



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia**

**Jenny Rocío Ríos Martínez**

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

2013



# **Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia**

**Jenny Rocío Ríos Martínez**

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

Director (a):  
Ph.D., Yris Olaya Morales

Línea de Investigación:  
Investigación de Operaciones  
Grupo de Investigación:  
Sistemas e Informática

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión  
Medellín, Colombia  
2013



## **Agradecimientos**

A Dios, porque siempre estuvo a mi lado y me dio la fortaleza para iniciar esta nueva etapa de mi vida. A mi familia, por su paciencia y comprensión durante la realización de este proyecto.

A la profesora Yris Olaya por su orientación, conocimientos y aportes que permitieron la culminación de esta investigación.

A la Universidad Nacional de Colombia y su programa “Beca estudiante sobresaliente de posgrado”, por su apoyo económico durante mis estudios.

A todos aquellos que de una u otra manera aportaron en el desarrollo de esta investigación.

## **Resumen**

Los programas de eficiencia energética permiten la reducción en el consumo de energía y las emisiones de carbono. Por lo tanto, ellos se consideran piezas claves en las políticas energéticas de diversas naciones del mundo. Colombia, ha establecido programas de eficiencia energética para los diferentes sectores de la economía, donde el sector residencial se destaca por ocupar la tercera posición en el consumo de energía. El energético más consumido en los hogares colombianos es la electricidad, por esta razón resulta de gran importancia conocer el impacto que tendrá la sustitución de refrigeradores domésticos en la reducción del consumo de energía eléctrica y por ende en las emisiones de carbono. La presente investigación desarrolla un modelo de simulación basado en la metodología de dinámica de sistemas con el fin de analizar y comparar el comportamiento del consumo residencial de energía y emisiones de carbono bajo distintas políticas de eficiencia energética. Los resultados indican que las políticas planteadas para la sustitución de refrigeradores domésticos ayudan a reducir el consumo de electricidad y las emisiones de carbono, y que la implementación conjunta de dichas políticas permite mayores reducciones que la aplicación individual de ellas.

**Palabras clave:** Eficiencia energética, sustitución electrodomésticos, sector residencial, simulación, dinámica de sistemas.

## **Abstract**

Energy efficiency programs allow to reduce energy consumption and carbon emissions. Therefore, they are considered as key players in energy policies from different countries around the world. Colombia has established energy efficiency programs for different sector of the economy, where the residential sector stands out to occupy the third position in energy consumption. The type of energy most consumed in Colombian households is electricity, for that reason is very important to know the impact of domestic refrigerators substitution in reducing electricity consumption and carbon emissions. This research develops a simulation model based on Systems Dynamic methodology in order to analyze and compare the behavior of residential energy consumption and carbon emission under various energy efficiency policies. The results indicate that the policies proposed to replace domestic refrigerators help reduce power consumption and carbon emissions, and the joint implementation of these policies allows greater reductions than their individual application.

**Keywords:** Energy efficiency, appliances replacement, residential sector, simulation, dynamic systems.

## Contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>6</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>11</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>13</b>
<b>Lista de abreviaturas .....</b>	<b>16</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>17</b>
1.1. Problema de investigación.....	19
1.2. Objetivos .....	19
1.2.1. Objetivo general.....	19
1.2.2. Objetivos específicos .....	19
1.3. Alcance de la investigación.....	20
1.4. Organización del documento .....	21
<b>2. Revisión de políticas de eficiencia energética en el sector residencial y su implementación en Colombia .....</b>	<b>22</b>
2.1. ¿Qué políticas de eficiencia energética se han implementado en sector residencial para reducir el consumo de energía? .....	22
2.2. ¿Cuáles son las barreras que impiden la aceptación e implementación de las políticas de eficiencia energética? .....	25
2.3. ¿Cuál es la situación actual del consumo de energía en el sector residencial en Colombia? .....	27
2.4. ¿Qué programa(s) se han implementado en Colombia dirigidos hacia la eficiencia energética residencial? .....	30

2.5.	¿En qué consiste la política de sustitución de refrigeradores domésticos? .....	32
2.5.1.	¿Cómo ha sido la experiencia de sustitución de neveras en Colombia? .....	34
2.6.	¿Cuáles son las características de los electrodomésticos que se tienen en cuenta a la hora de la sustitución por uno nuevo? .....	35
2.7.	¿En qué consiste y cómo se ha implementado la política de etiquetado de eficiencia energética en el mundo y en Colombia? .....	37
2.7.1.	Tipos de etiquetas eficientes .....	38
	Etiqueta de aprobación .....	38
	Etiquetas de comparación .....	38
	Etiqueta de información .....	38
2.7.2.	Etiquetado eficiente a nivel mundial.....	38
2.7.3.	Etiquetado eficiente en Colombia .....	40
2.7.4.	Etiquetado eficiente en refrigeradores domésticos en Colombia.....	41
<b>3.</b>	<b>Modelado de políticas de eficiencia energética en el sector residencial.....</b>	<b>46</b>
3.1.	Modelado de sistemas energéticos.....	46
3.1.1.	Revisión de modelos de políticas de eficiencia energética en el sector residencial .....	50
3.2.	Modelos de simulación de sistemas energéticos .....	53
3.2.1.	Revisión de estudios que aplican la metodología de simulación en el sector residencial .....	55
3.3.	Modelos de elección discreta.....	57
3.3.1.	Revisión de estudios aplicados a la elección de electrodomésticos con eficiencia energética .....	59
<b>4.</b>	<b>Modelado de la sustitución de electrodomésticos en los hogares colombianos. Caso de aplicación: refrigeradores .....</b>	<b>62</b>
4.1.	Estructura general del modelo de simulación.....	62
4.2.	Hipótesis Dinámica .....	63
4.3.	Formulación del modelo.....	68

4.4.	Validación del modelo de simulación .....	73
4.4.1.	Pruebas directas a la estructura .....	73
4.4.2.	Pruebas de la estructura orientadas al comportamiento .....	78
4.4.3.	Pruebas de validación del comportamiento .....	87
<b>5.</b>	<b>Análisis de políticas y resultados.....</b>	<b>89</b>
5.1.	Análisis del caso base .....	89
5.2.	Análisis de políticas .....	95
<b>6.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>111</b>
<b>7.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>116</b>
<b>A.</b>	<b>Anexo: Resultados del estudio de campo de neveras domésticos. ....</b>	<b>129</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo: Módulos del modelo de simulación en PowerSim Studio 8.....</b>	<b>133</b>
<b>C.</b>	<b>Anexo: Formulación del modelo de simulación en PowerSim Studio 8.....</b>	<b>137</b>
<b>D.</b>	<b>Anexo: Resultados del estudio de campo de neveras domésticos. ....</b>	<b>141</b>

## Lista de tablas

Tabla 1. Resumen de políticas de eficiencia energética del sector residencial a nivel mundial.....	23
Tabla 2. Barreras hacia la eficiencia energética.....	26
Tabla 3. Porcentaje de hogares por bienes que posee según Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV) en Colombia para los años 2003, 2008, 2010, 2011 y 2012. ....	30
Tabla 4. Subprogramas sectoriales de eficiencia energética en Colombia.....	31
Tabla 5. Clasificación de modelos energéticos .....	47
Tabla 6. Revisión de acuerdo con la metodología de modelos de políticas de eficiencia energética residencial.....	50
Tabla 7. Modelos de eficiencia energética residencial utilizando simulación.....	55
Tabla 8. Supuestos del nivel Neveras en uso ( <i>Nuso</i> ).....	70
Tabla 9. Ecuaciones que definen los niveles en el módulo sustitución del electrodoméstico .....	71
Tabla 10. Ecuaciones que definen los niveles en el módulo población y hogares.....	72
Tabla 11. Descripción de los parámetros del modelo.....	74
Tabla 12. Comparativo de la cantidad de neveras en uso durante el periodo de simulación. ....	91
Tabla 13. Comparativo de la cantidad de neveras sustituidas voluntariamente durante el periodo de simulación.....	93
Tabla 14. Comparativo de la consumo total de electricidad durante el periodo de simulación.....	94
Tabla 15. Comparativo de las neveras sustituidas entre el caso base y la política de exención de impuestos. ....	97

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

---

Tabla 16. Comparativo de las neveras sustituidas entre el caso base y la política de subsidio económico. ....	99
Tabla 17. Comparativo de las neveras sustituidas entre el caso base y la política de reducción de tasa de interés anual. ....	101
Tabla 18. Comparativo de las neveras sustituidas entre el caso base y la política de eliminación de tasa de interés anual. ....	103
Tabla 19. Comparativo de las neveras sustituidas entre el caso base y la política de programa de divulgación del programa de eficiencia energética. ....	105
Tabla 20. Comparativo de las neveras sustituidas entre el caso base y la política combinada de eliminación de tasa de interés anual y divulgación del programa de eficiencia energética. ....	107
Tabla 21. Comparativo de las neveras sustituidas entre el caso base y la política combinada de eliminación de tasa de interés anual, divulgación del programa de eficiencia energética y eliminación del IVA. ....	109
Tabla 22. Comparación del caso base con las políticas planteadas con respecto al ahorro en electricidad y emisiones de carbono. ....	110
Tabla 23. Modelos y características de refrigeradores analizados en la investigación. ..	129
Tabla 24. Notación de la Tabla 21. ....	131
Tabla 25. Formulación del modelo en PowerSim Studio 8. ....	137
Tabla 26. Promedio de consumo de energía (KWh/año) y del precio de venta (COP) para los tipos de neveras domésticas. ....	142

## Lista de figuras

Figura 1. Consumo final de energía por sectores de la economía Colombiana (2008)....	28
Figura 2. Participación por energético en el sector residencial Colombiano para el año 2008. ....	29
Figura 3. Publicidad de la campaña de sustitución de equipos de refrigeración doméstica en Bogotá .....	35
Figura 4. Etiqueta de eficiencia energética para refrigeradores domésticos en Colombia según la NTC 5020.....	42
Figura 5. Resultados de la observación de la presencia de etiqueta eficiente en refrigeradores domésticos en Colombia.....	43
Figura 6. Resultados de la observación de la ubicación de la etiqueta eficiente en refrigeradores domésticos en Colombia.....	44
Figura 7. Dimensiones de la aceptación pública del programa de etiquetado eficiente ...	45
Figura 8. Diagrama de la estructura del modelo.....	63
Figura 9. Hipótesis dinámica de la sustitución de electrodomésticos residenciales.....	64
Figura 10. Dinámica de la sustitución de electrodomésticos por obsolescencia.....	65
Figura 11. Dinámica de la sustitución voluntaria de electrodomésticos .....	66
Figura 12. Efecto de los electrodomésticos nuevos comprados.....	67
Figura 13. Efecto de la probabilidad de sustitución .....	68
Figura 14. Módulos representativos del modelo de simulación .....	69
Figura 15. Distribución porcentual de hogares por SMMLV de ingreso monetario disponible en Colombia. ENIG 2006-2007 .....	77
Figura 16. Variables exógenas y endógenas .....	79

Figura 17. Ingresos al nivel de neveras en uso cuando no hay compra de neveras por nueva demanda.....	80
Figura 18. Ingresos y egresos por sustitución voluntaria, y neveras sustituidas voluntariamente cuando la tasa de sustitución voluntaria por ingreso monetario es cero.	80
Figura 19. Ingresos y egresos por sustitución voluntaria, y neveras sustituidas voluntariamente cuando no hay neveras a sustituir. ....	81
Figura 20. Neveras en uso de eficiencia alta, media y baja realizando la simulación con cuatro métodos de integración diferentes. ....	82
Figura 21. Análisis de sensibilidad ante variaciones de <i>beta_precio</i> .....	83
Figura 22. Análisis de sensibilidad ante variaciones de <i>beta_volumen</i> .....	84
Figura 23. Análisis de sensibilidad ante variaciones en el <i>costo de inversión</i> .....	85
Figura 24. Análisis de sensibilidad ante variaciones en el parámetro <i>q</i> .....	86
Figura 25. Análisis de sensibilidad ante variaciones del parámetro <i>p</i> .....	86
Figura 26. Análisis de sensibilidad ante variaciones en el tiempo de vida útil de la nevera.....	87
Figura 27. Comportamiento en forma de S de las Neveras sustituidas voluntariamente.	88
Figura 28. (a) Neveras en uso con eficiencia alta, media y baja. (b) Ingresos por nuevos hogares.....	90
Figura 29. (a) Egresos por sustitución obligatoria (b) Egresos por sustitución voluntaria	91
Figura 30. (a) Ingresos por sustitución voluntaria (b) Ingresos por sustitución obligatoria	92
Figura 31. Neveras acumuladas sustituidas voluntariamente.....	93
Figura 32. Consumo de electricidad y emisiones de carbono de la totalidad de las neveras.....	94
Figura 33. Impactos en el modelo al aplicar la política de exención del IVA.....	96
Figura 34. Impactos en el modelo al aplicar la política de subsidio monetario.....	98
Figura 35. Impactos en el modelo al aplicar la política de reducción de tasa de interés	100
Figura 36. Impactos en el modelo al aplicar la política de eliminación de tasa de interés. ....	102
Figura 37. Impactos en el modelo al aplicar la política de divulgación de las neveras de eficiencia energética.....	104
Figura 38. Impactos en el modelo al aplicar de forma simultánea las políticas de eliminación de la tasa de interés y la divulgación de las neveras de eficiencia energética.....	106

Figura 39. Impactos en el modelo al aplicar de forma simultánea las políticas de exención de impuestos, eliminación de la tasa de interés y la divulgación de las neveras de eficiencia energética .....	108
Figura 40. Módulo de sustitución del electrodoméstico (nevera).....	133
Figura 41. Módulo de Consumo de electricidad de neveras en uso .....	134
Figura 42. Módulo de Costo Anual Equivalente de neveras con eficiencia alta .....	134
Figura 43. Módulo de Elección de nevera eficiencia alta vs. Nevera eficiencia baja y Módulo de Elección de nevera eficiencia alta vs. Nevera eficiencia media .....	135
Figura 44. Módulo de Población y hogares totales en Colombia.....	135
Figura 45. Módulo de Compras por nueva demanda .....	136
Figura 46. Módulo de Ingreso del hogar para la sustitución voluntaria .....	136
Figura 47. Participación del mercado de los diferentes tipos de neveras domésticas. ..	141
Figura 48. Participación del mercado neveras Top-Mount según su volumen.....	142

## Lista de abreviaturas

### Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
<i>ANDI</i>	Asociación Nacional de Empresarios de Colombia
<i>CONOCE</i>	Colombiano de Normalización, Acreditación, Certificación y Etiquetado de Equipos
<i>GLP</i>	Gas Licuado del Petróleo
<i>ICONTEC</i>	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
<i>IEA</i>	International Energy Agency
<i>NTC</i>	Norma Técnica Colombiana
<i>PNUD</i>	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
<i>PROURE</i>	Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía
<i>PSEE</i>	Programa de Sustitución de equipos Electrodomésticos
<i>SAO</i>	Sustancias Agotadoras de la capa de Ozono
<i>SIEL</i>	Sistema de Información Eléctrico Colombiano
<i>UPME</i>	Unidad de planeación Minero Energética
<i>UTO</i>	Unidad Técnica de Ozono

## 1.Introducción

Existe un creciente interés en la reducción del consumo de energía y en las emisiones de carbono en cada uno de los sectores de la economía. El sector residencial es un consumidor sustancial de energía en cada país del mundo, y por tanto un foco importante en esfuerzos para la reducción del uso de energía (Swan & Ugursal, 2009). Se estima que a nivel global este sector consume alrededor de 35% de la energía total (Daioglou, van Ruijven, & van Vuuren, 2012) y es responsable del 84% de las emisiones de dióxido de carbono (Galarraga, Heres, & Gonzalez-Eguino, 2011). Como consecuencia, el sector residencial juega un papel muy importante en la problemática de la reducción del consumo de energía, emisiones de carbono y mitigación del cambio climático (Daioglou et al., 2012)

Las políticas de eficiencia energética se han establecido como una herramienta esencial para reducir las emisiones y ahorrar energía. La IEA (International Energy Agency) indica que medidas de eficiencia energética pueden llegar a reducir entre 10-15% del dióxido de carbono global por año. Entre las políticas existentes para el sector residencial, la sustitución de electrodomésticos viejos por unos nuevos y energéticamente eficientes es considerada como una de las mejores estrategias para reducir el consumo de energía de los hogares (Galarraga et al., 2011; Wijaya & Tezuka, 2013) .

Además de la política de sustitución, existen una serie de políticas que han sido utilizadas para estimular el mercado los electrodomésticos que utilizan la energía de forma eficiente. Algunas de ellas son: etiquetado energético, programas gubernamentales obligatorios (mínimos estándares de desempeño energético), medidas fiscales (descuentos en el precio inicial, créditos con intereses bajos, reducción de impuestos), programas para los

distribuidores, programas de información sobre la decisión de compra (IEA, 2009). Sin embargo, existen ciertas barreras que impiden que los consumidores adquieran electrodomésticos eficientes, y entender estas barreras hacia la eficiencia energética ayuda a los creadores de políticas a desarrollar e implementar programas exitosos (Wiel & McMahon, 2003).

En Colombia, algunos autores han utilizado la dinámica de sistemas para construir modelos de simulación y estudiar el papel de la eficiencia energética en el sector residencial. Dyer, Smith, & Peña (1995) y Franco (1996) desarrollaron modelos de simulación de dinámica de sistemas para la sustitución de electrodomésticos, gasodomésticos y lámparas de iluminación por unos modelos con mayor eficiencia energética. Sin embargo, aún no se ha estudiado el caso particular de la sustitución de refrigeradores domésticos y de cómo diversas políticas de eficiencia energética, entre ellas el etiquetado eficiente, pueden estimular al consumidor a realizar la sustitución de su producto actual por uno que presente menor consumo de energía. Adicionalmente, se analiza la reducción de emisiones de carbono con la implementación de las políticas propuestas para el sector residencial.

El propósito de esta investigación es “Evaluar el impacto en el consumo de energía y en las emisiones de carbono del sector residencial en Colombia a partir de la implementación de la política de eficiencia energética de sustitución de electrodomésticos en dicho sector”. Para lograr este objetivo se realizará una revisión de literatura que permita identificar las políticas de eficiencia energética y las características que los usuarios tienen en cuenta a la hora de hacer la sustitución, posteriormente se construirá un modelo de simulación que permita aplicar las políticas identificadas anteriormente y se realizará una comparación de los impactos en la reducción de consumo de energía eléctrica y emisiones de carbono con el caso base.

La importancia de esta investigación radica en que se está abordando un subprograma de prioridad alta del sector residencial definido en el PROURE, el cual consiste en la sustitución de refrigeradores domésticos por unos nuevos y con alta eficiencia energética con el fin de reducir el consumo de electricidad de los hogares Colombianos. Además de que esta investigación analiza la influencia del etiquetado de eficiencia energética en la sustitución de dichos electrodomésticos.

## **1.1. Problema de investigación**

En los últimos años el sector residencial en Colombia ha ocupado el tercer lugar en consumo de energía, después del sector transporte e industrial (Prias, 2010). Este consumo de energía en los hogares se da principalmente por el uso de la energía eléctrica, en particular por el uso continuo de electrodomésticos (Kim, Keoleian, & Horie, 2006; Young, 2008). Además, en nuestro país la mayoría de hogares tienden a prolongar la vida útil de los electrodomésticos y tienden a funcionar por periodos más prolongados de los que fueron diseñados, por lo que el uso de estos modelos ineficientes genera un retardo prolongado en los ahorros en consumo de electricidad (Blaser, 2009; Young, 2008).

Por este motivo, se considera que políticas enfocadas en eficiencia energética pueden ser implementadas para incentivar a los hogares a sustituir sus actuales electrodomésticos por unos modelos nuevos y que tengan tecnología de alta eficiencia energética (Young, 2008).

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Evaluar el impacto en el consumo de energía y en las emisiones de carbono del sector residencial en Colombia a partir de la implementación de la política de eficiencia energética de sustitución de electrodomésticos en dicho sector.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Identificar las principales características de los electrodomésticos de uso residencial que influyen en la sustitución de los mismos.
- Desarrollar un modelo de simulación que permita analizar el comportamiento del consumo residencial de energía bajo distintos escenarios de sustitución de electrodomésticos.

- Comparar los diferentes escenarios y determinar cuál de ellos presenta una mayor contribución a la reducción tanto en el consumo de energía, como en la de emisiones de carbono

### **1.3. Alcance de la investigación**

La presente investigación está orientada al estudio de la eficiencia energética en el sector residencial en Colombia mediante la aplicación de la política energética de sustitución de electrodomésticos por otros que consuman menor cantidad de energía eléctrica, a través del desarrollo de un modelo de simulación. Se seleccionó para el análisis la política de sustitución a los refrigeradores domésticos ya que éstos consumen más electricidad que cualquier otro aparato del hogar y además son el objeto de uno de los subprogramas prioritarios del sector residencial del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales (PROURE).

A demás se pretende identificar las principales estrategias que permitan que se genere el proceso de sustitución del electrodoméstico antes de que este finalice su tiempo de vida e identificar cuáles de ellas representa un escenario más favorable para la reducción del consumo de energía eléctrica y de emisiones de carbono. Para ello se espera:

- Brindar un análisis del actual programa de etiquetado energético de refrigeración residencial en Colombia como estrategia para la sustitución de dicho electrodoméstico.
- Desarrollar un modelo de simulación que presente diferentes escenarios para la sustitución de refrigeradores residenciales en Colombia.
- Estudiar diferentes estrategias para incentivar la sustitución de refrigeradores residenciales antes de que terminen su tiempo de vida útil a través de un modelo de simulación.

## **1.4. Organización del documento**

El presente documento se encuentra organizado en seis capítulos. Después del capítulo de la introducción (capítulo uno), se presenta en el capítulo dos los principales conceptos relacionados con las políticas de eficiencia residencial en el ámbito tanto internacional como nacional y un estudio sobre el etiquetado de eficiencia energética en Colombia y la experiencia de este programa en diferentes países.

En el capítulo tres se revisan los modelos que se han desarrollado para abordar políticas de eficiencia energética en el sector residencial y las metodologías que pueden ser seleccionadas para abordar el problema.

En el capítulo cuatro se presenta el modelo de simulación desarrollado para describir el problema y la validación sistemática de dicho modelo.

En el capítulo cinco se presentan y analizan las diferentes políticas de eficiencia energética para analizar el comportamiento del sistema.

Finalmente, en el capítulo seis se presentan las principales conclusiones y recomendaciones de trabajo futuro derivadas de esta investigación.

A continuación se da inicio al capítulo dos, el cual se inicia con una revisión de diferentes políticas de eficiencia energética a nivel residencial, luego se presenta el panorama colombiano y finalmente se realiza un resumen de los diferentes programas de etiquetado energético en el mundo y la situación en Colombia.

## **2.Revisión de políticas de eficiencia energética en el sector residencial y su implementación en Colombia**

El propósito de este capítulo es presentar la revisión de literatura de las políticas de eficiencia energética que se han planteado en el mundo para el sector residencial y de las barreras existentes para la aceptación de dichas políticas. Posteriormente, se hace una reseña de la situación del sector residencial en Colombia acerca del consumo de energía y de las políticas de eficiencia energética que se han planteado haciendo énfasis en la sustitución de refrigeradores. Luego, se presenta una revisión de las características que los consumidores tienen en cuenta a la hora de sustituir los electrodomésticos del hogar y los programas de estandarización y etiquetado implementados en diferentes países. Finalmente, se hace un análisis del estado actual del programa de etiquetado en Colombia y su influencia en la sustitución de los refrigeradores domésticos.

Para el desarrollo de esta revisión de literatura se responden las siguientes preguntas de investigación:

### **2.1. ¿Qué políticas de eficiencia energética se han implementado en sector residencial para reducir el consumo de energía?**

A partir de la crisis del petróleo vivida en 1973, diferentes países del mundo han adoptado decenas de políticas para mejorar la eficiencia energética en todos los sectores de sus economías. Estas políticas han permitido reducir el consumo de energía y en adición, han sido parte de estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, en

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

especial de dióxido de carbono, para mitigar el cambio climático (Geller, Harrington, Rosenfeld, Tanishima, & Unander, 2006; IEA, 2007; Markandya, Ortiz, Mudgal, & Tinetti, 2009; Varone & Aebischer, 2001) y abordar los desafíos de la seguridad energética y el desarrollo económico (IEA, 2007).

Existen diferentes tipos de políticas de eficiencia energética tal y como lo presentan (Zhou, Levine, & Price, 2010) siendo algunas de ellas leyes, políticas fiscales y políticas orientadas a sectores específicos de la economía como la industria, el transporte, edificaciones comerciales y residenciales y electrodomésticos residenciales. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las políticas de eficiencia energética orientadas al sector residencial que han sido aplicadas a nivel global, el país que las ha implementado, el autor y el año de la información.

**Tabla 1.** Resumen de políticas de eficiencia energética del sector residencial a nivel mundial.

País(es) o región	Política(s) de eficiencia energética implementadas	Autor(es) del artículo
Estados Unidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estándares en los electrodomésticos</li> <li>▪ Programas de incentivos financieros</li> <li>▪ Programas de información sobre potenciales ahorros en inversión de electrodomésticos eficientes</li> <li>▪ Programas para el manejo de la energía en el sector gubernamental.</li> </ul>	(Gillingham, Newell, & Palmer, 2006)
Canadá, Dinamarca, Suecia, Suiza, Estados Unidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Instrumentos que guíen a los consumidores en la elección de electrodomésticos más eficientes a partir de una mejor información y un interés económico. Por ejemplo el etiquetado obligatorio o voluntario, la calidad de la etiqueta, reducción de impuestos, descuentos a la inversión inicial.</li> <li>▪ Instrumentos para promover nuevos patrones de uso de los electrodomésticos. Por ejemplo, programas educativos, eliminación de impuestos a la electricidad.</li> </ul>	(Varone & Aebischer, 2001)

**Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia**

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Instrumentos para desarrollar electrodomésticos cada vez más eficientes. Por ejemplo soporte financiero en investigación y desarrollo privado.</li> </ul>	
Japón	Subsidios en la adquisición de electrodomésticos eficientes	(Ashina & Nakata, 2008)
Unión Europea	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estandarización y etiquetado informativo en electrodomésticos como refrigeradores, lavadoras, lavavajillas, hornos, calentadores de agua, aire acondicionado e iluminación.</li> <li>▪ Estándares de desempeño (eco-diseño) en electrodomésticos como refrigeradores, lavadores, lavavajillas, hornos, calentadores de agua y de aires, aire acondicionado, televisores e iluminación.</li> <li>▪ Reducción de impuestos, descuentos en el precio inicial de neveras, lavadoras, secadoras y lavavajillas.</li> </ul>	(Bertoldi, Hirl, & Labanca, 2012)
Tailandia, Estados Unidos, Dinamarca, India, Nueva Zelanda y Reino Unido	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estándares y etiquetado eficiente en electrodomésticos del hogar</li> <li>▪ Campañas de promoción de medidas de eficiencia energética por medios masivos de información.</li> <li>▪ Subsidios económicos, préstamos para la inversión en electrodomésticos eficientes, incentivos en los impuestos.</li> </ul>	(Oliver, Lew, Redlinger, & Prijyanonda, 2001)
China	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estándares obligatorios y etiquetado energético en los siguientes electrodomésticos: refrigeradores, aire acondicionado, lavadoras, planchas, televisores, arroceras eléctricas, radios y ventiladores.</li> <li>▪ Impuesto al consumo de electricidad, créditos para la compra de electrodomésticos eficientes.</li> </ul>	(Zhou, Levine, & Price, 2010)
Estados Unidos (estados de New York, Indiana y Wisconsin)	Sustitución de electrodomésticos actuales (refrigeradores) por otros más eficientes.	(Kim et al., 2006)

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

País(es) o región	Política(s) de eficiencia energética implementadas	Autor(es) del artículo
España	Sustitución de electrodomésticos antiguos por otros más eficientes	(Galarraga et al., 2011)
China	Subsidios para la adquisición de electrodomésticos energéticamente eficientes y que utilicen energías renovables como los calentadores solares de agua.	(Lo, 2014)
Ghana	Mejora de la eficiencia energética de los electrodomésticos residenciales a partir de estándares y etiquetado.	(Van Buskirk, Ben Hagan, Ofosu Ahenkorah, & McNeil, 2007)

Fuente: elaboración propia.

A partir de la Tabla 1 es posible identificar cuatro tipos principales de políticas de eficiencia energética para el sector residencial: políticas fiscales que comprenden incentivos financieros, reducción de impuestos y subsidios), políticas de información (campañas de medios), estándares y etiquetado de electrodomésticos y sustitución de electrodomésticos ineficientes.

La eficiencia de las políticas de eficiencia energética ha sido estudiada en diversas regiones y países como Europa, Reino Unido, Estados Unidos, Australia y Japón y se ha demostrado su contribución en la reducción del consumo de energía. Un ejemplo de esto, han sido los estándares de desempeño de mínima energía y el etiquetado los cuales han sido aplicados por diferentes economías en electrodomésticos residenciales como los refrigeradores, lavadoras, secadoras y aires acondicionados mostrando un incremento en su eficiencia desde un 10% a un 60% y una reducción en los costos de electricidad entre un 10% y un 45% sin sacrificar los niveles del servicio ofrecido (IEA, 2009).

## 2.2. ¿Cuáles son las barreras que impiden la aceptación e implementación de las políticas de eficiencia energética?

Existen ciertas barreras que impiden tanto la implementación como la promoción (Zhang & Wang, 2013) mejora y aceptación de políticas de eficiencia energética, generando de esta

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

forma una diferencia entre los niveles actuales y los deseados de eficiencia energética (IEA, 2007). Estas barreras se han clasificado de diferentes formas según al sector que se encuentren dirigidas (barreras legales, financieras, de mercado e información, entre otras) y en la Tabla 2 se hace una presentación de las principales barreras encontradas.

**Tabla 2.** Barreras hacia la eficiencia energética

<b>Tipos de barreras</b>	<b>Referencia</b>
Barreras legales Barreras financieras Barreras sociales Barreras de mercado	(Zhang & Wang, 2013)
Información imperfecta Costos ocultos Riesgo e incertidumbre Limitado acceso a capital Incentivos divididos Racionalidad limitada	(Fleiter, Worrell, & Eichhammer, 2011) (Schleich, 2009)
Barreras de información	(Kounetas, Skuras, & Tsekouras, 2011)
Barreras y fallas en el mercado	(IEA, 2007) (IEA, 2009)
Barreras institucionales Barreras de Mercado Barreras técnicas y de conocimiento	(PNUD, 2005)
Barreras y fallas en el mercado Barreras regulatorias	(Brown, 2001)

Fuente: Elaboración propia

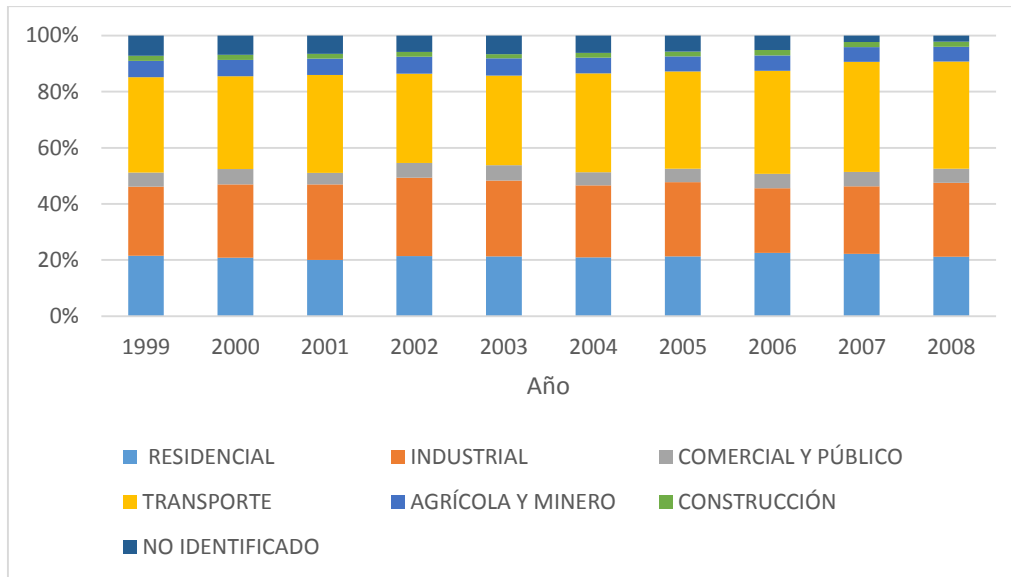
La política de sustitución de electrodomésticos se considera como una de las mejores opciones costo-beneficio que se pueden implementar en el corto plazo. Sin embargo ciertas barreras impiden que se sustituya el electrodoméstico viejo por uno con eficiencia energética (Galarraga et al., 2011). Algunas de estas barreras se presentaron en la Tabla 2 , y a continuación se hace una propuesta de la forma en cómo pueden ser superadas:

- Barreras fiscales: se pueden superar mediante subsidios y rebajas que permitan que los hogares puedan invertir en electrodomésticos de bajo consumo de energía.
- Barreras regulatorias: este tipo de barrera se puede superar obligando a los distribuidores de electrodomésticos a vender aparatos energéticamente eficientes y garantizar que esto se cumpla.
- Barreras de mercado: una forma de superar estas barreras es mediante estándares de desempeño energéticos que permita la fabricación de electrodomésticos cada vez más eficientes
- Barreras de conocimiento e información: se pueden superar mediante programas de educación que permitan que los consumidores conozcan y entiendan programas como el de etiquetado eficiente (Dianshu, Sovacool, & Minh Vu, 2010).

### **2.3. ¿Cuál es la situación actual del consumo de energía en el sector residencial en Colombia?**

El sector residencial en Colombia se ha posicionado en tercer lugar en consumo final de energía después de los sectores de transporte e industria desde 1999 a 2008, tal y como se presenta en la Figura 1, con un promedio de consumo de alrededor del 20% del consumo total de energía del país en cada año de la medición (Prias, 2010). Es por esto, que el sector residencial tiene un papel importante en la definición de políticas y programas de eficiencia energética (Bertoldi et al., 2012).

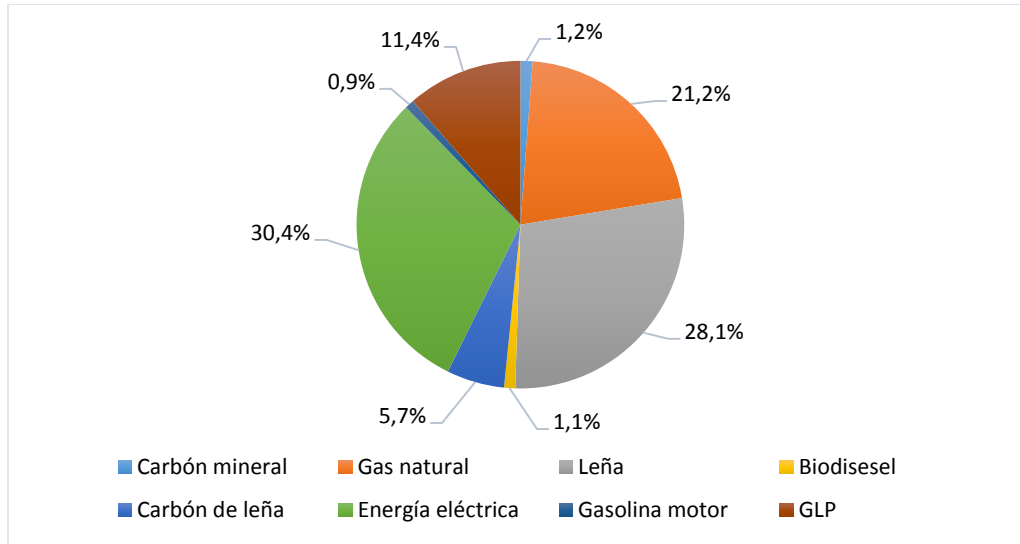
**Figura 1.** Consumo final de energía por sectores de la economía Colombiana (2008)



Fuente: Elaboración propia con datos tomados de (Prias, 2010)

La Figura 2 muestra el consumo final de energéticos en el sector residencial para el año 2008, en dónde la electricidad representa la mayor participación en la matriz del sector con el 30,4% del total, seguido de la leña, el gas natural, el GLP (Gas Licuado del Petróleo), el carbón de leña, el carbón mineral y el biodiesel. La participación de todos los combustibles fósiles (Carbón mineral, gas natural, GLP y gasolina motor) dentro del consumo de energía es sólo el 34%, siendo el gas natural el que mayor participación presenta (Prias, 2010).

Figura 2. Participación por energético en el sector residencial Colombiano para el año 2008.



Fuente: Elaboración propia con datos tomados de (Prias, 2010)

Un alto porcentaje del consumo de energía en los hogares está asociado con el uso de electrodomésticos (Wijaya & Tezuka, 2013). En la Unión Europea los grandes electrodomésticos como lavadoras, refrigeradores, lavaplatos, sistemas de calefacción, utilizan aproximadamente un 30% del total de energía consumida (Gaspar & Antunes, 2011), en Japón consumen el 17%, en Tailandia el 20% y en China el 30% (Lu, 2006). Por su parte en Colombia, en el sector residencial el consumo de energía eléctrica es de 30,4% por el uso de diferentes aparatos eléctricos, los cuales son presentados en la Tabla 3, en dónde es posible observar que la cantidad de electrodomésticos en uso ha tenido un rápido crecimiento en los últimos diez años.

**Tabla 3.** Porcentaje de hogares por bienes que posee según Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV) en Colombia para los años 2003, 2008, 2010, 2011 y 2012.

Electrodoméstico	Porcentaje de hogares que poseen el bien (%)					Tiempo de vida útil (años)	
	ECV 2003	ECV 2008	ECV 2010	ECV 2011	ECV 2012	Colombia	Europa
Televisor	76,7	88,5	90,4	91,3	91	5-15	10
Nevera o refrigerador	66,9	73,3	75,5	77	78,7	15-25	11
Equipo de sonido	43,8	50,2	49,5	50,8	47,9	4-10	9
Lavadora	24,9	40,1	45,5	48,9	51,8	10-18	7
Reproductor de video	2,2	47,1	45,3	47	44,4	4-10	7
Computador	11,2	22,8	29,6	33,9	38,5		
Horno eléctrico	19,1	22,4	21,7	23,8	23,5		
Horno microondas	7,3	14,5	15,9	18	-		
Aspiradora	8,2	7,1	6,7	7	-		

Fuente: (DANE, 2010), (DANE, 2011), (DANE, 2013), (Blaser, 2009)

De los electrodomésticos presentes en la Tabla 3, el refrigerador es el único que tiene una operación continua durante las 24 horas del día, y por ende su consumo de electricidad es superior al consumo de otros electrodomésticos del hogar (Lu, 2006), haciendo que éste se posicione en primer lugar de consumo de energía, seguido de la lavadora, el televisor, equipo de sonido, DVD o Blue-Ray, horno eléctrico, horno microondas, computador y aspiradora (Consorcio Bariloche & UPME, 2007).

## 2.4. ¿Qué programa(s) se han implementado en Colombia dirigidos hacia la eficiencia energética residencial?

En Colombia, se ha establecido la importancia de un programa de eficiencia energética de alcance nacional a través de la promulgación de la ley 697 de 2001, mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, decretando así en el artículo 1 el uso racional y eficiente de la energía como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, y en el artículo 5 la creación del Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás formas de Energía no Convencionales (PROURE) (Prias,

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

2009). Es por esto, que en la resolución 180919 de 2010 del Ministerio de Minas y Energía, se adopta el Plan de acción indicativo 2010-2015 para desarrollar el PROURE, el cual establece subprogramas prioritarios en los sectores: residencial; industrial residencial, público y servicios; y transporte. En la Tabla 4 se presentan los sectores de la economía Colombiana con sus respectivos programas de eficiencia energética y la prioridad establecida para cada uno de ellos (Ministerio de Minas y Energía, 2010; UPME, 2010).

La prioridad de los subprogramas de eficiencia energética de la Tabla 4, fue establecida por la UPME (Unidad de planeación Minero Energética) teniendo en cuenta el grado de avance y el compromiso por parte del gobierno (Consortio Bariloche & UPME, 2007), identificándose en cada uno de los sectores residencial e industrial dos subprogramas de prioridad alta y en los sectores comercial, público y servicios y en el de transporte un programa de prioridad alta. Dentro del sector residencial, los dos subprogramas de prioridad alta pretenden reducir el consumo de energía eléctrica, mientras que los de prioridad media están enfocadas en energéticos como gas natural y GLP.

**Tabla 4.** Subprogramas sectoriales de eficiencia energética en Colombia

<b>Sector</b>	<b>Subprograma</b>	<b>Prioridad</b>
<b>Residencial</b>	Sustitución de bombillas incandescentes	Alta
	Uso eficiente de energía en equipos de refrigeración, aire acondicionado y demás electrodomésticos	Alta
	Hornillas eficientes	Media
	Eficiencia energética en viviendas de interés social	Media
	Gas licuado del petróleo (GLP) en el sector rural y en zonas marginales.	Media
<b>Industrial</b>	Optimización del uso de energía eléctrica para fuerza motriz	Alta
	Gestión de la energía en la industria	Alta
	Optimización del uso de calderas	Media

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

	Cogeneración y autogeneración	Media
	Optimización de la cadena de frío	Media
	Eficiencia en iluminación	Baja
	Uso racional y eficiente de la energía en pymes	Baja
	Optimización de procesos de combustión	Baja
<b>Comercial, público y servicios</b>	Difusión sobre tecnologías y buenas prácticas en sistemas de iluminación, refrigeración y aire acondicionado	Media
	Caracterización, gestión de indicadores y asistencia técnica.	Alta
	Actualización tecnológica en alumbrado público	Media
<b>Transporte</b>	Biocombustibles	Alta
	Reconversión tecnológica	Media
	Modos de transporte	Baja
	Buenas prácticas de transporte	Baja

Fuente: Elaboración propia con información tomada de (Prias, 2010)

### 2.5. ¿En qué consiste la política de sustitución de refrigeradores domésticos?

Los refrigeradores viejos consumen en muchas ocasiones hasta el doble de electricidad en un año que un refrigerador moderno y eficiente. Una serie de estándares de eficiencia energética fueron diseñados para reducir el consumo de energía de los refrigeradores y otros electrodomésticos, permitiendo que los nuevos modelos diseñados tengan una mejor eficiencia energética. Sin embargo, los consumidores continúan utilizando su refrigerador actual debido, principalmente, a razones económicas dando como resultado un uso promedio de éstos de más de 20 años para países en desarrollo y de 11 y 14 años en países desarrollados como Reino Unido y Estados Unidos, respectivamente, y por ende mayor consumo de energía que un refrigerador eficiente. El deterioro de las partes del

refrigerador es otra causa del consumo excesivo de energía, causando muchas veces un consumo superior entre el 40-60% de electricidad (Kim et al., 2006).

Reemplazar un refrigerador antes de que cumpla su tiempo de vida útil puede ser una política muy útil para reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, la decisión de reemplazar el refrigerador está asociada con aspectos de tipo económico, social y de información (Kim et al., 2006).

Los incentivos para reemplazar los refrigeradores actuales e ineficientes por unos que tengan un menor consumo de electricidad es una política muy útil para reducir el consumo innecesario de energía. Desde el punto de vista de los consumidores, la decisión de reemplazar un determinado electrodoméstico depende del equilibrio entre un costo alto de inversión inicial para la compra de un refrigerador eficiente y menores costos de energía eléctrica anual. Como consecuencia, con frecuencia se utilizan incentivos y subsidios para facilitar programas de reemplazo de refrigeradores. Por ejemplo, en 1993, el condado de Sacramento, California, Estados Unidos ofreció una compensación de \$100 dólares para reemplazar el refrigerador antiguo por uno nuevo con eficiencia energética (Kim et al., 2006). En México, a partir del año 2011 se implementó el Programa de Sustitución de equipos Electrodomésticos (PSEE), el cual busca sustituir refrigeradores o equipos de aire acondicionado con diez o más años de uso, por aparatos nuevos más eficientes en su consumo de energía, ofreciéndole al usuario la posibilidad de ser acreedor del apoyo directo al precio del electrodoméstico y del apoyo de financiamiento, o bien, sólo del apoyo de financiamiento, dependiendo de su nivel de consumo de energía eléctrica (FIDE, 2012).

En Colombia, los refrigeradores son llamados neveras, y están formados por una parte para la refrigeración y otra para la congelación de alimentos. Estudios realizados por la UPME han estimado que los refrigeradores son responsables de entre el 20 y 50% del consumo energético de los hogares de los estratos 1, 2 y 3 en cuatro de las principales ciudades de Colombia, en donde el 62% del consumo energético lo realizan los estratos 1 y 2 y el 26% el estrato 3 y estiman que, en conjunto, estos estratos tienen en uso cerca de cuatro millones de refrigeradores ineficientes producidos antes de 1997 (Prias, 2010).

En un país en desarrollo como Colombia, resulta que la vida útil de los aparatos eléctricos llega a ser más larga que en los países industrializados debido a que éstos tienden a ser utilizados hasta su máximo rendimiento. Un claro ejemplo de esto es que una nevera usada suele ser reemplazada por un nuevo modelo y ésta pasa a ser entregada a parientes o a la empleada doméstica para continuar siendo usada en un nuevo hogar. Otra razón que extiende la vida útil de un refrigerador es que cuando éste se daña, generalmente es mandado a arreglar y se sigue utilizando hasta que su daño sea irreparable (Blaser, 2009).

### **2.5.1. ¿Cómo ha sido la experiencia de sustitución de neveras en Colombia?**

En la ciudad de Bogotá, Colombia en el año 2008 se desarrolló un programa piloto para la sustitución de 10.000 de equipos de refrigeración doméstica mediante la campaña publicitaria que se presenta en la Figura 3 llamada '**Cambia tu nevera, ahorras tú, gana el planeta y protegemos la capa de ozono**', la cual se prolongó entre el primero de mayo y el 31 de julio de ese mismo año. El objetivo de esta campaña era sustituir neveras que tuvieran Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono (SAO), más que su reemplazo por ineficiencia energética. Con esta iniciativa y gracias a la participación de fabricantes nacionales de neveras<sup>1</sup>, supermercados<sup>2</sup> y al apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, de la Unidad Técnica de Ozono (UTO) y de la Cámara de Electrodomésticos de la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) fue posible sustituir 1900 neveras en los tres meses del programa. Con esta campaña los colombianos podían acercarse a cualquiera de las 13 sucursales de una línea de supermercados en Bogotá, vinculada con la campaña, y presentando la marca, el modelo y el año de fabricación de su nevera actual, tenían la posibilidad de elegir una nueva nevera de fabricación nacional con el logotipo del proyecto, y recibir un bono por \$80,000 o \$100,000 para ser redimido inmediatamente como parte de pago. El proyecto logró obtener algunas ventajas especiales para pagos a través de crédito con tarjeta propia del supermercado (descuento de 10% adicional) y pagos a través de crédito con la empresa distribuidora de electricidad de Bogotá. Una vez realizada la compra, las empresas fabricantes llevaban directamente a los domicilios de los consumidores los

---

<sup>1</sup> Industrias Haceb S.A., Mabe Colombia S.A

<sup>2</sup>Almacenes Éxito S.A.

equipos nuevos y retiraban los equipos antiguos, verificando de esta forma el cumplimiento de los requisitos para la sustitución (Unidad Técnica Ozono, 2008).

**Figura 3.** Publicidad de la campaña de sustitución de equipos de refrigeración doméstica en Bogotá



Fuente: Boletín Ozono N°17 (Unidad Técnica Ozono, 2008)

## **2.6. ¿Cuáles son las características de los electrodomésticos que se tienen en cuenta a la hora de la sustitución por uno nuevo?**

Antes de comprar un electrodoméstico los consumidores suelen reunir información acerca de las características del producto de su interés. Esta información es útil ya que en muchos casos puede ayudar a tomar la decisión de cuál electrodoméstico se va a adquirir (Wijaya & Tezuka, 2013).

De acuerdo con Erasmus, Makgopa, & Kachale (2005), las características más relevantes de los electrodomésticos del hogar que se tienen en cuenta incluyen una combinación de factores funcionales, financieros, estéticos, durabilidad y estatus. Las características

funcionales se refieren a la habilidad de desempeño esperada de los electrodomésticos. Las características financieras se refieren al costo en corto y largo plazo, incluyendo costos de operación y mantenimiento. Las características de durabilidad incluyen aspectos como materiales y diseño que puedan afectar el servicio del electrodoméstico durante su tiempo de vida útil. Las características de estatus se refieren a la marca, país de origen y precio que puedan reflejar cierto estatus o prestigio hacia el consumidor. Las características estéticas hacen referencia hacia la atractividad del electrodoméstico en términos de diseño, materiales y acabados.

Gaspar & Antunes (2011), desarrollan una encuesta a usuarios cuando están a punto o en un futuro cercano de comprar un electrodoméstico con el fin de determinar las características más relevantes que los consumidores toman en consideración cuando adquieren nuevos electrodomésticos. La característica más tenida en cuenta es el costo del electrodoméstico, seguido de la calidad del producto, consumo de energía, garantía, facilidad de uso, rango de eficiencia energética, marca y/o modelo, diseño/color/decoración, innovación tecnológica, capacidad, número de funciones, dimensiones, servicio al cliente, seguridad, opiniones de otros usuarios, accesorios y facilidad de limpieza.

Encuestas realizadas en las ciudades de Yakarta y Bandung en Indonesia por (Wijaya & Tezuka (2013) con el fin de obtener información acerca del comportamiento económico y variables como actitudes, creencias y beneficios percibidos con respecto a la sustitución y compra de electrodomésticos, dieron como resultado que características de precio y calidad (en términos de apariencia del electrodoméstico) fueron el tipo de información más requeridas previas a la compra de electrodoméstico seguidas de garantía, facilidad de uso, consumo de energía, tecnología, seguridad, accesorios, marca y país de origen. Este estudio también concluyó que la mayoría de los consumidores solicitaban información sobre las características de los electrodomésticos al personal de ventas y que esta información se consideraba valiosa y confiable, implicando un tipo de persuasión hacia la compra o no de los electrodomésticos eficientes.

Según Newman & Staelin (1972), la información que buscan los compradores antes de adquirir un nuevo electrodoméstico para el hogar está basada en características tanto del producto como del hogar y del usuario. Dentro de las características del electrodoméstico

se toman en cuenta el costo, la forma de pago, es decir, si el pago será en efectivo o por medio de un crédito, si ya había tenido un producto del mismo tipo anteriormente, si el producto había sido recomendado por alguien más y la marca. Con respecto a las características del hogar y del usuario, se tiene en cuenta el nivel de educación del comprador, el ingreso del hogar y la localización de la residencia, es decir, si es de tipo urbana o rural, entre otras.

De los estudios mencionados anteriormente es posible observar que las características de costo del electrodoméstico, costo de operación, calidad, consumo de energía, emisiones de carbono y la marca son las más relevantes como información para ayudar al usuario a tomar la decisión de compra del electrodoméstico que se va a sustituir. Sin embargo, también es importante tener en cuenta características del hogar tal como lo es el ingreso monetario ya que afecta de forma directa la posibilidad de sustitución del electrodoméstico ineficiente.

## **2.7. ¿En qué consiste y cómo se ha implementado la política de etiquetado de eficiencia energética en el mundo y en Colombia?**

Una etiqueta de eficiencia energética usualmente está acompañada de un estándar y brinda información acerca del consumo de energía, eficiencia y costo de la energía, y sirve de guía para que los consumidores seleccionen bienes más eficientes a la hora de comprarlos (Mahlia, 2004) y para que los fabricantes produzcan electrodomésticos cada vez más eficientes (Mahlia & Saidur, 2010). El etiquetado puede considerarse como una de las políticas de eficiencia energética más efectivas a largo plazo que cualquier gobierno puede implementar (Wiel & McMahon, 2003). Es por esto, que distintos gobiernos alrededor del mundo han incrementado la implementación de estándares y etiquetado en los últimos 30 años. A finales del 2005, 62 países habían adoptado 1818 estándares y etiquetado que cubrían alrededor de 82 productos (Wiel, Egan, & delta Cava, 2006).

### **2.7.1. Tipos de etiquetas eficientes**

#### **Etiqueta de aprobación**

Este tipo de etiquetado ofrece un sello o logotipo de aprobación de que un determinado producto cumple con un criterio específico. Uno de los programas de etiquetado más conocidos a nivel mundial es ENERGY STAR, el cual fue introducido inicialmente en Estados Unidos para reconocer la eficiencia energética en computadores y posteriormente fue implementado en más de 40 productos (Saidur, Masjuki, & Mahlia, 2005; Wiel et al., 2006). Otros programas a nivel mundial incluyen los logotipos de *Blue Angel* en Alemania, *Eco-Logo* en Canadá, *Ecolabel* en la Unión Europea, y *Green Seal* en Estados Unidos. (Saidur et al., 2005)

#### **Etiquetas de comparación**

Este es un tipo de etiqueta informativa que va colocada en el producto y describe el consumo de energía, la eficiencia energética y el costo de la energía (Wiel et al., 2006), y permite que los consumidores comparen el uso de energía entre todos los modelos disponibles con el fin de hacer una elección de forma informada, además de estimular a los fabricantes a diseñar productos que logren estándares más altos que los mínimos exigidos (Saidur et al., 2005).

#### **Etiqueta de información**

Este tipo de etiqueta brinda información sobre el desempeño técnico del producto y no ofrece una forma simple de comparar el desempeño energético entre diferentes productos. Este tipo de etiquetas no son amigables con el consumidor porque sólo contienen información técnica (Saidur et al., 2005).

### **2.7.2. Etiquetado eficiente a nivel mundial**

A nivel mundial se han implementado diferentes programas de etiquetado tanto obligatorios como voluntarios. A continuación se presenta la experiencia en diferentes países.

### **Estados Unidos**

Tiene cinco programas principales de etiquetado tanto obligatorios como voluntarios: *Energy Guide*, *Energy Star*, *Green Seal*, *Scientific Certification Systems* y *Green-e* (Banerjee & Solomon, 2003).

*Energy Guide*: El congreso de Estados Unidos aprobó una Política de Energía y Conservación (EPCA, por sus siglas en inglés) en 1975, cuyo propósito principal era la conservación de energía permitiéndole a los usuarios utilizar un criterio de eficiencia energética a la hora de comprar electrodomésticos. Este tipo de etiquetado obligatorio requiere que los fabricantes de los electrodomésticos coloquen la etiqueta y prohíban que ésta sea removida antes de la venta (Banerjee & Solomon, 2003).

*Energy Star*: Es un programa voluntario que busca reducir la contaminación y el cambio climático mediante la promoción y uso de productos eficientes. Este programa fue iniciado en Estados Unidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, sus siglas en inglés) en 1972. Esta etiqueta promueve la eficiencia energética mediante un sello o logotipo de aprobación, lo que implica que cuando un fabricante cumple con el criterio de eficiencia energética para un producto en particular, le está permitido colocar el sello de *Energy Star* en el producto y hacer publicidad de éste (Banerjee & Solomon, 2003).

*Green Seal*: Establecido en 1989, es un tipo de etiquetado voluntario que promueve la fabricación y el uso de productos que menos causan daños al medio ambiente (Banerjee & Solomon, 2003).

*Scientific Certification Systems (SCS)*: Es un tipo de etiquetado voluntario establecido en 1984 (Banerjee & Solomon, 2003).

*Green-e*: Es un tipo de etiquetado voluntario establecido en 1997, que brinda un sello de aprobación el cual certifica que la electricidad brindada por un proveedor ha sido generada de fuentes renovables. Este programa inició en California y se ha difundido a más de 10 estados y se considera diferente a los otros programas de etiquetado ya que promueve la sostenibilidad a través del desarrollo y uso de fuentes renovables de energía, mientras que

otros programas promueven la eficiencia energética mediante el ahorro de energía (Banerjee & Solomon, 2003).

### **Unión Europea**

La directiva de la Unión Europea estableció un etiquetado obligatorio a diferentes productos (refrigeradores, lavadoras, lavaplatos, iluminación, vehículos entre otros). Inicialmente este etiquetado poseía 7 clases desde la A, mayor eficiencia, hasta la G, menor eficiencia. Sin embargo, en el año 2010 se establecieron nuevas categoría en el sistema de etiquetado con las siguientes clases: A+++, A++, A+, A, B, C y D (Chunekar, 2014; Zhou et al., 2010).

### **China**

En el año 2005 China estableció una etiqueta obligatoria de información energética la cual fue adaptada de la etiqueta de la Unión Europea y que posee cinco categorías de eficiencia energética. Estas categorías van desde productos que apenas cumplen con los estándares de eficiencia energética hasta aquellos con son casi el doble de eficientes. Inicialmente esta etiqueta fue aplicada a refrigeradores y aires acondicionados y luego el programa fue expandido a otros electrodomésticos del hogar y la industria (Zhou et al., 2010).

### **2.7.3. Etiquetado eficiente en Colombia**

El programa obligatorio de etiquetado en Colombia fue establecido por la UPME, la cual es una unidad administrativa especial del orden nacional, de carácter técnico, adscrita al Ministerio de Minas y Energía. Dicha entidad emitió la Resolución 0165 de 2001, la cual determina que los equipos de uso final de energía serán objeto del Programa Colombiano de Normalización, Acreditación, Certificación y Etiquetado de Equipos (Programa CONOCE). A partir de este programa se establecieron Normas Técnicas Colombianas (NTC) de eficiencia energética elaboradas bajo procedimientos del ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación), organismo nacional de normalización. Junto a estas normas se estableció el etiquetado de eficiencia energética para que los equipos especificados en la resolución anteriormente mencionada puedan ser comercializados en el país (UPME, 2005).

Los equipos objeto del programa CONOCE son los siguientes (UPME, 2005):

- Equipos refrigeradores para uso doméstico
- Equipos refrigeradores para uso comercial
- Balastos electromagnéticos para tubos fluorescentes
- Balastos electrónicos
- Bombillas fluorescentes compactas
- Bombillas fluorescentes circulares
- Bombillas fluorescentes tubulares de 1 casquillo
- Bombillas fluorescentes tubulares de 2 casquillos
- Bombillas de vapor de sodio alta presión
- Bombillas de mercurio
- Aire Acondicionado para recintos
- Calentadores eléctricos para almacenamiento de agua
- Motores eléctricos de corriente alterna.

#### **2.7.4. Etiquetado eficiente en refrigeradores domésticos en Colombia**

El etiquetado eficiente de los refrigeradores domésticos está establecido en la Norma Técnica Colombiana NTC 5020 de 2009, la cual permite clasificar a los refrigeradores en rangos de consumo de energía de acuerdo con su desempeño energético con letras que van desde la A hasta la G, siendo A la de mayor eficiencia energética y G la de menor eficiencia energética. Además especifica que todos los artefactos de refrigeración doméstica deben llevar una etiqueta, presentada en la Figura 4, que cumpla con las siguientes características:

**Permanencia:** La etiqueta debe ir adherida al refrigerador y no debe ser removida hasta después de que el producto haya sido comprado por el consumidor final.

**Ubicación:** La etiqueta debe estar ubicada sobre el artefacto en un lugar visible para el consumidor.

**Información:** La etiqueta debe contener mínimo la siguiente información: leyendas que digan “Energía”, “Marca”, “Modelo”, “Tipo de artefacto”, “Menor consumo” en la parte superior del rango A, “Mayor consumo” en la parte inferior de rango G, los rangos de

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

clasificación de acuerdo al consumo de energía que van desde la letra A hasta la G, una flecha que indique el rango al que pertenece el producto según su consumo de energía, leyendas que digan “Consumo de energía” en unidades de kWh/año,, “Índice de eficiencia energética” en unidades de (kWh/año)/litros,, “Clase de clima”, “Clasificación del compartimiento de baja temperatura”, “Volumen neto total” en unidades de litros, “Volumen neto del compartimiento del alimento frescos” en unidades de litros, “Volumen neto del congelador” en unidades de litros (ICONTEC, 2009).

**Color:** La etiqueta debe estar impresa en papel color amarillo y letras impresas de color negra.

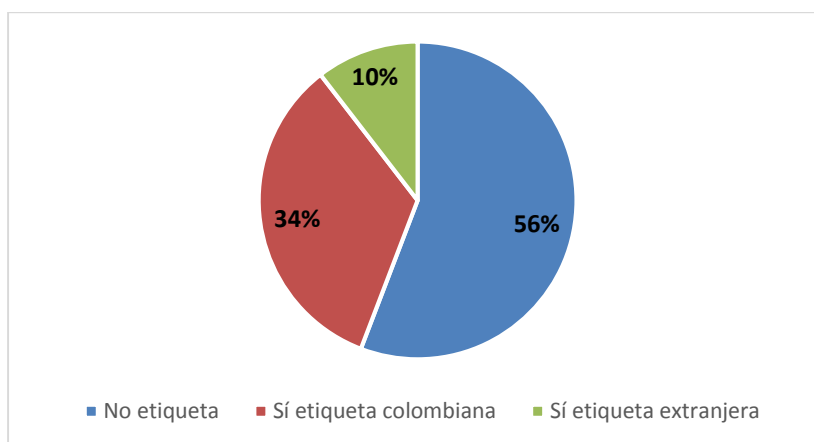
**Figura 4.** Etiqueta de eficiencia energética para refrigeradores domésticos en Colombia según la NTC 5020

<b>Energía</b>	
Marca	XYZ
Modelo	XYZ
Tipo de artefacto	Refrigerador
Menor consumo	
	<b>B</b>
Mayor consumo	
Consumo de energía (KWh/año) <i>El consumo real varía dependiendo de las condiciones de uso del artefacto y su localización.</i>	XYZ XYZ
Índice de eficiencia energética ( KWh/año ) / litros	
Clase de clima	Tropical (T)
Clasificación del compartimiento de baja temperatura	**
Volumen bruto total (Litros)	XYZ
Volumen neto del compartimiento de alimentos frescos (Litros)	XYZ
Volumen neto del congelador (Litros)	XYZ
Compare este artefacto con otros de similares características ( tipo, clase, volumen, neto total).	
Nota : Los resultados se obtienen aplicando los métodos de ensayo descritos en las normas técnicas colombianas NTC 2078, 4097, 4371 y 4296, según corresponda. Esta etiqueta no debe retirarse del artefacto hasta que este haya sido adquirido por el consumidor final.	

Fuente: Tomado de la NTC 5020 (ICONTEC, 2009).

Con base en esta norma y etiquetado de los artefactos de refrigeración doméstica en Colombia, en esta investigación se realizó un estudio de campo en refrigeradores domésticos disponibles para la venta en grandes superficies<sup>3</sup> de la ciudad de Medellín (Colombia), y cuya ficha técnica es presentada en el Anexo A. A partir de este estudio se encontró mediante información recolectada por observación respecto a la aplicación de la norma de etiquetado NTC 5020, tal y como se muestra en la Figura 5, que el 55,8 % de las neveras exhibidas para ser adquiridas por los consumidores finales no presentaban la etiqueta de eficiencia energética, el 33,7 % presentaban la etiqueta de eficiencia energética establecida en nuestro país tal como lo dice la norma NTC 5020 y el 10,5 % presentaban etiqueta de eficiencia energética de países como México y Estados Unidos.

**Figura 5.** Resultados de la observación de la presencia de etiqueta eficiente en refrigeradores domésticos en Colombia



Fuente: Elaboración propia con base en información de grandes superficies (2013).

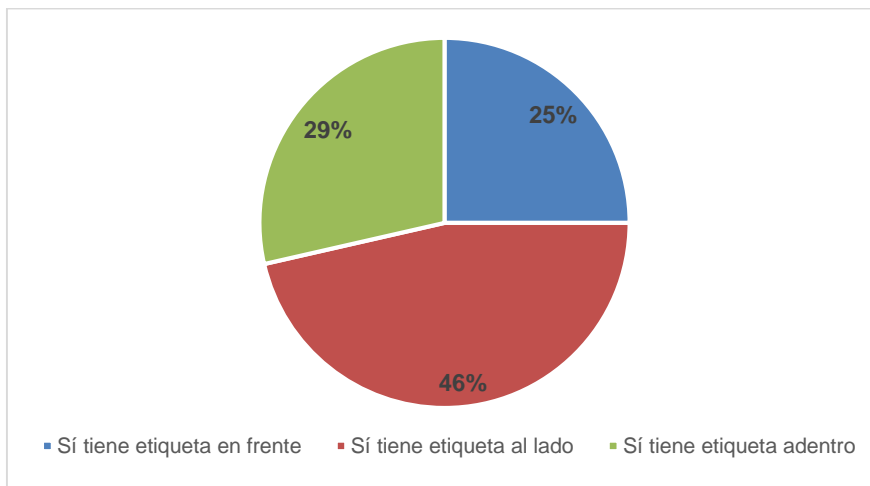
**A pesar de que la norma NTC 5020 no establece una ubicación específica para la etiqueta de eficiencia energética, fue posible encontrar que el Programa CONOCE sí establece que la etiqueta debe estar ubicada en la parte frontal del refrigerador doméstico en el punto de venta. A partir del estudio de campo fue posible identificar que de los refrigeradores con etiqueta de eficiencia energética Colombiana, el 25% presentaban la etiqueta en la parte frontal, el 46% en la parte lateral y el 29% en el interior, tal y como se presenta en la**

Figura 6.

---

<sup>3</sup> Almacenes Éxito, Jumbo, Metro, Fallabela, Home Center y Makro

**Figura 6.** Resultados de la observación de la ubicación de la etiqueta eficiente en refrigeradores domésticos en Colombia



Fuente: Elaboración propia con base en información de grandes superficies (2013).

La efectividad de un programa de etiquetado eficiente depende tanto de la respuesta del consumidor como la del fabricante. Una respuesta favorable del consumidor es la meta principal de un programa de etiquetado, ya que es un criterio importante para evaluar la aceptación pública del programa. Dicha respuesta se considera que tiene tres dimensiones: conocimiento, entendimiento y comportamiento, y que se presentan en la Figura 7. El entendimiento indica cómo un consumidor puede interpretar la conexión entre el significado de la etiqueta y las acciones necesarias para obtener los resultados. El comportamiento indica cómo el conocimiento y el entendimiento de los consumidores son traducidos a la acción deseada, es decir, a la compra de los productos etiquetados.

Estas tres dimensiones se pueden medir a través de encuestas, pero el comportamiento es usualmente el más difícil de determinar debido a que la decisión de compra está basada en diferentes aspectos como las características del electrodoméstico y del consumidor, además de la etiqueta de eficiencia energética. Por su parte, la respuesta del fabricante es la clave para la transformación del mercado, ya que entre más fabricantes accedan a producir electrodomésticos que cumplan con los estándares, más productos podrán tener

la etiqueta de eficiencia energética (Banerjee & Solomon, 2003; McMahon & Wiel, 2001; Mills & Schleich, 2013).

**Figura 7.** Dimensiones de la aceptación pública del programa de etiquetado eficiente



Fuente: Elaboración propia con base de información de (McMahon & Wiel, 2001).

La promoción (publicidad y materiales educativos) es un componente clave en la mayoría de los programas de etiquetado más exitosos, haciendo que se incremente el conocimiento entre los compradores potenciales. Esta promoción se lleva a cabo a partir de campañas de comunicación tales como: el entrenamiento del personal de venta; anuncios en los periódicos, en las revistas, en la televisión, en la radio y en internet (publicidad); comunicados de prensa. Incluso la influencia de las celebridades para crear entusiasmo por un producto y las fechas importantes, como Día de la Tierra, son utilizadas para lanzar campañas publicitarias para promocionar programas de etiquetado eficiente (McMahon & Wiel, 2001).

### **3. Modelado de políticas de eficiencia energética en el sector residencial**

En el capítulo anterior se expuso la revisión de literatura relevante para la identificación de conceptos y el planteamiento del problema de investigación. En este capítulo se presenta una revisión de literatura acerca del modelado de sistemas energéticos y se hace la selección de la metodología a aplicar para el desarrollo del modelo que se desea construir en la presente investigación.

Para el desarrollo de esta investigación se propone una metodología para el desarrollo del modelo que esté formado la integración de dos partes. La primera parte del modelo, corresponde al análisis de la decisión de los consumidores residenciales de sustituir o no el refrigerador por otro eficiente. La segunda parte, corresponde al análisis del sistema sobre los efectos en el consumo de energía y emisiones de carbono debido a la implementación de políticas de eficiencia energética. Debido a esta propuesta metodológica es necesario evaluar las diferentes metodologías existentes del modelado de sistemas energéticos con el fin de determinar cuál es la herramienta más adecuada para el análisis de cada una de las partes. Por este motivo, se hace una revisión de literatura de modelos que apliquen políticas de eficiencia energética en el sector residencial y modelos que involucren la elección de tecnología eficiente en el sector residencial.

#### **3.1. Modelado de sistemas energéticos**

Los modelos energéticos han sido aplicados para facilitar la toma de decisiones en la planificación energética, para analizar políticas energéticas y las implicaciones derivadas de la introducción de nuevas tecnologías. Debido a la complejidad de los sistemas energéticos, los modelos son construidos como herramientas que permiten explicar, controlar o predecir el comportamiento de estos sistemas. El modelo debe ser diseñado como una representación aproximada de la realidad y debe permitir obtener ciertas conclusiones que no se pueden obtener de la observación directa del sistema (Nakata, Silva, & Rodionov, 2011).

De acuerdo con Van Beeck (1999), los modelos de sistemas energéticos se pueden clasificar según su enfoque analítico, el propósito del análisis, la metodología, el enfoque matemático, la cobertura geográfica, el horizonte de tiempo y los requerimientos de información. En la Tabla 5 se hace una presentación de estas clasificaciones.

**Tabla 5.** Clasificación de modelos energéticos

<b>Criterio de clasificación</b>	<b>Modelos de energía</b>	
Enfoque analítico	Top-down y bottom up	
Propósito	General	Predecir el futuro y explorar el futuro
	Específico:	Modelos de demanda, suministro e impacto de energía, y evaluación de modelos
Metodología	Econometría, macro-economía, equilibrio económico, optimización, simulación, multicriterio y contables.	
Enfoque matemático	Programación lineal, programación entera mixta, programación dinámica.	
Cubrimiento Geográfico	Global, regional, nacional y local	
Horizonte de tiempo	Corto, medio y largo plazo	
Requerimiento de información	Cualitativo, cuantitativo, agregado y desagregado	

Fuente: Elaboración propia con información de (Van Beeck, 1999)

A partir de la Tabla 5, se identifican dos tipos de clasificaciones de modelos energéticos mencionados ampliamente en la literatura: según el enfoque analítico y según la metodología empleada. De acuerdo con el enfoque analítico, se tienen los modelos top-down y bottom-up. Los modelos top-down utilizan información de forma agregada para examinar las relaciones macroeconómicas entre el sector energético y el resto de los sectores económicos, son usualmente aplicados por economistas y utilizados para simular la respuesta de la economía a un estímulo financiero tales como impuesto al carbono y permiso de emisiones de carbono (Murphy & Jaccard, 2008). Los modelos bottom-up se enfocan exclusivamente en el sector energético, utilizan información desagregada para describir el sistema y asumen que la decisión de los consumidores está basada en la

relación costo-beneficio (Böhringer & Rutherford, 2009; Nakata et al., 2011; Swan & Ugursal, 2009). A partir de los modelos modelos top-down y bottom-up, se han desarrollado los modelos híbridos que combinan las fortalezas de estos dos tipos de modelos permitiendo tomar en cuenta el comportamiento de los consumidores e incorporar realimentaciones macroeconómicas(Murphy & Jaccard, 2008).

De acuerdo con la metodología se tienen los siguientes modelos:

- **Econométricos:** Este tipo de modelos utilizan técnicas estadísticas para extrapolar el comportamiento de cierto parámetro hacia el futuro (corto y mediano plazo) con base en información agregada que ha sido medida en el pasado. Estos modelos son utilizados de forma frecuente para analizar interacciones entre el sector energético y los sectores económicos. Las desventajas de este tipo de metodología son: la falta de un grupo representativo de tecnologías, sólo pueden ser utilizados por experimentados especialistas en econometría y presentan altos requerimientos de información (Nakata et al., 2011; Van Beeck, 1999). Entre los modelos econométricos se encuentran los modelos de elección discreta, los cuales buscan maximizar la utilidad aleatoria de los consumidores sujeta distintas restricciones y atributos de las alternativas a seleccionar (McFadden et al., 1997).
- **Macro-económicos:** Este tipo de modelos se enfocan completamente en la economía de una sociedad y considera al sector energético como uno de los sectores que componen la economía. Esta metodología estudia la interacción entre los sectores económicos y analiza las relaciones entre la economía y la energía mediante el uso de tablas de entrada-salida. Los modelos macro-económicos son usualmente desarrollados para explorar deferentes propósitos, asumiendo parámetros y escenarios que necesariamente no sean un reflejo de la realidad. Al igual que los modelos econométricos la desventaja este tipo de modelos es la falta de un grupo representativo de tecnologías y sólo pueden ser utilizados por experimentados especialistas en economía (Nakata et al., 2011; Van Beeck, 1999).
- **Equilibrio económico:** Estos modelos permiten estudiar las interacciones entre el sector energético y los otros sectores económicos en el mediano y largo plazo. Los modelos

que estudian únicamente algunos sectores económicos, tal como el sector energético, son conocidos como modelos de equilibrio parcial. Por el contrario, los modelos que incluyen de forma simultánea todos los mercados de la economía se conocen como modelos de equilibrio general. Este tipo de modelos considera las realimentaciones entre los mercados individuales (Nakata et al., 2011; Van Beeck, 1999).

- **Optimización:** Este tipo de modelos son desarrollados para optimizar las decisiones de inversión en energía, cumpliendo un objetivo específico bajo ciertas restricciones. Estos modelos a menudo son utilizados para desarrollar una estrategia óptima de inversión y para analizar las perspectivas del sistema energético. Estos modelos requieren un nivel relativamente alto de conocimiento matemático. El enfoque matemático utilizado en la mayoría de estos modelos es programación lineal (LP) (Nakata et al., 2011; Van Beeck, 1999).
- **Simulación:** son modelos descriptivos basados en una lógica representación de un sistema y cuyo objetivo es reproducir una operación simplificada del sistema. Un modelo de este tipo puede ser estático si el sistema es representado en un sólo periodo de tiempo y puede ser dinámico si la salida del periodo actual es afectada por las salidas de periodos anteriores. Este tipo de modelos son utilizados en casos donde es imposible o extremadamente costoso realizar experimentos sobre el sistema real; también son utilizados para análisis de escenarios. Una desventaja es la complejidad del sistema real que se desea modelar (Nakata et al., 2011; Van Beeck, 1999).
- **Multicriterio:** Estos modelos permiten incluir múltiples objetivos, que usualmente están en conflicto. Estos modelos se caracterizan por la optimización de un grupo de funciones objetivo sujetas a unas restricciones propias de cada sistema (Pohekar & Ramachandran, 2004). Además, permiten combinar información de tipo cuantitativa y cualitativa en el análisis y son relativamente nuevos entre los modelos energéticos (Nakata et al., 2011; Van Beeck, 1999).
- **Contables o de hoja de cálculo:** Estos modelos realizan un conteo numérico de variables mediante un análisis de entrada-salida. Estos modelos pueden ser utilizados para calcular el consumo total de energía y emisiones de carbono, usando hojas de cálculo,

las cuales son fáciles de usar y de modificar, y soportan información numérica sin la necesidad de programar (Neelis, Patel, Gielen, & Blok, 2005, p. 2).

### **3.1.1.Revisión de modelos de políticas de eficiencia energética en el sector residencial**

A continuación se presenta una revisión de diferentes modelos que se han desarrollado para analizar políticas de eficiencia energética en el sector residencial. La selección de estos modelos se hizo de acuerdo con el enfoque metodológico utilizado. En la Tabla 6, se presenta para cada uno de los modelos: el nombre, el enfoque analítico (top-down, bottom-up e híbridos), la metodología (optimización, simulación, contabilidad), la política implementada y la referencia bibliográfica.

**Tabla 6.** Revisión de acuerdo con la metodología de modelos de políticas de eficiencia energética residencial

<b>Nombre Modelo</b>	<b>Enfoque aplicado</b>	<b>Metodología</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Política(s) implementadas</b>	<b>Referencia</b>
CIMS	Híbrido	Simulación Elección discreta	Se estima un modelo de elección discreta acerca de la decisión entre renovación de vivienda estándar y eficiente y entre calefacción estándar y eficiente. Los parámetros de este modelo son luego utilizados en el modelo de simulación CIMS. Posteriormente, se hace un análisis de políticas.	Subsidios de 20% para la renovación de viviendas y de 9% para sistemas de calefacción de alta eficiencia	(Jaccard & Dennis, 2006)
CIMS	Híbrido	Simulación	Este modelo permite simular el impacto del impuesto al carbono y estándares de eficiencia energética en Estados Unidos en un horizonte de tiempo del 2010 al 2050.	Impuesto al carbono de €30/tCO <sub>2</sub> -eq con crecimiento del 5% anual hasta el 2050.  Estándares de eficiencia energética en equipos de uso residencial y	(Murphy & Jaccard, 2008)

**Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia**

				comercial, y códigos de construcción.	
CIMS	Híbrido	Simulación Elección discreta	Se estima un modelo de elección discreta acerca de la decisión entre calderas estándares y eficientes y cuyos parámetros son utilizados en el modelo de simulación CIMS. Posteriormente, se hace un análisis de políticas.	Impuesto a las emisiones de carbono de €50/tCO <sub>2</sub> -eq.  Difusión del conocimiento de la cogeneración.  Subsidios de capital a tecnologías de cogeneración.	(Rivers & Jaccard, 2005)
BUENAS (Bottom-up Energy Analysis System)	Bottom-up	Simulación	Este modelo permite evaluar el impacto potencial de diferentes estándares y etiquetas de eficiencia energética	Estándares y etiquetas de eficiencia energética para iluminación, electrodomésticos y equipos HVAC (heating, ventilation, air conditioning).	(McNeil, Letschert, & Rue du Can, 2008)
LEAP (Long-Range Energy Alternatives Planning System)	Bottom-up	Contable	Este modelo desarrolla cuatro escenarios, cada uno de los cuales comprende una o más políticas del Acta de Conservación de Energía de India.	Este modelo aplica la política de etiquetado eficiente para los electrodomésticos del hogar.	(Kadian, Dahiya, & Garg, 2007)
MARKAL (Market Allocation)	Bottom-up	Optimización	Este modelo encuentra la combinación de combustibles y tecnologías que minimizan el costo de energía del sistema, manteniendo la demanda satisfecha durante un determinado periodo de tiempo.	Aplica una tasa de descuento de 30 % para la compra de electrodomésticos eficientes.	(Mundaca, 2008)
NEMS (National Energy Modeling System)	Bottom-up	Simulación	Este modelo analiza los impactos de políticas con el fin de reducir la dependencia en importaciones de energía y en la reducción de emisiones en Estados Unidos.	Créditos a los impuestos para viviendas nuevas o existentes que instalen nuevos electrodomésticos eficientes. Mejora en los estándares de	(EIA, 2005)

**Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia**

				hornos, iluminación y ventilación.	
PAMS (Policy Analysis Modeling System)	Bottom-up	Contable	Este modelo permite calcular los costos y beneficios de programas de estándares y etiquetado eficiente en electrodomésticos (refrigeradores), mediante el uso de hojas de cálculo.	Descuento para la compra de un refrigerador eficiente de 11,6%	(Van Buskirk et al., 2007)
PAMS (Policy Analysis Modeling System)	Bottom-up	Contable	Este modelo hace un cálculo del ahorro de energía anual en tres escenarios diferentes mediante el uso de hojas de cálculo	Aplican Mínimos Estándares de Desempeño Energético (MEPS-Minimum Energy Performance Standars) y programa de etiquetado en refrigeradores domésticos	(Letschert, McNeil, Pavon, & Lutz, 2013)
Res-IRF (Residential module of Imaclim-R France)	Híbrido	Simulación	Este modelo evalúa el impacto de políticas para los sistemas de calefacción en el sector residencial en Francia, que permite determinar si las políticas propuestas contribuyen a cumplir las metas nacionales de reducción del consumo de energía y emisiones de carbono.	Subsidio del 30% a la inversión inicial del sistema de calefacción.  Tasa de interés de 0% para créditos de máximo de €30.000 por vivienda por un periodo de 10 años.  Códigos regulatorios de construcción de nuevas viviendas  Impuesto al carbón de €32/tCO <sub>2</sub> a partir del 2010 e incrementos del 5,8% hasta el 2030 y después de esta fecha del 4%.	(Giraudet, Guivarch, & Quirion, 2008)

Fuente: Elaboración propia con base en los modelos revisados por (Mundaca, Neij, Worrell, & McNeil, 2010)

A partir de los diez modelos revisados en la Tabla 6, es posible identificar que el 60% corresponden a modelos de simulación, el 30% son modelos contables y el 20% restante

son modelos de optimización. También fue posible identificar que dos de los modelos de simulación utilizaban modelos de elección discreta para determinar la elección entre opciones de eficiencia energética. Por ejemplo, en la investigación desarrollada por Rivers & Jaccard, (2005) integra un modelo de elección discreta con el modelo híbrido CIMS. Con el modelo de elección discreta se estiman parámetros: tasa de descuento, costos intangibles y heterogeneidad del mercado en la elección de calderas eficientes. Posteriormente, estos parámetros fueron utilizados en el modelo CIMS para simular las políticas de eficiencia energética.

La investigación que se desarrolla en esta tesis de maestría se enfoca en el análisis del comportamiento del consumo de electricidad residencial y en las emisiones carbono generadas por el uso continuo de electrodomésticos en los hogares Colombianos cuando se aplican políticas de eficiencia energética. Por este motivo, se hace necesario el uso de simulación como herramienta metodológica que permita estudiar el comportamiento del sistema, las interacciones, relaciones y realimentaciones entre sus elementos bajo políticas de eficiencia energética.

El comportamiento del consumo de energía residencial debido al uso de electrodomésticos y de las emisiones de carbono provenientes de dichos aparatos, son analizados mediante el uso de un modelo de simulación. Por tal motivo, es necesario hacer una revisión de los diferentes métodos de simulación existentes con el fin de determinar cuál es el más adecuado para el desarrollo del modelo de la presente investigación.

## **3.2. Modelos de simulación de sistemas energéticos**

La simulación es una metodología empleada cuando la complejidad del sistema que está siendo modelado requiere de técnicas que tengan en cuenta características propias del sistema que los modelos estáticos no pueden representar. La complejidad de un sistema se puede dar cuando este presenta riesgo e incertidumbre, comportamiento dinámico, mecanismos de realimentación (Kellner, Madachy, & Raffo, 1999) e información incompleta (Bagdasaryan, 2011). Uno de los objetivos de la simulación es ayudar en el entendimiento de los sistemas, en especial cuando se presentan comportamientos complejos como ciclos

de realimentación y retardos en el tiempo, ya que estos efectos presentan dificultad en su proyección en el tiempo.

En la literatura es posible encontrar diferentes clasificaciones de técnicas de simulación. Por ejemplo, Kellner et al. (1999) proponen simulación de eventos discretos, dinámica de sistemas y modelo de colas. Bagdasaryan (2011), propone las técnicas de simulación de eventos discretos, dinámica de sistemas y autómatas celulares. Por su parte, (Badham, 2010) propone unas técnicas de modelamiento entre las que se encuentran modelos cualitativos agregados (modelos de lazos causales), modelos cuantitativos agregados (modelos de dinámica de sistemas, algoritmos evolucionarios, redes bayesianas) y modelos individuales (autómatas celulares, microsimulación, simulación basada en agentes, simulación de eventos discretos).

A continuación se presenta una descripción de algunas de las técnicas de simulación encontradas en la literatura:

**Simulación basada en agentes:** es un método de simulación para modelar sistemas complejos compuestos por 'agentes' autónomos que interactúan entre sí, influenciando el comportamiento de los otros, aprendiendo de sus experiencias y adaptando su comportamiento para una mejor adaptación al ambiente. Las aplicaciones de este método están en un gran rango de áreas y disciplinas, tales como: cadenas de suministro, mercado de acciones, predicción de propagación de epidemias, entender el comportamiento del consumidor, y muchos otros (Macal & North, 2010).

**Dinámica de sistemas:** Es un método para estudiar y entender el comportamiento y la estructura de un sistema complejo en el tiempo. Dinámica de sistemas representa un enfoque interdisciplinar basado en la teoría de realimentación de control, y se encarga de manejar procesos de realimentación (lazos) y retardos en el tiempo que influyen el sistema. Estos lazos se representan mediante diagramas de lazo que incluyen niveles, flujos e información (Eusgeld, Henzi, & Kröger, 2008).

**Simulación de eventos discretos:** Es un método que permite modelar utilizando técnicas computacionales y brinda un enfoque reflexivo e intuitivo para la representación de sistemas complejos. Este método se caracteriza por tener la habilidad de representar

comportamientos complejos y su interacción con individuos, poblaciones y sus ambientes. La simulación de eventos discretos fue desarrollada en 1960 en el área de ingeniería industrial y de investigación de operaciones para el análisis de procesos industriales (Karnon et al., 2012).

**Autómatas celulares:** Este método permite representar sistemas físicos en los cuales el tiempo y el espacio son discreto, y las cantidades físicas pueden tomar sólo una cantidad finita de valores. El concepto de autómata celular fue desarrollado a finales de 1940, y durante los siguientes cincuenta años, este método ha sido utilizado en diferentes áreas (Chopard & Droz, 2000).

### **3.2.1.Revisión de estudios que aplican la metodología de simulación en el sector residencial**

A continuación, en la Tabla 7 se presenta una revisión de casos de estudio donde aplican diferentes métodos para simular políticas de eficiencia energética en el sector residencial. Para cada estudio se presenta el título, método de simulación, el objetivo de la investigación la referencia bibliográfica.

**Tabla 7.** Modelos de eficiencia energética residencial utilizando simulación

<b>Título</b>	<b>Método de simulación</b>	<b>Objetivo de la investigación</b>	<b>Autor(es)</b>
Residential Energy Efficiency Policy in Latvia: A System Dynamics Approach	Dinámica de sistemas	Se propone un modelo de dinámica de sistemas que permite simular y evaluar políticas de eficiencia energética incluidas y no incluidas en el Primer plan de acción de eficiencia energética de Lituania.	(Blumberg a, Zogla, Davidsen, & Moxnes, 2011)
Increasing innovation in home energy efficiency: Monte Carlo simulation of Potential improvements	Montecarlo	Desarrolla un modelo de simulación Monte Carlo de diferentes mejoras de eficiencia energética que permiten minimizar el tiempo de recuperación	(Soratana & Marriott, 2010)

**Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia**

		económica de la inversión de dichas medidas por los usuarios residenciales	
Energy efficiency in New Zealand's residential sector: A systemic analysis	Dinámica de sistemas	Analiza de forma sistémica la compleja situación de eficiencia energética residencial en Nueva Zelanda mediante el desarrollo de un diagrama causal y planteamiento de iniciativas para obtener cambios de comportamiento del sistema.	(Elias, 2008)
An Analysis of Residential Energy Intensity in Iran: A System Dynamics Approach	Dinámica de sistemas	Desarrolla un modelo de dinámica de sistemas que permita realizar cambios en la intensidad energética del sector residencial de irán.	(Jamshidi, 2008)
System Dynamics Based Research on Energy Efficient Residence Market	Dinámica de sistemas	Establece un modelo de dinámica de sistemas del sector residencial que integra los sectores de vivienda, al consumidor y el distribuidor.	(Li & Dai, 2008)
Racionalidad limitada del consumidor en mercados energéticos desregulados y la función del comercializador y el Gobierno.	Dinámica de sistemas		(Franco, 2002)
Un modelo nacional desagregado para la formulación de políticas para el uso racional de energía	Dinámica de sistemas	Desarrolla un modelo utilizando dinámica de sistemas que sirve como herramienta para evaluar políticas energéticas en el sector residencial rural y urbano de Colombia.	(Franco, 1996)
System Dynamics Modeling for Residential Energy Efficiency Analysis and Management	Dinámica de sistemas	Desarrolla un modelo de dinámica de sistemas que simula la sustitución de electrodomésticos y la construcción de escenarios y el análisis de penetración de tecnologías alternativas, crecimiento del consumo de electricidad, crecimiento en el consumo de gas y políticas de precios.	(Dyner, Smith, & Peña, 1995)

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de la dinámica en el largo plazo se plantea un modelo que permite simular el comportamiento en el tiempo del consumo de energía residencial debido al uso de refrigeradores domésticos y las emisiones de carbono provenientes del uso de éstos. Por tal motivo, se plantea la técnica de dinámica de sistemas, la cual permite modelar la dinámica de sustitución de electrodomésticos con diferentes edades y tipos de eficiencia energética (sin eficiencia, con eficiencia media y con eficiencia alta), ya que cada uno de estos electrodomésticos presenta características diferentes de consumo energético y emisiones.

Algunos modelos de simulación suelen tener módulos que permiten representar las elecciones individuales de los consumidores mediante el uso de modelos econométricos de elección discreta. En la Tabla 6, fue posible identificar tres investigaciones desarrolladas por Rivers & Jaccard (2005), Jaccard & Dennis (2006), Murphy & Jaccard (2011) que integran estos dos modelos metodológicos: simulación y econometría.

### **3.3. Modelos de elección discreta**

La elección se considera como el proceso en que un consumidor escoge entre bienes que se consideran discretos y que forman parte de un conjunto de opciones de interés (Ortúzar S., 2000). Estos consumidores se consideran como seres racionales en el sentido de que toman decisiones que maximizan la utilidad percibida (McFadden, 1980). Esta utilidad se deriva de los atributos o características de los bienes, las cuales son ponderadas por la importancia relativa de cada una de ellas en cuanto a contribuir en la utilidad del bien en particular (Ortúzar S., 2000).

Entre los modelos de elección discreta encontramos los modelos de elección de clases latentes y los modelos probabilísticos de elección, entre los que se encuentran: el probit multinomial, el logit híbrido y los no-paramétricos (McFadden et al., 1997). De acuerdo con Train (2002), considera que el modelo de elección discreta más utilizado y fácil de aplicar es el logit, en el cual según la cantidad de alternativas se tienen dos tipos: el modelo logit binario que sólo toma en cuenta dos alternativas, y el modelo logit multinomial que tiene en cuenta más de dos alternativas.

En los modelos de elección discreta un individuo  $q$  tiene elegir una alternativa  $i$  entre un conjunto de  $j$  alternativas posibles. Cada alternativa  $i$  tiene asociada una utilidad  $U_{iq}$  para el individuo  $q$ . Esta utilidad  $U_{iq}$  que se desea maximizar se presenta en la ecuación (1) y está representada por dos componentes: una componente determinística  $V_{iq}$ , que es función de los atributos o características medidas (observadas) de las  $i$  alternativas y otra componente aleatoria  $\varepsilon_{iq}$ , que refleja las características del individuo  $q$ , además de que tiene en cuenta errores de medición y observación del modelador (Ortúzar S., 2000).

$$U_{iq} = V_{iq} + \varepsilon_{iq} \quad (1)$$

La probabilidad  $P_{iq}$  de que un individuo  $q$  seleccione una alternativa  $i$  de un grupo de  $j$  alternativas, está dada por la expresión que se presenta en la ecuación (2),

$$P_{iq} = P(U_{iq} > U_{jq}; \forall j (\neq i) \in J)$$
$$P_{iq} = P(\varepsilon_{jq} < \varepsilon_{iq} + V_{iq} - V_{jq}; \forall j (\neq i) \in J) \quad (2)$$

Convertir la teoría de utilidad aleatoria en un modelo de elección requiere de un supuesto en la distribución conjunta del vector de términos de error aleatorio. Si los términos de error aleatorio son independientes e idénticamente distribuidos entre las alternativas, es posible obtener el modelo logit multinomial (Shen & Saijo, 2009). En este modelo, la probabilidad de elección  $P_{iq}$  se expresa como se muestra en la ecuación (3):

$$P_{iq} = \frac{e^{\mu * V_{iq}}}{\sum_{j=1}^J e^{\mu * V_{jq}}} \quad (3)$$

Donde  $\mu$  representa un parámetro que determina la escala de la utilidad, que usualmente esta normalizado a 1 en el modelo logit multinomial. Además, asumiendo que la componente determinística  $V_{iq}$  pueda representarse de forma lineal como se muestra en la ecuación (4):

$$V_{iq} = \beta * X_{iq} \quad (4)$$

Donde  $\beta$  representa un vector de parámetros asociados a la matriz de características  $X_{iq}$  de las alternativas. Por tanto, la probabilidad de elección  $P_{iq}$  puede reescribirse como se presenta en (5):

$$P_{iq} = \frac{e^{\mu * \beta * X_{iq}}}{\sum_{j=1}^J e^{\mu * \beta * X_{jq}}} \quad (5)$$

### **3.3.1. Revisión de estudios aplicados a la elección de electrodomésticos con eficiencia energética**

Los modelos de elección discreta se han aplicado para conocer el efecto en los consumidores de productos con eficiencia energética, especialmente en aquellos que presentan este tipo de etiquetado. A continuación se presentan una descripción de diferentes estudios encontrados en la revisión de literatura dónde se aplican modelos de elección discreta a la elección de electrodomésticos con eficiencia energética.

Shen & Saijo, (2009) aplican una encuesta hipotética para desarrollar un experimento de elección (Choice Experiment CE) en la ciudad de Shanghai, China. Este experimento tiene el fin de determinar si el etiquetado de eficiencia energética influye en la elección del consumidor al momento de comprar refrigeradores domésticos y equipos de aire acondicionado. Al consumidor se le dieron a escoger entre cuatro posibles alternativas: producto A nuevo de marca extranjera, producto B usado de marca extranjera, producto C nuevo de marca nacional y producto D usado de marca nacional. Con respecto a los atributos del producto, se tomaron en cuenta características asociadas a la etiqueta de eficiencia energética tal como su presencia o ausencia y características del producto mismo como el precio, el consumo de energía eléctrica, en el caso de los aires acondicionado el espacio de enfriamiento, función purificadora de aire, y en el caso de los refrigeradores la capacidad de enfriamiento y la función de reducción de ruido. Estimaron parámetros asociados a cada característica tanto para equipos de aire acondicionado como para refrigeradores utilizando el modelo logit mixto, el modelo logit multinomial y el modelo de clase latente.

Por su parte (Mills & Schleich (2010), realizaron una encuesta a más de 20.000 hogares en Alemania para determinar la elección de compra de un electrodoméstico de eficiencia

energética tipo A. Los electrodomésticos tomados en cuenta fueron: refrigeradores, congeladores, combinación de refrigerador y congelador, lavaplatos y lavadoras. En este estudio se tuvieron en cuenta atributos del hogar y del consumidor, los cuales fueron estimados mediante un modelo de clases latentes para cada uno de los electrodomésticos mencionados anteriormente. Posteriormente, se calcularon las probabilidades de seleccionar un electrodoméstico de eficiencia energética tipo A, teniendo en cuenta tanto consumidores que conocen el programa de etiquetado eficiente, como los que no lo conocen.

Michelsen & Madlener (2012), aplican un modelo de elección discreta logit multinomial para determinar la probabilidad de que los consumidores residenciales elijan un sistema de calefacción residencial entre un grupo de cuatro alternativas, teniendo en cuenta características socio-demográficas como ingreso, educación y edad del consumidor y características espaciales y de la vivienda.

Vaage (2000), utiliza un modelo de elección discreta en la elección de sistemas de calefacción entre cuatro alternativas: electricidad, electricidad con leña, electricidad con aceite y la combinación de electricidad, aceite y leña. Se incluyó en el modelo de elección características de la vivienda que se consideran influyentes en la elección del electrodoméstico y posteriormente se estimaron parámetros para las cuatro alternativas.

Otros modelos de elección discreta aplicados a decisiones en el sector residencial corresponden a (Garzón, 2010), quien utiliza un modelo integrado de simulación y elección discreta de tipo logit binario para analizar las decisiones de movilidad residencial en el Valle de Aburrá, Colombia. Baena (2011), aplica un modelo logit multinomial para determinar la probabilidad en la elección de un vehículo entre diferentes alternativas como vehículos eléctricos, híbridos, de combustión y celdas de combustible.

A partir de esta revisión de literatura de modelos de elección discreta, se tomó en cuenta que para el análisis de la decisión individual de sustitución de electrodomésticos en los hogares Colombianos, en el caso aplicado a los refrigeradores domésticos, es necesario utilizar un modelo basado en la teoría de utilidad aleatoria para elección discreta. A partir de este modelo, se pretende determinar la decisión de elegir entre dos opciones: la primera

es quedarse con el refrigerador actual y la segunda es sustituirlo por uno nuevo y eficiente energéticamente. Esta elección se toma utilizando los atributos del refrigerador que se consideran influyentes en la decisión del individuo y que se revisaron el capítulo 2. Por tanto, el modelo a utilizar es un modelo logit binario.

A partir de esta revisión fue posible identificar que existen diferentes tipos de modelos energéticos y clasificaciones de acuerdo con el objetivo, el alcance metodológico y las características propias del sistema. La metodología planteada para el desarrollo del modelo se compone de la integración de dos tipos de modelos. El primero, corresponde al análisis en el sistema de los efectos en el consumo de energía y emisiones de carbono debido a la implementación de políticas de eficiencia energética mediante un modelo de simulación de dinámica de sistemas y el segundo corresponde al análisis de la decisión de los consumidores residenciales de sustituir o no el refrigerador por otro eficiente energéticamente mediante un modelo de elección discreta.

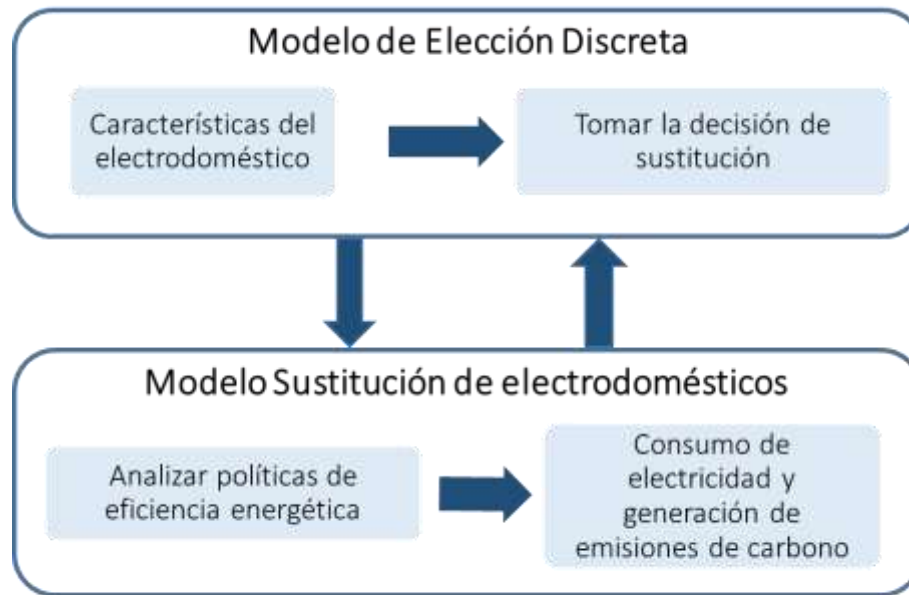
## **4. Modelado de la sustitución de electrodomésticos en los hogares colombianos. Caso de aplicación: refrigeradores**

A partir de la revisión de modelos y metodología realizada en el capítulo anterior, se concluye que un modelo de simulación en Dinámica de Sistemas es adecuado para analizar la sustitución de refrigeradores domésticos en Colombia y evaluar políticas que mejoren la eficiencia energética del sector residencial. En este capítulo, se presenta el desarrollo de este modelo y la correspondiente validación del mismo. Este modelo se aplica al caso particular de los refrigeradores domésticos o los más comúnmente llamados en nuestro país como neveras.

### **4.1. Estructura general del modelo de simulación**

La estructura general del modelo desarrollado es presentada en la Figura 8. Este modelo de simulación está compuesto por dos partes: La primera parte de la estructura corresponde a un modelo de elección discreta la cual permite determinar la probabilidad de elección de sustituir o no el electrodoméstico actual por uno nuevo y eficiente energéticamente. Esta elección se realiza teniendo en cuenta las características del electrodoméstico que se revisaron en el capítulo 2 y que se consideran más influyentes en la toma de la decisión. La segunda parte de la estructura, corresponde a un modelo de análisis de la dinámica de sustitución, la cual permite aplicar diferentes políticas de eficiencia energética en el sector residencial y analizar su impacto en el consumo de electricidad y en las emisiones de carbono.

Figura 8. Diagrama de la estructura del modelo



Fuente: Elaboración propia

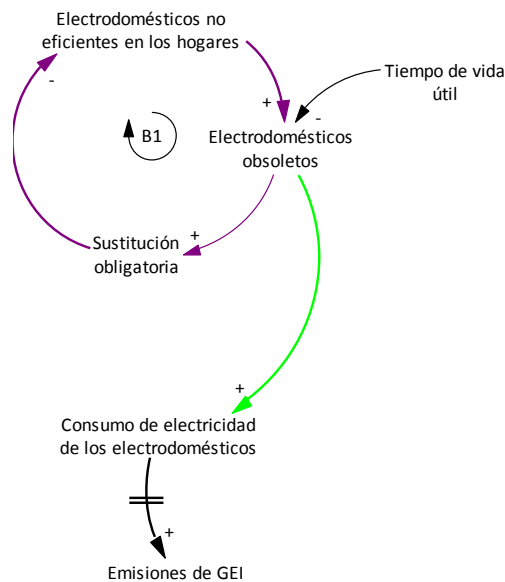
## 4.2. Hipótesis Dinámica

En esta sección se presentan las relaciones causales desarrolladas para explicar la sustitución de los aparatos eléctricos en el sector residencial en Colombia mediante el diagrama causal de la Figura 9, Este diagrama está compuesto por 4 ciclos de realimentación, de los cuales 2 son ciclos de balance y 2 son ciclos de refuerzo.



electrodomésticos eficientes. Este ciclo se cierra debido a que al existir mayor cantidad de electrodomésticos ineficientes en los hogares, los cuales se consideran que tienen cierto tiempo de uso, van a existir mayor cantidad de electrodomésticos obsoletos que tendrán que ser sustituidos en algún momento de su vida. La cantidad de electrodomésticos obsoletos afecta de forma directa el consumo de electricidad, tendiéndose en cuenta que los electrodomésticos que están en disposición de cumplir su tiempo de vida útil son aparatos ineficientes, van a generar un mayor consumo de electricidad y por ende mayor generación de emisiones a la atmósfera.

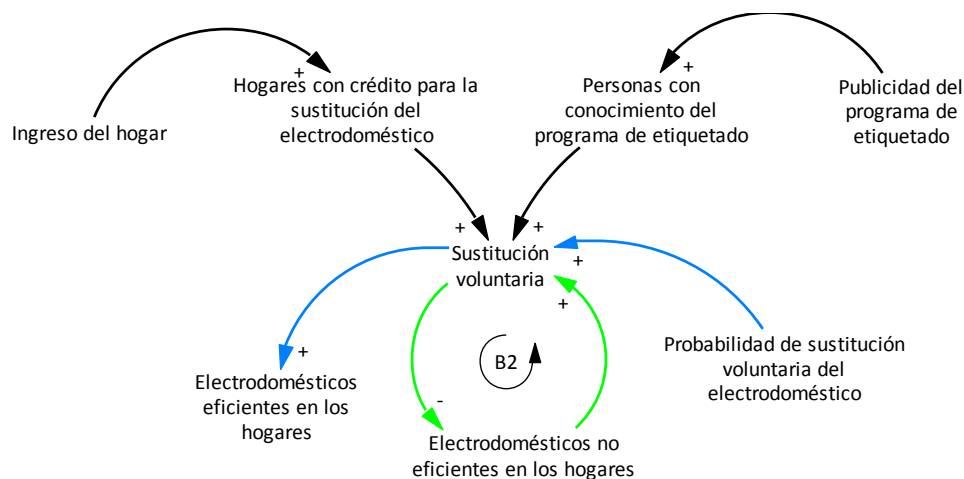
**Figura 10.** Dinámica de la sustitución de electrodomésticos por obsolescencia



**Ciclo de Balance 2 (B2): Sustitución de electrodomésticos de forma voluntaria:** Este ciclo se muestra en la Figura 11 y determina la sustitución de forma voluntaria de los electrodomésticos, lo que implica que el electrodoméstico es reemplazado antes de que cumpla el tiempo de vida útil. La sustitución voluntaria se incrementa debido al aumento de cuatro factores: electrodomésticos no eficientes en los hogares, la probabilidad de sustitución voluntaria del electrodoméstico, el conocimiento del programa de etiquetado y los créditos de consumo para la sustitución voluntaria.

La influencia de los hogares con crédito está determinada por el ingreso del hogar, lo que implica que a mayor ingreso del hogar, mayor va a ser la cantidad de hogares con crédito para la sustitución voluntaria. Con respecto a la cantidad de personas con conocimiento del programa de etiquetado, ésta variable va a depender de la publicidad que tenga dicho programa. Por tanto, entre mayor sea la publicidad dada al programa de etiquetado, mayor será la cantidad de personas que tengan conocimiento de la existencia del mismo. Por otro lado, entre mayor sea la sustitución voluntaria, mayor será la cantidad de electrodomésticos eficientes en los hogares y menor la cantidad de electrodomésticos no eficientes en los hogares.

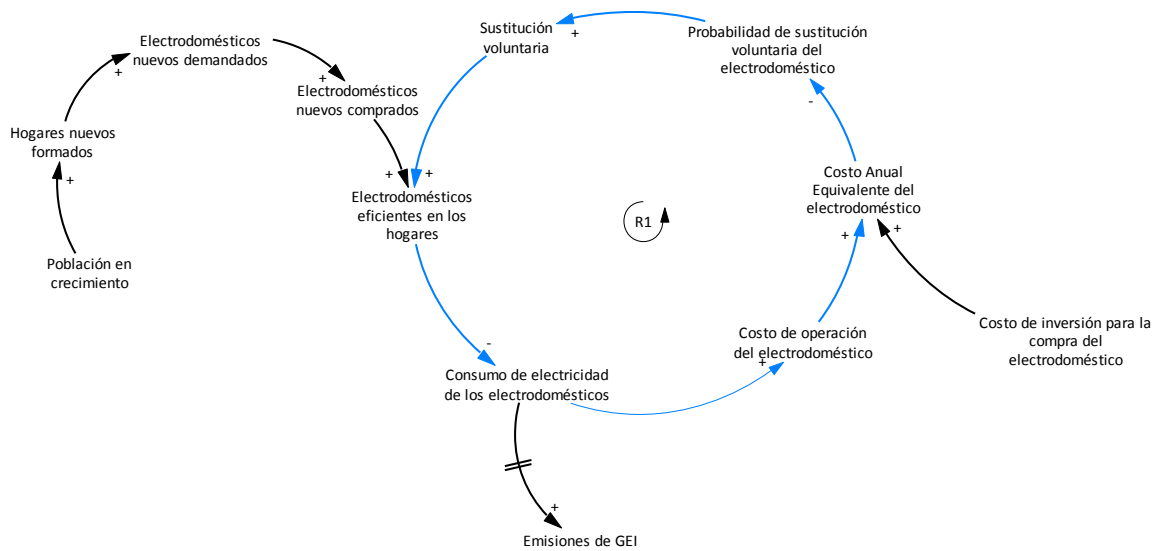
**Figura 11.** Dinámica de la sustitución voluntaria de electrodomésticos



**Ciclo de Refuerzo 1 (R1): Electrodomésticos nuevos comprados, consumo de electricidad, generación de emisiones de carbono y probabilidad de sustitución:** Este ciclo se presenta en la Figura 12 donde se muestra a medida que aumentan los costos de operación y de inversión del electrodoméstico nuevo, menor es la probabilidad de sustitución voluntaria y por tanto, se tendrán menos electrodomésticos sustituidos en los hogares. Los electrodomésticos eficientes en los hogares también se ven afectados por la cantidad de electrodomésticos nuevos comprados, ya que los electrodomésticos nuevos que están disponibles para la compra son aparatos con alta eficiencia energética. Por tanto, se tiene que a más población, se van a formar nuevos hogares y por lo que se van a

demandar nuevos electrodomésticos y esto va a llevar a la compra de nuevos aparatos eléctricos. Para continuar con el ciclo, se tiene que a mayor cantidad de electrodomésticos eficientes en los hogares, menor será el consumo de electricidad por parte de éstos y por consiguiente habrá menor generación de emisiones de carbono a la atmósfera. El consumo de energía también afecta de forma directa el costo de operación de los electrodomésticos, ya que entre mayor sea el consumo de electricidad, mayor será el costo de operación del electrodoméstico, cerrándose de esta forma el ciclo de refuerzo.

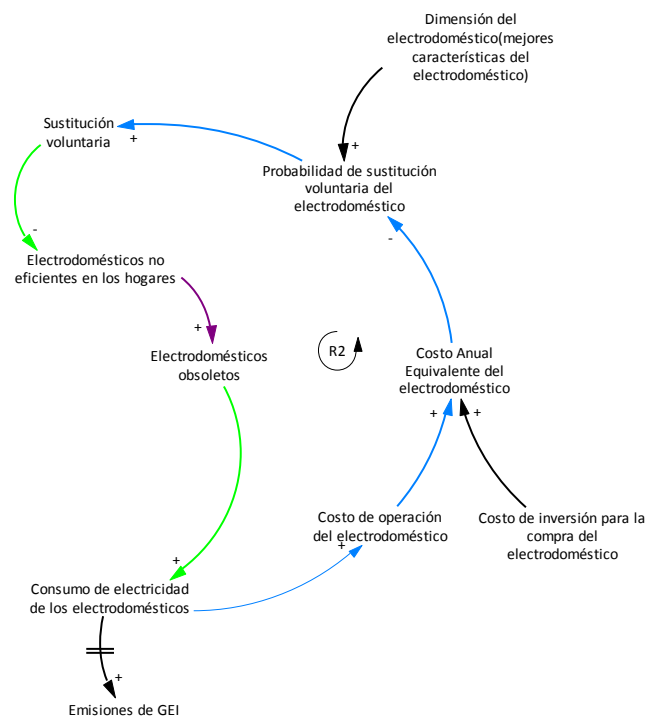
**Figura 12.** Efecto de los electrodomésticos nuevos comprados



**Ciclo de Refuerzo 2 (R2): Probabilidad de sustitución, sustitución voluntaria y electrodomésticos no eficientes:** Este ciclo se presenta en la Figura 13 donde se muestra que la probabilidad de sustitución voluntaria se encuentra afectada por dos variables: el costo anual equivalente y las dimensiones del electrodoméstico. Estas dos variables representan las características principales que el consumidor tiene en cuenta a la hora de tomar la elección de sustitución. Entre mayores sean las dimensiones del electrodoméstico nuevo, mayor será la probabilidad de sustitución, y entre mayores sean los Costos Anuales Equivalentes menor será la probabilidad de sustitución. Incrementos en la probabilidad de sustitución voluntaria, hace que se incremente la sustitución voluntaria y ésta a su vez permite hayan menos electrodomésticos no eficientes en los hogares. Si se tienen mayores

cantidades de electrodomésticos obsoletos en los hogares, entonces el consumo de electricidad será mayor generando un mayor costo de operación por parte de éstos.

**Figura 13.** Efecto de la probabilidad de sustitución



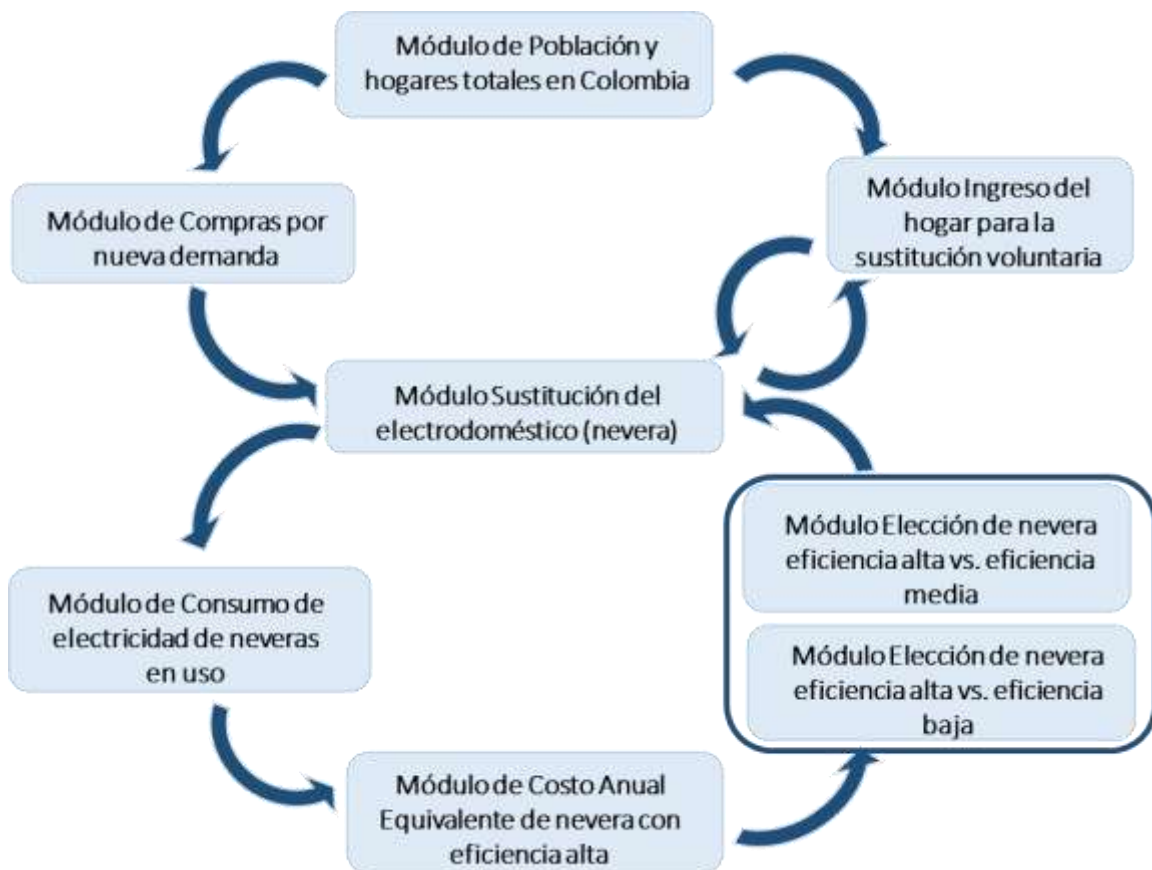
### 4.3. Formulación del modelo

La hipótesis dinámica representada en la Figura 9, puede ser representada a través de un diagrama de flujos y niveles elaborado bajo la herramienta computacional PowerSim Studio 8. Este modelo de simulación presenta un horizonte de tiempo de 20 años (2012-2032), con un tiempo de paso de 1 (uno) año y está compuesto por ocho módulos conectados unos con otros. El diagrama de la Figura 14 muestra cuáles y como están unidos los módulos del modelo de simulación desarrollado.

Los módulos de elección de nevera de eficiencia alta vs. Eficiencia media y elección de nevera de eficiencia alta vs. Eficiencia baja fueron modelados utilizando un modelo de elección discreta de tipo logit binario, para lo cual fue necesario aplicar la ecuación (5) de

la sección 3.3 del capítulo 3. Esta ecuación permite determinar la probabilidad de elección en cada uno de los módulos. De acuerdo con la revisión de características de los electrodomésticos realizada en la sección 2.6 del capítulo 2, es posible asumir que el costo del electrodoméstico, el costo de operación, consumo de energía, emisiones de carbono y la capacidad de almacenamiento son las más tenidas en cuenta a la hora de realizar la elección de sustitución. Debido a que el costo de operación y las emisiones de carbono dependen del consumo de electricidad, se seleccionan como atributos del modelo el costo del electrodoméstico, el costo de operación y la capacidad de almacenamiento.

**Figura 14.** Módulos representativos del modelo de simulación



Fuente: Elaboración propia.

A continuación se describen las principales ecuaciones de los módulos más representativos del modelo de simulación:

**Módulo sustitución de electrodomésticos**

En este módulo se presenta el nivel de Neveras en uso (*Nuso*), el cual corresponde a las neveras que se están siendo usadas en los hogares y que presentan tres tipos de eficiencia energética: alta, media y baja. En esta investigación, se ha establecido como supuesto que la eficiencia energética de la nevera varía según el año de cambio de tecnología de fabricación. Para el año de 2012, los valores iniciales del nivel *Nuso* son presentados en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Supuestos del nivel Neveras en uso (*Nuso*)

<b>Neveras en uso</b>	<b>Edad</b>	<b>Unidades en uso (2012)</b>
Eficiencia alta	Menores de 2 años (Fabricadas desde 2010)	876,543 (Blaser, 2009)
Eficiencia media	Entre 15-2 años (Fabricadas desde 1998 hasta 2009)	7,787,008(Blaser, 2009)
Eficiencia baja	Mayores de 15 años (Fabricadas hasta 1997)	1,093,458 (Blaser, 2009)

Fuente: Elaboración propia.

Se hace el supuesto de que las neveras de eficiencia media y baja corresponden a modelos fabricados antes de 2010, fecha en la que se estableció el estándar y etiquetado eficiente y por lo tanto, a partir de este momento se empezaron a fabricar y a importar neveras sólo con eficiencia alta (neveras entre 0 y 3 años). Se asume que las neveras de eficiencia baja corresponden a neveras fabricadas hasta 1997 (neveras mayores de 15 años), fecha en la que se inició la prohibición de fabricación y comercialización de neveras con SAO en Colombia y que las neveras de eficiencia media son las fabricadas y comercializadas desde 1998 hasta 2009 (neveras entre 15 y 3 años). Estos dos tipos de neveras disminuyen cuando los consumidores deciden sustituir y adquirir una nevera de eficiencia alta. En la Tabla 9 se presentan las ecuaciones del nivel y sus respectivas ecuaciones de flujos de entrada y salida.

**Tabla 9.** Ecuaciones que definen los niveles en el módulo sustitución del electrodoméstico

Formulación y descripción	Unidades
$\frac{dNuso_i}{dt} = Nuso_{i0} \int_0^t Ind_i + Iso_i + Isv_i - Eso_i - Esv_i$	neveras/año
<p>Los flujos de entrada: ingresos por nueva demanda (<math>Ind_i</math>), ingresos por sustitución obligatoria (<math>Iso_i</math>) e ingresos por sustitución voluntaria (<math>Isv_i</math>) incrementan la cantidad de neveras de eficiencia alta en el mercado. Mientras que los flujos de salida egresos por sustitución obligatoria (<math>Eso_i</math>) y egresos por sustitución voluntaria (<math>Esv_i</math>) reducen la cantidad de neveras de eficiencia media y baja.</p>	
$Ind_i = \begin{cases} Cnd & i = 1 \\ 0 & i = 2,3 \end{cases}$	neveras /año
<p>Los ingresos por nueva demanda (<math>Ind_i</math>) se asumen que sólo ocurren para las neveras de eficiencia alta (<math>i = 1</math>), y son iguales a las compras de neveras por nueva demanda <math>Cnd</math>. Estas son una función de la demanda anual potencial de neveras por nuevos hogares.</p>	
$Iso_i = \begin{cases} Nsch & i = 1 \\ 0 & i = 2,3 \end{cases}$	neveras/año
<p>Los ingresos por sustitución obligatoria (<math>Iso_i</math>) se asumen que sólo ocurren para las neveras de eficiencia alta (<math>i = 1</math>), y son iguales a las neveras sustituidas por chatarrización (<math>Nsch</math>). Estas son la suma de los egresos por sustitución obligatoria de las neveras con eficiencia media (<math>Eso_2</math>) y baja (<math>Eso_3</math>)</p>	
$Isv_i = \begin{cases} Esv_2 + Esv_3 & i = 1 \\ 0 & i = 2,3 \end{cases}$	neveras /año
<p>Los ingresos por sustitución voluntaria (<math>Isv_i</math>) se asumen que sólo ocurren para las neveras de eficiencia alta (<math>i = 1</math>), y son iguales a la suma de los egresos por sustitución voluntaria de las neveras con eficiencia media (<math>Esv_2</math>) y baja (<math>Esv_3</math>)</p>	
$Eso_i = \begin{cases} 0 & i = 1 \\ Nuso_i/tvu_i & i = 2,3 \end{cases}$	neveras /año
<p>Los egresos por sustitución obligatoria (<math>Eso_i</math>) se calculan para las neveras con eficiencia media y baja (<math>i = 2,3</math>) y son una función de las neveras en uso de cada tipo en el mercado (<math>Nuso_i</math>) retardadas por el tiempo de vida útil de la nevera (<math>tvu_i</math>)</p>	
$Esv_i = \begin{cases} 0 & i = 1 \\ pNps_i + (q_i - p_i)Nsv_i - \frac{q_i}{Nps_i Nsv_i^2} & i = 2,3 \end{cases}$	neveras /año

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

Formulación y descripción	Unidades
<p>Los egresos por sustitución voluntaria (<math>Esv_i</math>) se definen para las neveras con eficiencia media y baja (<math>i = 2,3</math>) y son calculados a partir de un modelo de difusión de Bass (Bass, 2004a, 2004b). En este modelo, las neveras potenciales a ser sustituidas de cada tecnología (<math>Nps_i</math>) se van sustituyendo voluntariamente siguiendo un proceso de contagio en el tiempo afectado por influencias internas (<math>p</math>) e influencias externas (<math>q</math>) y pasan a ser neveras sustituidas voluntariamente (<math>Nsv_i</math>)</p>	
$\frac{dNsv_i}{dt} = Esv_i$	neveras/año
<p>Las neveras sustituidas voluntariamente (<math>Nsv_i</math>) aumentan en el tiempo según el flujo de entrada egresos por sustitución voluntaria (<math>Esv_i</math>)</p>	

Fuente: Elaboración propia

### Módulo población y hogares totales Colombia

La Población total en Colombia ( $PtC$ ) en cada periodo de tiempo se determina a partir del flujo de entrada de crecimiento de población ( $Cp$ ). Este flujo de crecimiento de la población afecta el flujo de crecimiento de los hogares ( $Chn$ ), permitiendo determinar el nivel de Hogares totales Colombia ( $HtC$ ). En la Tabla 10 se encuentran las ecuaciones de niveles y flujos correspondientes a este módulo y su descripción.

**Tabla 10.** Ecuaciones que definen los niveles en el módulo población y hogares

Formulación y descripción	Unidades
$\frac{dPtC}{dt} = Cp$	personas/año
<p>La población total de Colombia (<math>PtC</math>) se incrementa con el flujo de entrada crecimiento de la población (<math>Cp</math>). Este flujo fue definido a partir de una tasa media anual de crecimiento.</p>	
$\frac{dHtC}{dt} = Chn$	hogares /año
<p>Los hogares totales de Colombia (<math>HtC</math>) aumentan con el flujo de entrada crecimiento hogares (hogares nuevos cada año <math>Chn</math>). Este flujo se calculó dividiendo el crecimiento de la población (<math>Cp</math>) entre el número de habitantes en cada hogar.</p>	

Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo B se presenta el diagrama de flujos y niveles desarrollado en PowerSim Studio 8 para cada uno de los módulos presentados la Figura 14. En el Anexo C se presentan las ecuaciones usadas para modelar todas las variables y parámetros del modelo de simulación.

#### **4.4. Validación del modelo de simulación**

La validación constituye un paso muy importante en cualquier metodología basada en modelos de simulación, en especial en modelos de dinámica de sistemas (Barlas, 1994). Los aportes de la validación consisten en decidir si el modelo es aceptable para el propósito que ha sido desarrollado y si el modelo reproduce el comportamiento real para dicho propósito (Qudrat-Ullah, 2011) .

En la literatura se han encontrado diferentes clasificaciones de pruebas de validación. De acuerdo con Barlas (1996), existen dos categorías principales de pruebas de validación: pruebas de la estructura (pruebas directas a la estructura y pruebas de la estructura orientadas al comportamiento) y pruebas de comportamiento. Forrester & Senge (1980), plantean pruebas de verificación de la estructura, pruebas de verificación de comportamiento y pruebas de implicación de políticas. Sterman (2000), propone pruebas de validación tanto de la estructura como del comportamiento sin hacer una agrupación clasificatoria de ellas. Qudrat-Ullah (2011), propone dos clasificaciones de pruebas para la validación del modelo: de estructura y de comportamiento.

A continuación se presentan las pruebas de validación que se aplicaron al modelo propuesto en esta investigación.

##### **4.4.1. Pruebas directas a la estructura**

###### **Prueba de consistencia dimensional:**

Esta es una de las primeras pruebas que se debe realizar. Consiste en especificar las unidades de medida de cada una de las variables (flujos, niveles, auxiliares y parámetros) involucradas en el modelo a medida que se va construyendo (J. D. Sterman, 2000).

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

---

Para realizar esta prueba se necesita que para cada ecuación matemática del modelo evalúe si las unidades de medida de todas las variables y constantes involucradas tengan consistencia dimensional, es decir, si tenemos una entrada (manzanas)=salida (manzanas) (Qudrat-Ullah, 2005). Además, el software utilizado para el desarrollo del modelo de simulación, PowerSim Studio 8, exige que exista consistencia en las dimensiones para poder ejecutar la simulación.

### Prueba de verificación de parámetros

Esta prueba indica que se deben comparar los parámetros del modelo con el conocimiento que se tiene del sistema real con el fin de determinar si dichos parámetros corresponden de forma conceptual y numérica con la realidad. La confirmación conceptual significa que los parámetros del modelo se deben poder identificar con elementos de la estructura del sistema real. La correspondencia numérica significa determinar si el valor dado para el parámetro cae dentro de un rango de valores posibles del parámetro real, es decir, que el valor numérico estimado sea lo suficientemente exacto (Forrester & Senge, 1980).

Los parámetros usados en el modelo fueron estimados u obtenidos a partir de diferentes fuentes tanto académicas como gubernamentales. En la Tabla 11 se presenta el nombre de cada uno de los parámetros usados, el valor, el significado y la fuente a partir de la cual fue obtenido cada uno de ellos.

**Tabla 11.** Descripción de los parámetros del modelo

Nombre	Valores	Significado	Fuente
% hogares con energía eléctrica	0.936	Porcentaje de hogares colombianos con energía eléctrica	(DANE, 2010)
Beta_precio	-0.0002	Factor de importancia relativa del precio de la nevera	(Shen & Saijo, 2009)
Beta_volumen	0.0037	Factor de importancia relativa del volumen de la nevera	(Shen & Saijo, 2009)
	Eficiencia alta: 550		

**Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia**

<b>Nombre</b>	<b>Valores</b>	<b>Significado</b>	<b>Fuente</b>
Consumo de electricidad anual por nevera	Eficiencia media: 1020	Consumo promedio de electricidad anual de cada tipo de nevera (kWh/yr)	(Universidad Nacional de Colombia & UPME, 2006) <sup>a</sup>  Los autores <sup>a</sup>
	Eficiencia baja: 1380		
Costo inversión	1135419	Precio de una nevera de tamaño medio (\$)	Los autores <sup>b</sup>
Crecimiento por año	2012-2014: 0.0137	Proyección de la tasa promedio anual de crecimiento de la población colombiana	(UNFPA & CEPAL, 2002)
	2015-2019: 0.0124		
	2020-2024: 0.0110		
	2025-2029: 0.0096		
	2030-2032: 0.0081		
Factor de emisión de CO <sub>2</sub>	0.2849	Cálculo del factor de emisión de CO <sub>2</sub> del sistema eléctrico interconectado colombiano (KgCO <sub>2</sub> /kWh)	(Sanjuán, 2009)
Habitantes en cada hogar	3.9	Promedio de número de habitantes por hogar en Colombia	(DANE, 2009)
influencias externas p	0.0023	Coeficiente de innovación para las neveras	(Bass, 2004a) <sup>c</sup>
Influencias internas q	0.215	Coeficiente de imitación para las neveras	(Bass, 2004a) <sup>c</sup>
Neveras en cada hogar	0.77	Porcentaje de hogares colombianos con nevera	(DANE, 2013)
Porcentaje de hogares posibilidad de crédito	0.391	Porcentaje de hogares colombianos que pueden acceder a un crédito en el sistema financiero Colombiano	(DANE, 2009) <sup>d</sup>
Precio promedio kWh	332.7	Precio promedio de la electricidad (\$/kWh)	(UPME, 2013) <sup>e</sup>

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

Nombre	Valores	Significado	Fuente
Tasa de compra de neveras por nuevos hogares	0.68	Porcentaje de la demanda anual estimada de neveras por nuevos hogares	(Blaser, 2009).
Tasa interés anual	0.279	Tasa de interés máxima permitida en el sistema financiero colombiano para acceder a un crédito de libre inversión	(Superfinanciera, 2013) <sup>f</sup>
Tiempo de inversión	3	Tiempo (en años) durante el cual se difiere la inversión realizada para comprar una nevera	Los autores <sup>g</sup>
Tiempo de vida útil de la nevera	25	Tiempo (en años) durante el cual un colombiano promedio usa una nevera	(Kim et al., 2006) irreparable (Blaser, 2009). <sup>h</sup>
Volumen alta vs baja	Eficiencia alta: 694	Volúmenes de las neveras de eficiencia alta y baja	Los autores <sup>i</sup>
	Eficiencia baja: 350		
Volumen alta vs media	Eficiencia alta: 694	Volúmenes de las neveras de eficiencia alta y media	Los autores <sup>i</sup>
	Eficiencia media: 550		

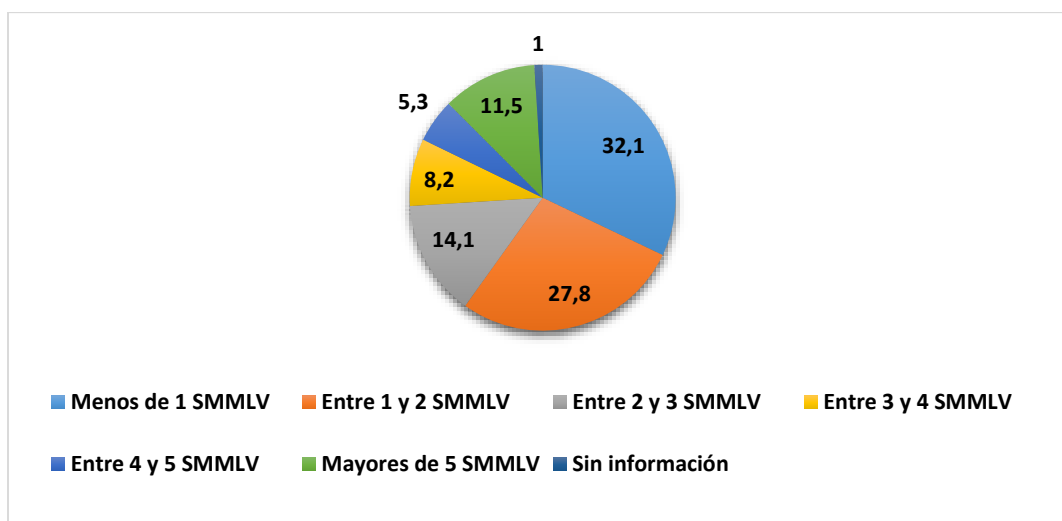
Los valores asignados para estos parámetros se justifican a continuación:

- a. El documento *Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial urbano y comercial* (2006) permite conocer el consumo electricidad de las neveras de eficiencia baja. Para determinar el consumo de las neveras de eficiencia alta se toma el promedio de consumo de electricidad de las neveras de tipo Top-Mount de 300-400 litros obtenidos a partir del estudio de campo y que es presentado en el Anexo D. El consumo de electricidad de las neveras de eficiencia media y baja es un supuesto que se toma a partir del consumo de la nevera de eficiencia alta.
- b. Este valor se toma del estudio de campo presente en el Anexo D como promedio de precios de neveras de 300 y 400 litros tipo Top-Mount.
- c. Los valores asociados a las influencias internas  $q$  y externas  $p$  fueron estimados basados en el método “guessing by analogy” propuesto en (Jiang, Bass, & Bass, 2006). Este método permite usar los parámetros estimados para productos análogos y que han sido introducidos previamente en el mercados con el fin predecir el patrón de la difusión del nuevo producto en un mercado específico. En esta investigación se tomaron los parámetros de  $p$  y  $q$  del estudio realizado por (Bass, 2004a) para la difusión de refrigeradores eléctricos en Estados Unidos.

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

- d. Según la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos (ENIG) 2006-2007 realizada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), el ingreso monetario de la población Colombiana se distribuye entre quienes ganan menos de 1 salario mínimo mensual legal vigente (SMMLV) hasta los que ganan más de 5 SMMLV. La Figura 15 muestra la participación de los hogares por nivel de ingreso corriente monetario disponible donde el 59,9% de hogares tienen un ingreso disponible inferior a 2 SMMLV de 2007, distribuidos de la siguiente forma: 32,1% para el rango inferior a 1 SMMLV y 27,8% en el rango de 1 a menos de 2 SMMLV; el 14,1% de los hogares se encuentran en el nivel de ingreso de 2 a menos de 3 SMMLV, el 8,2% de los hogares se encuentran en el nivel de ingreso de 3 a menos de 4 SMMLV, mientras que 5,3% de los hogares están en el rango de ingreso entre 4 a menos de 5 SMMLV; el 11,5% de los hogares registran ingresos superiores a 5 SMMLV (DANE, 2009).

**Figura 15.** Distribución porcentual de hogares por SMMLV de ingreso monetario disponible en Colombia. ENIG 2006-2007



Fuente: Elaboración propia con base en información de grandes superficies (2013).

Para efectos del modelo de simulación se tiene en cuenta que las personas con ingresos iguales o superiores al valor del refrigerador van a poder acceder a un crédito de consumo para poder realizar la sustitución del electrodoméstico. Según la investigación realizada en grandes superficies, un refrigerador de tamaño medio (300-400 litros de capacidad) tiene un costo promedio en el mercado de 1.136.809 pesos colombianos, lo que significa que las personas con ingresos superiores a 2 SMMLV (39,1% de los hogares) pueden acceder a un crédito y reemplazar su refrigerador actual.

- e. Promedio de la tarifa del precio de electricidad en unidades de kWh del sector residencial urbano en el estrato 4 para el periodo 2007-2012, tomado del Sistema de Información Eléctrico Colombiano (SIEL).

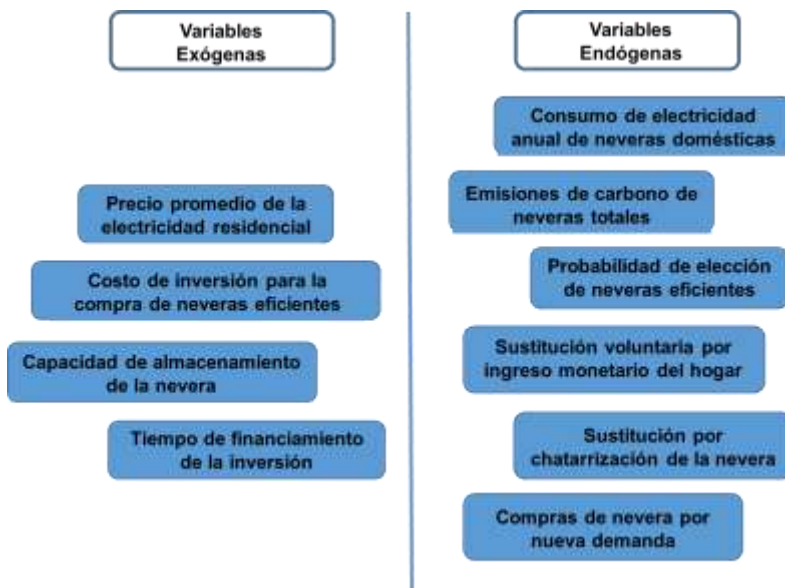
- f. Promedio de las tasas de interés de usura (Abril de 2007- Septiembre de 2013).
- g. De acuerdo con (FIDE, 2012) el apoyo de financiamiento consiste en un crédito con tasa de interés, a un plazo de 4 años que se cobrará a través del recibo de energía eléctrica. Para el modelo de simulación desarrollado se asume un plazo de 3 años para el financiamiento.
- h. Se asume que en Colombia, una nevera doméstica tiene una vida útil de 25 años.
- i. El volumen de neveras de eficiencia alta es determinado a partir de los datos del estudio de campo realizado como parte de la investigación, encontrándose que la nevera con mayor capacidad de almacenamiento de tipo Top-Mount es de 694 litros. Los valores de volumen de eficiencia media y baja se suponen bajo los volúmenes encontrados en el documento *Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial urbano y comercial* (2006).

#### **4.4.2. Pruebas de la estructura orientadas al comportamiento**

##### **Límites del modelo**

Esta prueba evalúa si el modelo desarrollado contiene toda la estructura relevante o si es necesario agregar alguna relación con el fin de satisfacer el propósito de dicho modelo (Forrester & Senge, 1980). En la Figura 16 se presenta la distribución de variables endógenas y exógenas con el fin de que el modelo se desempeñe correctamente para el propósito que fue diseñado.

Figura 16. Variables exógenas y endógenas

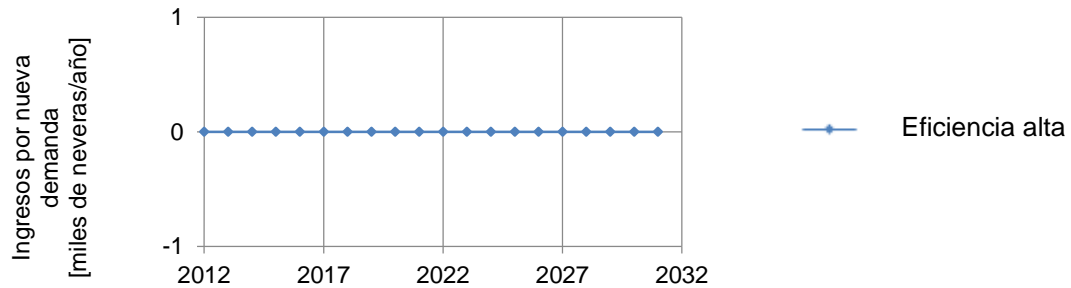


### Condiciones Extremas

Los modelos deben ser robustos en condiciones extremas, lo cual significa que el modelo se debe comportar de acuerdo al modelo real sin importar qué tan extremas sean las entradas impuestas. A continuación se presentan aquellas condiciones extremas que se asumieron para hacer la prueba del modelo:

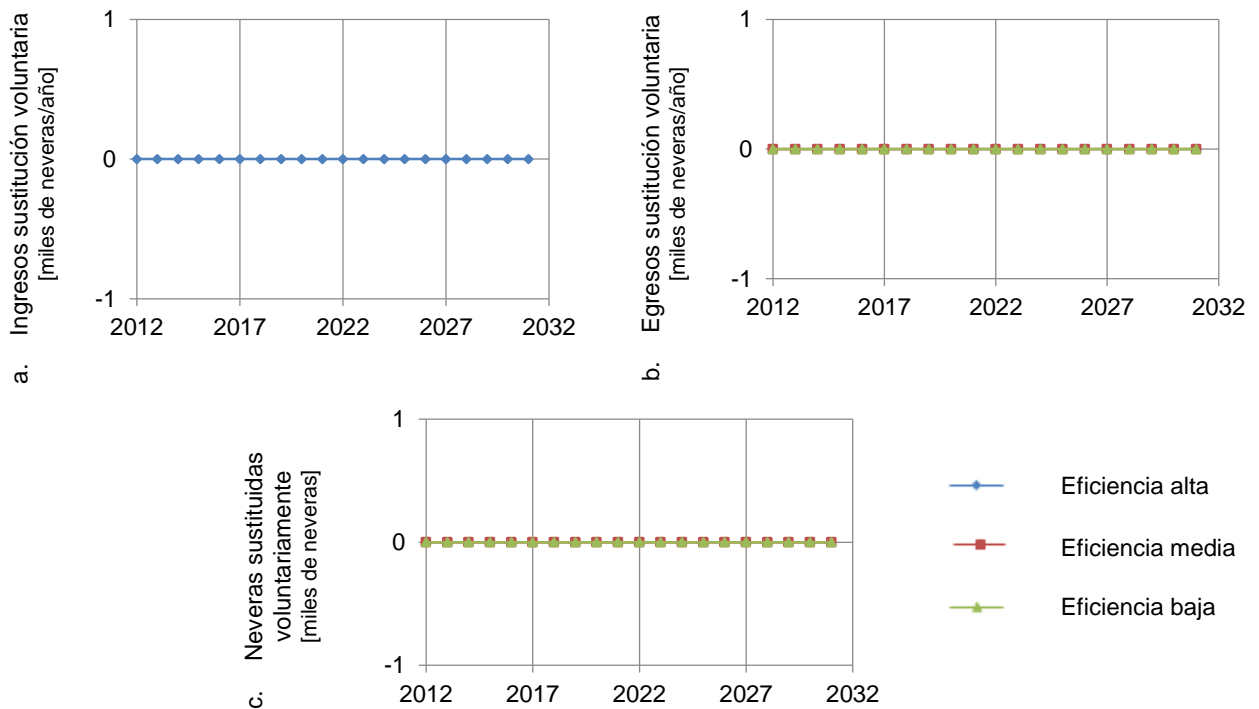
- *No hay ingresos al nivel neveras en uso (Nuso) por nueva demanda:* Esta condición se alcanza cuando el parámetro Tasa de compra de neveras por nuevos hogares se hace cero. Lo que implica, que los hogares nuevos que se formen no van a comprar neveras nuevas y eficientes. De esta forma, los ingresos al nivel de neveras en uso por nueva demanda son cero, tal y como se presenta en la Figura 17.

**Figura 17.** Ingresos al nivel de neveras en uso cuando no hay compra de neveras por nueva demanda.



- *Tasa de sustitución voluntaria por ingreso monetario del hogar es cero:* Esta condición se logra haciendo cero el porcentaje de hogares con posibilidad de crédito. Esto implica que los ingresos por sustitución voluntaria, los egresos por sustitución voluntaria y las neveras sustituidas voluntariamente sean también cero, tal y como se muestra en la Figura 18

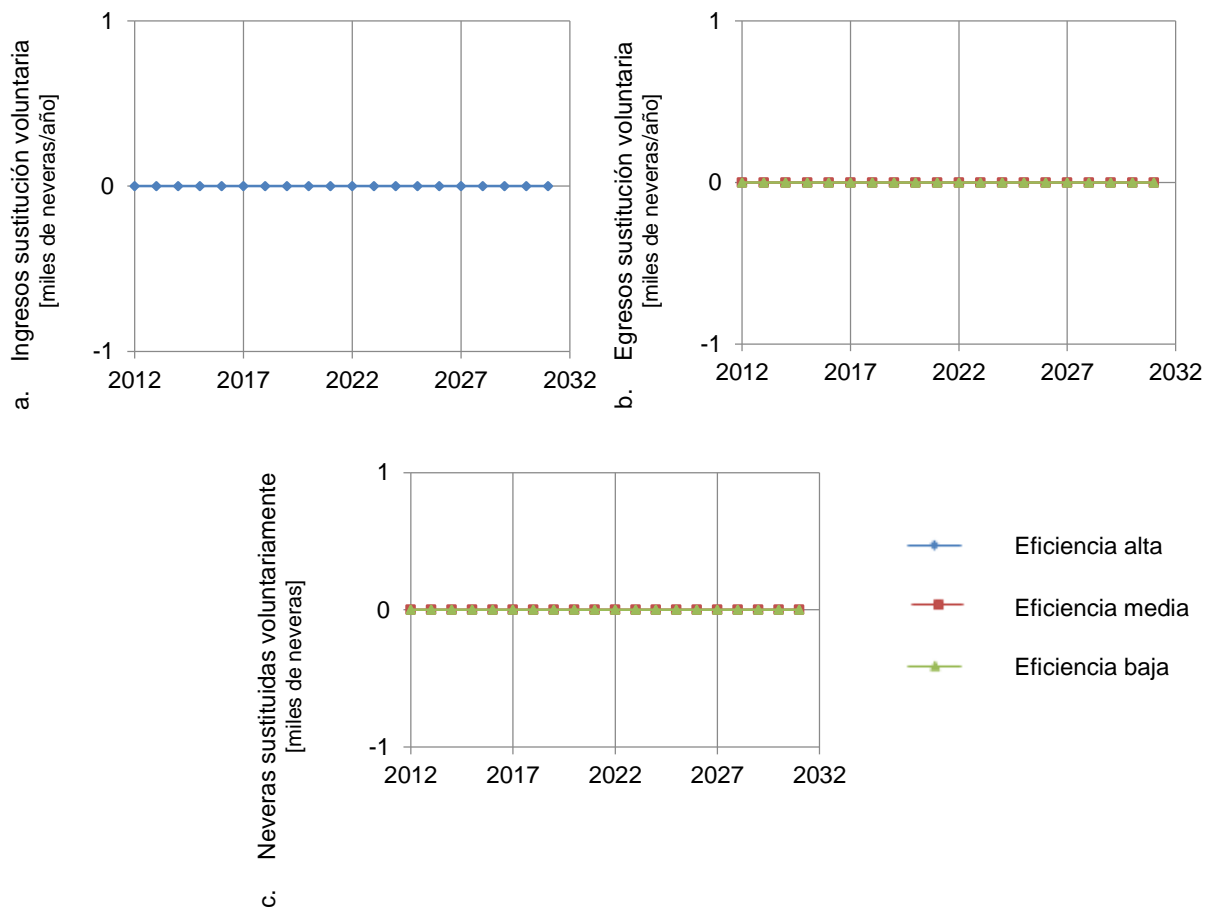
**Figura 18.** Ingresos y egresos por sustitución voluntaria, y neveras sustituidas voluntariamente cuando la tasa de sustitución voluntaria por ingreso monetario es cero.



## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

- *Sustitución voluntaria de neveras igual a cero*: Esta condición se logra haciendo cero los valores de neveras de eficiencia media y baja, por lo tanto, no habría neveras a ser sustituidas voluntariamente. Esto implica que los egresos por sustitución voluntaria, los ingresos por sustitución voluntaria y las neveras sustituidas voluntariamente sean cero, tal y como se muestra en la Figura 19.

**Figura 19.** Ingresos y egresos por sustitución voluntaria, y neveras sustituidas voluntariamente cuando no hay neveras a sustituir.



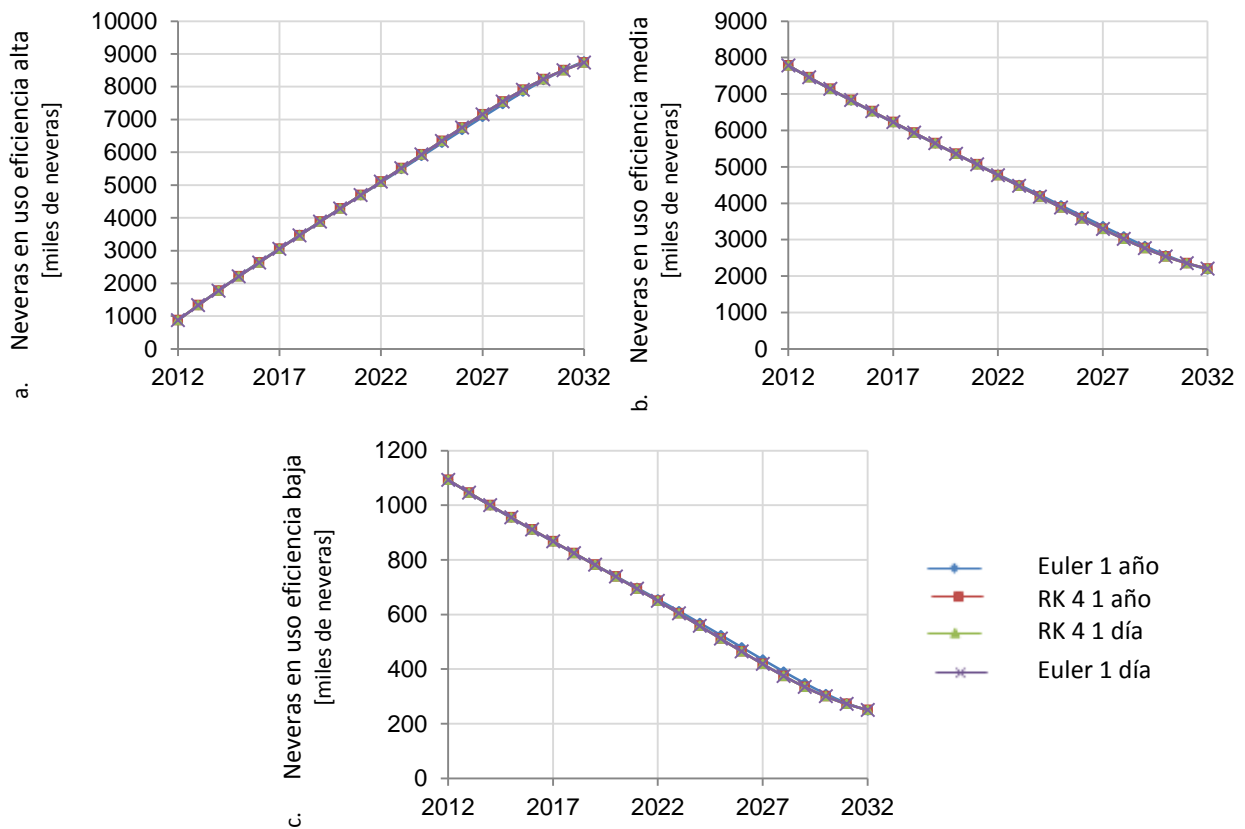
### Errores de integración

Esta prueba se realiza simulando el modelo con cuatro métodos de integración: Euler (primer orden) y Runge Kutta (segundo, tercero y cuarto orden). Los resultados obtenidos con estos cuatro métodos de integración y con diferente tamaño de paso se muestran en la Figura 20., donde se evidencia que el modelo no es sensible a estos cambios. En

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

consecuencia se elige método de integración Runge-Kutta 4 y tamaño de paso 1 año para el análisis de los resultados.

**Figura 20.** Neveras en uso de eficiencia alta, media y baja realizando la simulación con cuatro métodos de integración diferentes.



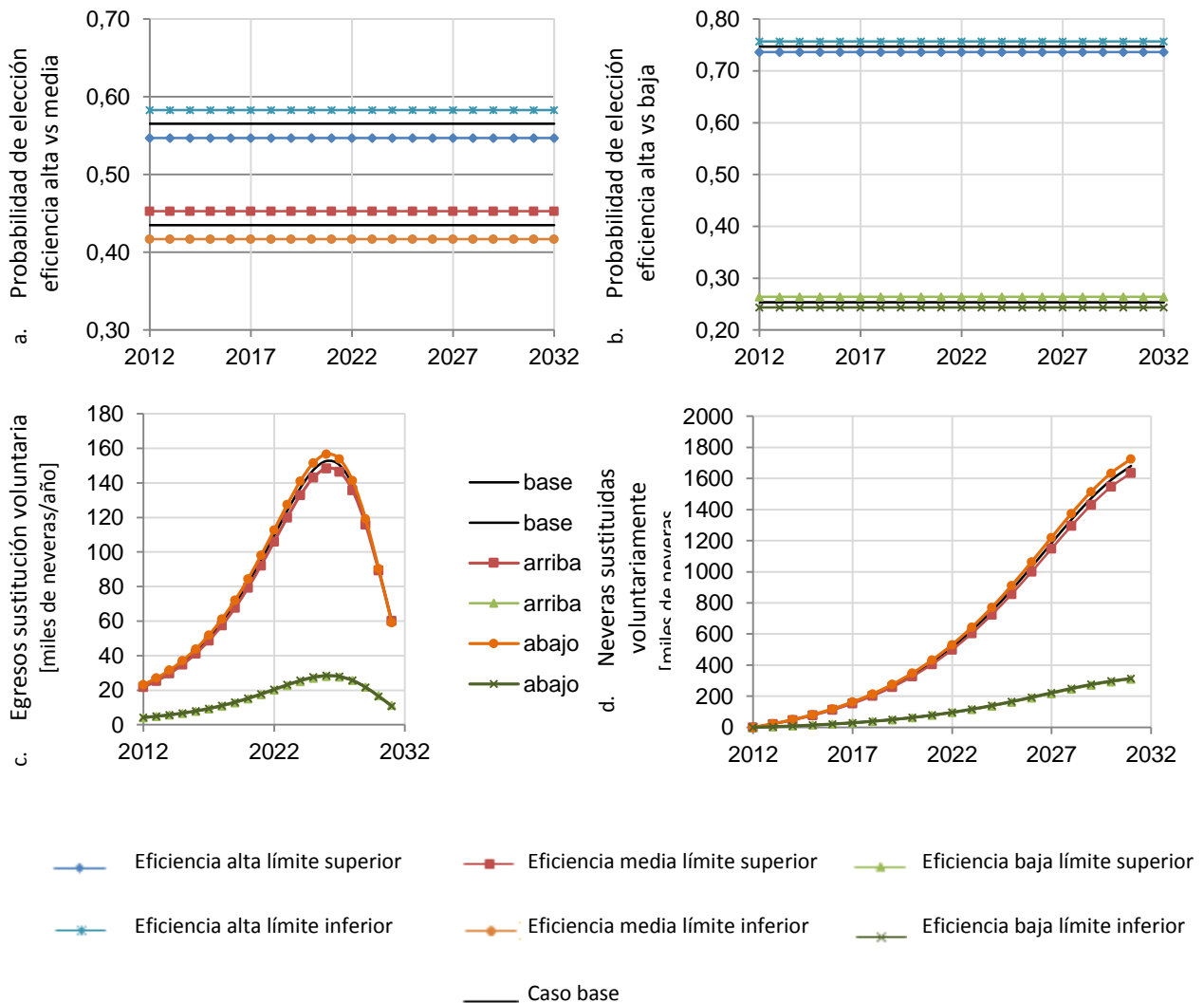
### Análisis de sensibilidad

Con esta prueba se demuestra la robustez del modelo diseñado bajo incertidumbre de ciertos supuestos. Este análisis pregunta si los resultados cambian de forma importante con respecto al propósito que se diseñó, cuando estos supuestos son variados en un posible rango de incertidumbre (J. Sterman, 2000). El propósito de esta prueba es observar la sensibilidad de una o varias variables cuando se realizan cambios en los supuestos del modelo.

**Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia**

*Sensibilidad ante cambios del parámetro Beta\_precio:* En la Figura 21 se muestran los resultados de la simulación de las variables Probabilidad de elección de eficiencia alta vs media, Probabilidad de elección de eficiencia alta vs. baja, Egresos por sustitución voluntaria y Neveras sustituidas voluntariamente. Es posible observar que estas cuatro variables no son sensibles ante cambios en el parámetro *Beta\_precio*.

**Figura 21.** Análisis de sensibilidad ante variaciones de *beta\_precio*

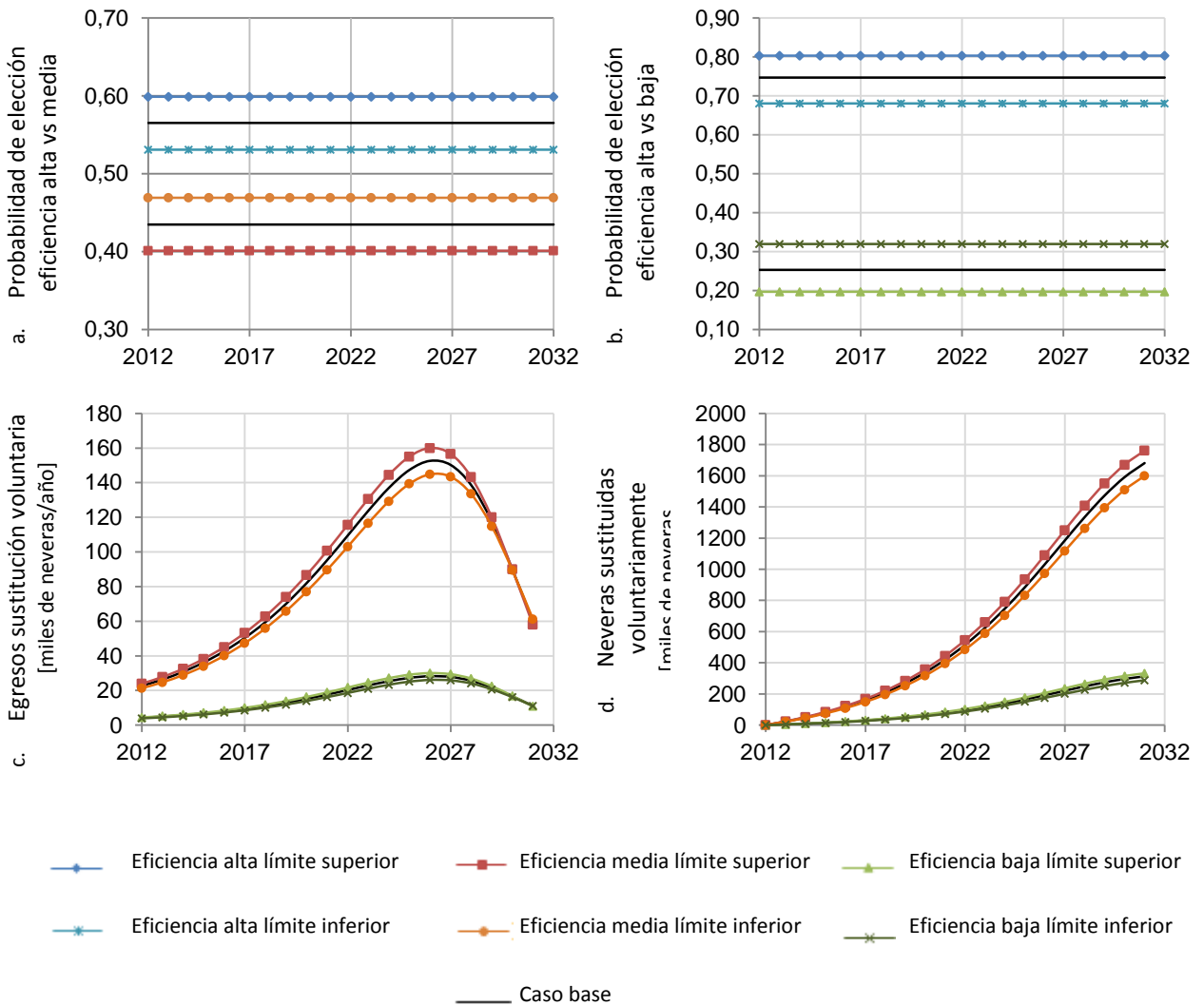


*Sensibilidad ante cambios del parámetro Beta\_volumen:* En la Figura 22 se muestran los resultados de la simulación de las variables Probabilidad de elección de eficiencia alta vs

**Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia**

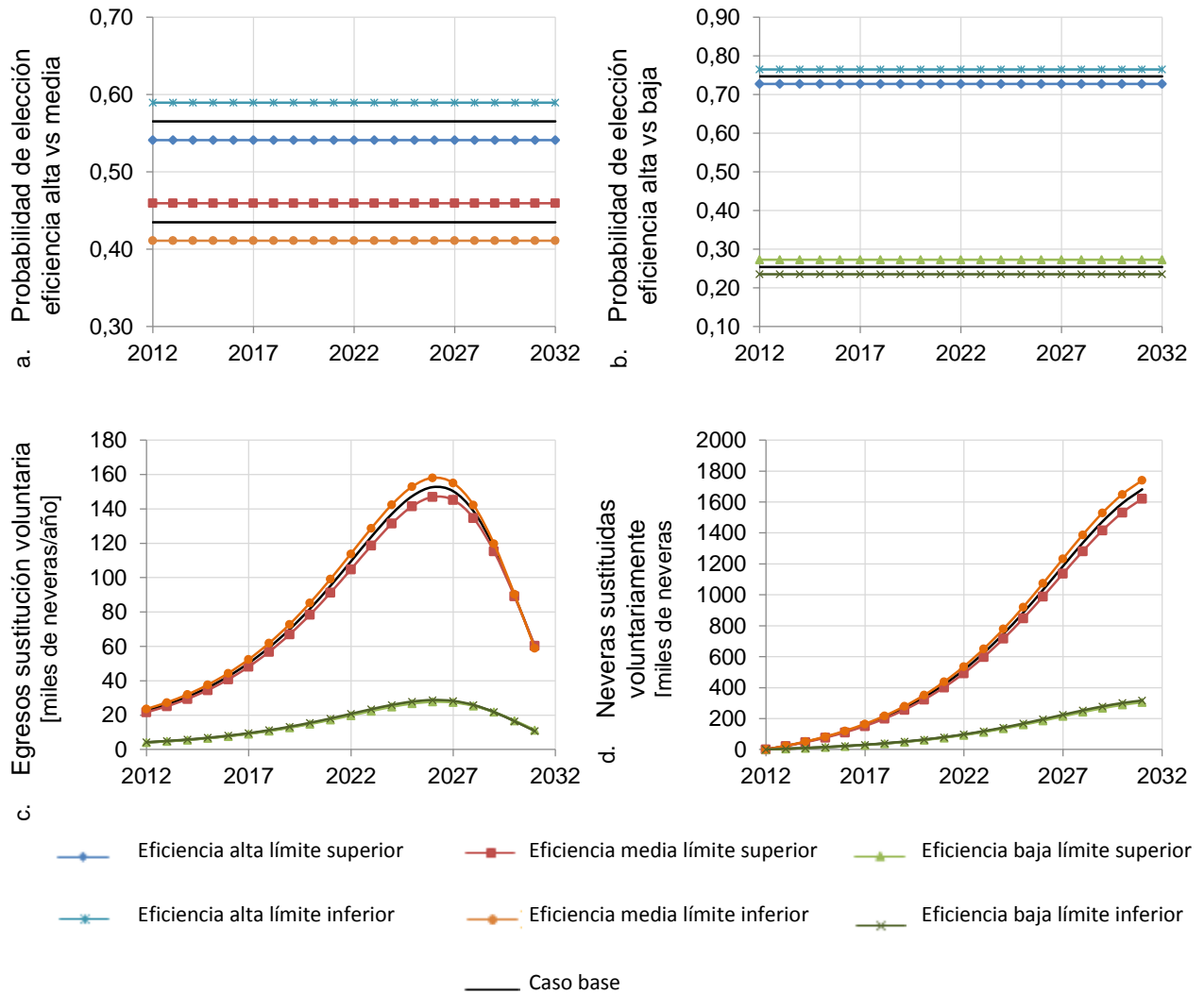
media, Probabilidad de elección de eficiencia alta vs. baja, Egresos por sustitución voluntaria y Neveras sustituidas voluntariamente. Es posible observar que estas cuatro variables no son sensibles ante cambios en el parámetro *Beta\_precio*.

**Figura 22.** Análisis de sensibilidad ante variaciones de *beta\_volumen*



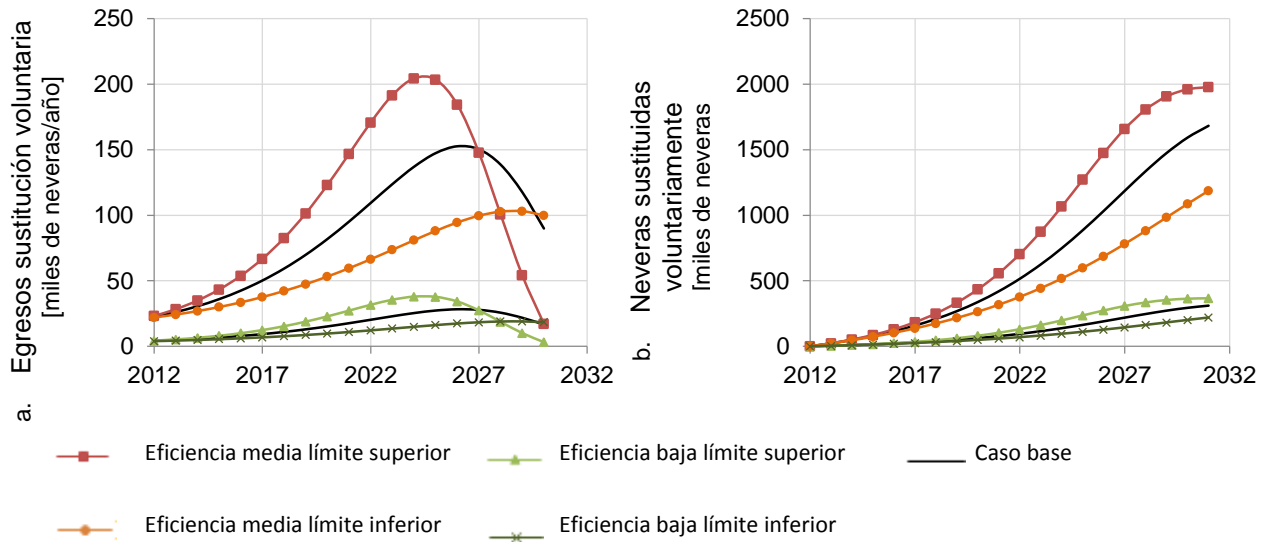
*Sensibilidad ante cambios en el costo de inversión:* En la Figura 23 se muestran los resultados de la simulación de las variables Probabilidad de elección de eficiencia alta vs media, Probabilidad de elección de eficiencia alta vs. baja, Egresos por sustitución voluntaria y Neveras sustituidas voluntariamente. Es posible observar que estas cuatro variables no son sensibles ante cambios en el parámetro *Beta\_precio*.

Figura 23. Análisis de sensibilidad ante variaciones en el costo de inversión



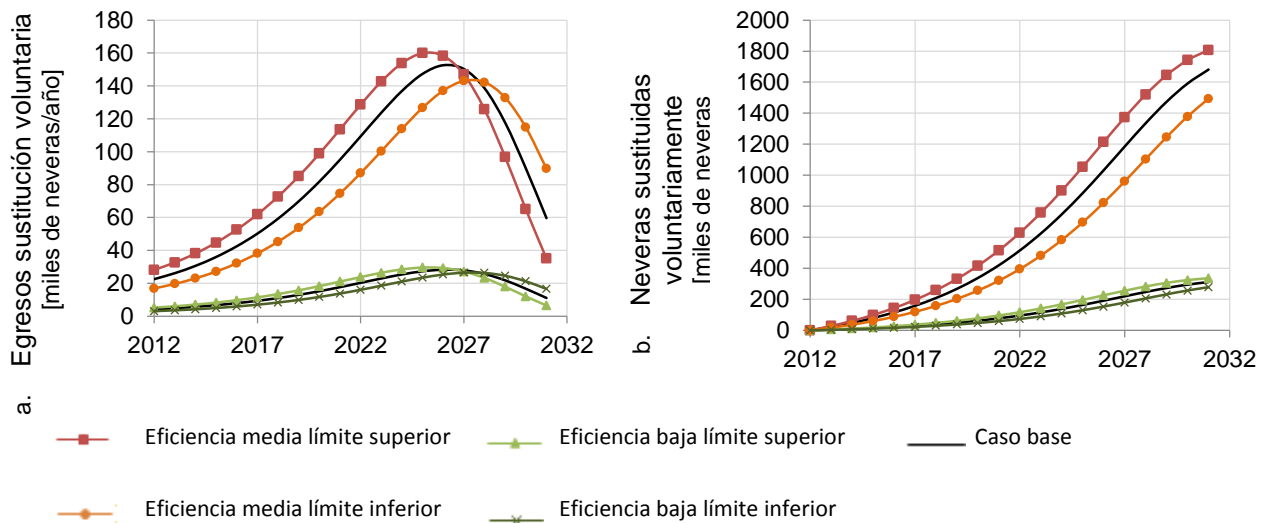
*Sensibilidad ante cambios el parámetro q (influencias internas):* En la Figura 24 se muestran los resultados de la simulación de las variables Egresos por sustitución voluntaria y Neveras sustituidas voluntariamente. Es posible observar que estas dos variables aunque presentan el mismo patrón de comportamiento, existe sensibilidad ante cambios en el parámetro  $q$ .

Figura 24. Análisis de sensibilidad ante variaciones en el parámetro  $q$ .



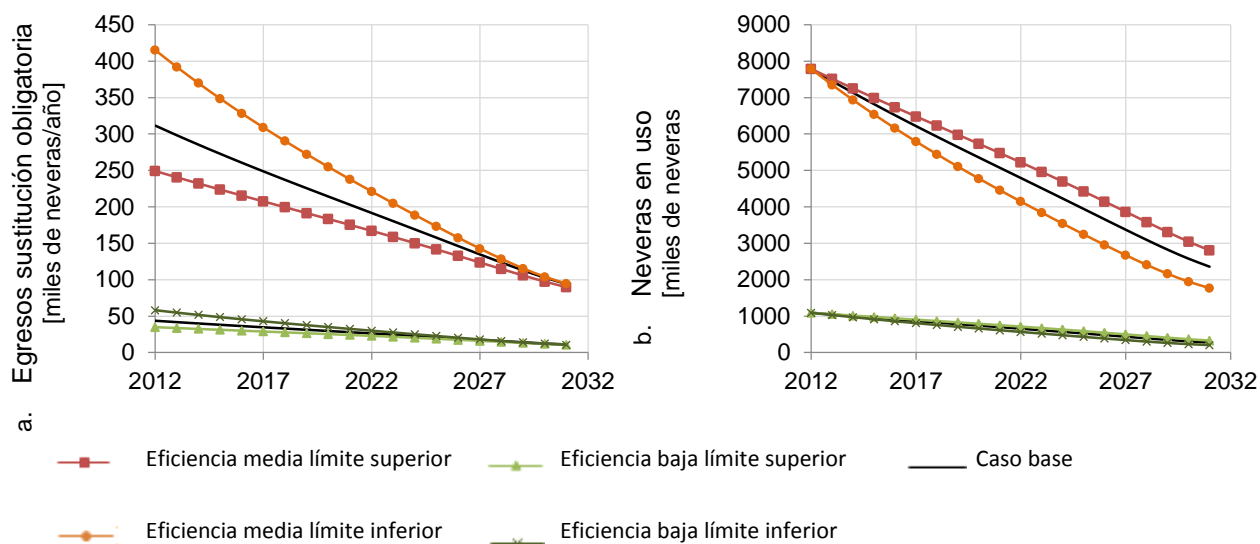
*Sensibilidad ante cambios el parámetro  $p$  (influencias externas):* En la Figura 25 se muestran los resultados de la simulación de las variables Egresos por sustitución voluntaria y Neveras sustituidas voluntariamente. Es posible observar que estas dos variables aunque presentan el mismo patrón de comportamiento, existe sensibilidad ante cambios en el parámetro  $p$ .

Figura 25. Análisis de sensibilidad ante variaciones del parámetro  $p$



*Sensibilidad ante cambios el parámetro de Tiempo de vida útil de la nevera:* En la Figura 26 se muestran los resultados de la simulación de las variables Egresos por sustitución voluntaria y Neveras sustituidas voluntariamente. Es posible observar que estas dos variables no son sensibles ante cambios en el parámetro de *Tiempo de vida útil de la nevera*.

**Figura 26.** Análisis de sensibilidad ante variaciones en el tiempo de vida útil de la nevera



#### 4.4.3. Pruebas de validación del comportamiento

Estas pruebas están diseñadas para medir qué tan aproximado el modelo reproduce los patrones de comportamiento observados en el sistema real (Barlas, 1994). Entre estas pruebas se incluyen: reproducción del comportamiento, predicción del comportamiento, anomalías en el comportamiento, comportamiento sorpresivo, políticas extremas y modelos familiares (Forrester & Senge, 1980).

En la revisión de literatura realizada en esta investigación no fue posible encontrar con la información histórica de la variable que representa la cantidad de neveras con eficiencia alta, media y baja para el periodo de simulación desarrollado. Por lo tanto, debido a que no se cuenta con la información que permita comparar los datos históricos del sistema real con los datos del sistema obtenidos a través de la simulación, no es posible realizar esta prueba.

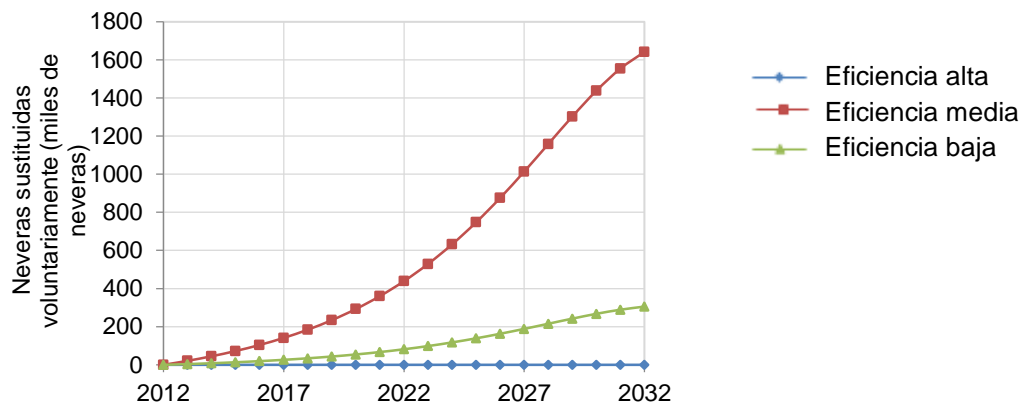
## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

Sin embargo, es posible verificar la reproducción de patrón de comportamiento del modelo de Bass como se presenta a continuación.

### Reproducción del patrón de comportamiento

El modelo desarrollado reproduce el patrón de comportamiento del modelo de difusión de Bass, el cual se utilizó para calcular la cantidad de neveras sustituidas voluntariamente. Este patrón sigue una curva en forma de S y es posible observar este mismo comportamiento en la variable *Neveras sustituidas voluntariamente* que se presenta en la Figura 27.

**Figura 27.** Comportamiento en forma de S de las Neveras sustituidas voluntariamente



En este capítulo se presentaron tres etapas para el desarrollo del modelo de simulación: la construcción del diagrama causal, la formulación del diagrama de flujos y niveles, y la validación del modelo. Para la construcción del modelo de flujos y niveles aplicado a la sustitución de neveras en Colombia fue necesario realizar unos supuestos basados en información encontrada tanto en la literatura como en el estudio de campo. La tercera etapa del modelo desarrollada en este capítulo, permitió determinar que el modelo no es sensible bajo parámetros beta del modelo logit binario y que sí es sensible con respecto a los parámetros  $p$  y  $q$  del modelo de Bass.

## 5. Análisis de políticas y resultados

En el capítulo anterior se presentó la construcción del modelo de simulación y su correspondiente validación. En el presente capítulo se hará un análisis del caso base y posteriormente, se mostrarán los resultados de la aplicación de las políticas de eficiencia energética propuestas para el sector residencial con el fin de reducir el consumo de electricidad y las emisiones de carbono de los hogares Colombianos.

### 5.1. Análisis del caso base

El caso base del modelo de simulación corresponde al análisis del efecto que tiene la sustitución de electrodomésticos residenciales en el consumo de electricidad y en las emisiones de carbono. La sustitución se puede dar en dos modalidades: la primera es la sustitución obligatoria, la cual se da cuando el electrodoméstico ha dejado de funcionar porque ha cumplido su tiempo de vida útil y la segunda, es la sustitución voluntaria, la cual consiste en reemplazar el electrodoméstico antes de que cumpla su tiempo de vida útil.

Para el desarrollo del caso base, se utilizó el modelo construido en PowerSim Studio 8, cuyo diagrama de flujos y niveles es presentado en el Anexo B, y que utiliza los parámetros de la Figura 14.

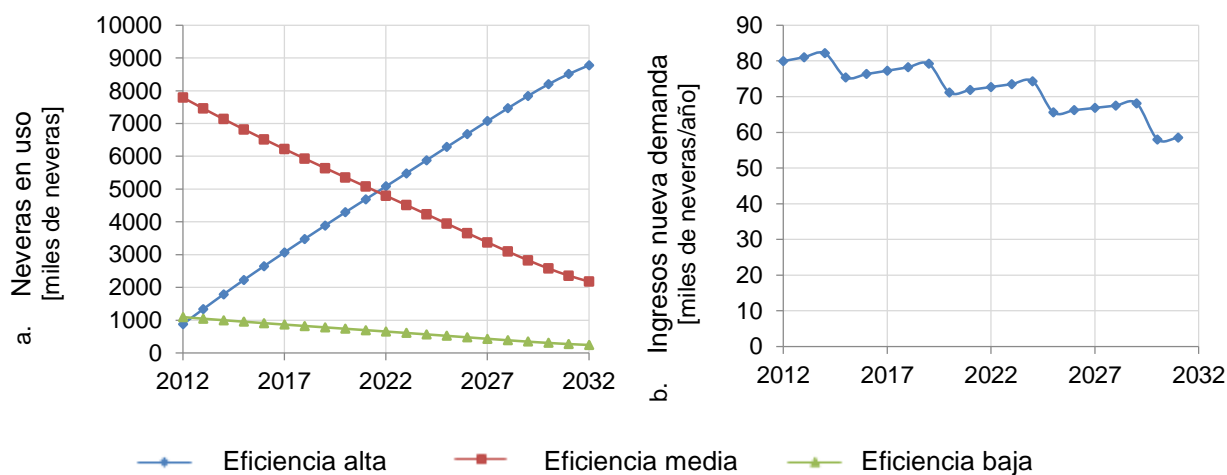
En el caso base se analizan los efectos que tienen los flujos de entrada y salida tanto de la sustitución obligatoria como de la sustitución voluntaria, y el flujo de entrada debido a las compras de nuevos electrodomésticos sobre el nivel de neveras en uso. Este nivel permite

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

conocer en cada periodo de tiempo la cantidad de neveras no eficientes y eficientes que se están utilizando en los hogares.

En la Figura 28 (a) se presenta el comportamiento de las neveras en uso con eficiencia alta, media y baja. Las unidades de neveras de eficiencia baja y media van decreciendo debido a que son sustituidas (de forma obligatoria o voluntaria) por un modelo nuevo y eficiente, lo que genera el comportamiento creciente de las unidades de neveras de eficiencia alta. Estas neveras de eficiencia alta también se incrementan debido a la compra por la formación de nuevos hogares tal y como se presenta en la Figura 28 (b).

**Figura 28.** (a) Neveras en uso con eficiencia alta, media y baja. (b) Ingresos por nuevos hogares



La cantidad de neveras en uso al inicio y al final de periodo de simulación son presentadas en la Tabla 12 dónde es posible observar un incremento en el porcentaje de mercado para las neveras de eficiencia alta, pasando de un 9% en el 2012 a un 76,38% en el 2032, y una reducción para las de eficiencia media y alta quedando en 21,15% y 2.47% en el 20132 respectivamente.

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

**Tabla 12.** Comparativo de la cantidad de neveras en uso durante el periodo de simulación.

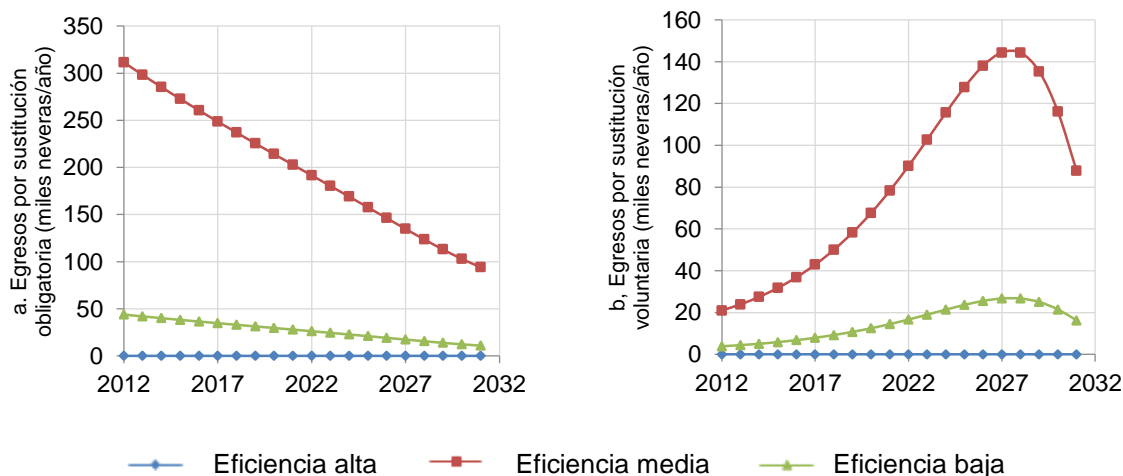
		Inicio de la simulación 2012		Fin de la simulación 2032	
		Cantidad	% participación de mercado	Cantidad	% participación de mercado
<b>Neveras en uso</b> <b>[miles de neveras]</b>	Eficiencia alta	877	9%	8778	76.38%
	Eficiencia media	7787	79.8%	2174	21.15%
	Eficiencia baja	1093	11.2%	248	2.47%

El decrecimiento de las neveras sólo ocurre para los tipos de eficiencia media y baja, ya que las unidades de eficiencia alta permanecen en cero debido a que éstas no son reemplazadas en gran parte porque son neveras nuevas que presentan una alta eficiencia energética. Esta reducción en las unidades de neveras es causada por los egresos de sustitución tanto voluntaria como obligatoria. La

**Figura 29 (a)**, muestra los egresos por sustitución obligatoria dónde en cada periodo de tiempo van siendo sustituidas, aunque cada vez menos, unidades de neveras de eficiencia media y baja. Por su parte, en la

Figura 29 (b), los egresos por sustitución voluntaria crecen hasta un punto de saturación en el año 2028, y luego empiezan a decrecer, siguiendo la curva de difusión del modelo Bass.

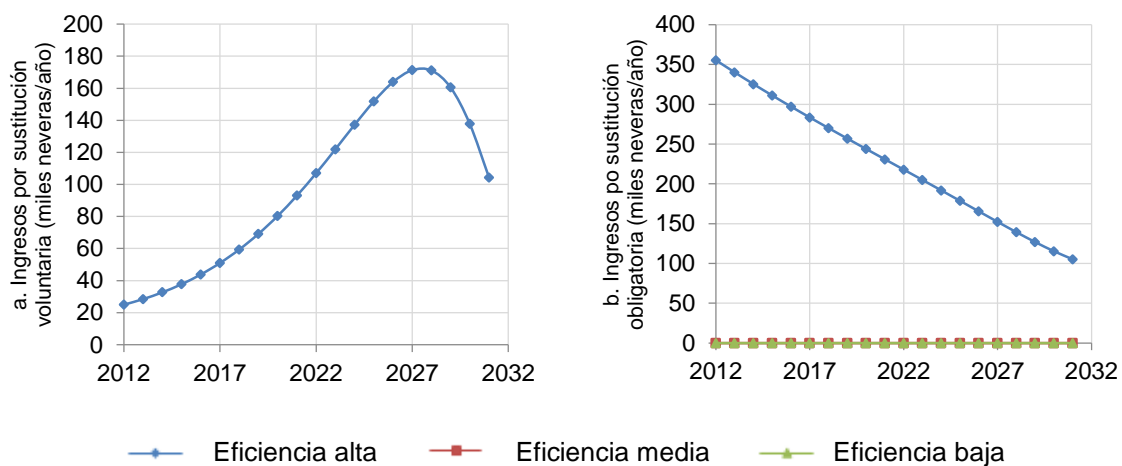
**Figura 29.** (a) Egresos por sustitución obligatoria (b) Egresos por sustitución voluntaria



## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

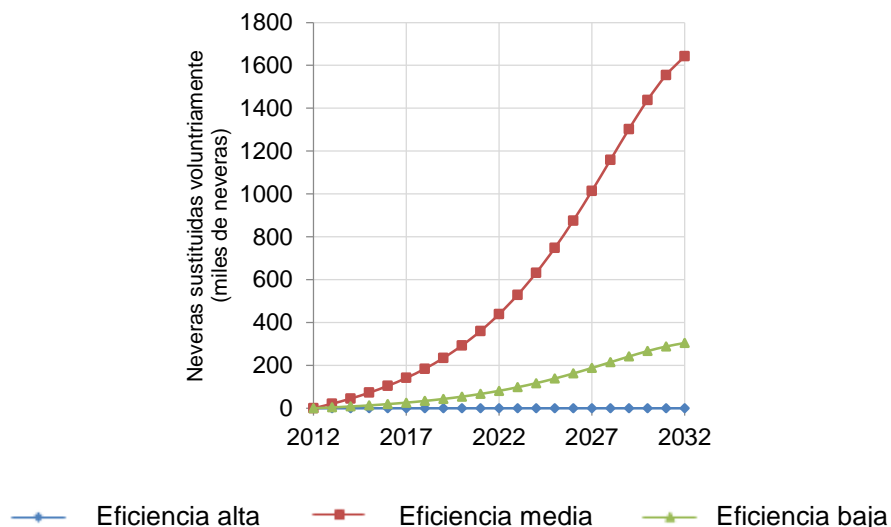
La Figura 30 (a), muestra los ingresos por sustitución voluntaria dónde en cada periodo de tiempo van siendo sustituidas, aunque cada vez, más unidades siguiendo la curva de difusión del modelo Bass. Por su parte, en la Figura 30 (b), los ingresos de neveras de eficiencia por sustitución obligatoria se van reduciendo en unidades en cada periodo de tiempo.

**Figura 30.** (a) Ingresos por sustitución voluntaria (b) Ingresos por sustitución obligatoria



Los egresos de neveras por sustitución voluntaria, únicamente neveras de eficiencia media y baja, son acumulados en una variable de nivel, la cual presenta la curva en forma de S del patrón del modelo de Bass, tal y como se muestra en la Figura 31.

**Figura 31.** Neveras acumuladas sustituidas voluntariamente



A partir de los resultados de la **Figura 31** se presenta en la

Tabla 13, un comparativo de la cantidad de neveras de eficiencia alta, media y baja sustituidas de forma voluntaria entre el inicio de la simulación en el año 2012 y el último periodo de simulación en el 2032. A partir de estos resultados es posible identificar que la mayor cantidad de neveras sustituidas corresponden a las de eficiencia media, seguidas de las neveras de eficiencia alta, y que durante los 20 años de simulación en el escenario base es posible sustituir 1947. Además es posible verificar que no hay reemplazo de neveras de eficiencia alta, tal y como se diseñó en el modelo de simulación.

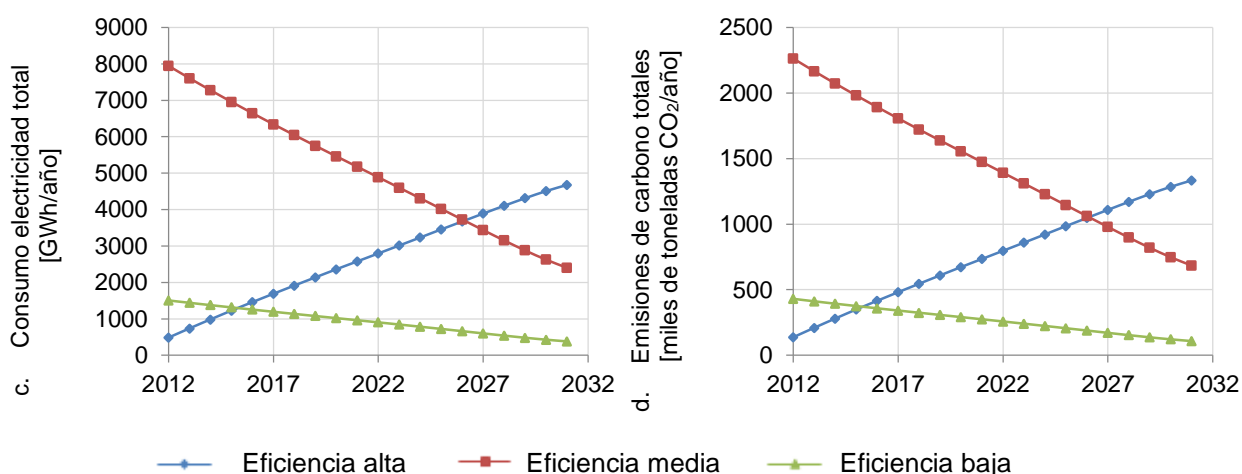
**Tabla 13.** Comparativo de la cantidad de neveras sustituidas voluntariamente durante el periodo de simulación.

		Inicio de la simulación 2012	Fin de la simulación 2032
<b>Neveras sustituidas voluntariamente [miles de neveras]</b>	Eficiencia alta	0	0
	Eficiencia media	0	1642
	Eficiencia baja	0	305
<b>Neveras totales sustituidas voluntariamente</b>			1947

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

El consumo de electricidad y las emisiones de carbono de las neveras totales son mostrados en la Figura 32 y presentan una reducción a medida de que van pasando los años de simulación para las neveras de eficiencia media y baja, lo que indica que estos tipos de nevera están dejando de ser utilizados. Aunque existe un aumento en el consumo de electricidad de las neveras de eficiencia alta, este es inferior al de las neveras de eficiencia media. Estos resultados son resumidos en la Figura 32, donde es posible identificar el cambio en el consumo de electricidad al inicio y al final del periodo de simulación.

**Figura 32.** Consumo de electricidad y emisiones de carbono de la totalidad de las neveras



**Tabla 14.** Comparativo de la consumo total de electricidad durante el periodo de simulación.

		Inicio de la simulación 2012	Fin de la simulación 2032
<b>Consumo total electricidad [GWh/año]</b>	Eficiencia alta	482	4681
	Eficiencia media	7943	2404
	Eficiencia baja	1509	380

## 5.2. Análisis de políticas

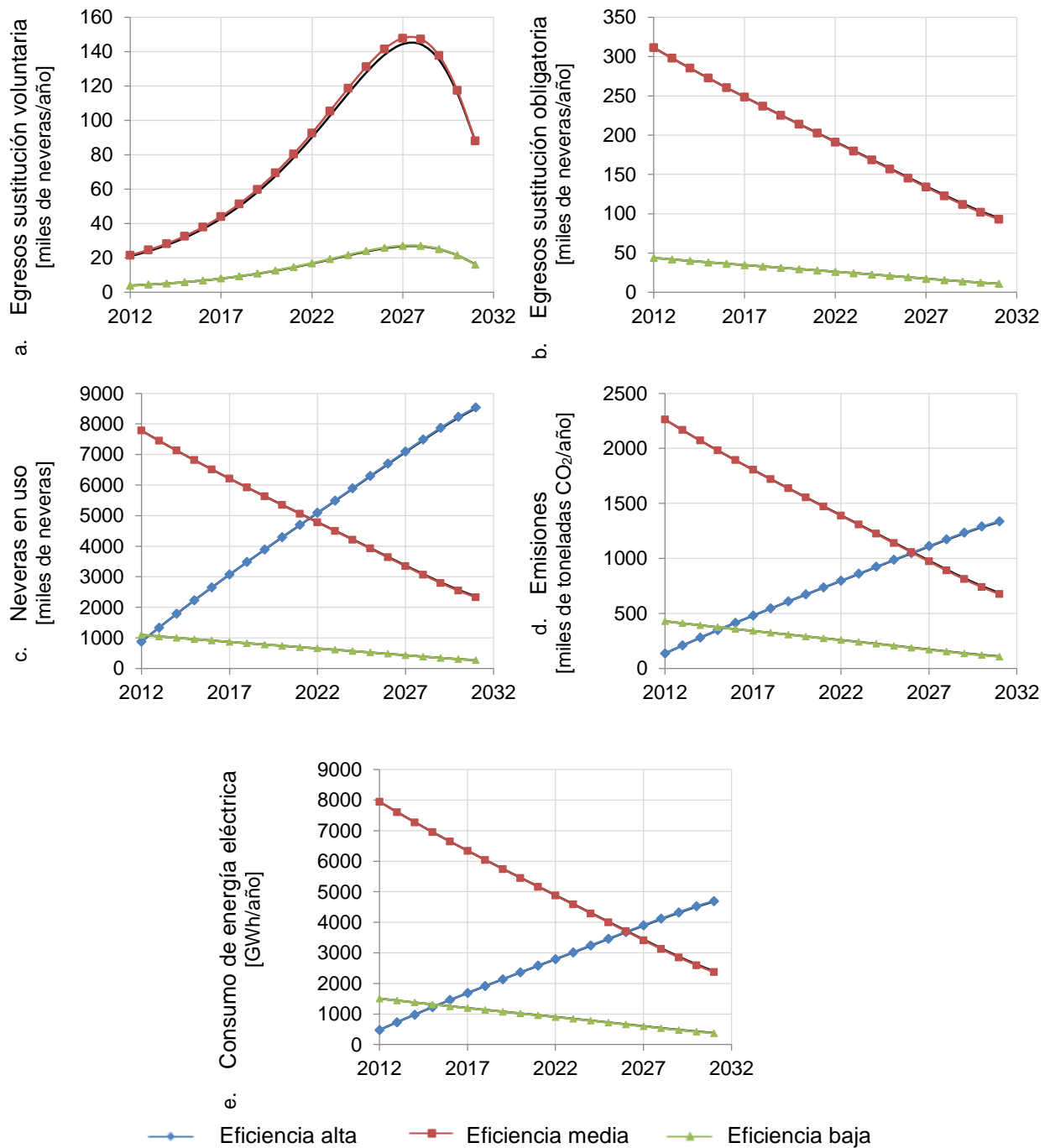
Las políticas de eficiencia energética son una herramienta que permiten reducir el consumo de energía y las emisiones de carbono. A partir de la revisión de literatura del capítulo 2, acerca de las políticas de eficiencia energética aplicadas al sector residencial, se ha decidido evaluar la aplicación al caso Colombiano de políticas de tipo fiscal que incluyen tanto incentivos económicos como reducción y exención de impuestos y tasas de interés y políticas de información dirigidas a mejorar el conocimiento de la población sobre el programa de etiquetado eficiente.

### **Política 1: Exención del IVA (Impuesto de valor agregado)**

Este tipo de política fiscal busca eliminar el IVA, el cual es un impuesto que paga el consumidor para la adquisición de bienes y servicios. En el caso de las neveras domésticas este impuesto corresponde a un 16% del valor total del producto y aplicar esta política en el modelo de simulación es equivalente a reducir un 16% de la variable *costo inversión*.

En la Figura 33 se muestran los efectos que tiene la aplicación de esta política en las variables de *Egresos por sustitución voluntaria*, *Egresos por sustitución obligatoria*, *Neveras en uso*, *Emisiones de CO2 de las neveras* y *Consumo total anual de electricidad neveras*.

Figura 33. Impactos en el modelo al aplicar la política de exención del IVA



El efecto de esta política, que es encontrado en la Figura 33, es comparado con los resultados del caso base (presentado en la sección 5.1) en el último periodo de simulación

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

---

(año 2032). A partir de estos resultados se hace un resumen comparativo que es presentado en la Tabla 15 en donde es posible observar la cantidad de neveras sustituidas voluntariamente con respecto al caso base para el año 2032.

**Tabla 15.** Comparativo de las neveras sustituidas entre el caso base y la política de exención de impuestos.

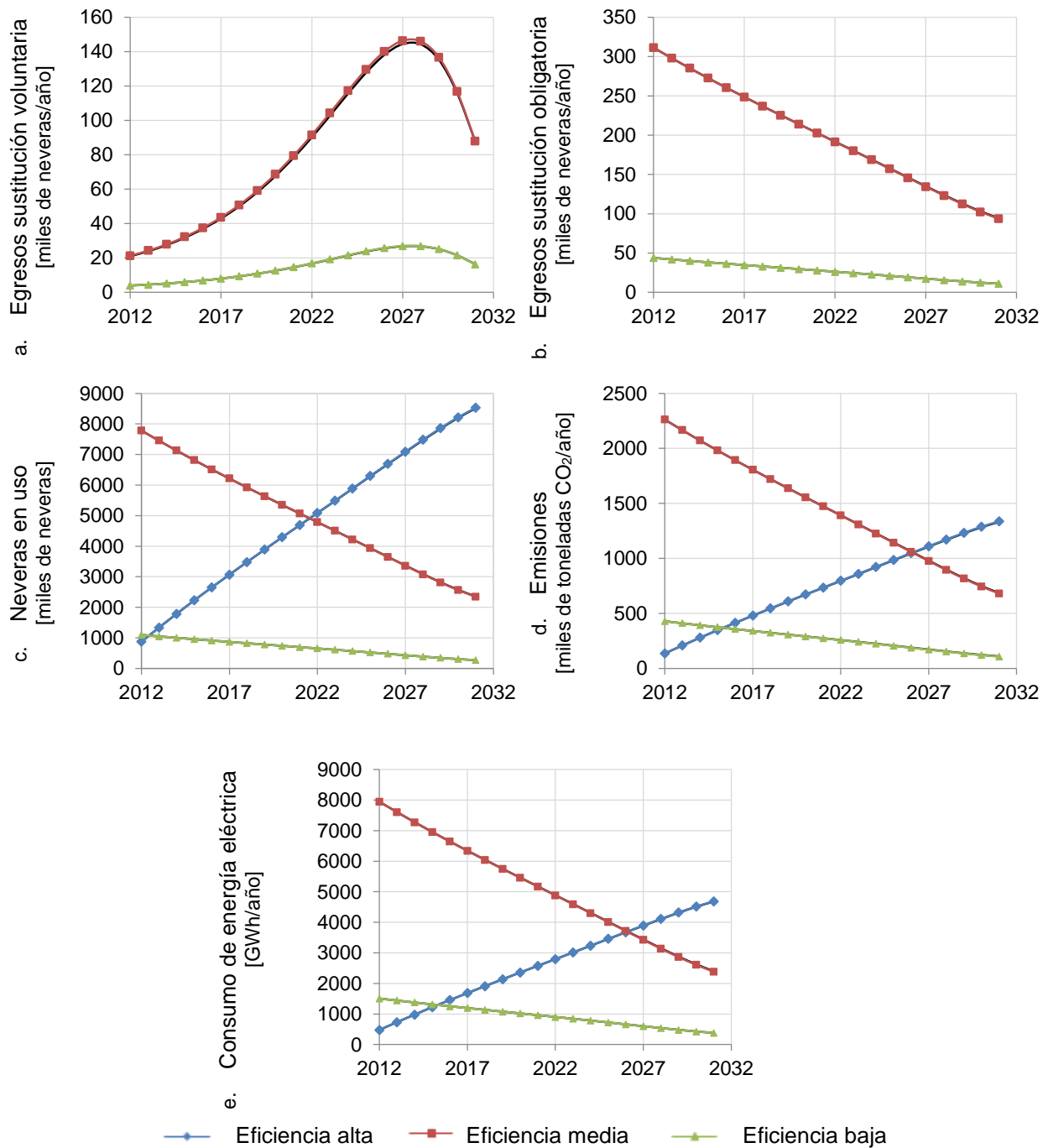
		<b>Caso base</b>	<b>Política 1</b>
<b>Neveras sustituidas voluntariamente [miles de neveras]</b>	Eficiencia alta	0	0
	Eficiencia media	1642	1679
	Eficiencia baja	305	308
<b>Neveras totales sustituidas voluntariamente</b>		1947	1987

### **Política 2: Subsidio monetario a la compra de neveras eficientes**

Este tipo de política fiscal busca reducir el precio de compra de la nevera. Esta política parte del programa piloto que ya se realizó en Colombia en el año 2008, para dar un incentivo económico de máximo \$100.000 pesos colombianos para que los consumidores replacen su nevera vieja e ineficiente por una nueva y con alta eficiencia energética.

Esta política se aplicó en el modelo de simulación en el *costo inversión* mediante una reducción de 100000 al valor promedio de la nevera (1135000). En la Figura 34 se muestran los efectos que tiene la aplicación de esta política en las variables de *Egresos por sustitución voluntaria*, *Egresos por sustitución obligatoria*, *Neveras en uso*, *Emisiones de CO2 de las neveras* y *Consumo total anual de electricidad neveras*.

Figura 34. Impactos en el modelo al aplicar la política de subsidio monetario



El efecto de esta política, que es encontrado en la Figura 34, es comparado con los resultados del caso base (presentado en la sección 5.1) en el último periodo de simulación

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

---

(año 2032). A partir de estos resultados se hace un resumen comparativo que es presentado en la Tabla 16 en donde es posible observar la cantidad de neveras sustituidas voluntariamente con respecto al caso base para el año 2032.

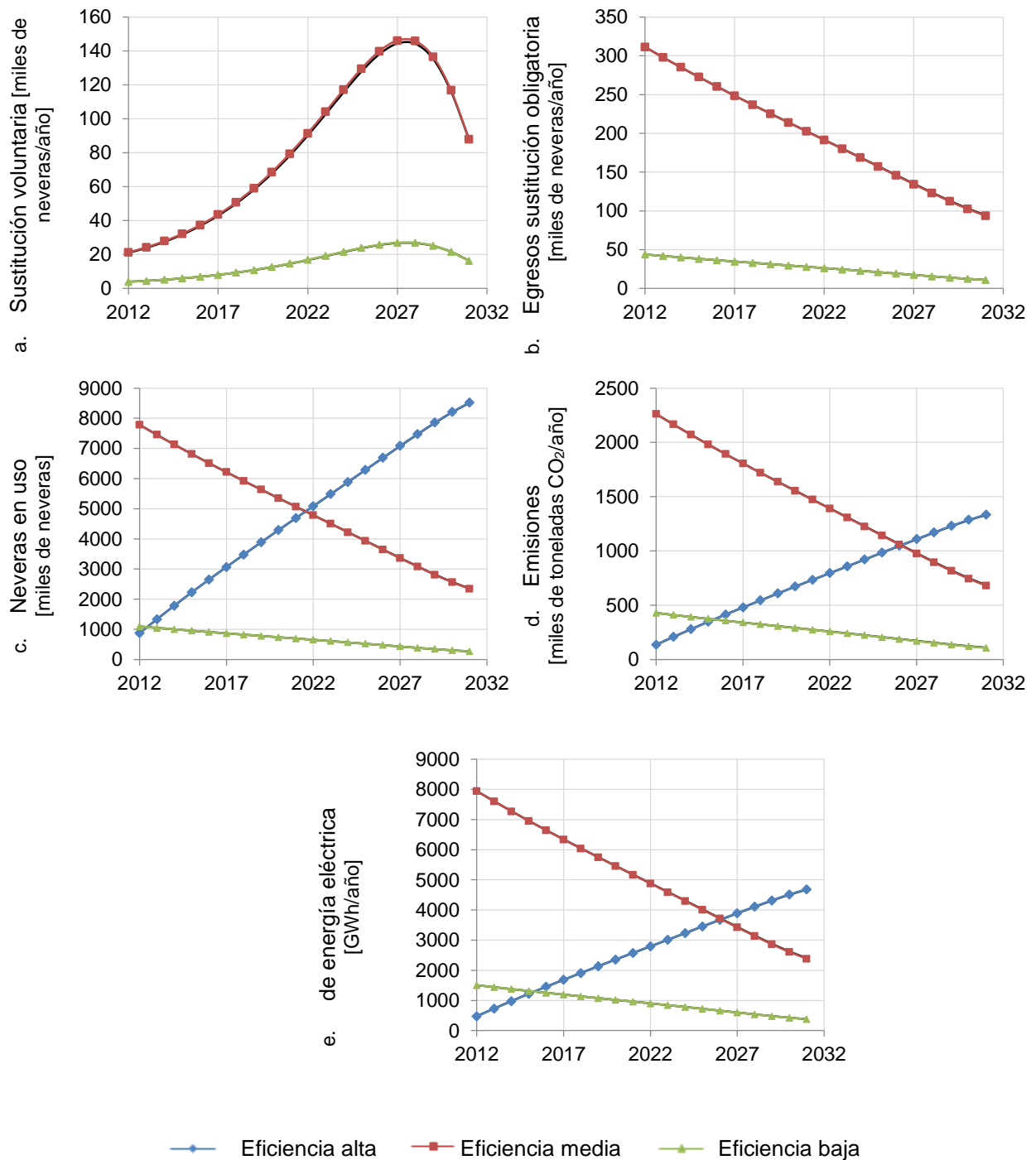
**Tabla 16.** Comparativo de las neveras sustituidas entre el caso base y la política de subsidio económico.

		Caso base	Política 2
Neveras sustituidas voluntariamente [miles de neveras]	Eficiencia alta	0	0
	Eficiencia media	1642	1663
	Eficiencia baja	305	306
	<b>Neveras totales sustituidas voluntariamente</b>	1947	1970

### Política 3: Reducción de tasas de interés para la compra de neveras eficientes

Este tipo de política fiscal busca reducir el la tasa de interés anual que para la compra de la nevera de alta eficiencia energética. Esta política se aplicó en el modelo de simulación en la variable *Tasa interés anual* mediante una reducción de del 20% del valor promedio para créditos de consumo de (27,9%). En la Figura 35 se muestran los efectos que tiene la aplicación de esta política en las variables de *Egresos por sustitución voluntaria*, *Egresos por sustitución obligatoria*, *Neveras en uso*, *Emisiones de CO2 de las neveras* y *Consumo total anual de electricidad neveras*.

Figura 35. Impactos en el modelo al aplicar la política de reducción de tasa de interés



El efecto de esta política, que es encontrado en la Figura 35., es comparado con los resultados del caso base (presentado en la sección 5.1) en el último periodo de simulación

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

---

(año 2032). A partir de estos resultados se hace un resumen comparativo que es presentado en la Tabla 17 en donde es posible observar la cantidad de neveras sustituidas voluntariamente con respecto al caso base para el año 2032.

**Tabla 17.** Comparativo de las neveras sustituidas entre el caso base y la política de reducción de tasa de interés anual.

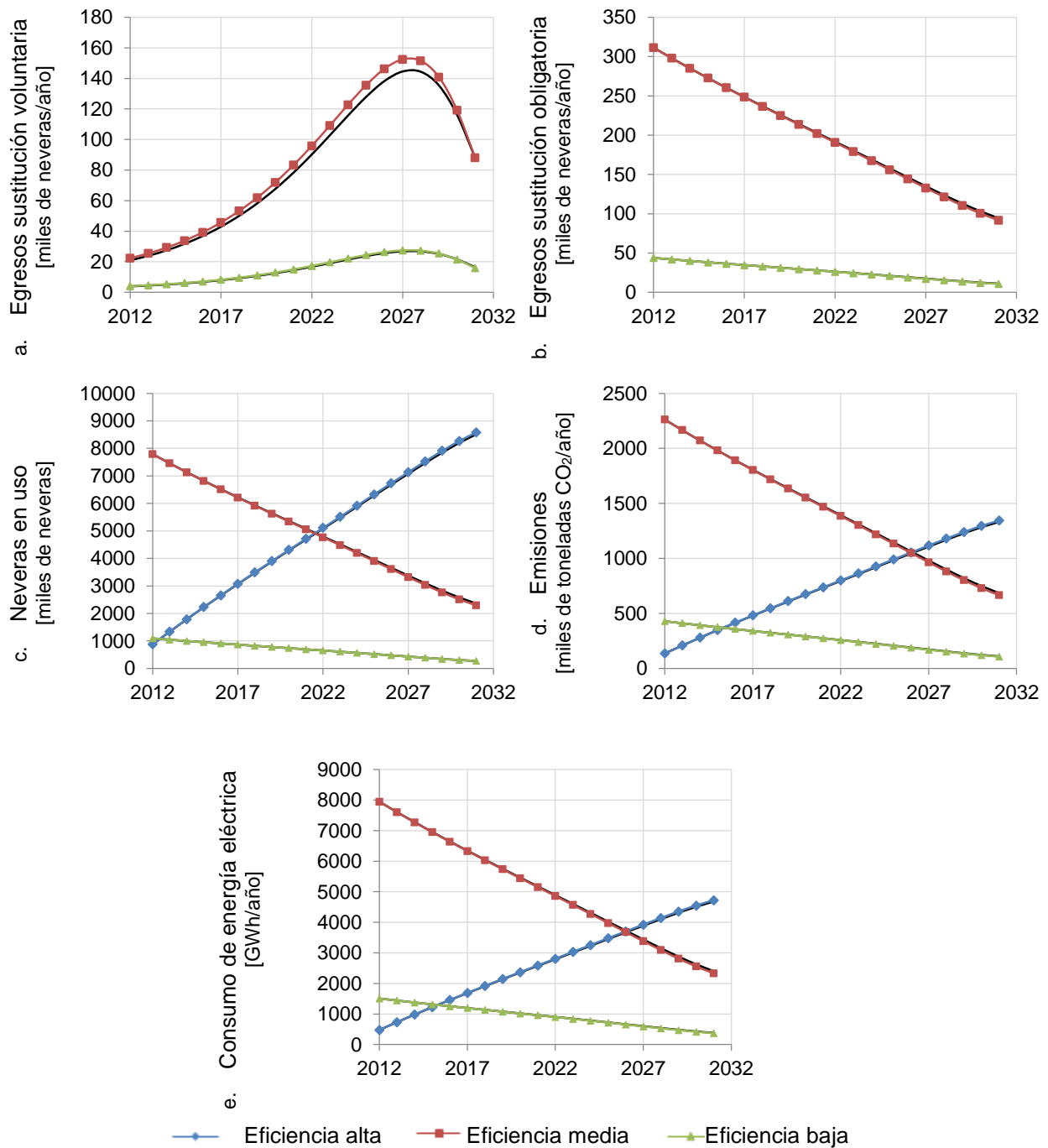
		Caso base	Política 3
Neveras sustituidas voluntariamente [miles de neveras]	Eficiencia alta	0	0
	Eficiencia media	1642	1660
	Eficiencia baja	305	306
Neveras totales sustituidas voluntariamente		1947	1966

### Política 4: Eliminación de tasas de interés para la compra de neveras eficientes

Este tipo de política fiscal parte de la política de reducción de impuestos y se convierte en una forma más agresiva de incentivar al consumidor mediante la eliminación de la tasa de interés anual para la compra de la nevera de alta eficiencia energética.

Esta política se aplicó en el modelo de simulación en la variable *Tasa interés anual* pasando de un valor promedio para créditos de consumo de 27,9% a 0%. En la Figura 36 se muestran los efectos que tiene la aplicación de esta política en las variables de *Egresos por sustitución voluntaria*, *Egresos por sustitución obligatoria*, *Neveras en uso*, *Emisiones de CO2 de las neveras* y *Consumo total anual de electricidad neveras*.

Figura 36. Impactos en el modelo al aplicar la política de eliminación de tasa de interés.



El efecto de esta política, que es encontrado en la Figura 36, es comparado con los resultados del caso base (presentado en la sección 5.1) en el último periodo de simulación (año 2032). A partir de estos resultados se hace un resumen comparativo que es

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

---

presentado en la Tabla 18 en donde es posible observar la cantidad de neveras sustituidas voluntariamente con respecto al caso base para el año 2032.

**Tabla 18.** Comparativo de las neveras sustituidas entre el caso base y la política de eliminación de tasa de interés anual.

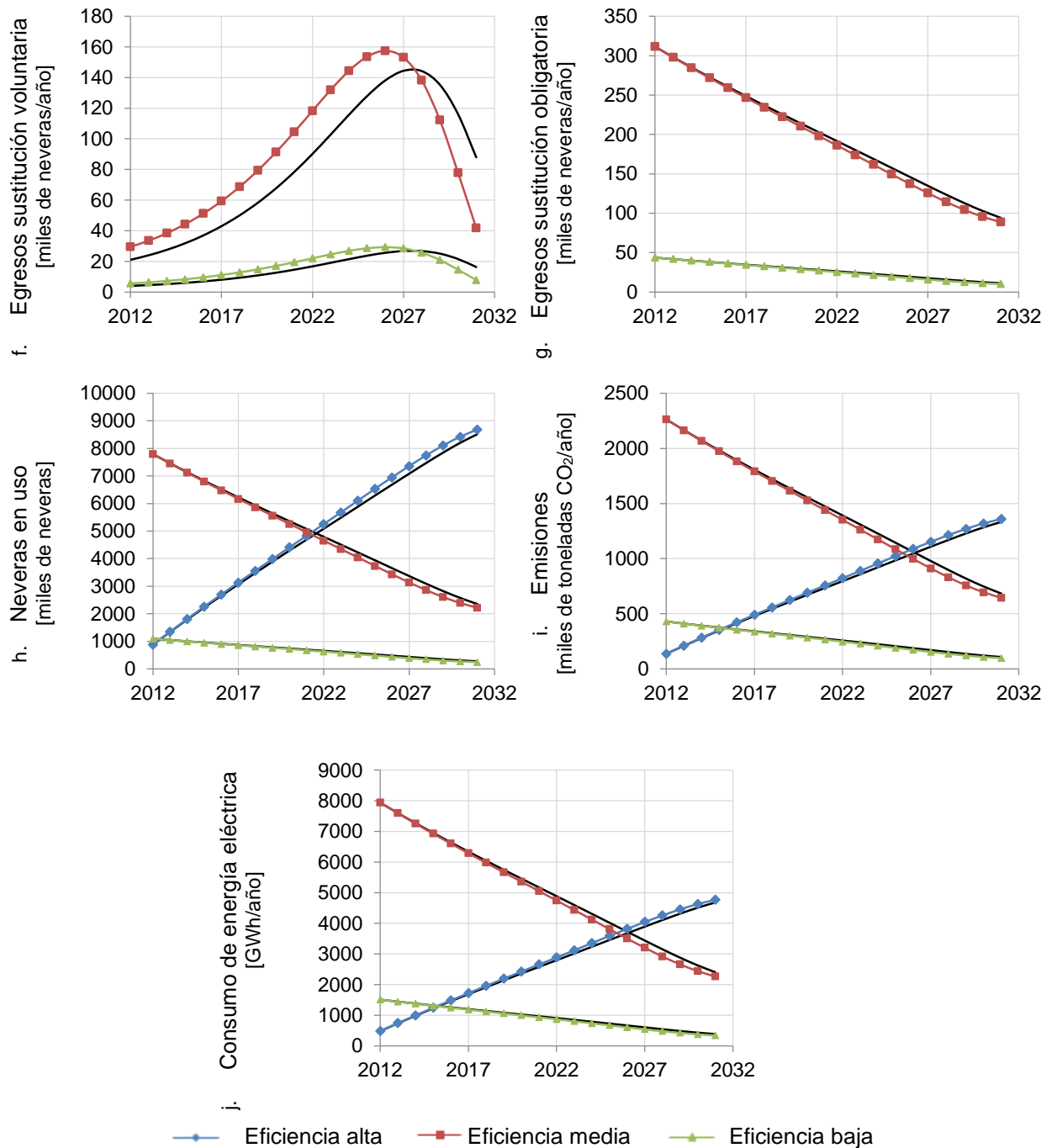
		Caso base	Política 4
Neveras sustituidas voluntariamente [miles de neveras]	Eficiencia alta	0	0
	Eficiencia media	1642	1728
	Eficiencia baja	305	312
	<b>Neveras totales sustituidas voluntariamente</b>	1947	2040

### Política 5: Divulgación de las neveras de eficiencia energética.

Se considera que este tipo de política hace parte de un programa de información del consumidor sobre conocimiento del etiquetado eficiente de las neveras domésticas. El conocimiento de un programa de etiquetado eficiente puede influir en la decisión de compra de un consumidor en una nevera de alta eficiencia energética. Este conocimiento se puede adquirir mediante campañas de mercadeo y promoción enfocadas en avisos publicitarios en periódicos, revistas, radio y televisión (McMahon & Wiel, 2001).

En el modelo de Bass el parámetro  $p$  representa las influencias externas entre las que se destacan los medios de comunicación (Bass, 2004a). Por tal motivo, esta política se aplicó en el modelo de simulación elevando el coeficiente de *influencias externas*  $p$  en un 40% con respecto a su valor inicial pasando de 0,0023 a 0.00322. En la Figura 37 se muestran los efectos que tiene la aplicación de esta política en las variables de *Egresos por sustitución voluntaria*, *Egresos por sustitución obligatoria*, *Neveras en uso*, *Emisiones de CO2 de las neveras* y *Consumo total anual de electricidad neveras*.

Figura 37. Impactos en el modelo al aplicar la política de divulgación de las neveras de eficiencia energética



## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

---

El efecto de esta política, que es encontrado en la Figura 37, es comparado con los resultados del caso base (presentado en la sección 5.1) en el último periodo de simulación (año 2032). A partir de estos resultados se hace un resumen comparativo que es presentado en la Tabla 19 en donde es posible observar la cantidad de neveras sustituidas voluntariamente con respecto al caso base para el año 2032.

**Tabla 19.** Comparativo de las neveras sustituidas entre el caso base y la política de programa de divulgación del programa de eficiencia energética.

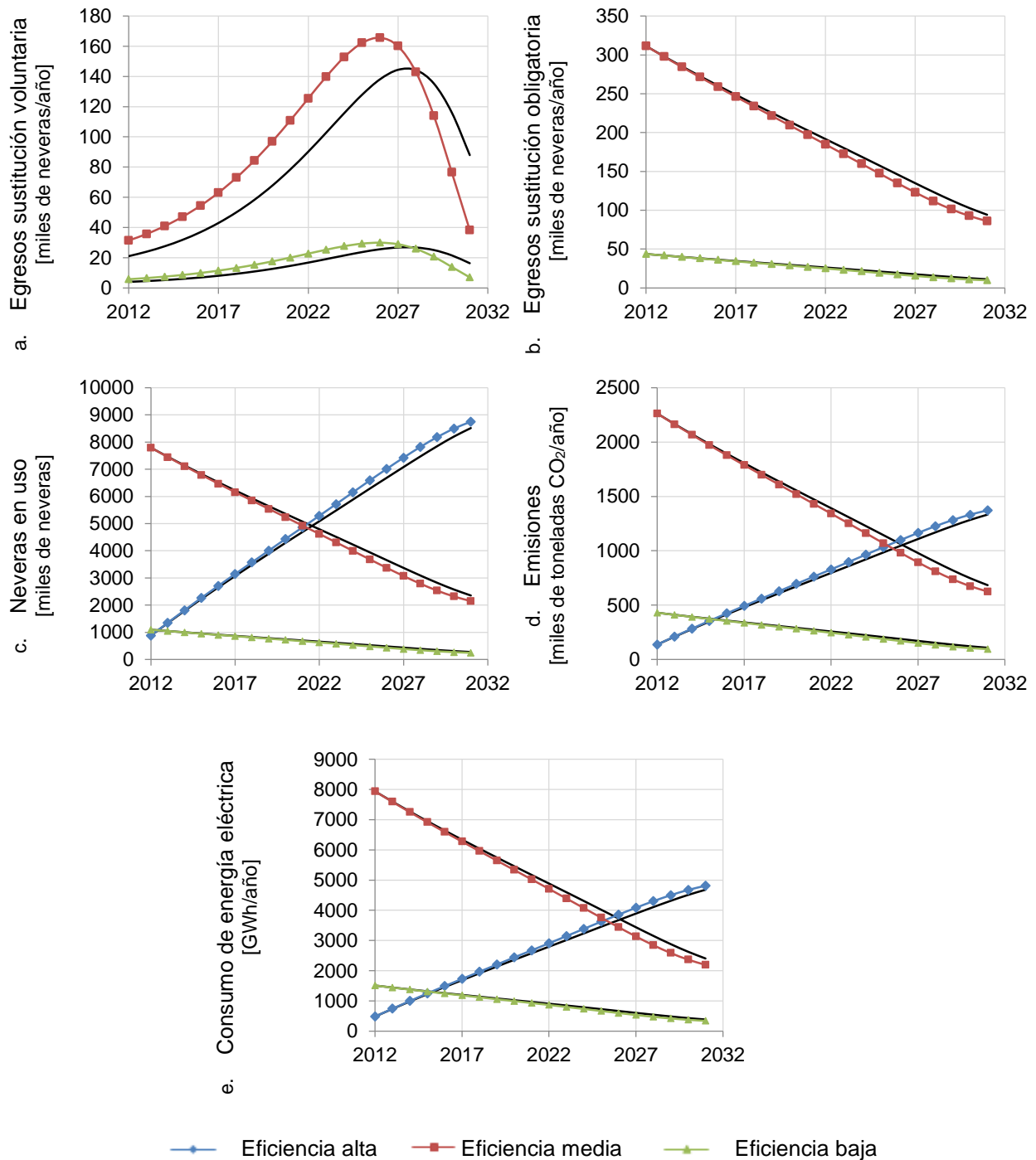
		Caso base	Política 5
Neveras sustituidas voluntariamente [miles de neveras]	Eficiencia alta	0	0
	Eficiencia media	1642	1829
	Eficiencia baja	305	340
	<b>Neveras totales sustituidas voluntariamente</b>	1947	2169

### **Política 6: combinación de las políticas 4 y 5: Eliminación de tasas de interés para la compra de neveras eficientes + Divulgación de las neveras de eficiencia energética.**

Ahora se analiza el efecto en el modelo de la combinación de una política de tipo de fiscal con una política de información, con el fin de obtener un mayor impacto en la reducción del consumo de electricidad y de emisiones de las neveras.

Estas políticas se aplicaron en el modelo de simulación modificando de forma simultánea la *Tasa interés anual* y elevando el coeficiente de *influencias externas p* en un 40% con respecto a su valor inicial. En la Figura 38 se muestran los efectos que tiene la aplicación de esta política en las variables de *Egresos por sustitución voluntaria*, *Egresos por sustitución obligatoria*, *Neveras en uso*, *Emisiones de CO2 de las neveras* y *Consumo total anual de electricidad neveras*.

**Figura 38.** Impactos en el modelo al aplicar de forma simultánea las políticas de eliminación de la tasa de interés y la divulgación de las neveras de eficiencia energética



## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

---

El efecto de estas dos políticas, que es encontrado en la Figura 38, es comparado con los resultados del caso base (presentado en la sección 5.1) en el último periodo de simulación (año 2032). A partir de estos resultados se hace un resumen comparativo que es presentado en la Tabla 20 en donde es posible observar la cantidad de neveras sustituidas voluntariamente con respecto al caso base para el año 2032.

**Tabla 20.** Comparativo de las neveras sustituidas entre el caso base y la política combinada de eliminación de tasa de interés anual y divulgación del programa de eficiencia energética.

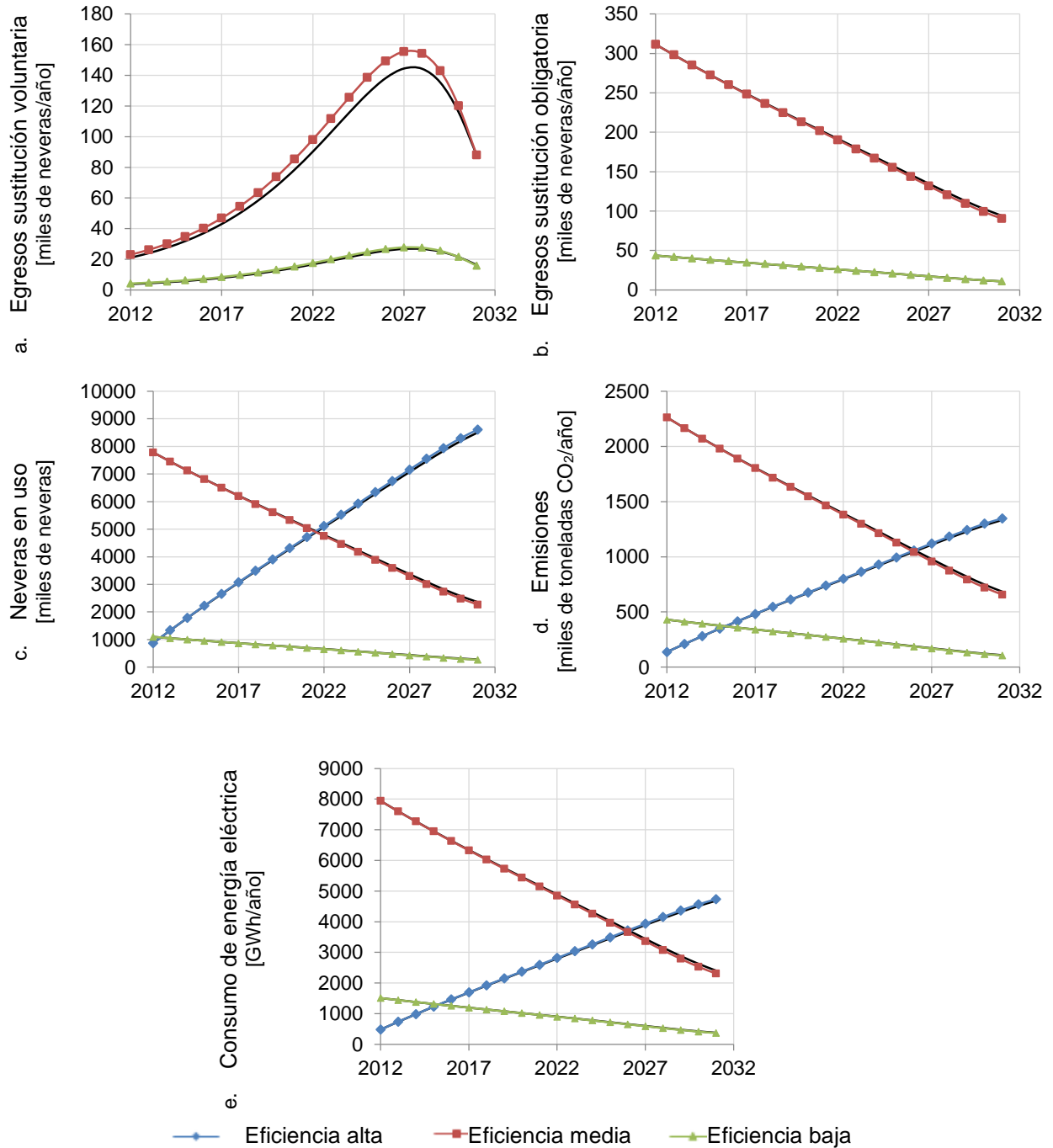
		Caso base	Política 6
Neveras sustituidas voluntariamente [miles de neveras]	Eficiencia alta	0	0
	Eficiencia media	1642	1916
	Eficiencia baja	305	346
	<b>Neveras totales sustituidas voluntariamente</b>	1947	2262

### **Política 7: combinación de las políticas 1, 4 y 5: Exención del IVA (Impuesto de valor agregado) + Eliminación de tasas de interés para la compra de neveras eficientes + Divulgación de las neveras de eficiencia energética.**

Ahora se analiza el efecto en el modelo de la combinación de dos políticas de tipo fiscal con una política de información, con el fin de obtener un mayor impacto en la reducción del consumo de electricidad y de emisiones de las neveras que la combinación de dos políticas.

Estas políticas se aplicaron en el modelo de simulación modificando de forma simultánea el *costo inversión*, la *Tasa interés anual* y el coeficiente de *influencias externas p*. En la Figura 39 se muestran los efectos que tiene la aplicación de esta política en las variables de *Egresos por sustitución voluntaria*, *Egresos por sustitución obligatoria*, *Neveras en uso*, *Emisiones de CO2 de las neveras* y *Consumo total anual de electricidad neveras*.

**Figura 39.** Impactos en el modelo al aplicar de forma simultánea las políticas de exención de impuestos, eliminación de la tasa de interés y la divulgación de las neveras de eficiencia energética



## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

El efecto de estas dos políticas, que es encontrado en la Figura 39, es comparado con los resultados del caso base (presentado en la sección 5.1) en el último periodo de simulación (año 2032). A partir de estos resultados se hace un resumen comparativo que es presentado en la Tabla 21 en donde es posible observar la cantidad de neveras sustituidas voluntariamente con respecto al caso base para el año 2032.

**Tabla 21.** Comparativo de las neveras sustituidas entre el caso base y la política combinada de eliminación de tasa de interés anual, divulgación del programa de eficiencia energética y eliminación del IVA.

		Caso base	Política 6
<b>Neveras sustituidas voluntariamente [miles de neveras]</b>	Eficiencia alta	0	0
	Eficiencia media	1642	1940
	Eficiencia baja	305	348
	<b>Neveras totales sustituidas voluntariamente</b>	1947	2282

A continuación, en la Tabla 22 se presenta una comparación entre el caso base y cada uno de las políticas de eficiencia energética planteadas en esta investigación, En el caso base no hay sustitución de neveras a causa de algún tipo de incentivo al consumidor, la sustitución en este escenario se da por el proceso del reemplazo del electrodoméstico, por lo tanto se compara este escenario con aquellos dónde se aplicaron incentivos tanto económicos como de información hacia el consumidor. En estos escenarios dónde se aplicaron políticas de eficiencia energética fue posible identificar sustitución de neveras, ahorro en el consumo total de electricidad y ahorro en las emisiones de carbono. A partir de estos resultados, fue posible identificar que la política 7, la cual consiste en la eliminación del iva del producto y en un incentivo de información sobre la eficiencia energética del producto, fue la que produjo mayor cantidad de neveras sustituidas durante todo el periodo de simulación, con 337.911 neveras sustituidas en 20 años. También es posible observar que la aplicación individual de políticas ya sea económicas o de información, tales como la política 4 y 5, presentaron un valor muy similar de sustitución de neveras, aunque inferior a las sustituciones logradas con la política integrada 7.

**Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia**

**Tabla 22.** Comparación del caso base con las políticas planteadas con respecto al ahorro en electricidad y emisiones de carbono.

Escenario	IVA	Costo de inversión	Tasa interés anual (%)	Subsidio económico (\$)	Programa de divulgación de información	Neveras totales sustituidas	Ahorro total de electricidad (GWh)	Ahorro total de emisiones de carbono (Ton CO <sub>2</sub> )
Caso Base	16%	1.135.419	27,9	0	No	0	0	0
Política 1	0%	1.135.419	27,9	0	No	40.330	20.162	5.744
Política 2	16%	1.135.419	27,9	100.000	No	22.369	11.188	3.187
Política 3	16%	1.135.419	22.32	0	No	20.145	10.076	2.871
Política 4	16%	1.135.419	0	0	No	62.117	31.039	8.843
Política 5	16%	1.135.419	27,9	0	Sí	61.354	40.781	11.619
Política 6	16%	1.135.419	0	0	Sí	314.230	162.598	46.324
Política 7	0%	1.135.419	0	0	Sí	337.911	174.316	49.663

Como se encontró en el análisis de sensibilidad presentado en la sección 4.4.2 (Pruebas de la estructura orientadas al comportamiento), el modelo de simulación es poco sensible a variaciones en el *costo de inversión* de la nevera eficiente. Al aplicar las políticas fiscales 1 y 2, las cuales fueron realizadas modificando la variable de *costo de inversión*, fue posible observar que los porcentajes de mejora con respecto al caso base fueron de 0,21% y 0,12% respectivamente. A partir de estos resultados, se considera que un incentivo de este tipo, sería más efectivo si hiciera parte de un programa que también involucrara a la parte de la oferta y no sólo la demanda.

## 6. Conclusiones

En este capítulo se presentan las principales conclusiones de la investigación desarrollada y se proponen trabajos futuros que permitan continuar con el estudio del problema de investigación planteado en este documento

En Colombia, el consumo de energía eléctrica residencial es causado por el uso continuo de electrodomésticos. Uno de los electrodomésticos que más consume electricidad es la nevera, y de acuerdo con (Blaser, 2009) su tiempo de vida útil suele ser extendido a más de 25 años, doblando incluso el tiempo de uso que se da en países desarrollados como Estados Unidos y Reino Unido. Por este motivo, se decidió analizar su sustitución por un artefacto nuevo y de alta eficiencia energética que permita reducir el consumo de electricidad y las emisiones de carbono. Además, durante la revisión de literatura fue posible identificar, de acuerdo con la principal entidad gubernamental encargada de asuntos de energía en Colombia (UPME), el uso eficiente de energía en equipos de refrigeración doméstica es una medida de prioridad alta en nuestro país. Por tanto, el problema de investigación analizado en este estudio es de prioridad e interés nacional.

En la revisión de literatura realizada a lo largo de la investigación fue posible identificar que la sustitución de electrodomésticos es considerada una política de eficiencia energética en el sector residencial. Además, también fue posible identificar otros tipos de políticas tales como políticas fiscales (subsídios, reducción de impuestos y de tasas de interés para la compra de electrodomésticos eficientes), políticas de información (campañas de medios para promocionar equipos eficientes) y estandarización y etiquetado de eficiencia energética en electrodomésticos. A partir de la identificación de este grupo de políticas, se seleccionaron políticas específicas dirigidas a los consumidores para incentivar la

sustitución de neveras domésticas y las cuales son aplicadas al modelo de simulación del capítulo 5.

A partir del estudio de campo realizado en grandes superficies en la ciudad de Medellín, fue posible reconocer que el 55,8 % de las neveras exhibidas para ser adquiridas por los consumidores finales no presentaban la etiqueta de eficiencia energética, el 33,7 % presentaban la etiqueta de eficiencia energética establecida en nuestro país tal como lo dice la norma NTC 5020 y el 10,5 % presentaban etiqueta de eficiencia energética de países como México y Estados Unidos. Por tanto se concluye que esta falta de homogeneidad en la presencia de etiquetado puede afectar la decisión del consumidor acerca de la compra de una nevera de alta eficiencia energética.

De este estudio de campo, también fue posible concluir la falta de divulgación del conocimiento y entendimiento de la etiqueta de eficiencia energética, ya que en ocasiones puede ser confundida con publicidad del fabricante acerca de las características de la nevera, y también su información puede ser confusa para quienes la quieran tomar en cuenta a la hora de la compra del electrodoméstico.

Durante el desarrollo de esta investigación se conoció que en Colombia se está desarrollando una nueva propuesta de Reglamento Técnico de Etiquetado Eficiente (RETIQ) en equipos que utilizan energía eléctrica entre los cuales se encuentran los refrigeradores domésticos. Al revisar esta información se debe considerar que las etiquetas van dirigidas hacia el consumidor, por tanto se hace la recomendación de que esta nueva etiqueta sea más clara en su información que la etiqueta actual y que vaya acompañada de un programa intensivo de conocimiento para que desde su inicio sea una influencia positiva a la hora de la compra de neveras nuevas.

De acuerdo con la revisión de modelos y estudios que aplican políticas de eficiencia energética residencial y con las diferentes metodologías de simulación consultadas se decidió elaborar un modelo de simulación basado en la técnica de Dinámica de Sistemas que permitiera integrar la elección de sustitución de la nevera mediante un modelo de

elección discreta logit binario y la aplicación de políticas de eficiencia energética para estudiar su impacto en el consumo de electricidad y emisiones de carbono.

Debido a que no fue posible encontrar encuestas de preferencia de los consumidores sobre la elección entre sustituir o no su nevera actual por una nueva y eficiente, no se estimaron los parámetros beta del modelo logit para el caso Colombiano. Por esta razón fue necesario utilizar los parámetros ya estimados para el mercado de Shanghai, China para las variables de volumen de almacenamiento y precio de la nevera. Esta situación hace que se recomiende como trabajo futuro desarrollar un experimento de elección discreta con el fin de calcular estos parámetros para el mercado Colombiano, y de esta forma evitar la incertidumbre que se tiene cuando se calcula la probabilidad de elección utilizando parámetros de otras economías. Además se obtiene la posibilidad de involucrar otros atributos en la decisión, tales como características del hogar y del consumidor.

Además, como trabajo futuro se recomienda:

- Desarrollar un experimento de elección discreta con el fin de calcular los parámetros beta del modelo logit para las características sociales y económicas de Colombia y de esta forma evitar la incertidumbre presente en al calcula la probabilidad de sustitución utilizando parámetros de otras economías.
- Realizar un análisis beneficio-costo de la implementación de campañas de conocimiento de la etiqueta de eficiencia energética para Colombia
- Se recomienda que el proceso de sustitución de los electrodomésticos ineficientes se encuentre acompañado por un programa de reciclado obligatorio para garantizar que estos productos salgan de uso y se realice un manejo correcto de los CFCs.

**Reporte del cumplimiento de los objetivos específicos:**

- Identificar las principales características de los electrodomésticos de uso residencial que influyen en la sustitución de los mismos.

En el capítulo 2 se realizó una revisión de las características que los consumidores tienen en cuenta a la hora de comprar un electrodoméstico nuevo, en particular neveras, dando

como resultado las características de costo inicial de inversión, el costo de operación, el consumo de electricidad y la capacidad o volumen de almacenamiento. A partir de esta identificación, fue posible utilizar las características en el modelo para determinar la elección del consumidor entre sustituir o no su nevera por una nueva y eficiente energéticamente. Además, fue necesario realizar un estudio de campo en grandes superficies de la ciudad de Medellín con el fin de conocer los valores que tendrán el costo inicial de inversión y el volumen de almacenamiento de la nevera de alta eficiencia energética en el modelo de simulación.

- Desarrollar un modelo de simulación que permita analizar el comportamiento del consumo residencial de energía bajo distintos escenarios de sustitución de electrodomésticos.

Para lograr este objetivo, en el capítulo 4 se desarrolló un modelo de simulación de Dinámica de Sistemas (metodología seleccionada en el capítulo 3) de la sustitución de las neveras en los hogares colombianos, permitiendo de esta forma analizar el consumo de energía las emisiones de carbono de este electrodoméstico mediante un caso base y siete escenarios de políticas de eficiencia energética. Estas políticas fueron identificadas en el capítulo 2 como políticas fiscales, de información y estándares y etiquetado.

En el modelo de simulación construido se aplicó un análisis de sensibilidad a la variable *Neveras sustituidas voluntariamente*, que evidenció que ésta variable es sensible a variaciones en los parámetros de influencias internas y externas. Por tanto, se considera que las políticas dirigidas al consumidor deberían estar combinadas con políticas dirigidas a los fabricantes de electrodomésticos, con el fin de incrementar la efectividad del programa de sustitución de neveras domésticas.

- Comparar los diferentes escenarios y determinar cuál de ellos presenta una mayor contribución a la reducción tanto en el consumo de energía, como en la de emisiones de carbono

En el capítulo 5 se aplicaron siete políticas de eficiencia energética: cinco individuales y dos combinadas. Posteriormente, se compararon sus resultados con el caso base y se encontró

## **Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia**

---

que entre las políticas fiscales aplicadas se observan mejores resultados con la eliminación de las tasas de interés. Es posible sustituir en 20 años (con respecto al caso base) 62.217 neveras, ahorrar 31.039 GWh y no emitir 8.843 toneladas CO<sub>2</sub>.

Con respecto a la política de información (publicidad del etiquetado para la divulgación de neveras eficientes) se lograron sustituir 61.354 neveras, ahorrar 40.7819 GWh, no emitir 11.619 toneladas CO<sub>2</sub>.

Sin embargo el mejor escenario consiste en las políticas que integren tanto mediadas fiscales como de información (política #7): 0% IVA, 0% tasas de interés y programa publicitario en funcionamiento con el cual se lograron sustituir 337.911 neveras, ahorrar 174.316 GWh, no emitir 49.663 toneladas CO<sub>2</sub>.

## 7. Bibliografía

- Ashina, S., & Nakata, T. (2008). Energy-efficiency strategy for CO2 emissions in a residential sector in Japan. *Applied Energy*, 85(2-3), 101–114.  
doi:10.1016/j.apenergy.2007.06.011
- Badham, J. (2010). A compendium of modelling techniques. *Integration Insights*, (12), 1–25. doi:1834-304X
- Baena, A. (2011). *Dinámica de la penetración de tecnologías alternativas para vehículos automotores y su impacto en las concentraciones de carbono atmosférico*. Universidad Nacional de Colombia.
- Bagdasaryan, A. (2011). Discrete dynamic simulation models and technique for complex control systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(4), 1061–1087.  
doi:10.1016/j.simpat.2010.12.010
- Banerjee, A., & Solomon, B. D. (2003). Eco-labeling for energy efficiency and sustainability: a meta-evaluation of US programs. *Energy Policy*, 31(2), 109–123.  
doi:10.1016/S0301-4215(02)00012-5
- Barlas, Y. (1994). Model validation in System Dynamics. Presented at the International System Dynamics Conference.
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *Systems Dynamics Review*, 12(3), 183–210.

- Bass, F. M. (2004a). A New Product Growth for Model Consumer Durables. *Management Science*, 50(12\_supplement), 1825–1832. doi:10.1287/mnsc.1040.0264
- Bass, F. M. (2004b). Comments on ?A New Product Growth for Model Consumer Durables? *Management Science*, 50(12 Supplement), 1833–1840. doi:10.1287/mnsc.1040.0300
- Bertoldi, P., Hirl, B., & Labanca, N. (2012). Energy Efficiency Status Report 2012. Retrieved from <http://iet.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/sites/energyefficiency/files/energy-efficiency-status-report-2012.pdf>
- Blaser, F. (2009). Gestión de Residuos Electrónicos en Colombia. Diagnóstico de Electrodomésticos y de Aparatos Electrónicos de Consumo. Retrieved from [http://www.ewasteguide.info/files/EMPA-ANDI\\_Diagnostico\\_Electrodomesticos\\_y\\_Aparatos\\_Electronicos\\_de\\_Consumo.pdf](http://www.ewasteguide.info/files/EMPA-ANDI_Diagnostico_Electrodomesticos_y_Aparatos_Electronicos_de_Consumo.pdf)
- Blumberga, A., Zogla, G., Davidsen, P., & Moxnes, E. (2011). Residential Energy Efficiency Policy in Latvia: A System Dynamics Approach. In *International Conference of the System Dynamics Society, Washington, DC, USA*. Retrieved from <http://www.systemdynamics.org/conferences/2011/proceed/papers/P1106.pdf>
- Böhringer, C., & Rutherford, T. F. (2009). Integrated assessment of energy policies: Decomposing top-down and bottom-up. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 33(9), 1648–1661. doi:10.1016/j.jedc.2008.12.007
- Brown, M. A. (2001). Market failures and barriers as a basis for clean energy policies. *Energy Policy*, 29(14), 1197–1207. doi:10.1016/S0301-4215(01)00067-2
- Chopard, B., & Droz, M. (2000). Cellular Automata Modelling of Physical Systems. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and*

- Fields*, 13(1), 75–75. doi:10.1002/(SICI)1099-1204(200001/02)13:1<75::AID-JNM381>3.0.CO;2-M
- Chunekar, A. (2014). Standards and Labeling program for refrigerators: Comparing India with others. *Energy Policy*, 65, 626–630. doi:10.1016/j.enpol.2013.09.069
- Consorcio Bariloche, & UPME. (2007). Consultoría pra la formulación estratégica del plan de Uso Racional de Energía y de Fuentes no Convencionaes de Energía 2007 – 2025. Retrieved from [http://www.corpoema.com/Informacion%20FNCE/Eficiencia/UPME\\_Medidas%20URE%20Bariloche.pdf](http://www.corpoema.com/Informacion%20FNCE/Eficiencia/UPME_Medidas%20URE%20Bariloche.pdf)
- Daioglou, V., van Ruijven, B. J., & van Vuuren, D. P. (2012). Model projections for household energy use in developing countries. *Energy*, 37(1), 601–615. doi:10.1016/j.energy.2011.10.044
- DANE. (2009). Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos 2006/2007. Retrieved from <http://www.dane.gov.co/index.php/calidad-vida/encuesta-de-ingresos-y-gastos>
- DANE. (2010). *Boletín Censo General 2005 Colombia*.
- DANE. (2011). Encuesta Nacional Calidad de Vida 2010. Retrieved from [www.dane.gov.co/files/.../condiciones.../Boletin\\_Prensa\\_ECV\\_2010.pdf](http://www.dane.gov.co/files/.../condiciones.../Boletin_Prensa_ECV_2010.pdf)
- DANE. (2013). Encuesta Nacional Calidad de Vida 2012. Retrieved from [www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/tic/bol\\_tic\\_2012.pdf](http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/tic/bol_tic_2012.pdf)
- Dianshu, F., Sovacool, B. K., & Minh Vu, K. (2010). The barriers to energy efficiency in China: Assessing household electricity savings and consumer behavior in Liaoning Province. *Energy Policy*, 38(2), 1202–1209. doi:10.1016/j.enpol.2009.11.012
- Dyner, I., Smith, R. A., & Peña, G. E. (1995). System Dynamics Modelling for Residential Energy Efficiency Analysis and Management. *The Journal of the Operational Research Society*, 46(10), 1163–1173. doi:10.2307/2584613

- EIA. (2005). Assessment of Selected Energy Efficiency Policies.
- Elias, A. A. (2008). Energy efficiency in New Zealand's residential sector: A systemic analysis. *Energy Policy*, 36(9), 3278–3285.
- Erasmus, A. C., Makgopa, M. M., & Kachale, M. G. (2005). The paradox of progress: inexperienced consumers' choice of major household appliances. *Journal of Family Ecology and Consumer Sciences*, 33, 89–101.
- Eusgeld, I., Henzi, D., & Kröger, W. (2008). *Comparative Evaluation of Modeling and Simulation Techniques for Interdependent Critical Infrastructures* (pp. 1–50). Zurich.
- FIDE. (2012, April). Una historia de éxito. *Evolución Y Energía*, 3. Retrieved from [http://www.fide.org.mx/images/stories/revista/evolucion\\_energia\\_3.pdf](http://www.fide.org.mx/images/stories/revista/evolucion_energia_3.pdf)
- Fleiter, T., Worrell, E., & Eichhammer, W. (2011). Barriers to energy efficiency in industrial bottom-up energy demand models—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3099–3111. doi:10.1016/j.rser.2011.03.025
- Forrester, J. W., & Senge, P. M. (1980). Test for building confidence in System Dynamics models. *Times Studies in the Management Sciences*, 14, 209–228.
- Franco, C. (1996). *Un modelo nacional desagregado para la formulación de políticas para el uso racional de energía*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/1542/>
- Franco, C. (2002). *Racionalidad limitada del consumidor en mercados energéticos desregulados y la función del comercializador y el gobierno*.
- Galarraga, I., Heres, D. R., & Gonzalez-Eguino, M. (2011). Price premium for high-efficiency refrigerators and calculation of price-elasticities for close-substitutes: a methodology using hedonic pricing and demand systems. *Journal of Cleaner Production*, 19(17-18), 2075–2081. doi:10.1016/j.jclepro.2011.06.025

- Garzón, L. (2010). *Estudio de las Dinámicas de Movilidad Residencial y su efecto en el Uso del Suelo del Área Metropolitana del Valle de Aburrá*. Universidad Nacional de Colombia.
- Gaspar, R., & Antunes, D. (2011). Energy efficiency and appliance purchases in Europe: Consumer profiles and choice determinants. *Energy Policy*, 39(11), 7335–7346. doi:10.1016/j.enpol.2011.08.057
- 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. doi:10.1016/j.enpol.2005.11.010
- Gillingham, K., Newell, R., & Palmer, K. (2006). Energy Efficiency Policies: A Retrospective Examination. *Annual Review of Environment and Resources*, 31(1), 161–192. doi:10.1146/annurev.energy.31.020105.100157
- Giraudet, L.-G., Guivarch, C., & Quirion, P. (2008). Comparing and Combining Energy Saving Policies: Will Proposed Residential Sector Policies Meet French Official Targets? *The Energy Journal*, 32(Special Issue 1), 213–242.
- ICONTEC. (2009). Norma Técnica Colombiana NTC 5020.
- IEA. (2009). Gadgets and gigawatts: Policies for energy efficiency electronics. Retrieved from <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/gigawatts2009-1.pdf>
- IEA, O. (2007). Mind the gap. Retrieved from [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/mind\\_the\\_gap.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/mind_the_gap.pdf)
- Jaccard, M., & Dennis, M. (2006). Estimating home energy decision parameters for a hybrid energy—economy policy model. *Environmental Modeling & Assessment*, 11(2), 91–100. doi:10.1007/s10666-005-9036-0

- Jamshidi, M. (2008). An analysis of residential energy intensity in Iran, a system dynamics approach. In *Proceedings of the 26th International Conference of the System Dynamics Society, Athens, Greece* (pp. 20–24). Retrieved from <http://www.systemdynamics.org/conferences/2008/proceed/papers/JAMSH383.pdf>
- Jiang, Z., Bass, F. M., & Bass, P. I. (2006). Virtual Bass Model and the left-hand data-truncation bias in diffusion of innovation studies. *International Journal of Research in Marketing*, 23(1), 93–106. doi:10.1016/j.ijresmar.2006.01.008
- Kadian, R., Dahiya, R. P., & Garg, H. P. (2007). Energy-related emissions and mitigation opportunities from the household sector in Delhi. *Energy Policy*, 35(12), 6195–6211. doi:10.1016/j.enpol.2007.07.014
- Karnon, J., Stahl, J., Brennan, A., Caro, J. J., Mar, J., & Moller, J. (2012). Modeling Using Discrete Event Simulation: A Report of the ISPOR-SMDM Modeling Good Research Practices Task Force-4. *Medical Decision Making*, 32(5), 701–711. doi:10.1177/0272989X12455462
- Kellner, M., Madachy, R., & Raffo, D. M. (1999). Software Process Simulation Modeling: Why? What? How? *Journal of Systems and Software*, 46(2/3), 1–18.
- Kim, H. C., Keoleian, G. A., & Horie, Y. A. (2006). Optimal household refrigerator replacement policy for life cycle energy, greenhouse gas emissions, and cost. *Energy Policy*, 34(15), 2310–2323. doi:10.1016/j.enpol.2005.04.004
- Kounetas, K., Skuras, D., & Tsekouras, K. (2011). Promoting energy efficiency policies over the information barrier. *Information Economics and Policy*, 23(1), 72–84. doi:10.1016/j.infoecopol.2010.08.001
- Letschert, V. E., McNeil, M. A., Pavon, M., & Lutz, W. (2013). Design of Standards and Labeling programs in Chile: Techno-Economic Analysis for Refrigerators. In *Proceedings of the 4th ELAEE*. Uruguay.

- Li, H., & Dai, H.-X. (2008). System Dynamics Based Research on Energy Efficient Residence Market. In *4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM '08* (pp. 1–4).  
doi:10.1109/WiCom.2008.1943
- Lo, K. (2014). A critical review of China's rapidly developing renewable energy and energy efficiency policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 508–516.  
doi:10.1016/j.rser.2013.09.006
- Lu, W. (2006). Potential energy savings and environmental impact by implementing energy efficiency standard for household refrigerators in China. *Energy Policy*, 34(13), 1583–1589. doi:10.1016/j.enpol.2004.12.012
- Macal, C. M., & North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 4(3), 151–162. doi:10.1057/jos.2010.3
- Mahlia, T. M. . (2004). Methodology for predicting market transformation due to implementation of energy efficiency standards and labels. *Energy Conversion and Management*, 45(11-12), 1785–1793. doi:10.1016/j.enconman.2003.09.021
- Mahlia, T. M. I., & Saidur, R. (2010). A review on test procedure, energy efficiency standards and energy labels for room air conditioners and refrigerator–freezers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1888–1900.  
doi:10.1016/j.rser.2010.03.037
- Markandya, A., Ortiz, R. A., Mudgal, S., & Tinetti, B. (2009). Analysis of tax incentives for energy-efficient durables in the EU. *Energy Policy*, 37(12), 5662–5674.  
doi:10.1016/j.enpol.2009.08.031
- McFadden, D. (1980). Econometric Models for probabilistic Choice Among Products. *The Journal of Business*, 53(3), S13–S29.

- McFadden, D., Ben-Akiva, M., Abe, M., Böcenholt, U., Bolduc, D., Gopinath, D., ...  
Steinberg, D. (1997). Modeling Methods for Discrete Choice Analysis. *Marketing Letters*, 8(3), 273–286.
- McMahon, J. E., & Wiel, S. (2001). *Energy-efficiency labels and standards: A guidebook for appliances, equipment and lighting* (No. LBNL--45387, 836221). Retrieved from <http://www.osti.gov/servlets/purl/836221-AL2uNh/native/>
- McNeil, M. A., Letschert, V. E., & Rue du Can, S. de la. (2008). Global potential of energy efficiency standards and labeling programs.
- Michelsen, C. C., & Madlener, R. (2012). Homeowners' preferences for adopting innovative residential heating systems: A discrete choice analysis for Germany. *Energy Economics*, 34(5), 1271–1283. doi:10.1016/j.eneco.2012.06.009
- Mills, B., & Schleich, J. (2010). What's driving energy efficient appliance label awareness and purchase propensity? *Energy Policy*, 38(2), 814–825.  
doi:10.1016/j.enpol.2009.10.028
- Mills, B., & Schleich, J. (2013). Analysis of Existing Data: Determinants for the Adoption of Energy-Efficient Household Appliances in Germany. In K. Rennings, B. Brohmann, J. Nentwich, J. Schleich, T. Traber, & R. Wüstenhagen (Eds.), *Sustainable Energy Consumption in Residential Buildings* (Vol. 44, pp. 39–67). Heidelberg: Physica-Verlag HD. Retrieved from [http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-7908-2849-8\\_2](http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-7908-2849-8_2)
- Ministerio de Minas y Energía. (2010). Resolución 180919 de 2010.
- Mundaca, L. (2008). Markets for energy efficiency: Exploring the implications of an EU-wide “Tradable White Certificate” scheme. *Energy Economics*, 30(6), 3016–3043.  
doi:10.1016/j.eneco.2008.03.004

- Mundaca, L., Neij, L., Worrell, E., & McNeil, M. (2010). Evaluating Energy Efficiency Policies with Energy-Economy Models. *Annual Review of Environment and Resources*, 35(1), 305–344. doi:10.1146/annurev-environ-052810-164840
- Murphy, R., & Jaccard, M. (2008). Modeling Efficiency Standards and Carbon Tax: Simulations for the U.S. using a Hybrid Approach. *The Energy Journal*, 32(Special Issue 1), 43–60.
- Murphy, R., & Jaccard, M. (2011). Energy efficiency and the cost of GHG abatement: A comparison of bottom-up and hybrid models for the US. *Energy Policy*, 39(11), 7146–7155. doi:10.1016/j.enpol.2011.08.033
- Nakata, T., Silva, D., & Rodionov, M. (2011). Application of energy system models for designing a low-carbon society. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(4), 462–502. doi:10.1016/j.pecs.2010.08.001
- Neelis, M. L., Patel, M., Gielen, D. J., & Blok, K. (2005). Modelling CO2 emissions from non-energy use with the non-energy use emission accounting tables (NEAT) model. *Resources, Conservation and Recycling*, 45(3), 226–250. doi:10.1016/j.resconrec.2005.05.003
- Newman, J. W., & Staelin, R. (1972). Prepurchase Information Seeking for New Cars and Major Household Appliances. *Journal of Marketing Research*, 9(3), 249–257.
- Oliver, T., Lew, D., Redlinger, R., & Prijyanonda, C. (2001). Global energy efficiency and renewable energy policy options and initiatives. *Energy for Sustainable Development*, 5(2), 15–25. doi:10.1016/S0973-0826(08)60266-5
- Ortúzar S., J. de D. (2000). *Modelos econométricos de elección discreta*. Santiago de Chile: Universidad Católica de Chile.

- PNUD. (2005). Fortalecimiento de la capacidad para eliminar las barreras para el desarrollo y la implementación de normas y etiquetado de eficiencia energética (CSL-Andino). Retrieved from <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/URE/docsyl.pdf>
- Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381. doi:10.1016/j.rser.2003.12.007
- Prias, O. (2010). PROGRAMA DE USO RACIONAL Y EFICIENTE DE ENERGÍA Y FUENTES NO CONVENCIONALES - PROURE. Retrieved from <http://www.corpoema.net/Informacion%20FNCE/Eficiencia/1.pdf>
- Qudrat-Ullah, H. (2005). Structural validation of system dynamics and agent-based simulation models. Presented at the 19th European Conference on Modelling and Simulation, Riga, Latvia.
- Qudrat-Ullah, H. (2011). On the validation of system dynamics type simulation models. *Telecommunication Systems*, 51(2-3), 159–166. doi:10.1007/s11235-011-9425-4
- Rivers, N., & Jaccard, M. (2005). Combining Top-Down and Bottom-Up Approaches to Energy-Economy Modeling Using Discrete Choice Methods. *The Energy Journal*, 26(1). doi:10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol26-No1-4
- Saidur, R., Masjuki, H. H., & Mahlia, T. M. I. (2005). Labeling design effort for household refrigerator-freezers in Malaysia. *Energy Policy*, 33(5), 611–618. doi:10.1016/j.enpol.2003.09.005
- Sanjuán, H. A. (2009). Cálculo del factor de emisión de CO<sub>2</sub> del sistema eléctrico interconectado Colombiano. Retrieved from [http://www.siame.gov.co/Portals/0/Factor\\_CO2/Calculo%20del%20Factor%20de%20Emision\\_2008\\_3.pdf](http://www.siame.gov.co/Portals/0/Factor_CO2/Calculo%20del%20Factor%20de%20Emision_2008_3.pdf)

- Schleich, J. (2009). Barriers to energy efficiency: A comparison across the German commercial and services sector. *Ecological Economics*, 68(7), 2150–2159.  
doi:10.1016/j.ecolecon.2009.02.008
- Shen, J., & Saijo, T. (2009). Does an energy efficiency label alter consumers' purchasing decisions? A latent class approach based on a stated choice experiment in Shanghai. *Journal of Environmental Management*, 90(11), 3561–3573.  
doi:10.1016/j.jenvman.2009.06.010
- Soratana, K., & Marriott, J. (2010). Increasing innovation in home energy efficiency: Monte Carlo simulation of potential improvements. *Energy and Buildings*, 42(6), 828–833.
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics* (1st ed.). New York, NY, USA: McGraw-Hill, Inc.
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill Higher Education.
- Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1819–1835.
- Train, K. (2002). *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge University Press.
- Unidad Técnica Ozono. (2008, July). Boletín Ozono N°17. Retrieved from [http://www.minambiente.gov.co/documentos/boletin\\_ozono\\_17.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/boletin_ozono_17.pdf)
- Universidad Nacional de Colombia, & UPME. (2006). *Determinación del consumo final de energía en los sectores residencial, urbano y comercial*.
- UPME. (2005). Programa Colombiano de Normalización, Acreditación, Certificación y Etiquetado de equipos de uso final de energía (CONOCE). Retrieved from <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/URE/CONOCE.pdf>
- UPME. (2010). PEN 2010-2030. Informe Final. Retrieved from <http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN%202010%20VERSION%20FINAL.pdf>

- UPME. (2013). *Sistema de Información Eléctrico Colombiano (SIEL)*. Retrieved from [http://www.upme.gov.co/GeneradorConsultas/Consulta\\_SuiConsumo.aspx?IdModulo=2&Servicio=4](http://www.upme.gov.co/GeneradorConsultas/Consulta_SuiConsumo.aspx?IdModulo=2&Servicio=4)
- Vaage, K. (2000). Heating technology and energy use: a discrete/continuous choice approach to Norwegian household energy demand. *Energy Economics*, 22(6), 649–666. doi:10.1016/S0140-9883(00)00053-0
- Van Beeck, N. (1999). *Classification of energy models*. Citeseer. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.43.8055&rep=rep1&type=pdf>
- Van Buskirk, R., Ben Hagan, E., Ofosu Ahenkorah, A., & McNeil, M. A. (2007). Refrigerator efficiency in Ghana: Tailoring an appliance market transformation program design for Africa. *Energy Policy*, 35(4), 2401–2411. doi:10.1016/j.enpol.2006.08.017
- Varone, F., & Aebischer, B. (2001). Energy efficiency: the challenges of policy design. *Energy Policy*, 29(8), 615–629. doi:10.1016/S0301-4215(00)00156-7
- Wiel, S., Egan, C., & delta Cava, M. (2006). Energy efficiency standards and labels provide a solid foundation for economic growth, climate change mitigation, and regional trade. *Energy for Sustainable Development*, 10(3), 54–63. doi:10.1016/S0973-0826(08)60544-X
- Wiel, S., & McMahon, J. E. (2003). Governments should implement energy-efficiency standards and labels—cautiously. *Energy Policy*, 31(13), 1403–1415. doi:10.1016/S0301-4215(02)00199-4
- Wijaya, M. E., & Tezuka, T. (2013). Measures for improving the adoption of higher efficiency appliances in Indonesian households: An analysis of lifetime use and

decision-making in the purchase of electrical appliances. *Applied Energy*, 112, 981–987. doi:10.1016/j.apenergy.2013.02.036

Young, D. (2008). When do energy-efficient appliances generate energy savings? Some evidence from Canada. *Energy Policy*, 36(1), 34–46.  
doi:10.1016/j.enpol.2007.09.011

Zhang, Y., & Wang, Y. (2013). Barriers' and policies' analysis of China's building energy efficiency. *Energy Policy*, 62, 768–773. doi:10.1016/j.enpol.2013.06.128

Zhou, N., Levine, M. D., & Price, L. (2010). Overview of current energy-efficiency policies in China. *Energy Policy*, 38(11), 6439–6452. doi:10.1016/j.enpol.2009.08.015

## A. Anexo: Ficha técnica del estudio de campo.

En la Tabla 23 se presentan los datos de la observación de 86 diferentes modelos de refrigeradores domésticos que se pueden encontrar en el mercado. En esta tabla se presenta la marca, referencia del producto, consumo de energía (kWh/año), volumen neto (litros), consumo de energía (kWh/año), precio (pesos colombianos), tipo de refrigerador, presencia de etiqueta de eficiencia energética, posición de la etiqueta y rango de eficiencia energética en la etiqueta.

**Tabla 23.** Modelos y características de refrigeradores analizados en la investigación.

Marca	Referencia	Consumo de energía (kWh/año)	Volumen Neto (litros)	Precio (pesos colombianos)	Tipo de refrigerador	Presencia de Etiqueta de EE NTC5020	Posición de etiqueta	Rango de eficiencia
Haceb	420L SE 2P TI	398,71	420	1.239.900	1	1	3	A
LG	GM-S482ULS	600	345	1.449.900	1	0	0	0
LG	GM-L26ANSJP	475	625,4	5.193.900	4	0	0	0
LG	GR-P267FSN	568,4	694	4.553.187	2	0	0	0
LG	GC-J237AGPB	492,4	614	5.799.900	2	0	0	0
LG	GM-L237MTGL	509,3	520	2.868.400	2	0	0	0
Samsung	RF263BEAESL	475	589	4.399.000	4	0	0	0
Haceb	656L SE SBS DA TI	734,4	605	3.079.900	2	0	0	0
Whirlpool	WD2020L	578	609	2.371.407	2	2	0	0
GE	GSMT2LEBFGP	596	611	2.324.907	2	2	2	0
Whirlpool	WD2001Q	578	609	2.371.407	2	2	2	0
LG	GC-L207FQ	490,8	516	5.699.900	2	0	0	0
Haceb	541L SE SBS DA TI	843,15	541	2.909.900	2	1	1	A
Haceb	541L SE SBS DA VI NE	843,15	504	3.750.000	2	0	0	0
Mabe	RMT1951YBCS0	537	505	1.560.000	1	1	2	A
Mabe	RMT1540YMXS1	437	393	1.448.000	1	1	2	A

**Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia**

Marca	Referencia	Consumo de energía (kWh/año)	Volumen Neto (litros)	Precio (pesos colombianos)	Tipo de refrigerador	Presencia de Etiqueta de EE NTC5020	Posición de etiqueta	Rango de eficiencia
LG	GR-S632GSR	696	460	2.384.900	1	0	0	0
Electrolux	ERT163EG	430	440,8	1.711.900	1	2	1	0
Challenger	CR 420	660	0	879.900	1	0	0	A
LG	GM-C402QLDC	540	322	1.049.367	1	0	0	0
Haceb	268L SE 2P DA TI	613,24	0	899.900	1	0	0	0
Mabe	MA0371EKCES0	555	0	1.060.000	1	0	0	0
Haceb	219L CE 1P DA TI	314,5	205,4	589.900	3	1	2	A
Haceb	244L SE 2P DA TI	609,55	243,5	689.900	1	1	2	A
Haceb	300L SE 2P DA TI	620,5	295	949.900	1	1	2	A
Mabe	MA0346JCE	547,5	0	960.000	1	0	0	0
Challenger	CR 365	372	0	779.900	1	0	0	0
Haceb	370L SE 2P TI	645,32	364,67	1.113.900	1	1	2	A
LG	GM-S482ULS	600	345	1.499.900	1	0	0	0
LG	GM-S582ULV	660	405	1.849.900	1	0	0	0
Whirlpool	LWT3530D	401	362	1.228.900	1	2	3	0
Mabe	RMLb267yJCE	551	252	927.000	1	1	1	A
Haceb	265L CE 1P DA TI	354,72	261,7	659.900	1	1	2	A
LG	GM-S582ULV	660	405	1.849.900	1	0	0	0
Haceb	420L SE 2P TI	657	398,71	1.239.900	1	1	1	A
Haceb	370L SE 2P TI	645,32	364,57	1.113.900	1	1	1	A
Simply	35LC45	595	342	999900,00	1	1	3	A
Whirlpool	LWT5506D	435	451	1.529.900	1	2	3	0
Mabe	MA0346JCE	547,5	339	995.000	1	1	3	A
LG	GM-S582ULS	660	405	1.849.900	1	0	0	0
LG	GC-L207FQ	490,8	553	2.699.900	2	0	0	0
LG	GM-S482ULS	600	345	1.449.900	1	0	0	0
LG	GM-S582ULV	660	405	1.849.900	1	0	0	0
Haceb	420L SE 2P TI	657	398,71	1.239.900	1	1	2	A
Whirlpool	LWT5506D	435	451	1.529.900	1	2	1	0
Whirlpool	LWT3530D	358,45	362	1.228.900	1	2	3	0
Whirlpool	LWT8506A	461	502	199.900	1	2	1	0
Centrales	CCN369FYJSE1	726,4	359	982.000	1	1	2	B
Haceb	268L SE 2P DA TI	613,24	0	899.900	1	1	4	0
Mabe	MA0371EKCES0	555	364	1.060.000	1	1	1	A
Haceb	300L SE 2P DA TI	620,5	295	949.900	1	1	3	A
Haceb	370L SE 2P TI	645,32	364,57	1.113.900	1	1	2	A

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

Marca	Referencia	Consumo de energía (kWh/año)	Volumen Neto (litros)	Precio (pesos colombianos)	Tipo de refrigerador	Presencia de Etiqueta de EE NTC5020	Posición de etiqueta	Rango de EE
Centrales	CCN226FUASE1	526	214	799.000	1	1	2	A
Haceb	244L SE 2P DA TI	609,55	243,5	689.900	1	1	2	A
LG	GM-C322QLDC	511,2	231	947.300	1	0	0	0
Mabe	MA0346JCE	547,5	339	1.019.000	1	1	2	A
LG	GM-C402SLDC	540	322	1.043.367	1	0	0	0
Haceb	656L SE SBS DA TI	734,4	0	3.079.900	2	0	0	0
Haceb	CE 1PC DA TI	304,8	0	589.900	3	0	0	0
Haceb	265L CE 1P DA TI	354,72	261,7	659.900	3	1	3	A
Centrales	CCN226FUASE1	526	214	799.000	1	1	1	A
Challenger	CR 258	345,6	0	569.900	3	0	0	A
Challenger	CR 240	360	0	509.900	3	0	0	A
Challenger	CR 365	372	0	779.900	1	0	0	A
Haceb	220L SE 2P DA TI	602,25	219,5	829.900	1	1	3	A
Haceb	268L SE 2P DA TI	613,24	267,5	899.900	1	1	3	A
Haceb	370L SE 2P TI	645,32	364,57	1.113.900	1	1	3	A
Centrales	CCN369FYJSE1	726,4	359	982.000	1	1	3	B
Mabe	MA021YICES1	547,5	0	1.019.000	1	0	0	0
Mabe	MA041ZNCES0	2091,6	0	1.304.000	1	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 24, se presenta la notación correspondiente a las variables: Etiqueta de eficiencia energética, Posición Etiqueta, Rango de EE, Consumo

**Tabla 24.** Notación de la Tabla 21.

<b>Volumen</b>	
0	No existe información
<b>Tipo refrigerador</b>	
1	Top mount
2	Side by side
3	Compacta
4	Botton mount
<b>Presencia de Etiqueta de EE NTC 5020</b>	
0	No tiene etiqueta
1	Sí tiene etiqueta

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

---

2	Tiene etiqueta de otro país: Whirlpool etiqueta mexicana, GE americana
<b>Posición Etiqueta</b>	
0	No tiene etiqueta
1	Sí tiene etiqueta en frente
2	Sí tiene etiqueta en el lado
3	Sí tiene etiqueta adentro
4	Etiqueta no visible
<b>Rango de EE</b>	
0	No existe información

Fuente: Elaboración propia.

## B. Anexo: Módulos del modelo de simulación en PowerSim Studio 8.

Figura 40. Módulo de sustitución del electrodoméstico (nevera)

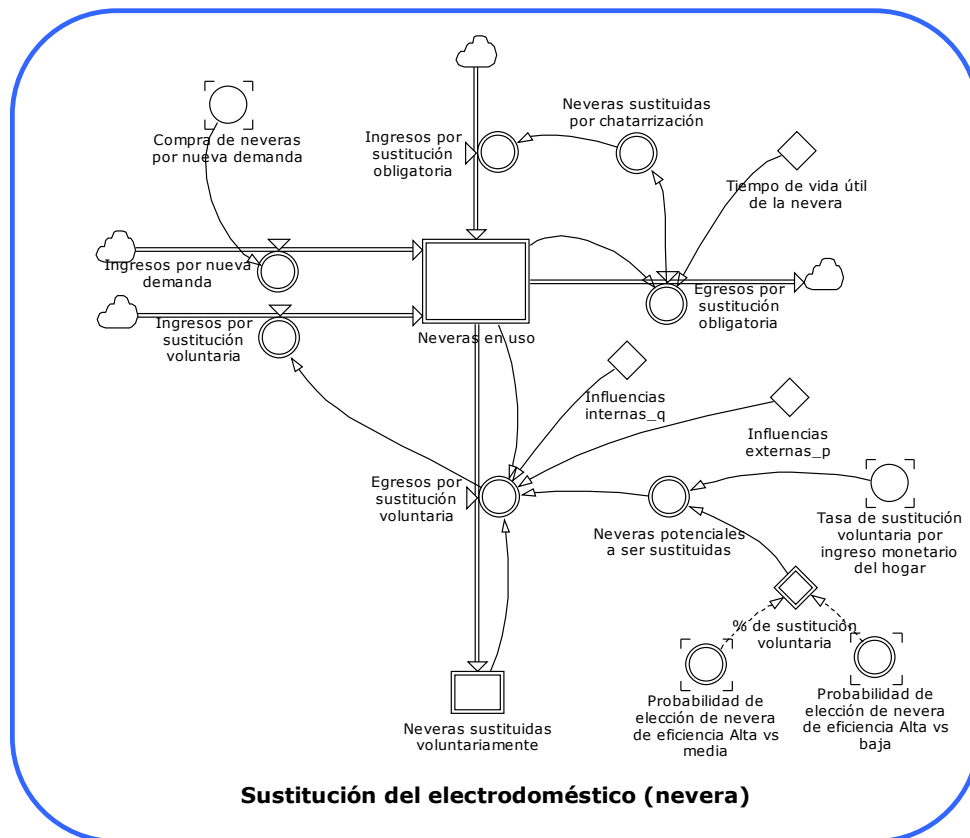


Figura 41. Módulo de Consumo de electricidad de neveras en uso

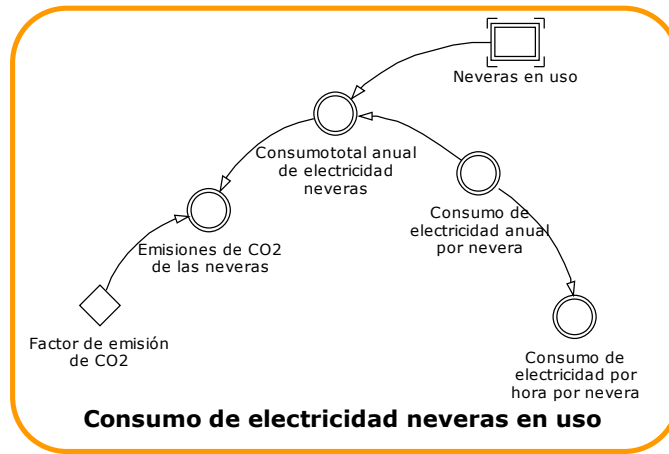


Figura 42. Módulo de Costo Anual Equivalente de neveras con eficiencia alta

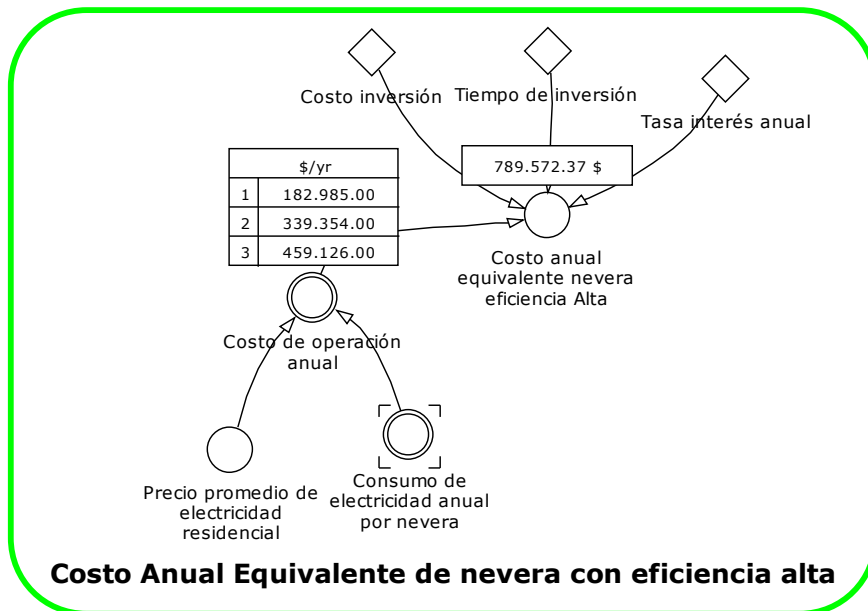


Figura 43. Módulo de Elección de nevera eficiencia alta vs. Nevera eficiencia baja y Módulo de Elección de nevera eficiencia alta vs. Nevera eficiencia media

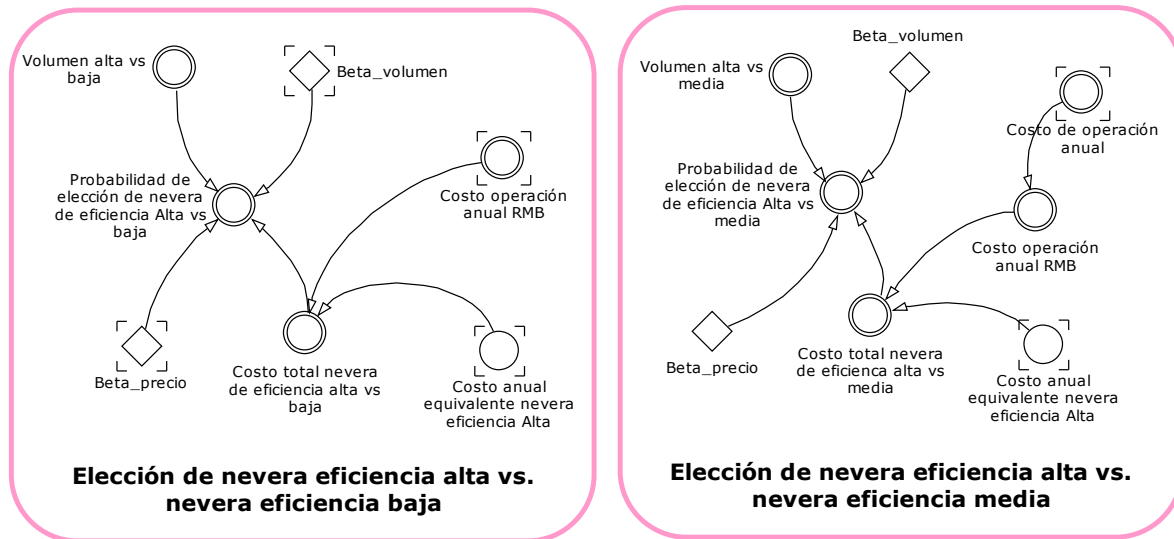


Figura 44. Módulo de Población y hogares totales en Colombia

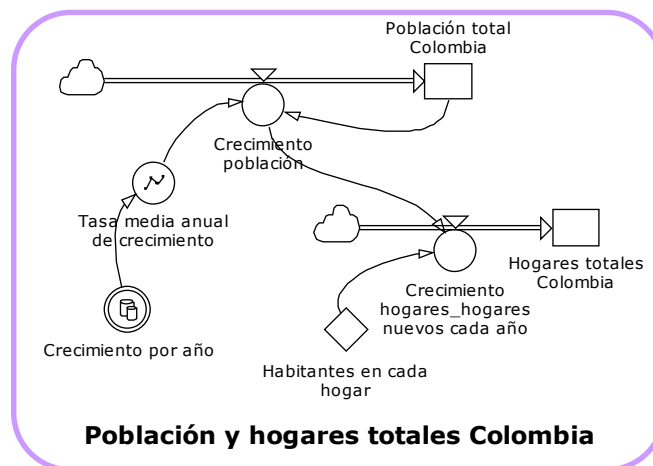
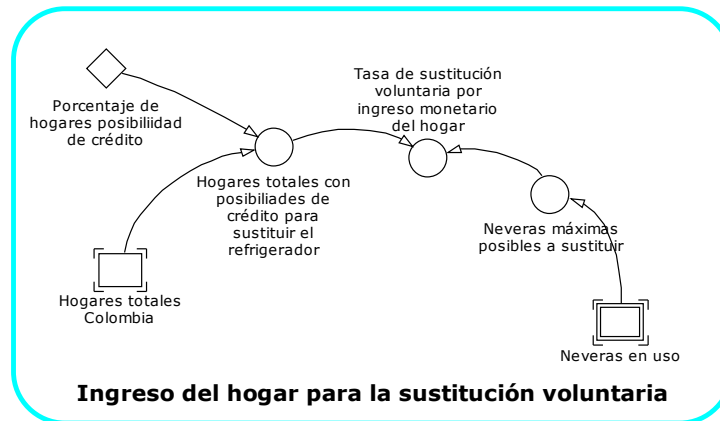


Figura 45. Módulo de Compras por nueva demanda



Figura 46. Módulo de Ingreso del hogar para la sustitución voluntaria



## C. Anexo: Formulación del modelo de simulación en PowerSim Studio 8.

En la Tabla 25 que compone este anexo, se presenta la formulación de niveles, flujos, variables auxiliares y parámetros utilizados en el modelo de simulación. En la primera columna aparece el nombre del elemento. En la segunda columna aparecen las dimensiones en caso de que la variable o parámetro sea un vector de dos o tres elementos. En la tercera columna aparecen las unidades. En la cuarta columna aparece la formulación en PowerSim Studio 8 que puede incluir valores escalares, gráficas, ecuaciones y funciones.

**Tabla 25.** Formulación del modelo en PowerSim Studio 8.

Nombre	Dimensiones	Unidades	Formulación en Powersim
% de sustitución voluntaria	1..2	-	{'Probabilidad de elección de nevera de eficiencia Alta vs media'[1], 'Probabilidad de elección de nevera de eficiencia Alta vs baja'[1]}
% hogares con energía eléctrica	-	-	0.936
Beta_precio	-	-	-0.0002
Beta_volumen	-	-	0.0037
Compra de neveras por nueva demanda		neveras/yr	'Demanda anual potencial de neveras por nuevos hogares'/'*Probabilidad de elección de nevera'
Consumo de electricidad anual por nevera	1..3	kWh/yr	{550, 1020, 1380}<<kWh/yr>>
Consumo de electricidad por hora por nevera	1..3	kWh/hora	('Consumo de electricidad anual por nevera')*((1<<yr>>)/((360*24)*1<<horas>>))

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

Nombre	Dimensiones	Unidades	Formulación en Powersim
Consumo total anual de electricidad neveras	1..3	neveras*kWh/yr	'Consumo de electricidad anual por nevera'*Neveras en uso'
Costo anual equivalente nevera eficiencia Alta		\$	'Costo inversión'*Tasa interés anual*((1+Tasa interés anual)^(Tiempo de inversión/1<<yr>>))/(((1+Tasa interés anual)^(Tiempo de inversión/1<<yr>>))-1)+('Costo de operación anual'[1]*1<<yr>>)
Costo de operación anual	1..3	\$/yr	'Consumo de electricidad anual por nevera'*Precio promedio kWh'
Costo inversión		\$	1135000<<\$>>
Costo operación anual RMB	1..3	\$/yr	'Costo de operación anual'/307.41
Costo total nevera de eficiencia alta vs media	1..2	-	{'Costo anual equivalente nevera eficiencia Alta'/307.41<<\$>>, 'Costo operación anual RMB'[2]*1<<yr/\$>>}
Costo total nevera de eficiencia alta vs baja	1..2	-	{'Costo anual equivalente nevera eficiencia Alta'/307.41<<\$>>, 'Costo operación anual RMB'[3]*1<<yr/\$>>}
Crecimiento hogares_hogares nuevos cada año		hogar/yr	'Crecimiento población'/Habitantes en cada hogar'
Crecimiento población		habitantes/yr	'Población total Colombia'*Tasa media anual de crecimiento'
Crecimiento por año	1..31	yr^-1	XLDATA("proyecciones2.xls", "TasaC", "B2:B32")<<1/yr>>
Demanda anual estimada de neveras por nuevos hogares		neveras/yr	'Hogares nuevos con energía eléctrica'*Neveras en cada hogar'
Demanda anual potencial de neveras por nuevos hogares		neveras/yr	'Demanda anual estimada de neveras por nuevos hogares'*Tasa de compra de neveras por nuevos hogares'
Egresos por sustitución obligatoria	1..3	neveras/yr	{0<<neveras>>, 'Neveras en uso'[2], 'Neveras en uso'[3]}/Tiempo de vida útil de la nevera'
Egresos por sustitución voluntaria_salen de B y C	1..3	neveras/yr	{0<<neveras/yr>>, IF('Neveras en uso'[2]>0<<neveras>>, ('Neveras potenciales a ser sustituidas'[1]*influencias externas p'+('Influencias internas q'-influencias externas p'))*Neveras sustituidas voluntariamente[2]-('Influencias internas q'/Neveras potenciales a ser sustituidas'[1])*Neveras sustituidas voluntariamente[2]^2)/1<<yr>>, 0<<neveras/yr>>), IF('Neveras en

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

Nombre	Dimensiones	Unidades	Formulación en Powersim
			uso[3]>0<<neveras>>,(('Neveras potenciales a ser sustituidas'[2]*'Influencias externas p'+('Influencias internas q'-'Influencias externas p')*'Neveras sustituidas voluntariamente'[3]-('Influencias internas q'/'Neveras potenciales a ser sustituidas'[2])*'Neveras sustituidas voluntariamente'[3]^2)/1<<yr>>,0<<neveras/yr>>}}
Emisiones de CO <sub>2</sub> de las neveras	1..3	neveras*Kg CO2/yr	'Consumototal anual de electricidad neveras'*'Factor de emisión de CO2'
Factor de emisión de CO <sub>2</sub>		KgCO2/kWh	0.2849<<KgCO2/kWh>>
Habitantes en cada hogar		habitantes/hogar	3.9<<habitantes/hogar>>
Hogares nuevos con energía eléctrica		hogar/yr	'Crecimiento hogares_hogares nuevos cada año'*'% hogares con energía eléctrica'
Hogares totales Colombia		hogar	10924541<<hogar>>
Hogares totales con posibilidades de crédito para sustituir el refrigerador		hogar	'Hogares totales Colombia'*'Porcentaje de hogares posibilidad de crédito'
Influencias externas_p			0.0023
Influencias internas_q			0.2
Ingresos por nueva demanda	1..3	neveras/yr	{'Compra de neveras por nueva demanda', 0<<neveras/yr>>, 0<<neveras/yr>>}
Ingresos por sustitución obligatoria	1..3	neveras/yr	{'Neveras sustituidas por chatarrización'[1], 0<<neveras/yr>>, 0<<neveras/yr>>}
Ingresos por sustitución voluntaria	1..3	neveras/yr	{'Egresos por sustitución voluntaria_salien de B y C'[2]+'Egresos por sustitución voluntaria_salien de B y C'[3],0 <<neveras/yr>>,0 <<neveras/yr>>}
Neveras en cada hogar		neveras/hogar	0.77 <<neveras/hogar>>
Neveras en uso	1..3	neveras	{876543, 7787008, 1093458} <<neveras>>
Neveras máximas posibles a sustituir	1	neveras	'Neveras en uso'[2]+'Neveras en uso'[3]
Neveras potenciales a ser sustituidas	1..2	neveras	{7787008*'Tasa de sustitución voluntaria por ingreso del hogar'*'% de sustitución voluntaria'[1], (1093458*'Tasa de sustitución voluntaria por ingreso del hogar'*'% de sustitución voluntaria'[2])}*1<<neveras>>

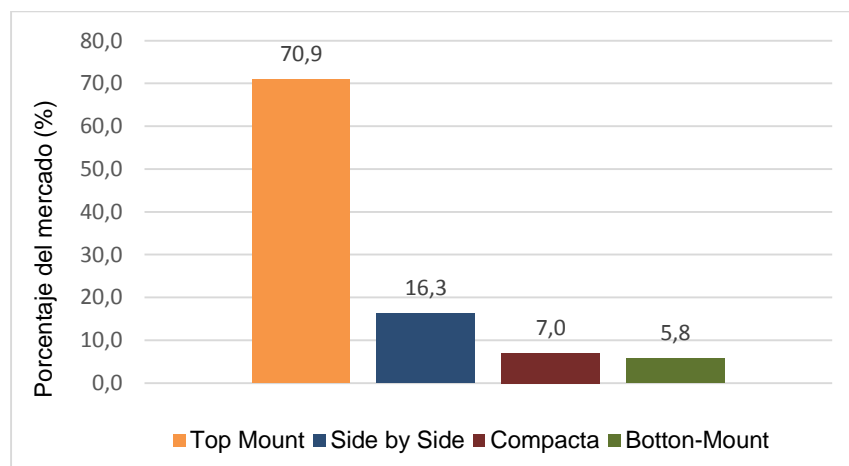
## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

Nombre	Dimensiones	Unidades	Formulación en Powersim
Neveras sustituidas por chatarrización	1..3	neveras/yr	{'Egresos por sustitución obligatoria'[2]+'Egresos por sustitución obligatoria'[3], 0<<neveras/yr>>, 0<<neveras/yr>>}
Neveras sustituidas voluntariamente	1..3	neveras	{0,0,0}<<neveras>>
Población total Colombia	1	habitantes	46448212 <<habitantes>>
Porcentaje de hogares posibilidad de crédito	1	-	0.391
Precio promedio electricidad residencial	1	\$/kWh	332.7<<\$/kWh>>
Probabilidad de elección de nevera de eficiencia Alta vs baja	1..2	-	EXP(('Volumen alta vs baja'*Beta_volumen)+('Costo total nevera de eficiencia alta vs baja'*Beta_precio))/ARRSUM(EXP(('Costo total nevera de eficiencia alta vs baja'*Beta_precio)+('Volumen alta vs baja'*Beta_volumen)))
Probabilidad de elección de nevera de eficiencia Alta vs media	1..2	-	EXP(('Volumen alta vs media'*Beta_volumen)+('Costo total nevera de eficiencia alta vs media'*Beta_precio))/ARRSUM(EXP(('Volumen alta vs media'*Beta_volumen)+('Costo total nevera de eficiencia alta vs media'*Beta_precio)))
Tasa de compra de neveras por nuevos hogares	1	-	0.68
Tasa de sustitución voluntaria por ingreso del hogar	1	-	('Neveras máximas posibles a sustituir'/Hogares totales con posibilidades de crédito para sustituir el refrigerador')*1<<hogar/neveras>>
Tasa interés anual	1		0.279
Tasa media anual de crecimiento	1	yr <sup>-1</sup>	GRAPH(YEAR(),2010,1,'Crecimiento por año')
Tiempo de inversión	1	Yr	3<<yr>>
Tiempo de vida útil de la nevera	1	Yr	25<<yr>>
Volumen alta vs baja	1..2	-	{700, 350}
Volumen alta vs media	1..2	-	{700, 550}

## D. Anexo: Resultados del estudio de campo de neveras domésticos.

El estudio de campo en grandes superficies de la ciudad de Medellín, reveló que los consumidores residenciales tienen la posibilidad de elegir entre cuatro tipos de modelos de neveras: Top-Mount, Side by Side, Compacta y Botton-Mount. En la Figura 47 se presenta el porcentaje de participación del mercado, donde se muestra las neveras que predominan en el mercado son de tipo Top-Mount con un 70,9%, seguidas de las neveras Side by Side con un 16,3%, neveras compactas con un 7% y finalmente las neveras Botton-Mount con un 5,8%, las cuales son las que menos son exhibidas a los consumidores.

**Figura 47.** Participación del mercado de los diferentes tipos de neveras domésticas.

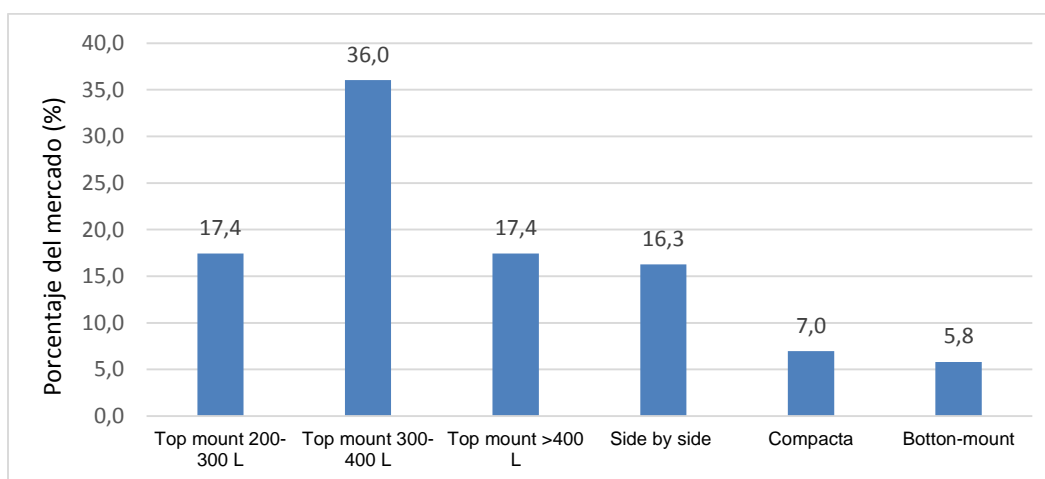


Después de identificar que las neveras de tipo Top-Mount lideran el mercado, se hace una identificación de cuál es el volumen más común de ellas. Para ello se seleccionan tres

## Simulación de políticas de eficiencia energética en el sector residencial en Colombia

rangos de volumen: entre 200 y 300 litros, entre 300 y 400 litros y mayores de 400 litros. Los resultados encontrados son presentados en la Figura 48, muestran que para las neveras de tipo Top-Mount el rango de volumen con mayor participación es el de 300-400 litros con el 36%, seguido en igual medida por los rangos 200-300 litros y mayores de 400 litros con 17,4%.

**Figura 48.** Participación del mercado neveras Top-Mount según su volumen.



La Tabla 26 muestra el promedio del consumo de electricidad en unidades de KWh/año y el precio de venta en pesos Colombianos para los seis tipos de neveras identificadas en el mercado.

**Tabla 26.** Promedio de consumo de energía (KWh/año) y del precio de venta (COP) para los tipos de neveras domésticas.

Modelo/alternativa de nevera	Promedio de Consumo de energía (kWh/año)	Promedio del precio de venta (\$)
Top mount 200-300 L	541	833413
Top mount 300-400 L	550	1135419
Top mount >400 L	565	1541215
Side by side	622	3459059
Compacta	336	583900
Botton-mount	475	4796450