016.pdf](http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/UPME_Proyeccion_demanda_regional_energia_electrica_Julio_2016.pdf)
- UPME. (2018). *Premio a la Eficiencia Energética*. Obtenido de <http://www1.upme.gov.co/Paginas/Premio-a-la-Eficiencia-Energetica.aspx>
- UPME. (2018a). *INFORME MENSUAL - SOLICITUD DE CERTIFICACIÓN DE PROYECTOS DE FNCER - INCENTIVOS LEY 1715 DE 2014*. Bogotá.
- UPME. (2018b). *Informe de evaluación de proyectos de eficiencia energética y gestión eficiente de la energía*. Bogotá.
- UPMEc. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. Bogotá.
- Van der Zwaan, B., & Rabl, A. (2004). The learning potential of photovoltaics: Implications for energy policy. *Energy Policy*, 1545–1554.
- Vargas Nieto, M. D. (12 de Diciembre de 2018). *Pontificia Universidad Javeriana*. Obtenido de <https://www.javeriana.edu.co/pesquisa/hidroelectricas-energia-amigable-con-el-medio-ambiente/>

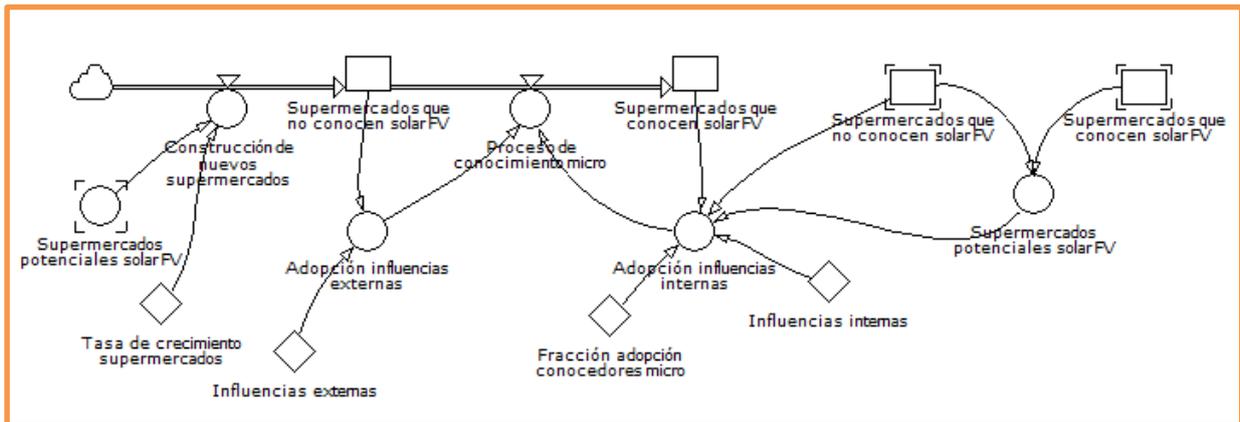
- Vedung, E. (1995). *Informativa styrmedel*. Uppsala universitet, statsvetenskapliga institutionen.
- Victor, D., & Zhou, D. (2013). *Climate change 2014: mitigation of climate change Intergovernmental panel on climate change 5th assessment report*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Waechter, S., Sütterlin, B., & Siegrist, M. (2015). The misleading effect of energy efficiency information on perceived energy friendliness of electric goods. *Journal of Cleaner Production*, 193-202.
- Wang, T., Li, X., Liao, P.-C., & Fang, D. (2016). Building energy efficiency for public hospitals and healthcare facilities in China: Barriers and drivers. *Energy*, 588-597.
- Wang, Y., Jin, X., & Zhu, Z. D. (2018). Evaluation of operation performance of a multi-chiller system using a data-based chiller model. *Energy and Buildings*, 1-9.
- White, R., Engelen, G., & Uljee, I. (1997). "The use of constrained cellular automata for high resolution modelling of urban land use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 323-343.
- Wolfram, S. (1984). Cellular automata as model of complexity. *Nature*, 419-424.
- Wood, G., & Newborough, M. (2003). Dynamic energy-consumption indicators for domestic appliances: environment, behaviour and design. *Energy and Buildings*, 35(8), 821-841.
- World Commission On Dams. (2000). *Dams and development: A new framework for decision-making*. London and Sterling: Earthscan Publications Ltd.
- Wu, C., Xingxi, Z., & Shiming, D. (2005). Development of control method and dynamic model for multi-evaporator air conditioners (MEAC). *Energy Convers. Manag.*, 451-465.
- XM. (2016a). *Demanda energía eléctrica por código CIU*. Medellín.
- XM. (2016b). *Informe anual*. Medellín.
- XM. (2018). *Integración de las Fuentes de Energía Renovable No Convencional en la matriz energética colombiana y avances técnicos en torno a estas*.
- XM. (26 de Febrero de 2019). XM. Obtenido de <http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>
- Yang, J., Chan, K., Wu, X., Yu, F., & Yang, X. (2012). An analysis on the energy efficiency of air-cooled chillers with water mist system. *Energy and Buildings*, 273-284.
- Yang, L., Lu, F., Zhou, X., Wang, X., Duan, X., & Sun, B. (2014). Progress in the studies on the greenhouse gas emissions from reservoirs. *Acta Ecologica Sinica*, 204-212.
- Ye, L.-C., Rodrigues, J., & Lin, H. (2017). Analysis of feed-in tariff policies for solar photovoltaic in China 2011–2016. *Applied Energy*, 496-505.
- Zapata, M., Franco, C., & Dyner, I. (2014). *Políticas para la autogestión de electricidad en el sector residencial urbano de Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Zeppini, P. (2015). A discrete choice model of transitions to sustainable technologies. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 187-203.
- Zeppini, P., Frenken, K., & Kupers, R. (2014). Thresholds models of technological transitions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 54-70.
- Zhang, M., Zhou, D., Zhou, P., & Chen, H. (2017). Optimal design of subsidy to stimulate renewable energy investments: The case of China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 873-883.
- Zhang, M., Zhou, P., & Zhou, D. (2016). A real options model for renewable energy investment with application to solar photovoltaic power generation in China. *Energy Economics*, 213-226.
- Zhang, X., Shen, L., & Chan, S. Y. (2012). The diffusion of solar energy use in HK: What are the barriers? *Energy Policy*, 241–249.
- Zhang, Y., Bai, X., P.Mills, F., & Pezzey, J. C. (2018). Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: A review. *Energy and Buildings*, 279-294.
- Zhao, J., Mazhari, E., Celik, N., & Son, Y.-J. (2011). Hybrid agent-based simulation for policy evaluation of solar power generation systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2189-2205.



### Modelo de bass de microgeneración

El Gráfico 81, presenta el diagrama de flujos y niveles para el modelo de difusión de Bass para microgeneración.

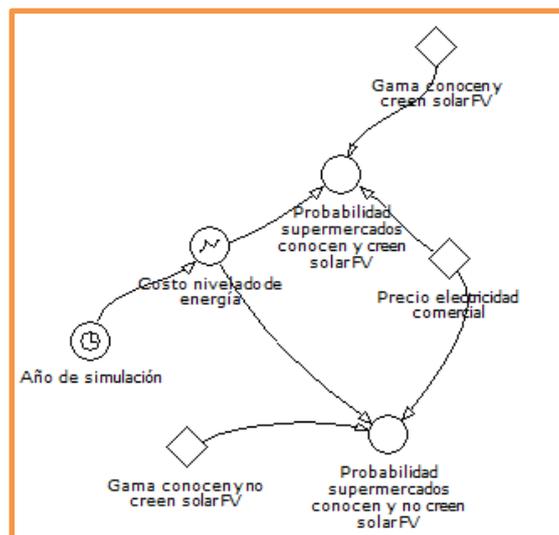
Gráfico 81 Diagrama de flujos y niveles. Sección de modelo de difusión Bass microgeneración. Elaboración propia



### Modelo de selección de microgeneración

El Gráfico 82, presenta el diagrama de flujos y niveles donde se da el proceso de evaluar a través de la función logit el costo de la energía de la red versus el costo de la energía del arreglo solar.

Gráfico 82 Diagrama de flujos y niveles. Sección de función logit microgeneración. Elaboración propia

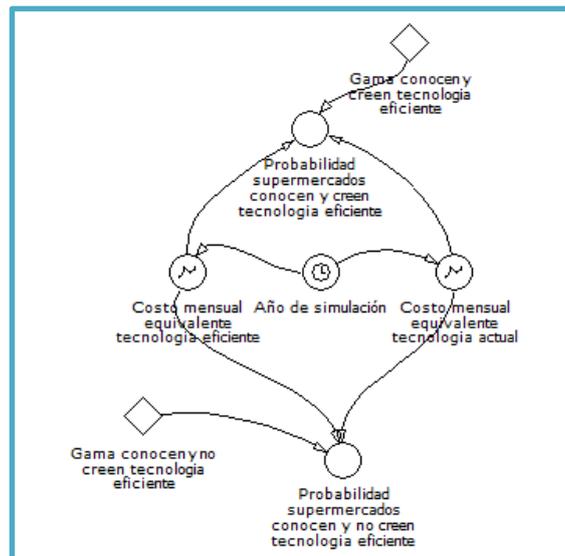




### Modelo de selección de eficiencia energética

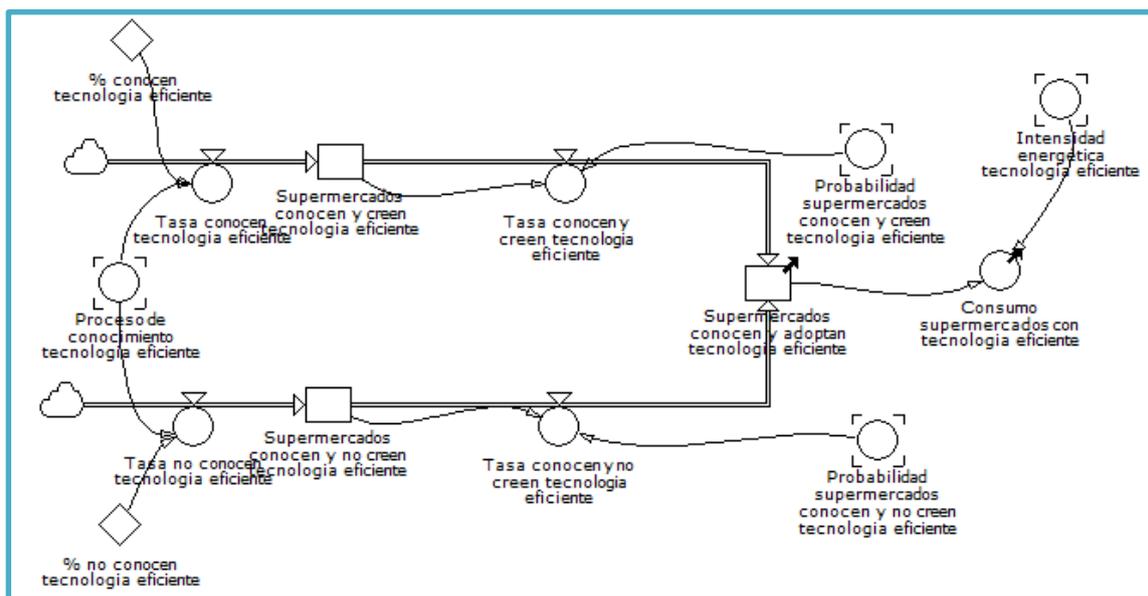
El Gráfico 85, presenta el diagrama de flujos y niveles donde se da el proceso de evaluar a través de la función logit el costo mensual equivalente de la tecnología actual versus el costo mensual equivalente de la tecnología eficiente. El costo mensual equivalente es calculado con el costo de inversión y operación (consumo de energía) de la tecnología.

Gráfico 85 Diagrama de flujos y niveles. Sección de función logit EE. Elaboración propia



El Gráfico 86, presenta el diagrama de flujos y niveles para el modelo Customer Choice de selección de tecnología eficiente.

Gráfico 86 Diagrama de flujos y niveles. Sección de Customer Choice EE. Elaboración propia

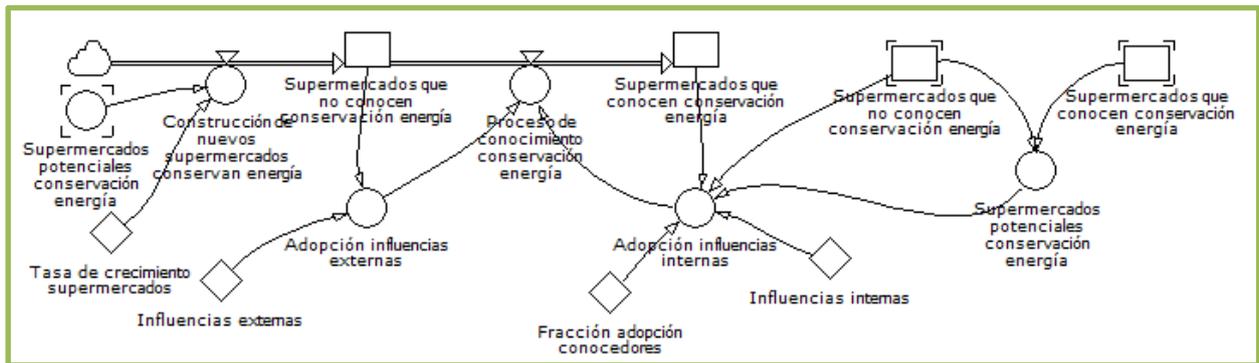


- **Conservación de la energía**

**Modelo de bass de conservación de la energía**

El Gráfico 87, presenta el diagrama de flujos y niveles para el modelo de difusión de Bass para la aplicación de prácticas de conservación de la energía.

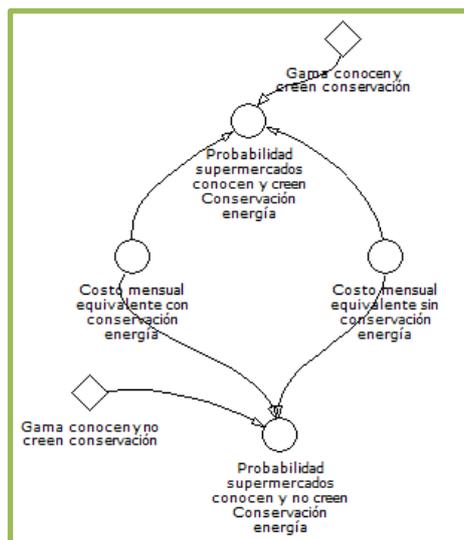
Gráfico 87 Diagrama de flujos y niveles. Sección de modelo de difusión Bass conservación de la energía. Elaboración propia



**Modelo de selección de conservación de la energía**

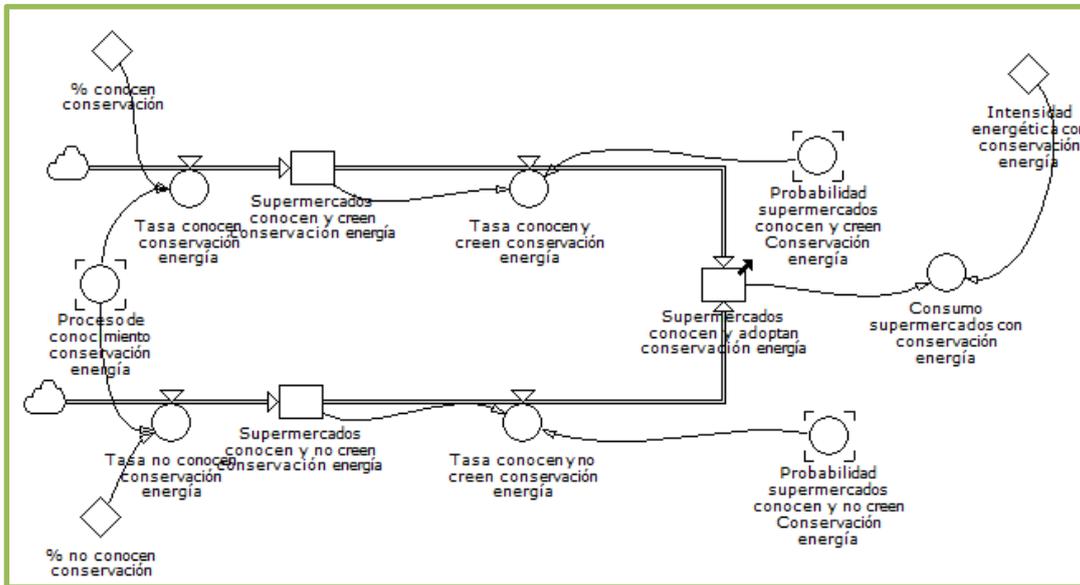
El Gráfico 88, presenta el diagrama de flujos y niveles donde se da el proceso de evaluar a través de la función logit el costo mensual equivalente de la prácticas de conservación de la energía actual versus el costo mensual equivalente de la prácticas de conservación de la energía eficiente. El costo mensual equivalente es calculado con el costo de inversión y operación (consumo de energía) de la práctica.

Gráfico 88 Diagrama de flujos y niveles. Sección de función logit conservación de la energía. Elaboración propia



El Gráfico 89, presenta el diagrama de flujos y niveles para el modelo Customer Choice de selección de prácticas de conservación de la energía.

Gráfico 89 Diagrama de flujos y niveles. Sección de Customer Choice conservación de la energía. Elaboración propia



## B. Anexo: Ecuaciones del modelo de simulación

Se muestran las ecuaciones utilizadas en el modelo de simulación descritas en el Capítulo 4, dando sustento a la consistencia dimensional (literal a numeral 4.13.1).

Variable	Ecuación	Unidad
Tasa de crecimiento supermercados	PIB	1/mo
Supermercados que no conocen la tecnología	461	supermercado
Supermercados que conocen la tecnología	0	supermercado
Supermercados potenciales	Supermercados que no conocen la tecnología + Supermercados que conocen la tecnología	supermercado
Construcción nuevos supermercados	Tasa de crecimiento supermercados*Supermercados potenciales	supermercado/mo
Adopción influencias externas	Supermercados que no conocen la tecnología*Influencias externas	supermercado
Adopción influencias internas	Influencias internas*Fracción adopción conocedores*Supermercados que no conocen la tecnología*(Supermercados que conocen la tecnología/Supermercados potenciales micro)	supermercado
Supermercados que conocen y no creen en la tecnología	0	supermercado
Supermercados que conocen y creen en la tecnología	0	supermercado
Supermercados que conocen y adoptan tecnología	0	supermercado
Tasa conocen y creen en tecnología	('Supermercados conocen y no creen en la tecnología'*Probabilidad supermercados conocen y no creen en la tecnología')*1<<1/mo>>	supermercado/mo
Tasa conocen y no creen en tecnología	('Supermercados conocen y no creen micro'*Probabilidad supermercados conocen y no creen micro')*1<<1/mo>>	supermercado/mo

Variable	Ecuación	Unidad
Gama conocen y no creen en la tecnología	-0,5	-
Gama conocen y creen en la tecnología	-3	-
Costo nivelado de energía	GRAPH('Año de simulación',2018,5,{123.93,104.87,85.8,66.73//Min:-1;Max:11//})	\$/kWh
Precio electricidad comercial	395	\$/kWh
Probabilidad supermercados conocen y no creen en la tecnología	((('Costo nivelado de energía '^Gama conocen y no creen en la tecnología')/((('Precio electricidad comercial '^Gama conocen y no creen en la tecnología')+(('Costo nivelado de energía '^Gama conocen y no creen en la tecnología'))))	-
Probabilidad supermercados conocen y creen en la tecnología	((('Costo nivelado de energía '^Gama conocen y creen en la tecnología')/((('Precio electricidad comercial '^Gama conocen y creen en la tecnología')+(('Costo nivelado de energía '^Gama conocen y creen en la tecnología'))))	-
Supermercados que adoptan la tecnología	0	supermercado
Supermercados que no adoptan la tecnología	Supermercados potenciales'-Supermercados conocen y adoptan tecnología'	-
Intensidad energética red	137,08	MWh/supermercado
Intensidad energética tecnología	Va a depender del uso de la energía ir al capítulo 4	MWh/supermercado
Consumo supermercados red	Supermercados que no adoptan la tecnología'*Intensidad energética red'	MWh
Consumo supermercados con tecnología	Supermercados conocen y adoptan la tecnología'*Intensidad energética tecnología'	MWh
Demanda supermercados base	Consumo supermercados red '+Consumo supermercados con tecnología'	MWh
Factor de emisión SIN	0,1913	TonCO2e/MWh
Emisiones base	Demanda supermercados base'*Factor de emisión SIN'	TonCO2e