

IMPACTO DE LAS POLÍTICAS ENERGÉTICAS EN LA
INDUSTRIA DE LA FABRICACIÓN DE REFRIGERADORES
DOMÉSTICOS EN LATINOAMÉRICA: CASO MÉXICO,
COLOMBIA Y ECUADOR.

Nelson Gustavo Jara Cobos

Director

César Alejandro Isaza Roldan, PhD



ESCUELA DE FORMACIÓN AVANZADA
DOCTORADO EN INGENIERÍA
ÁREA ENERGÍA
MEDELLÍN
2018

**IMPACTO DE LAS POLÍTICAS ENERGÉTICAS EN LA
INDUSTRIA DE LA FABRICACIÓN DE REFRIGERADORES
DOMÉSTICOS EN LATINOAMÉRICA: CASO MÉXICO,
COLOMBIA Y ECUADOR.**

Nelson Gustavo Jara Cobos

Trabajo de grado para optar al título de Doctor en Ingeniería
Área Energías.

Director

César Alejandro Isaza Roldan, PhD



ESCUELA DE FORMACIÓN AVANZADA
DOCTORADO EN INGENIERÍA
ÁREA ENERGÍA
MEDELLÍN
2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

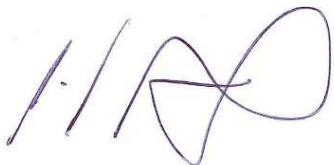
Declaración de originalidad

Medellín, 17 de julio de 2018.

Yo, Nelson Gustavo Jara Cobos

“Declaro que esta tesis de grado no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad”, Art 18 Régimen Dicente de Formación Avanzada.

Firma

A handwritten signature in blue ink, consisting of a series of loops and strokes that appear to be the initials 'N.G.J.C.' followed by a large, stylized flourish.

DEDICATORIA

Todo el esfuerzo y trabajo desplegado en el desarrollo de este proyecto, dedico de todo corazón a las personas que son el motor de mi vida.

A mi esposa Taty.

A mis hijas Verónica y Sofía.

Agradecimientos

Por el presente trabajo de tesis en primera instancia me gustaría agradecerle a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado.

A mi **esposa Taty** por todo el apoyo que me ha brindado y sobre todo por soportar el abandono que este trabajo ha demandado.

A la **Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín** por darme la oportunidad de estudiar el posgrado.

A mi director de tesis, **Dr. Cesar Alejandro Isaza Roldán** por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en mí que pueda concluir con este trabajo con éxito.

También me gustaría agradecer a mis profesores durante este proceso de formación porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación, y en especial al **Dr. Luciano Gallón** y a la **Dra. Diana Giraldo** por sus consejos, su enseñanza y más que todo por su amistad.

Y por último a la **Universidad Politécnica Salesiana**, en su representación el **Padre Javier Herrán**, Rector y el **Econ. César Vásquez**, Vicerrector de la Sede Cuenca quienes siempre estuvieron apoyando para el desarrollo de mis estudios de posgrado.

Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

Resumen

En este proyecto se cuantificará el impacto tecnológico que podría tener la industria de la refrigeración doméstica en Latinoamérica, luego de introducir políticas energéticas con base en el establecimiento de estándares mínimos de desempeño energético (MEPS), que lleven a un control de la producción nacional y sobre todo a un control de los equipos de refrigeración doméstica que están siendo importados. Estos MEPS serían establecidos de manera general con base en la homologación mediante estándares utilizados en países con índices de eficiencia energética más exigentes, utilizando los datos de México, Colombia y Ecuador como casos de estudio.

Para determinar el impacto mencionado, en primera instancia se estudia la industria de la refrigeración doméstica en México, Colombia y Ecuador como casos de estudio, en aspectos como: participación en el mercado, situación tecnológica, generación de empleo y cadena productiva de suministros; en segunda instancia se estudia la evolución de los índices de eficiencia energética y las políticas establecidas en dichos países, considerando los objetivos, incentivos y reglamentos, además de establecer los desarrollos tecnológicos que se han propuesto en refrigeración doméstica para mejorar la eficiencia; en una siguiente instancia se analiza el comportamiento del mercado de los productos de refrigeración doméstica en la región ante la implementación de políticas de eficiencia energética, específicamente en refrigeradores/congeladores, que son los más utilizados en los países mencionados, esto a través del modelado y simulación con software especializado que utiliza la *metodología de la dinámica de sistemas* y la consideración de atributos de decisión del usuario para la renovación voluntaria de equipos ineficientes, como: consumo energético, costos y tamaños fundamentalmente.

Los resultados del modelo para el año 2025 indican que los ahorros de energía eléctrica por el uso de refrigeradores eficientes con etiqueta energética A+ y A++ que representan los escenarios 3 y 4 establecidos, para México estarían en el orden de 4,5 TWh/año y 55 millones de toneladas de CO₂ evitadas por dicho ahorro, para Colombia llegarían a valores de 1.8 TWh/año y 14 millones de toneladas de CO₂ evitadas por dicho ahorro y para Ecuador llegarían a tener ahorros de 0.7 TWh/año y 8 millones de toneladas de CO₂ evitadas por dicho ahorro, esto sin lugar a duda representaría para los países en estudio ahorros económicos significativos y sobre todo para las empresas fabricantes la posibilidad de incrementar su capacidad de producción, sean estas por exportaciones a otros mercados con índices de eficiencia más exigentes o por ventas en el mercado interno debido a la implementación de planes de renovación, proyectados para México en 3 millones de equipos, para Colombia de 1,5 millones y para Ecuador de 0,45 millones. El crecimiento de las empresas representaría también un incremento sustancial en la generación de empleo, cadenas de suministros que involucren procesos adicionales y la necesidad de formación profesional del personal involucrado.

Palabras clave: refrigeración doméstica, eficiencia energética, estándares mínimos de rendimiento energético, políticas de eficiencia energética, tecnologías de refrigeración, ahorro energético.

Abstract

This project will quantify the technological impact that the domestic refrigeration industry could have in Latin America, after introducing energy policies based on the establishment of minimum energy performance standards (MEPS), leading to a control of national production and all to a control of the

domestic refrigeration equipment that is being imported. These MEPS would be established in a general way based on the homologation with standards used in countries with more demanding energy efficiency indices, using data from Mexico, Colombia and Ecuador as case studies.

In order to determine the aforementioned impact, the domestic refrigeration industry in Mexico, Colombia and Ecuador is first studied as case studies, in aspects such as: participation in the market, technological situation, generation of employment and productive chain of supplies; in the second instance, the evolution of the energy efficiency indices and the policies established in those countries are studied, considering the objectives, incentives and regulations, as well as establishing the technological developments that have been proposed in domestic refrigeration to improve efficiency; In the next instance, the market behavior of domestic refrigeration products in the region is analyzed in light of the implementation of energy efficiency policies, specifically in refrigerators / freezers, which are the most used in the aforementioned countries, this through modeling and simulation with specialized software that uses the *methodology of systems dynamics* and the consideration of user decision attributes for the voluntary renewal of inefficient equipment, such as: energy consumption, costs and sizes fundamentally.

The results of the model for the year 2025 indicate that the savings of electric energy by the use of efficient refrigerators with energy label A + and A ++ that represent scenarios 3 and 4 established, for Mexico would be in the order of 4.5 TWh / year and 55 million tons of CO₂ avoided by such savings, for Colombia would reach values of 1.8 TWh / year and 14 million tons of CO₂ avoided by said savings and for Ecuador they would have savings of 0.7 TWh / year and 8 million tons of CO₂ avoided by such savings, this would undoubtedly represent significant economic savings for the countries under study and, above all, for manufacturing companies the possibility of increasing their production capacity, whether through exports to other markets with more demanding efficiency indices or for sales in the domestic market due to the implementation of renovation plans, projected for Mexico in 3 million equipment, for Colombia to 1.5 million and for Ecuador of 0.45 million. The growth of the companies would also represent a substantial increase in the generation of employment, supply chains that involve additional processes and the need for professional training of the personnel involved.

Keywords: household refrigeration, energy efficiency, minimum energy performance standards, energy efficiency policies, refrigeration technologies, energy saving.

Contenido

Resumen.....	VII
Abstract.....	VII
Lista de Figuras.....	XII
Lista de Tablas.....	XV
Introducción.....	1
Alcance del Proyecto.....	4
Descripción general del problema.....	4
Objetivos.....	5
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos.....	5
Contribuciones.....	6
CAPÍTULO 1.....	8
1. Industria de la refrigeración domestica.....	8
1.1 Descripción de la industria de refrigeradores domésticos en Latinoamérica.....	8
1.1.1 Tipo de refrigerador doméstico más vendido.....	9
1.1.2 Tecnología utilizada para la fabricación del refrigerador Top-Mount.....	10
1.1.3 Análisis comparativo de las tecnologías utilizadas en los refrigeradores domésticos de más bajo consumo eléctrico comercializados en el mercado Latinoamericano.....	10
1.2 Mercado de refrigeradores domésticos en México, Colombia y Ecuador.....	12
1.2.1 México.....	12
1.2.2 Colombia.....	13
1.2.3 Ecuador.....	15
1.3 Situación eléctrica de Latinoamérica, México, Colombia y Ecuador.....	16
1.3.1 Latinoamérica.....	16
1.3.2 México.....	17
1.3.3 Colombia.....	18
1.3.4 Ecuador.....	18
1.4 Eficiencia energética en refrigeración doméstica.....	19
1.4.1 Sistemas de Refrigeración Doméstica - Estado del Arte de Las Mejoras en la Eficiencia Energética.....	19

1.4.2	Alternativas tecnológicas que se pueden implementar en la industria de la refrigeración domestica a fin de producir equipos eficientes energéticamente.....	23
Capítulo 2.....		34
2.	Revisión de Políticas e Índices de Eficiencia Energética en refrigeración doméstica, implementados en Latinoamérica	34
2.1	Antecedentes	34
2.2	Etiquetado energético y estándares mínimos de eficiencia energética.	35
2.2.1	Etiquetado energético.....	35
2.2.2	Evolución de estándares mínimos de eficiencia en países desarrollados	40
2.2.3	Evolución de etiquetado y estándares mínimos de eficiencia en América Latina ...	41
2.3	Programas de renovación de refrigeradores domésticos.....	42
2.3.1	Programa PROCAE en Argentina	42
2.3.2	Programa PROCEL en Brasil.....	44
2.3.3	Programa de eficiencia energética para refrigeradores domésticos en Chile	45
2.3.4	Programa PROURE en Colombia.....	46
2.3.5	Programa cambia tu viejo por un nuevo de México	48
2.3.6	Programa Renova refrigerador Ecuador.....	49
Capítulo 3.....		51
3.	Modelo	51
3.1	Justificación para la utilización de la metodología de Dinámica de Sistemas como herramienta de simulación.....	51
3.2	Modelo de Dinámica de Sistemas	52
3.2.1	Límites del Modelo.....	53
3.2.2	Hipótesis Dinámica.....	59
3.2.3	Validación	64
Capítulo 4.....		70
4.	Modelado.....	70
4.1	Planteamiento del caso base de modelado	70
4.1.1	Antecedentes	70
4.1.2	Caso base.....	71
4.2	Resultados del Caso Base	71
		X

4.3	Análisis del impacto en la industria de la refrigeración doméstica	77
4.3.1	Estrategias a implementar en los escenarios.....	77
4.3.2	Planteamiento de escenarios.....	84
4.3.3	Resultados de los Escenarios.....	86
	Conclusiones	90
	Cumplimiento de Objetivos.....	95
	Divulgación de Resultados.....	97
	Trabajos Futuros	98
	Anexo A	99
	A. Sistemas de refrigeración por compresión de vapor.....	99
	Anexo B	102
	B. Estado del arte de las mejoras tecnológicas en refrigeradores domésticos	102
	Anexo C	111
	C. Trabajos desarrollados a través de la Metodología de la Dinámica de Sistemas	111
	Referencias.....	114

Lista de Figuras

Figura 1-1. Compañías fabricantes de refrigeradores a nivel global y latinoamericano al 2013 [27].	9
Figura 1-2: Comercio internacional de la industria de electrodomésticos de México, 2007-2013 [28].	12
Figura 1-3: Prospectiva de producción y consumo de refrigeradores domésticos en México 2014-2020 [29].	13
Figura 1-4: Marcas de refrigeradores domésticos comercializados en el mercado colombiano año 2008 [31].	14
Figura 1-5: Evolución de la producción de cocinas y refrigeradores en el Ecuador período 2010-2013 [27].	15
Figura 1-6: Distribución del consumo regional de electricidad por países al año 2010 [26].	17
Figura 1-7: Funcionamiento de compresor alternativo. Tomado de [101].	24
Figura 1-8: Vista tridimensional del compresor alternativo biela-manivela. Tomado de [99].	25
Figura 1-9: Esquema interno del compresor lineal [104].	26
Figura 1-10: Compresor Lineal Inverter de LG. Tomado de [107].	26
Figura 1-11: Evolución de los compresores Embraco Tomado de [108].	27
Figura 1-12: Comparaciones del rendimiento de compresores Embraco. Adaptado de [108].	27
Figura 1-13: Comparaciones de la variación de temperatura de compresores Embraco [108].	27
<i>Figura 1-14: Apreciación en 2D del flujo de aire dentro de un refrigerador tradicional, con un solo evaporador [109].</i>	28
Figura 1-15: Ciclo de refrigeración de doble evaporador. Tomado de [110].	29
Figura 1-16: Implementación de evaporador dual. Tomado de [111].	30
Figura 2-1: Etiqueta de eficiencia energética para aparatos de refrigeración de uso doméstico. Tomado de [126].	43
<i>Figura 2-2: Etiqueta utilizada en Refrigeradores en Brasil [132].</i>	44
<i>Figura 2-3: Etiqueta de Eficiencia Energética de Refrigerador de acuerdo a normas NCh [135].</i>	45
<i>Figura 2-4: Etiqueta de Refrigeradores domésticos en Colombia [138].</i>	47
<i>Figura 2-5: Etiqueta de Refrigeradores domésticos en México [139].</i>	49
<i>Figura 2-6: Etiqueta de Refrigeradores domésticos en Ecuador. Fuente Autor.</i>	50
Figura 3-1: Número de habitantes de México, Colombia y Ecuador para el período 1994-2050. Fuente: adaptado por el Autor de INEGI, DANE e INEC.	53
Figura 3-2: Número de hogares existentes en México, Colombia y Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: adaptado por el autor de INEGI, DANE e INEC.	54

Figura 3-3: Porcentaje de posesión de refrigeradores domésticos en México, Colombia y Ecuador en el período 1995-2050. Fuente adaptado por el Autor de INEGI, DANE e INEC.....	55
Figura 3-4: Porcentaje de acceso a la electricidad en México, Colombia y Ecuador en el período 1995-2050. Fuente adaptado de [142].....	55
Figura 3-5: Estructura dinámica de realimentación de refrigeradores domésticos por grupo de vida útil y la conversión de equipos de más de 10 años a refrigeradores nuevos. Fuente: Autor.	59
Figura 3-6: Estructura para la determinación del ahorro de energía eléctrica, emisiones evitadas por el ahorro y comportamiento del mercado de refrigeradores domésticos. Fuente: Autor.	60
Figura 3-7: Modelo de conversión de refrigeradores domésticos. Fuente: Autor	61
Figura 3-8: Modelo para determinar la cantidad de refrigeradores domésticos por grupo de vida útil. Fuente: Autor.....	63
Figura 3-9: Modelo para determinar la cantidad de refrigeradores domésticos nuevos. Fuente: Autor	63
Figura 3-10: Estadísticas de venta de refrigeradores domésticos en México en el período 1995-2010. Fuente ANFAD-CONUEE.....	67
Figura 3-11: Estadísticas de venta de refrigeradores domésticos en México para el período 1995-2050 como modo de referencia. Fuente ANFAD-CONUEE, Adaptado autor.	67
Figura 3-12: Comportamiento de la cantidad de refrigeradores vendidos en México versus la cantidad de refrigeradores nuevos obtenidos del modelo para el período 1995-2050. Fuente autor.	68
Figura 3-13: Comportamiento del total acumulado de refrigeradores vendidos en México versus el total acumulado de refrigeradores nuevos obtenidos del modelo para el período 1995-2050. Fuente autor.	68
Figura 4-1: Diagrama causal de proceso de conversión a RDE nuevos. Fuente Autor.....	71
Figura 4-2: Demanda de refrigeradores domésticos nuevos en México, Colombia y Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.....	72
Figura 4-3: Refrigeradores domésticos para disposición y reciclaje en México, Colombia y Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	73
Figura 4-4 Refrigeradores domésticos por grupos de vida útil existentes en México para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	74
Figura 4-5: Refrigeradores domésticos por grupos de vida útil existentes en Colombia para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	75
Figura 4-6: Refrigeradores domésticos por grupos de vida útil existentes en Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	75

Figura 4-7: Refrigeradores domésticos de 0 a 10 años en operación en México, Colombia y Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	76
Figura 4-8: Refrigeradores domésticos que se encuentran en operación en los hogares de México, Colombia y Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	76
Figura 4-9: Consumo promedio de energía eléctrica por el uso de Refrigeradores domésticos que se encuentran en operación en los hogares de México, Colombia y Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	77
Figura 4-10: Refrigerador doméstico Whirlpool tipo Top Mount de 385.00 L / 13.59 pies ³ Modelo #: WT4020S. Fuente: Autor.	79
Figura 4-11: Resultados por escenarios de consumo promedio de energía eléctrica por uso de Refrigeradores domésticos en operación en los hogares de México para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	86
Figura 4-12: Resultados por escenarios del consumo promedio de energía eléctrica por uso de Refrigeradores en operación en los hogares de Colombia para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	87
Figura 4-13: Resultados por escenarios del consumo promedio de energía eléctrica por uso de Refrigeradores en operación en los hogares de Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	87
Figura 4-14: Resultados por escenarios del ahorro de energía eléctrica por el uso de Refrigeradores domésticos eficientes en México para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	88
Figura 4-15: Resultados por escenarios del ahorro de energía eléctrica por el uso de Refrigeradores domésticos eficientes en Colombia para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	88
Figura 4-16: Resultados por escenarios del ahorro de energía eléctrica por el uso de Refrigeradores domésticos eficientes en Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	89
Figura 4-17: Resultados por escenarios de las emisiones de CO ₂ evitadas por el ahorro de energía eléctrica en México para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	89
Figura 4-18: Resultados por escenarios de las emisiones de CO ₂ evitadas por el ahorro de energía eléctrica en Colombia para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	90
Figura 4-19: Resultados por escenarios de las emisiones de CO ₂ evitadas por el ahorro de energía eléctrica en Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.	90

Lista de Tablas

Tabla 1-1: Top 10 de principales países exportadores de electrodomésticos en el mundo al 2013 [28].	8
Tabla 1-2. Refrigeradores domésticos tipo Top - Mount más vendidos en Latinoamérica. Fuente: Autor.	9
Tabla 1-3: Tecnologías de refrigeradores domésticos fabricados en países de Latinoamérica. Fuente Autor.	10
Tabla 1-4: Especificaciones técnicas de refrigeradores Top Mount. Adaptado por el autor.	11
Tabla 1-5: Refrigeradores domésticos Top-Mount comercializados en el Ecuador. Adaptado por el autor.	12
Tabla 1-6: Participación en el mercado de neveras en Colombia [30].	14
Tabla 1-7: Relación entre el PIB per cápita y el consumo de electricidad per cápita [32].	16
Tabla 1-8: Principales avances de eficiencia energética logrados en la refrigeración doméstica. Fuente: Adaptado por el Autor	20
Tabla 1-9 Compresores más utilizados en equipos de refrigeración doméstica. Fuente: EMBRACO.	24
Tabla 1-10: Modelos de Samsung con tecnología Twin Cooling Plus. Adaptada de [111].	30
Tabla 1-11: Modelos refrigeradores domésticos LG con evaporadores independientes. Adaptado de [113].	30
Tabla 1-12: Modelos de refrigeradores Whirlpool, con tecnología dual NoFrost. Adaptado de: [115].	31
Tabla 1-13: Propiedades físicas y químicas de refrigerantes [117].	32
<i>Tabla 2-1: Programas de etiquetado y MEPS en varios países del mundo para equipos de: aire acondicionado, lavadoras de ropa, congeladores y refrigeradores. Fuente: Adaptado por el Autor.</i>	36
<i>Tabla 2-2: Estándares mínimos de rendimiento energético de refrigeradores domésticos implementados por algunos países Latinoamericanos y también de Norteamérica. Fuente: Adaptado por el Autor.</i>	37
Tabla 3-1: Número de personas promedio por hogar en México, Colombia y Ecuador. Fuente adaptado por el Autor de INEGI, DANE e INEC.	53
Tabla 3-2: Consumo promedio de energía eléctrica de un refrigerador/congelador de 2 puertas Top Mount, Fuente: adaptado de [143].	55
Tabla 3-3: Consumo de energía promedio para refrigeradores domésticos ineficientes [144].	56
Tabla 3-4: Consumo de energía eléctrica promedio para refrigeradores por grupo de vida útil. Fuente Autor.	56
Tabla 3-5: Determinación del costo anual equivalente para un refrigerador doméstico. Fuente Autor.	57
Tabla 3-6: Parámetros y variables endógenas y exógenas consideradas. Fuente: Autor	58
Tabla 3-7 Parámetros utilizados en el modelo. Fuente: Autor	64
Tabla 3-8 Variables exógenas utilizadas en el modelo. Fuente: Autor	66
Tabla 3-9: Valores del total acumulado de refrigeradores nuevos y refrigeradores comercializados en México para el período 1995-2050. Fuente autor.	69
Tabla 4-1: Rangos porcentuales para la evaluación de la conversión por grupos de vida útil. Fuente Autor.	70

Tabla 4-2: Consumos de energía de referencia. Fuente [138].	81
Tabla 4-3: Comparativa del consumo energético del RD Top Mount Modelo WT4020S Whirlpool. Fuente: Autor	83
Tabla 4-4: Número de unidades de refrigeradores para plan de conversión - escenario 1. Fuente: Autor	85
Tabla 4-5: Número de unidades de refrigeradores para plan de conversión - escenario 2. Fuente: Autor	85

Introducción

Se puede verificar que el crecimiento económico de los pueblos ha estado directamente relacionado con el uso de los recursos energéticos, a mayor crecimiento mayor uso de recursos, sin embargo esta relación ha sufrido variaciones en los últimos años, debido fundamentalmente a la preocupación de los gobiernos por mejorar su sistema energético mediante la implementación de programas de eficiencia energética.

La OLADE en un estudio para América Latina y el Caribe, estima que el ahorro acumulado de energía resultante de la introducción de medidas de eficiencia energética relativamente blandas estarían entre el 3 y 5% [1], esto no significa que la calidad de vida de los pueblos haya disminuido.

La relación directa entre el crecimiento económico y la demanda del uso de recursos energéticos puede perder sintonía, en gran medida por la introducción de políticas de eficiencia energética motivadas por la escasez de recursos y el cuidado del medio ambiente, esto está llevando a la posible creación de un nuevo vínculo entre el crecimiento económico y la aplicación de políticas de eficiencia energética, que llevan a las naciones hacia el desarrollo sostenible.

Como se puede apreciar, dos son las situaciones características que preocupan a los gobiernos de distintos países del mundo, estas son: la escasez de recursos y el cuidado del medioambiente.

En lo que respecta a la escasez de recursos, varios países en América Latina están en un proceso de cambio de su matriz energética, como el caso de países como México, Colombia y Ecuador, en los que se está tratando de disminuir drásticamente la generación de energía eléctrica mediante energía tradicional y contaminante, con la gestión e implementación de nuevos proyectos de energía eléctrica que utilicen energías renovables limpias y sustentables como la hidroeléctrica, solar, eólica, biomasa y geotérmica.

En cuanto al consumo eléctrico, uno de los equipos más utilizados a nivel mundial y a nivel residencial, es el refrigerador de uso doméstico, mismo que funciona de manera continua durante todo el año, razón por la que representa en las cuentas eléctricas de los hogares un alto consumo de energía; consumo que está supeditado al estado del equipo, los años de funcionamiento, ubicación, etc.

Un refrigerador promedio (225 litros) consume entre 500 y 700 kWh/año [2], representando aproximadamente un 33.33% de consumo de energía eléctrica en hogares que facturan aproximadamente 150 kWh/mes. Sin embargo, este valor puede variar drásticamente debido fundamentalmente a los componentes del sistema, como el compresor, el condensador, el evaporador y el tubo capilar, ya que la mayor parte de energía desperdiciada por estos elementos, se debe a las pérdidas irreversibles que se generan [3], otra hace referencia al número de años de operación que tiene dicho equipo pudiendo llegar a consumir más de 1500 kWh/año; esto dependerá también de la capacidad del equipo.

Por otro lado, en lo que respecta al cuidado del medio ambiente, el uso de refrigerantes, como los CFC, HCFC, HFC contribuyen al agotamiento de la capa de ozono y el aumento en el calentamiento global. Hasta el año de 1995 los refrigerantes que se habían utilizado en refrigeración doméstica, han sido los CFCs; a través de los términos establecidos en el Protocolo de Montreal [4], se determinó que el uso de estos compuestos ocasionaban el agotamiento de la capa de ozono, por ello su producción fue controlada y limitada por etapas hasta el cese de la misma el 01 de enero del año 2010.

Los HCFCs y los HFCs aparecieron como sustitutos, sin embargo el Protocolo de Kioto [5], señala precisamente a los refrigerantes HFCs, como gases de “Efecto Invernadero”, y por lo tanto quedaron sujetos a control sobre sus emisiones; en lo que respecta a los refrigerantes HCFCs, que a pesar de poseer un bajo impacto sobre el deterioro de la capa de ozono, también son controlados por el Protocolo de Montreal y se establece un cronograma para su eliminación definitiva para el año 2040 en países como Colombia.

Los investigadores han tratado de sustituir a estos refrigerantes por otros que no contaminen. Es así que varios estudios realizados en la última década establecen a los hidrocarburos (HC) como una alternativa [6]–[14], siendo estos refrigerantes naturales considerados como los refrigerantes ideales, amigables con el medio ambiente y la solución decisiva al problema del agotamiento del ozono y el calentamiento global [15]. En definitiva los HC son la alternativa más prometedora para el reemplazo de los refrigerantes tradicionales contaminantes [16].

Sin embargo, los refrigerantes hidrocarburos presentan problemas de seguridad, los cuales pueden limitar las posibilidades de una amplia utilización, si no se cumplen con ciertas consideraciones. En este sentido varias son las investigaciones en las que se analiza la seguridad y el peligro de inflamabilidad en caso de fugas; se demostró que una concentración del HC en el aire (hasta 0,15kg) en una habitación estándar no es peligrosa por lo tanto tampoco lo es su uso como refrigerante, además que se han incorporado medidas de seguridad especiales [17], es por ello que algunas empresas especialmente en Europa y Asia ya usan hidrocarburos como refrigerantes [9] y en el caso de Colombia, empresas como las Industrias Haceb S.A., fabrican refrigeradores domésticos con refrigerantes HC desde el año 2012, para el caso de México y Ecuador las industrias de fabricación de refrigeradores domésticos, siguen todavía utilizando el refrigerante R134a como fluido de trabajo.

En la búsqueda de establecer estrategias para mejorar la eficiencia energética, varios países del mundo han propuesto políticas para la promoción de productos de alta eficiencia energética, principalmente las de impulsar a la industria a mejorar sus diseños con criterios ecológicos y de eficiencia energética y la emisión de normativas de etiquetado energético.

Es por esto que principalmente las empresas fabricantes de refrigeradores domésticos de países Latinoamericanos como Colombia y Ecuador, que fabrican principalmente equipos de refrigeración con etiqueta energética A, deben establecer procesos de innovación que sustituyan las tecnologías antiguas [18] con las que cuentan y optar por aquellas que ya se están utilizando en varios países que poseen índices de eficiencia energética más exigentes y que etiquetan a sus refrigeradores con A+, A++ y A+++; esto de seguro permitirá a dichas empresas aperturar nuevos mercados posibilitando su crecimiento y desarrollo económico en general, además del ahorro eléctrico que se podría conseguir si se comercializan estos equipos eficientes en el mercado interno de estos países.

Para el caso específico de países como México, Colombia y Ecuador, es de vital importancia contar con políticas que conlleven a tener ahorros energéticos significativos, proponiendo estrategias que radican fundamentalmente en el establecimiento de estándares mínimos de rendimiento energético para algunos equipos de mayor consumo energético en los distintos sectores de la población, como el residencial, comercial e industrial. Todas estas acciones aportan sustancialmente a la sostenibilidad energética de los países en el futuro.

En este sentido para el caso de México, desde el año 1994 inician las primeras acciones para la implementación de manera obligatoria de estándares mínimos de rendimiento energético (MEPS) dirigido a refrigeradores, acondicionadores de aire y motores, estándares que en los últimos años

están completamente armonizados con los estándares del Departamento de Energía U.S (DOE), haciendo que el programa mexicano ingrese agresivamente al mundo en términos de eficiencia energética; por otra parte, para el caso de Colombia, desde el año 2015, la Unidad de Planeación Minero Energética UPME, adscrita al Ministerio de Minas y Energía, estableció un programa obligatorio de etiquetado, el cual determina que los equipos de uso final de energía serán objeto del Programa Colombiano de Normalización, Acreditación, Certificación y Etiquetado de Equipos denominado Proyecto de Reglamento Técnico de Etiquetado - RETIQ en Colombia; por último para el caso de Ecuador, el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables MEER, está liderando desde hace varios años la implementación de distintas políticas de eficiencia energética en distintos temas.

A partir de los programas mencionados en los países de estudio, se establecieron normas técnicas de eficiencia energética, programas de etiquetado energético, planes de sustitución de equipos ineficientes por eficientes, etc., los cuales reorientan el comportamiento del mercado nacional, limitándolos a que puedan ser comercializados [19]. De una u otra forma estas acciones dinamizan los mercados tanto a nivel nacional como internacional.

Alcance del Proyecto

Descripción general del problema

Se estima que al año 2009, en el mundo se encontraban funcionando de 1,5 a 1,8 mil millones de refrigeradores y congeladores domésticos, contabilizando una producción y ventas aproximadas de 100 millones de equipos nuevos por año. De esta producción se estima que un 35 a 40% de equipos fabricados operan con refrigerantes hidrocarburos (HC), principalmente el isobutano (R-600a) [20].

China se convierte en el país con mayor aporte mundial en la producción con más de 40 millones de unidades, Europa aporta con alrededor de 25 millones, Norte y sur América alrededor de 20 millones de equipos y el resto de Asia con 15 millones aproximadamente, en otros lugares las producciones son pequeñas.

La Agencia Internacional de Energía (AIE), estimó que el stock de refrigeradores de los países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) fue de más de 500 millones en el año 2000 [21].

Si se considera que el refrigerador de uso doméstico es normalmente de uso continuo, es decir, permanece conectado y consumiendo energía durante todo el día, todos los días, y detallando que su consumo anual en dependencia de sus características, diseño, tamaño, eficiencia y cultura de uso varía de 100 a 1000 o más kWh/año, el refrigerador de uso doméstico se constituye en una importante fuente de empleo de energía eléctrica.

Por ejemplo, se estima que en Australia el consumo energético de refrigeradores de uso doméstico constituyó 7,2 TWh/año en el año 2008, representando el 12% del gasto residencial de energía eléctrica de ese país [21]; en México la refrigeración es la responsable de aproximadamente el 29% del consumo eléctrico en hogares ubicados en climas templados [22].

En vista de que los refrigeradores, congeladores y acondicionadores de aire son los principales consumidores de energía en el sector residencial y en cierta medida en el sector comercial, varios países en el mundo han emprendido distintas acciones para la mejora en la eficiencia en la búsqueda de reducir su consumo de energía eléctrica y en consecuencia la disminución de la contaminación del medio ambiente [23].

En este sentido, de acuerdo con la base de datos en línea CLASP de estándares y etiquetado, los países miembros de la Unión Europea (UE) y otros 18 países más, tienen normas de eficiencia energética obligatorias para refrigeradores y congeladores, en cambio otros 24 países tienen un programa de etiquetado comparativo obligatorio y estándares mínimos de rendimiento energético (MEPS) (Minimum Energy Performance Standards) [24], [25].

Las pérdidas energéticas que se logren evitar, estarán influenciado directamente el sistema socio-económico, ambiental, político y sobre todo industrial de los países. Esto incluye no sólo la medición de resultados, sino también una evaluación de las metas de los programas y la propia concepción del uso eficiente de energía, sus límites y alcances.

Por la complejidad de la estructura energética de los países latinoamericanos para la toma de decisiones se requiere contar un modelo que cuantifique el impacto tecnológico que podría tener la industria de la refrigeración doméstica en Latinoamérica, luego de introducir políticas energéticas con base en el establecimiento de estándares mínimos de desempeño energético (MEPS), que lleven

a un control de la producción nacional y sobre todo a un control de los equipos de refrigeración doméstica que están siendo importados.

Objetivos

Objetivo General

Determinar el impacto tecnológico en la industria de refrigeración doméstica en Latinoamérica, por la implementación de políticas de eficiencia energética.

Objetivos Específicos

1. Describir la industria de refrigeración doméstica desde la participación en el mercado latinoamericano, su situación tecnológica, la generación de empleo y la cadena productiva (suministros).
2. Analizar la evolución de los índices de eficiencia energética y las políticas energéticas establecidas en la región.
3. Modelar y simular mediante el uso de la dinámica de sistemas, el comportamiento del mercado de los productos de refrigeración doméstica en la región, ante la implementación de nuevas políticas de eficiencia energética.
4. Evaluar los impactos que afectarían la industria nacional frente a los retos que imponen las políticas de eficiencia energética en la región.

Contribuciones

Las principales contribuciones de esta investigación se resumen en lo siguiente:

1. Modelo para determinar el número de refrigeradores domésticos nuevos que se demandan en un país, considerando el crecimiento poblacional, número de hogares, acceso a la electricidad y el factor de posesión de equipos de refrigeración a nivel residencial.
2. Modelo que determina la dinámica de los refrigeradores domésticos en un país, clasificados en grupos de vida útil, en función del modelo Logit, que determina fundamentalmente las posibilidades de conversión de refrigeradores ineficientes de más de 10 años por equipos eficientes y de tecnología de bajo consumo eléctrico.
3. Modelo que determina el ahorro de energía eléctrica por el uso de refrigeradores eficientes y las toneladas de CO₂ evitadas por dicho ahorro.

Los modelos desarrollados para México, Colombia y Ecuador, permiten obtener datos útiles para recomendar a los gobiernos, la promoción e implementación de planes y programas en eficiencia energética para refrigeradores domésticos, ya que se ha podido verificar que dichos planes, sobre todo si se refirieren a sustituir refrigeradores domésticos eficientes que estén sintonizados con índices de eficiencia energética más exigentes, a más de conseguir que los usuarios tomen una decisión de renovar su equipo de más de 10 años y en consecuencia se consigan ahorros eléctricos significativos a nivel de país, **las industrias tendrían la oportunidad de abrir nuevos y potenciales mercados**, incrementando su producción y su capacidad y en consecuencia empleando más mano de obra directa.

A continuación, se presentan algunos detalles de los modelos y sus resultados:

- El proceso de sustitución de refrigeradores domésticos puede ocasionarse desde dos caminos, el primero se refiere a una sustitución del equipo de refrigeración por daño prematuro o por haber superado el nivel de vida útil que el usuario considera, el cuál muchas de las veces puede ser mayor a los 20 años (sobre todo en sitios con clima frío), el segundo se refiere a una sustitución influenciada por planes y programas que el gobierno pueda implementar, en esta circunstancia el usuario puede verse influenciado con las propuesta existentes y tomar la decisión de renovar su equipo de refrigeración a partir de los 11 años de vida útil, claro está que esto dependerá de las posibilidades de financiamiento, subsidio, bajo consumo de energía, costos asequibles, etc. El proceso de sustitución de refrigeradores domésticos se verá afectado también por las características del mercado local y por las limitaciones que la industria pueda presentar en los procesos de innovación y mejora de sus productos.
- El diseño de las estrategias a aplicarse debe tener en cuenta las características del mercado y sus antecedentes. En este sentido países Latinoamericanos como México, Colombia y Ecuador presentan similitudes y diferencias en lo referente al mercado de refrigeradores domésticos.
- Los resultados obtenidos evidencian un porcentaje pequeño de conversión de refrigeradores domésticos que se encuentran en el grupo de 11 a 15 años de vida útil, este porcentaje se va incrementando más a medida que el equipo ha superado los 15 años.

- Se espera que, en los próximos 30 años, la dinámica de refrigeradores domésticos en Latinoamérica se someta a una conversión gradual en equipos eficientes que utilicen una tecnología de bajo consumo eléctrico y sobre todo respetando el medio ambiente. Este panorama plantea retos en diseño, innovación e investigación de alternativas que propendan a mejorar la eficiencia energética de dichos electrodomésticos.
 - El modelo desarrollado permite analizar la forma en que el usuario toma sus decisiones a convertir su refrigerador ineficiente de más de 10 años de vida útil influenciado por los planes, programas y políticas de eficiencia energética que puedan emprender los gobiernos de países Latinoamericanos. Los planes, programas y políticas de eficiencia energética deberían tomar en cuenta principalmente la posibilidad de que las industrias fabricantes de equipos de refrigeración vayan adoptando los avances tecnológicos que se han ido desarrollando en distintas partes constitutivas de la nevera.
 - Los resultados encontrados indican que la aplicación de políticas orientadas a la implementación de planes y programas de renovación de refrigeradores ineficientes por eficientes causan ahorros de energía eléctrica significativa a nivel de país.
4. Creación y aprobación del Grupo de Investigación y Desarrollo en Simulación, Optimización y Toma de Decisiones GID-STD en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca Ecuador.
 5. Artículos presentados en congresos nacionales e internacionales, además de la publicación de trabajos en revistas científicas de clasificación Latindex

CAPÍTULO 1

1. Industria de la refrigeración doméstica

Con datos al año 2011, se puede afirmar que hay cerca de mil millones de refrigeradores y congeladores domésticos en el mundo. En el mercado europeo, se ha determinado un promedio de saturación de 106%, esto significa que algunos hogares ya tienen más de 1 equipo. Para el caso de los congeladores, estos presentan tasas de penetración de alrededor del 52% en los países de la UE-15 [26].

A continuación, se realiza una revisión de la industria de la refrigeración doméstica en Latinoamérica y específicamente en México, Colombia y Ecuador, que son los países en donde se realizarán las distintas aplicaciones de análisis.

1.1 Descripción de la industria de refrigeradores domésticos en Latinoamérica.

La industria de la línea blanca a nivel mundial está subdividida en 6 segmentos de acuerdo a lo siguiente:

- Aire acondicionado
- Refrigeradores
- Lavadoras
- Cocinas
- Microondas
- Otros

De estos segmentos, los equipos de aire acondicionado y refrigeradores representan aproximadamente un 55%, específicamente los refrigeradores, congeladores, etc., con un 28%.

El mercado global de línea blanca es de aproximadamente 200.000 millones de dólares, de los cuales apenas el 10% corresponde a Latinoamérica, en donde México ocupa un volumen de 4 mil millones, Colombia de mil millones y Ecuador de 400 millones de dólares [27].

México es el principal exportador de América Latina y el sexto a nivel mundial. En 2013, México exportó 6.712 millones de dólares, con una balanza comercial superavitaria, en la Tabla 1-1 se puede observar el top 10 de los principales países exportadores de electrodomésticos en el mundo.

Tabla 1-1: Top 10 de principales países exportadores de electrodomésticos en el mundo al 2013 [28].

Lugar	País	Exportaciones 2013
1	China	51.984
2	Alemania	13.790
3	Italia	9.003
4	Tailandia	7.493
5	Estados Unidos	7.277
6	México	6.712
7	Polonia	5.487
8	Corea del Sur	4.863
9	Turquía	4.510
10	Francia	2.683

Se ha identificado 5 compañías por segmento de refrigeradores, que abarcan los mayores porcentajes de participación sea a nivel global y latinoamericano de acuerdo con lo establecido en la Figura 1-1.

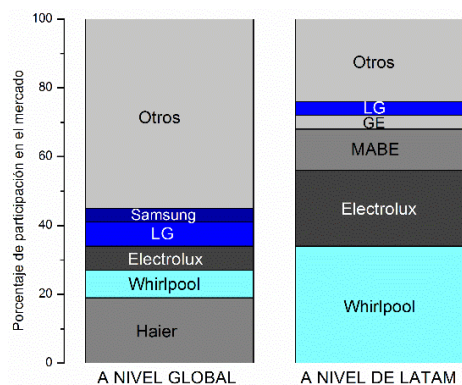


Figura 1-1. Compañías fabricantes de refrigeradores a nivel global y latinoamericano al 2013 [27].

1.1.1 Tipo de refrigerador doméstico más vendido.

Con la intención de identificar el tipo de refrigerador doméstico más vendido en Latinoamérica, se realizó un análisis del mercado de refrigeradores de varios países, para determinar el tipo de equipo más comercializado, en este sentido se pudo determinar que el tipo Top – Mount, de dos puertas (congelador arriba y refrigerador abajo) es el más requerido por los usuarios a nivel residencial. En la Tabla 1-2 se presentan datos de los modelos más vendidos, la capacidad, el precio y las dimensiones en general.

Tabla 1-2. Refrigeradores domésticos tipo Top - Mount más vendidos en Latinoamérica. Fuente: Autor.

País	Marca Nacional	Modelos	Volumen Neto (L)	Ancho (cm)	Prof. (cm)	Alto (cm)	Precio	Etiqu.
México	Mabe	RMA1025YMXS1	251,19	55,5	69,7	166,8	9.319 (MXN)	A
		RMA1130YMFXX0	302,34	59,9	71,7	176	10.400 (MXN)	A
		RME1436YMXX0	368,77	68	70,6	175,48	11.500 (MXN)	A
		RMS1540AMXX0	399,95	66,4	72,1	187,2	12.500 (MXN)	A
Colombia	Haceb	220L SE 2P DA TI	229,21	61	69	147	950.000 (COP)	B
		240L SE 2P DA TI	257,96	61	69	159	1.100.000 (COP)	B
		272L SE 2P DA TI	274,55	61	69	168	1.300.000 (COP)	B
		300L SE 2P DA TI	292,79	61	69	176	1.350.000 (COP)	B
		N 375L SE 2P DA TI	375	70	73	172	1.600.000 (COP)	B
		420L SE 2P DA	420	70	73	185	1.830.000 (COP)	B
Ecuador	Indurama	RI-385CR	256	62	67	158	560 (USD)	A
		RI-425CR	309	62	71	169	600 (USD)	A
		RI-485CR	370	71	70	175	700 (USD)	A
		RI-580CR	381	71	70	181	800 (USD)	A
Argentina	Gafa	HGNF 260	251	60,9	61,5	154	8.600 (ARS)	B
		HGNF 300	286	60,9	61,5	167,5	9.400 (ARS)	B
		HGF 377AW	325	60,9	61,5	161,8	10.400 (ARS)	B
		HGF 387AW	365	60,9	61,5	181,3	11.200 (ARS)	B
Brasil	Esmaltec	RCD34	276	54	66	157,3	1.900 (BRL)	A
		RCD38	306	59,5	65	172,4	2.100 (BRL)	A
Chile	Mademsa	ALTUS 900 INOX	241	60,7	60	153	220.000 (CLP)	A
		ALTUS 940 INOX	267	60,7	60	166,5	250.000 (CLP)	A
		ALTUS 970 INOX	401	70,7	70	175,9	320.000 (CLP)	A+
Venezuela	Frigilux	NFR-585S	490	73,5	70,5	182,5	13.700.000 (VEF)	
Perú	CoolStyle	281ASteel	273	55	69	145	919 (PEN)	

311ASteel	294	55	69	160	1.199 (PEN)
331NSteel	320	60	69	160	1.259 (PEN)
391ASteel	450	70	69	175	1.469 (PEN)

1.1.2 Tecnología utilizada para la fabricación del refrigerador Top-Mount.

Una vez identificado el tipo de refrigerador más utilizado a nivel residencial, se realizó una revisión de la tecnología que utilizan en lo referente a sus partes principales, en este sentido en la Tabla 1-3 se presentan datos de los equipos de refrigeración más vendidos en distintos países de Latinoamérica, de los cuales se ha verificado la tecnología con la que cuentan cada una de sus partes principales con excepción del condensador, evaporador y tipo de aislante, ya que resultaron ser comunes a todas las marcas. Para el caso del condensador, este es de tipo serpentín y aletas de disipación – condensador por aire, el evaporador es el del tipo de tubos y placas y el aislante es de espuma de poliuretano rígida con agente soplante HCFC-141b y aislante de ciclo pentano utilizado en equipos de refrigeración que trabajan con refrigerante R600a principalmente.

Tabla 1-3: Tecnologías de refrigeradores domésticos fabricados en países de Latinoamérica. Fuente Autor.

País	Marca de RD	Etiqueta EE	Compresor	Válvula	Refrigerante	Control
México	Mabe	A+ A	Hermético de tipo recíprocante Embraco ¼ hp	Válvula de expansión	R134a	Mediante termostato
Colombia	Haceb	A B	Hermético de tipo recíprocante Embraco ¼ hp	Tubo capilar	R600a	Mediante una tarjeta electrónica
Ecuador	Indurama	A	Hermético de tipo recíprocante Embraco Fullmotion VEG	Tubo capilar marca BOWA	R134a	Mediante termostato
Argentina	Gafa	A B	Hermético de tipo recíprocante Embraco Fullmotion ¼ hp	Tubo capilar marca BOWA	R134a	Mediante termostato analógico
Brasil	Esmaltec	A	Hermético de tipo recíprocante Embraco VEG 1/6	Válvula de expansión	R134a	Mediante termostato digital
Chile	Mademsa	A+	Hermético de tipo recíprocante Embraco Fullmotion ¼ hp	Tubo capilar 0,8	R600a	Mediante termostato y sistema Airflow
Venezuela	Cybelux	A B	Hermético de tipo recíprocante Emerson	Válvula de expansión	R134a	Mediante termostato
Perú	CoolStyle	A	Hermético de tipo recíprocante 1/6hp	Válvula de expansión	R600a	Mediante un panel electrónico digital

1.1.3 Análisis comparativo de las tecnologías utilizadas en los refrigeradores domésticos de más bajo consumo eléctrico comercializados en el mercado Latinoamericano.

Una vez que se han revisado cada una de las tecnologías en refrigeración doméstica que poseen las empresas más importantes de los distintos países Latinoamericanos, se tienen los insumos necesario para establecer un análisis comparativo entre equipos, con el fin de determinar las variables tecnológicas que influyen directamente en el consumo eléctrico.

La comparación se efectuará entre los refrigeradores más comúnmente vendidos, que de acuerdo con la información recabada en el apartado 1.1 de este documento, son los refrigeradores de tipo Top - Mount, con capacidades de almacenamiento en el rango de 200 a 300 litros.

Con los modelos de refrigeradores que presenten el menor consumo eléctrico, se revisará la tecnología que poseen sus principales componentes. Es importante mencionar que la eficiencia energética de un

refrigerador doméstico también depende de otras variables externas, como el piso térmico en el que opera, la ubicación dentro del hogar y la forma de utilización por parte del usuario.

En la Tabla 1-4, se puede observar los refrigeradores Top – Mount de fabricación nacional, de similares características y comercializados en países Latinoamericanos, además con la intención de contar con referentes tecnológicos, se incluyeron marcas líderes a nivel mundial como LG y Samsung que también se comercializan en dichos países.

Tabla 1-4: Especificaciones técnicas de refrigeradores Top Mount. Adaptado por el autor.

Marca	País	Modelo	Clase Energía	Tipo Compresor	Refrigerante	Aislante Térmico	Controlador	Consumo Anual kWh/año
GAFSA	Argentina	HGNF357 AW	A	Reciprocante	R134a	HCFC-141b	Termostato	355
LG	Corea del Sur	GT32WPP	A+	Lineal	R600a	C-pentano	Tecnología inverter	320
KELVINATOR	EEUU	KTB2802 WA	A	Reciprocante	R134a	HCFC-141b	Flex storm	-
SAMSUNG	Corea del Sur	RT46K653 1SL/	A+	Lineal	R600a	C-pentano	Digital inverter technology	323
ESMALTEC	Brasil	RCD 38	A	Reciprocante	R134a	HCFC-141b	Termostato	359
MADEMSA	Chile	ALTUS 970	A+	Reciprocante	R600a	C-pentano	Termostato y sistema airflow	348
INDURAMA	Ecuador	RI-580CR	A	Reciprocante	R134a	HCFC-141b	Termostato	345
CYBERLUX	Venezuela	NFR-585S	A	Reciprocante	R134a	HCFC-141b	Termostato	-
HACEB	Colombia	HIMALAY A 375 SE DA TI	A	Reciprocante	R600a	C-pentano	Tarjeta electrónica	343
MABE	México	SILVER MABE - RME1436 YMXSO	A	Reciprocante	R134a	HCFC-141b	Termostato	340
COLDEX	Perú	395 N STEEL	A	Reciprocante	R600a	C-pentano	Tarjeta electrónica	

De la tabla 1-4 se identifica que la tecnología LG y Samsung son los más eficientes ya que consumen alrededor de 321 kWh/año en comparación con 350 kWh/año que corresponde a los refrigeradores que producen los distintos países Latinoamericanos, esto significa que los equipos de refrigeración de tecnología LG y Samsung consumen aproximadamente un 8% menos que los fabricados en Latinoamérica.

Las variables identificadas que representan un cambio en la tecnología aplicada que influyen directamente en el consumo eléctrico del refrigerador son:

- Tipo de compresor: con las alternativas de compresor lineal y compresor reciprocante o alternativo,
- Tipo de refrigerante: con las alternativas del R600a y el R134a
- Tipo de aislamiento térmico: con las alternativas de espuma rígida de poliuretano con agente soplante HCFC-141b y espuma rígida de poliuretano con agente soplante ciclo pentano.

En la Tabla 1-5 se presenta distintas marcas de refrigeradores tipo Top-Mount comercializados en el Ecuador, sus precios y consumos eléctricos.

Tabla 1-5: Refrigeradores domésticos Top-Mount comercializados en el Ecuador. Adaptado por el autor.

Marca	Compresor	Marca Compresor	Refrigerante	PVP USD.	Consumo Energético kWh/Año
SAMSUNG	Lineal	SAMSUNG	R600a	619,99	323
LG	Lineal	LG	R600a	679,99	320
MABE	Reciprocante	EMBRACO	R134a	514,99	340
WHIRPOOL	Reciprocante	EMBRACO	R600a	551,00	377
ELECTROLUX	Reciprocante	EMBRACO	R134a	469,99	394
INDURAMA	Reciprocante	EMBRACO	R134a	450,00	345,39
HACEB	Reciprocante	EMBRACO	R134a	499,00	343
DUREX	Reciprocante	EMBRACO	R134a	470,00	405,15

Los componentes tecnológicos por analizarse son factor común en todos los refrigeradores fabricados en el mundo ya que su principio de funcionamiento es el mismo en cualquier parte, es decir, poseen el mismo ciclo termodinámico de enfriamiento.

De los componentes tecnológicos se determinó que el compresor es el elemento principal, que influye en el consumo de energía y en el costo para que se cumpla el ciclo de enfriamiento y el refrigerante al ser utilizado como fluido de trabajo pueda extraer el calor para mantener el ambiente frío.

1.2 Mercado de refrigeradores domésticos en México, Colombia y Ecuador.

1.2.1 México.

El comercio internacional de la industria de electrodomésticos de México presenta el siguiente detalle de exportaciones e importaciones de acuerdo con lo que se presenta en la Figura 1-2.

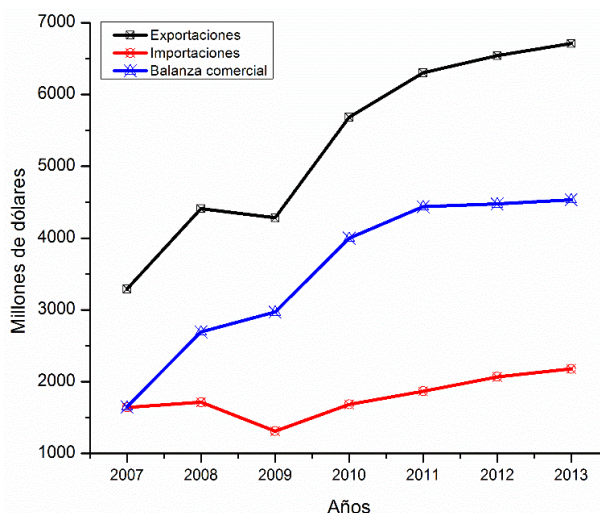


Figura 1-2: Comercio internacional de la industria de electrodomésticos de México, 2007-2013 [28].

En el año 2013 se registró un total de 2.613 millones de dólares de exportaciones de refrigeradores con congelador y puertas exteriores separadas (lo que representaría 8.710.000 unidades considerando un costo promedio de 300 dólares por unidad), esto significa alrededor de un 39% del total de exportaciones de electrodomésticos a ese año, se registra además 458 millones de dólares por refrigeradores por compresión de vapor, de acuerdo con los códigos arancelarios correspondientes.

En lo referente a las empresas fabricantes de refrigeradores domésticos, México cuenta con un mercado muy grande, ya que gran parte de su producción se exporta a los Estados Unidos, la marca nacional líder es Mabe.

Mabe es el tercer proveedor más importante de electrodomésticos en toda América Latina. La compañía mantiene productos bajo las marcas General Electric, Easy, IEM y Mabe. Cuenta con 8 plantas de fabricación en México y otras más en mundo, como por ejemplo en Colombia y Ecuador.

Exporta a más de 70 países y es el principal exportador de productos de línea blanca a Estados Unidos, gracias a su alianza regional con General Electric. En 2013 registró ventas por 4.043 millones de dólares. La empresa emplea a 22,173 personas.

Whirlpool es la segunda empresa más importante en términos de ventas de electrodomésticos, cuenta con dos plantas de fabricación de refrigeradores. Del total de los electrodomésticos que fabrica en México, el 60% se exporta a Estados Unidos, Europa, y América Latina y 40% es para el consumo interno.

Samsung Electrónica, mantiene una producción en la que el 20% tiene como destino el mercado mexicano, el 60% el mercado de Estados Unidos y el 20% destinado a países de Latinoamérica.

En lo referente a la producción nacional de electrodomésticos, se estima que en 2014 fue de 7.167 mdd y se pronostica una tasa media de crecimiento anual (TMCA) del 3.4 % para el período 2014-2020, en cuanto al consumo se estima que fue de 2.260 mdd y se pronostica una TMCA real de 2.4 % para el mismo período. En la Figura 1-3 se pueden observar estos valores.

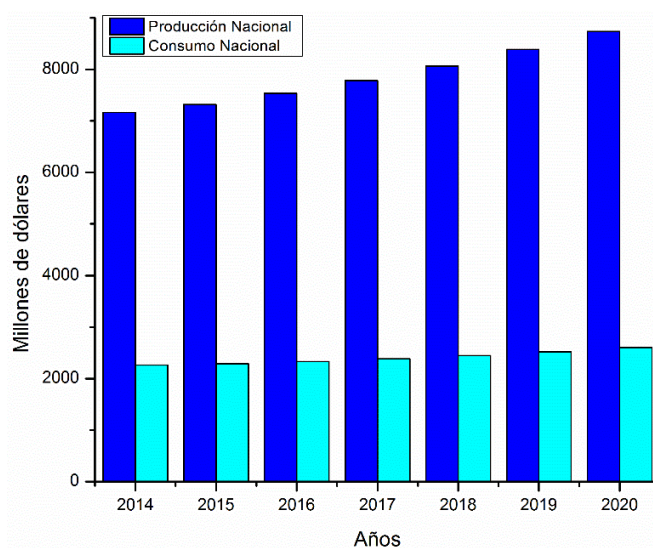


Figura 1-3: Prospectiva de producción y consumo de refrigeradores domésticos en México 2014-2020 [29].

1.2.2 Colombia.

En Colombia, la producción en línea blanca como neveras, lavadoras y cocinas, principalmente, la realizan las empresas Haceb, Mabe, Indusel, Sudelec, Superior, Challenger e Indufrial (especializada en refrigeración industrial); las cuales mantienen una capacidad instalada suficiente para el mercado nacional y las exportaciones a la Comunidad Andina De Naciones – CAN y eventualmente a los países del Caribe e incluso se ha incursionado en el mercado americano pero aun sin lograr volúmenes efectivos [30].

El tamaño estimado del mercado es de 1.550.000 unidades de electrodomésticos de línea blanca, distribuidos en 700.000 neveras, 280.000 estufas y 525.000 lavadoras [30], según informes de las empresas más representativas del sector que de acuerdo con el comportamiento histórico y las proyecciones propias realizan anualmente el cálculo de esta cifra. En este sentido la participación en el mercado de las distintas empresas fabricantes de neveras se pueden ver en la Tabla 1-6.

Tabla 1-6: Participación en el mercado de neveras en Colombia [30].

Marca	Porcentaje (%)
MABE	46%
HACEB	23%
LG	9%
CHALLENGER	7%
ABBA	4%
OTROS	11%

En Colombia se constituyen aproximadamente 250.000 hogares al año [30], mismos que conjuntamente con aquellos que realizan la reposición de su nevera, forman el grupo de demanda potencial de este tipo de electrodomésticos, los cuales para hacer su adquisición están a la expectativa de las propuestas novedosas (alta tecnología) y precios competitivos antes de tomar su decisión de compra. Actualmente las personas en Colombia cambian sus neveras a pesar de que siguen funcionando, ya que muchos buscan que sean amigables con el medio ambiente y sobre todo permitan un ahorro de energía eléctrica razonable.

Como se puede observar en la Figura 1-4, la marca líder nacional ha llegado a ser HACEB y CENTRALES, misma que en la actualidad es MABE; en lo referente a importaciones se adquieren las mejores marcas como LG, Whirlpool, Mabe y Samsung entre otras.

El tamaño estimado del mercado de refrigeración en Colombia es de 618.000 unidades. Cifra que corresponde al 1.4% aproximadamente del total de la población colombiana, tomando como línea base una población muestra al 2008 de 44,451 millones de habitantes [31].

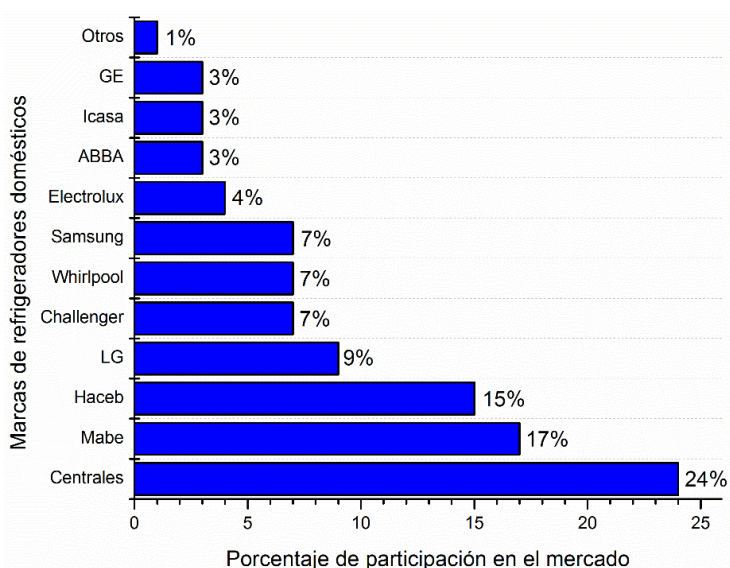


Figura 1-4: Marcas de refrigeradores domésticos comercializados en el mercado colombiano año 2008 [31].

De esto refrigeradores domésticos comercializados en Colombia, se pueden diferenciar tres tipos de equipos como [26]:

- Los convencionales (*frost*) de 1 y 2 puertas con un tamaño aproximado de 283.000 unidades, en donde las marcas nacionales de Centrales, Mabe y Haceb abarcan el 70% del mercado y las importadas como Samsung apenas un 5%.
- Refrigeradores (*nofrost*) de 2 puertas con un tamaño aproximado de 309.000 unidades, en donde las marcas nacionales de Mabe, Haceb y Centrales abarcan el 53% del mercado y las importadas como LG, Whirlpool y Samsung llegan a un 33%.
- *Syde by Side*, representa la línea de productos más costosa y presenta un tamaño aproximado de 26.000 unidades, en donde las marcas importadas Samsung y LG manejan el 62% del mercado.

Haciendo un resumen general de la participación de distintas marcas en el mercado de neveras colombiano, se ha verificado que al año 2012 marcas nacionales como Mabe posee un mercado del 46%, seguida por Haceb con un 23%, además de un 9% de la marca internacional LG [30].

1.2.3 Ecuador.

Con datos al año 2013, el mercado ecuatoriano de línea blanca es aproximadamente de 440 millones de dólares al año, concentrado principalmente en refrigeradores, lavadoras y cocinas.

Específicamente para refrigeradores domésticos se determina un consumo de 208 millones de dólares lo que significaría 416.000 unidades aproximadamente, considerando un valor promedio de 500 dólares por equipo de refrigeración. De este consumo total, 61 millones de dólares corresponden a importaciones y 22 millones de dólares a exportaciones, determinándose una producción nacional de 294.000 unidades aproximadamente y un consumo nacional de 372.000 unidades.

Las empresas Indurama y Mabe, representan los dos mayores fabricantes de línea blanca, que producen más del 90% de la producción nacional ecuatoriana de refrigeradores y cocinas.

En la figura 1-5 se puede observar la evolución que ha tenido la producción de cocinas y refrigeradores en el Ecuador en el periodo 2010-2013 [27].

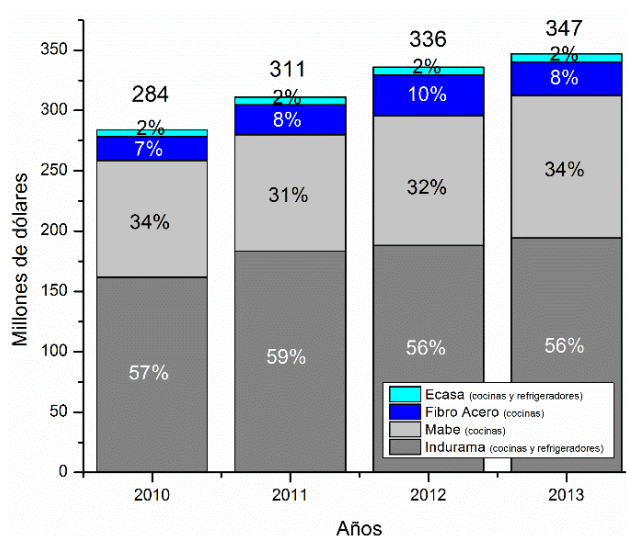


Figura 1-5: Evolución de la producción de cocinas y refrigeradores en el Ecuador período 2010-2013 [27].

El 71% de los refrigeradores comercializados en Ecuador son de producción nacional, el 21% son importados de países Latinoamericanos y el 8% de otros países.

1.3 Situación eléctrica de Latinoamérica, México, Colombia y Ecuador

1.3.1 Latinoamérica

La participación de la electricidad en la matriz de consumo final de América Latina y El Caribe (ALyC) al año 2010 fue relativamente bajo en un 16%, en comparación con el conjunto de los países de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) en la que se encuentra México y Chile que llegó a un 22% [32].

Con respecto al sector residencial de los países de ALyC, estos valores se justifican por el alto índice de uso de gas licuado de petróleo para la cocción de alimentos, como el caso de Colombia y Ecuador.

En lo referente al consumo de electricidad total en ALyC, este pasó de 489.000 GWh para el año 1990, a 1.073.000 GWh al año 2010, representando una tasa de crecimiento promedio anual del 4%. Por el contrario para el caso del sector residencial, el consumo de electricidad se incrementó del 26% en el año 1990 al 27% para el año 2010 [32].

En la tabla 1-7 se puede observar que la tasa de crecimiento promedio anual (t.c.p.a) del consumo de electricidad per cápita y del PIB per cápita para ALyC es de 1,49 y de 0,82 para los países de la OCDE, esto se debe principalmente a los exitosos programas de eficiencia energética que buscan disminuir la intensidad energética¹ [32].

Tabla 1-7: Relación entre el PIB per cápita y el consumo de electricidad per cápita [32]

Relación	América Latina y el Caribe			Países OCDE		
	1990	2010	t.c.p.a	1990	2010	t.c.p.a
US\$/hab.año	3.996	5,541	1,65%	23.219	30.428	1,36%
kWh/hab.año	1.129	1.833	2,45%	6.667	8.315	1,11%
Relación t.c.p.c			1,49			0,82

El consumo total de electricidad, está altamente concentrado en las principales economías, debiéndose destacar que Brasil participa con el 41% y México participa con un 17% del consumo regional y que más del 80% de este valor, lo cubren 5 países, tal y como se puede observar en la Figura 1-6.

¹ La **intensidad energética (I)**. - es un indicador de la eficiencia energética de una economía. Se calcula como la relación entre el consumo energético (E) y el producto interior bruto (PIB) de un país.

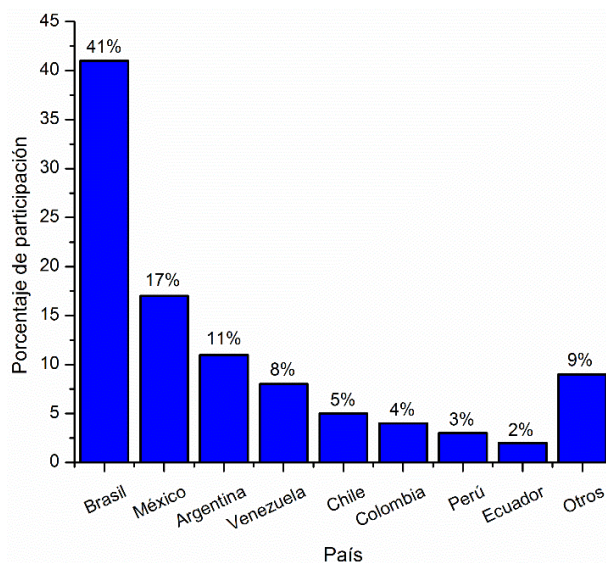


Figura 1-6: Distribución del consumo regional de electricidad por países al año 2010 [26].

En el tema de uso racional de la energía en la región, se han implementado durante los últimos años programas con el fin de promover el ahorro energético y optimizar el manejo de los recursos naturales y económicos, habiéndose creado en algunos países instituciones y marcos jurídicos específicos para asegurar la eficacia de estos programas.

A continuación se mencionan algunas de las experiencias más exitosas de la región respecto a instituciones y programas de uso racional de la energía:

- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) – México
- Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PROURE) – Colombia
- Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) – Ecuador
- Programa Nacional de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PRONUREE) – Argentina
- Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) – Brasil
- Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE) – Chile

1.3.2 México

Al final de 2014, el sistema eléctrico nacional SEN, tenía una capacidad instalada eléctrica de 65.451,8 MW, de esta capacidad el 83,1% pertenecía a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) (54,366.9 MW), el 8,9% por autoabastecimiento, el 5,4% mediante procesos de cogeneración y el restante 2,7% por otros auto consumidores [33].

En lo referente al consumo eléctrico, para el año 2013 se registró un total de 241.571 GWh, de este consumo el 56,9% le correspondió al consumo del sector industrial y el 21,7% (52.420,9 GWh) al consumo del sector residencial [33].

En los últimos años, los precios de electricidad se han mantenido sin fuertes fluctuaciones, para el caso específico del sector residencial el precio se ha establecido en 1,2 pesos/kWh, esta estabilización se debe fundamentalmente al otorgamiento de subsidios por parte del estado [33].

En México el mayor responsable de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) después del sector del transporte, le corresponde a la generación de energía eléctrica. En 2013 las emisiones de CO₂

asociadas a la generación de electricidad, ascendió a 13.440,9 millones de toneladas (Mt), siendo el carbón el combustible más contaminante. Con las políticas energéticas actuales, se espera alcanzar en 2040 un total de 19.992 Mt [33].

Haciendo un análisis del consumo de energía eléctrica en el Distrito Federal, se puede establecer que al provenir del sistema interconectado nacional, el cual lleva la energía generada a través de diferentes tecnologías y combustibles, los factores de emisión se obtienen con base al previo cálculo de las emisiones de la región del sistema interconectado al que pertenece el Distrito Federal. En este sentido para efectos de aplicación en el modelo se procede a establecer el valor en 669 Ton CO₂/GWh [34].

1.3.3 Colombia

El Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Colombia, presentó a diciembre de 2016 una capacidad total instalada de 16.597,3 MW, de los cuales las centrales hidroeléctricas tienen una participación de 69,93%, y en segundo lugar se ubican las centrales térmicas (gas y carbón) que alcanzan de manera agregada el 20,78% [35].

Al mes de noviembre de 2016 el SIN recibió del parque generador 5.544,7 GWh. Dicha energía se incrementó respecto al mes anterior en 2,16%, el mayor aporte en la generación lo realizaron las centrales hidráulicas, en un 84,93% del total generado y las plantas térmicas participaron en un 13,18% respecto del total [35]. Es importante hacer notar que la participación térmica ha ido disminuyendo de un valor aproximado del 50% en los primeros meses de 2016 hasta valores inferiores al 15%.

Los cálculos de emisiones de CO₂ del SIN para el mes de diciembre de 2016 indican que el parque generador colombiano emitió 478.224,99 toneladas de CO₂, como resultado de la combustión de gas natural, carbón y combustibles líquidos principalmente, lo que podría sugerir que en este año se emitió al menos 6 millones de toneladas de CO₂.

El factor de emisión del SIN para el mes de diciembre de 2016 fue de 86 Ton CO₂/GWh, mismo que en comparación con los meses de diciembre 2015 a marzo de 2016, presenta una disminución trascendental debido al incremento sustancial de la participación de la generación hidráulica y a su vez la disminución de la participación de la generación térmica [35].

En otra bibliografía, se ha encontrado que de acuerdo a las consideraciones establecidas el factor de emisión del SIN para proyectos de mecanismos de desarrollo limpio MDL en Colombia, es 0.388 tCO₂/MWh, lo que significa 388 tCO₂/GWh [36].

1.3.4 Ecuador

El Ecuador produce energía renovable proveniente de fuentes hidráulicas, solares, eólicas y térmicas de cogeneración y energía no renovable de fuentes como térmicas de turbo gas, turbo vapor y motores de combustión interna.

Desde el Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos - MICSE, se ha elaborado balances energéticos del país, en donde se presenta la contabilización de los flujos de energía en cada etapa de la cadena energética, desde el momento de producción o extracción de las fuentes primarias hasta la obtención de fuentes secundarias con un proceso intermedio de transformación [37].

Con respecto a la capacidad efectiva de generación eléctrica, se ha determinado que al mes de mayo de 2015 se tuvo una capacidad de 2.538,12 MW a través de fuentes renovables y mediante fuentes no renovables de 2.907,66 MW, lo que significó una capacidad total de 5.448,77 MW, en lo referente a

la energía entregada para el servicio público, específicamente en el consumo eléctrico nacional a nivel residencial se registró un consumo de 6.537,42 GWh [37].

En cuanto a los factores de emisión promedio anual de CO₂ expresados en kgCO₂/kWh para cada tipo de tecnología del parque generador del sistema eléctrico de Ecuador, se ha establecido un promedio entre cada una de las fuentes en un valor de 731,6 kgCO₂/kWh lo que resulta un valor de 731,6 Ton CO₂/GWh [38].

1.4 Eficiencia energética en refrigeración doméstica

Debido al alto valor de consumo de energía eléctrica que representan los refrigeradores y congeladores en los hogares, varios países en todo el mundo han implementado algún programa para regular o controlar este consumo; en la mayoría de los casos, se introdujeron programas de eficiencia energética en forma de estándares mínimos de eficiencia energética (MEPS) o también en forma de etiquetas energéticas.

La base de todas las normas y etiquetas energéticas, radica en los métodos y procedimientos de prueba establecidos y desarrollados en un laboratorio, que posibilitan tener:

- Repetibilidad y precisión de los resultados
- Una predicción exacta del consumo de energía en condiciones reales
- Fácil comparación de los resultados con los resultados de otros procedimientos de prueba
- Reflejo de los resultados relativos de diferentes opciones de diseño para un determinado equipo

Estas exigencias han obligado a los fabricantes de refrigeradores domésticos a implementar mejoras en la tecnología utilizada para la elaboración de sus electrodomésticos, en el caso específico de los sistemas de refrigeración, se han adoptado compresores más eficientes, aislamientos más efectivos, diseño de espacios más óptimos, sistemas de control y refrigerantes hidrocarburos principalmente.

Los sistemas de refrigeración por compresión de vapor presentan algunas características específicas en su ciclo de operación y funcionamiento (ver anexo A), las cuales deben ser estudiadas a profundidad a fin de conseguir mejoras sustanciales que lleven a un incremento del coeficiente de operación (COP) y consecuentemente una mejora en la eficiencia energética del refrigerador doméstico.

1.4.1 Sistemas de Refrigeración Doméstica - Estado del Arte de Las Mejoras en la Eficiencia Energética.

Un refrigerador de uso doméstico es un artefacto muy utilizado a nivel mundial de manera continua durante todo el año, por lo que representa un alto consumo de energía en los hogares que lo requieren. Para analizar esta problemática es necesario mencionar las causas que lo generan. Una de ellas se debe fundamentalmente a los componentes del sistema como el compresor, el condensador, el evaporador y el tubo capilar, ya que la mayor parte de energía es desperdiciada por estos elementos, debido a las pérdidas irreversibles que se generan [39].

Dichas anomalías que existen en el refrigerador doméstico, son trabajos de interés mundial para buscar mejoras en la eficiencia energética a través de alternativas que optimizan el funcionamiento del sistema de refrigeración en general y el uso de refrigerantes naturales que poseen buenas propiedades termodinámicas, no tóxicos, y sobre todo muy eficientes en su desempeño.

En la Tabla 1-8 se presenta varias propuestas para mejorar la eficiencia energética del refrigerador doméstico desarrolladas en los últimos años por distintos autores, las cuales se amplían en el Anexo B.

Tabla 1-8: Principales avances de eficiencia energética logrados en la refrigeración doméstica. Fuente: Adaptado por el Autor

Sistema	Propuesta para mejorar la eficiencia energética del refrigerador	Autor
Sistema de refrigeración en general	Proponen que las líneas de refrigerante deben ser reordenadas con un flujo descendente y los canales de refrigerante deben moverse más hacia los bordes.	Björk, Palm y Nordenberg [40]
	Reducir el área de sección transversal del canal de refrigerante interno en la parte corriente arriba del evaporador	Hermes, Melo, Knabben y Gonçalves [41]
	Desarrollaron un procedimiento de análisis para detectar posibles fallos que pueda tener el compresor en condiciones defectuosas, tales como el bloqueo del evaporador, ensuciamiento del condensador, envejecimiento del aislamiento y desgaste del compresor. Observaron que el consumo de energía aumenta en 0.274 kWh/día (+17%).	Hermes y Melo [42]
	Proponen el uso de sistemas de circuito secundario, intercambiadores de calor, instalación de sensores de refrigerantes inflamables y extractores de aire para minimizar los riesgos.	Wang, Eisele, Hwang y Radermacher [43]
	Sugieren un rediseño del SLHX, aportando mejoras al compresor ya que recibiría menos refrigerante líquido en el arranque, tomando en cuenta también que tal cambio de diseño no produzca un aumento en la caída de presión.	Björk, Palm y Nordenberg [44]
Compresor	Variando la velocidad del compresor en función de la demanda de refrigeración se ha mantenido funcionando casi de modo continuo, logrando ahorros de energía significativos en comparación con los de control termostático clásico (ciclos ON/OFF).	P. Binneberg, E. Kraus, H. Quack [45]
	Para variar la velocidad del compresor se ha utilizado inversores como TRIAC, PWM (Modulación de Ancho de Pulso) y algoritmos de control para la regulación difusa de la velocidad del compresor.	C. Aprea, R. Mastrullo, C. Renno [46]
	Se puede conseguir la capacidad de modulación sin utilizar controladores electrónicos (sin cambiar la frecuencia de funcionamiento) controlando el desplazamiento del pistón (volumen muerto).	H. Lee, S. Ki, S. Jung, W. Rhee [47]
	Se ha desarrollado un compresor lineal prototipo, que utilizando una combinación entre la inductancia y la capacitancia logró una auto modulación del 70-90%, con ello se lograría disminuir el consumo de energía y reducir costos ya que no existen controladores electrónicos.	J. K. Kim, C. G. Roh, H. Kim, J. H. Jeong [48]
	Presentó en el 2011 un modelo de simulación integral de un compresor lineal a escala miniatura.	C. R. Bradshaw, E. A. Groll, and S. V. Garimella [49]
	Validaron posteriormente con los resultados obtenidos en un prototipo de compresor lineal que fue construido para el efecto.	C. R. Bradshaw, E. A. Groll, and S. V. Garimella [50]
	Resortes mecánicos permiten usar el compresor lineal para el control de la capacidad eficiente a partir de más o menos 35 a 100%, con ello el compresor puede funcionar a una potencia de entrada más baja por lo menos en condiciones de carga parcial ahorrando energía.	C. R. Bradshaw, E. A. Groll, and S. V. Garimella [51]
	Presentó una guía para optimizar el diseño de un sistema de refrigeración por compresión de vapor, utilizando compresores de capacidad variable, logrando conseguir hasta un 40% de ahorro de energía y una reducción del ruido de hasta 5 dB con este sistema.	Marcos G. [52]
Condensadores y Evaporadores	Se presenta una degradación de la transferencia de calor, caída de presión, mayor humedad relativa del aire, menor velocidad de flujo de aire y reducción de la temperatura del refrigerante, lo que da lugar a una gran cantidad de acumulación de escarcha.	Cui, Li, Liu y Zhao [53]

	El evaporador tiene la capacidad de proporcionar la cantidad de refrigeración necesaria para la preservación de los bienes almacenados en el refrigerador a la temperatura deseada.	Waltrich, Barbosa, Hermes, Melo [54]
	La escarcha acumulada en el serpentín del evaporador disminuye de forma significativa al rendimiento del intercambiador de calor.	Silva, Hermes y Melo [55]
	La disminución del rendimiento se debe al efecto combinado de la baja conductividad térmica de la capa de escarcha y la tasa de flujo de aire del ventilador suministrado.	Knabben, Hermes, Melo [56]
	La formación de escarcha en el serpentín del evaporador se da en forma de aguja no muy densa, ocasiona que la presión de aire disminuya en las aletas y en los extremos de las aletas aumenta el coeficiente de transferencia de calor.	Özkan y Özil [57]
	Evaluaron el efecto del número de filas de tubos en el rendimiento de los evaporadores térmicos hidráulicos sin escarcha, establecen que las últimas filas de tubos ayudan con menos eficacia a la transferencia de calor, mientras que todavía ejerce alguna influencia en la caída de presión.	Hermes y Waltrich [58]
	Demonstraron que el COP presenta variaciones pequeñas que van desde 0,95 hasta 1,03 al cambiar la longitud del evaporador y 1,02 a 1,03 al variar la altura de la salida del evaporador.	Waltrich, Barbosa y Hermes [59]
	Encontraron que el coeficiente de transferencia de calor baja al aumentar la calidad, por lo que pide no utilizar flujos de masa tan bajas como 21 kg/m ² s.	Björk y Palm [60]
	El condensador es el componente principal en el sistema de refrigeración ya que rechaza el calor absorbido por el refrigerante en el evaporador hacia fuera del compartimiento del refrigerador.	Bassiouny [61]
	Afirmaron que la reducción en el consumo de energía puede lograrse mediante el uso de un compresor controlable	Porkhial, Khastoo y Razavi [62]
	Concluyó que un intercambiador de calor de alta eficacia no proporciona el mejor diseño termo hidráulico necesariamente para bobinas del condensador y del evaporador.	Hermes [63]
Dispositivo de expansión	Sugieren reducir la carga y el volumen interno de todos los componentes ya que permiten un beneficio considerable sin disminuir su rendimiento además de utilizar una válvula de expansión electrónica (EEV).	Poggia, Tejedaa, Leducqa, y Bontempsb [64]
	Usaron una metodología que reduce al mínimo el consumo de energía, a través del método de métrica variable, predice el punto de trabajo óptimo correctamente, ya que correlaciona el diámetro del tubo y la carga de refrigerante, permitiendo determinar el diámetro y carga de refrigerante para un consumo de energía óptimo.	Björk y Boeng y Melo [65]
	Demonstraron que a una carga muy baja, el sobrecalentamiento del evaporador aumenta, en cambio con una carga muy elevada la línea de aspiración se convierte en una región de carga térmica no aprovechada, conduciendo en los dos casos a un mayor consumo de energía.	Björk y Palm [66]
	Encontraron que hay pérdidas en el desplazamiento de refrigerante después de un arranque y parada del compresor, la cual afecta al rendimiento general del sistema y otra se da cuando el compresor está activo, en el período de carga térmica de los intercambiadores de calor es más alta de lo que sería para un sistema controlado de forma continua, registrando en general pérdidas de eficiencia de 5-37%.	Björk y Palm [67]
	Sugieren un tubo capilar estrangulado, con una temperatura de condensación flotante, puede operar grandes variaciones de carga sin llegar a desestabilizarlo, al igual que un sistema de control para el dispositivo de expansión termostática más sofisticado.	Björk y Palm [68]
	Indicaron que el rendimiento del sistema de EEV es mucho más alto en comparación con el sistema de tubo capilar, sostuvieron que se puede optimizar el rendimiento de la bomba de calor en condiciones fuera de diseño, manteniendo un recalentamiento constante mediante el control de la apertura de la EEV.	Choi y Kim [69]
Distribución del flujo de aire al interior del refrigerador	Indican que es importante estudiar la transferencia de calor en el interior del refrigerador, tomando en cuenta los ciclos de encendido y apagado del compresor con el fin de predecir la distribución de la temperatura en el interior del compartimiento de refrigeración.	Laguerre y Flick [70]

	Estudiaron los efectos de los obstáculos en los perfiles de velocidad, con el objetivo de predecir las zonas calientes y frías, indicaron que estos influyen en la circulación de aire principal a lo largo de las paredes y la zona central.	Laguerre, Amara, Moureh y Flick [71]
	Utilizaron un sistema de PIV (velocimetría de imágenes de partículas), para la medición de la velocidad del aire, aseguraron que el aire estancado en la parte superior de la cavidad tiene una velocidad de 0,04m/s y en la parte inferior de la pared fría es de 0,02m/s. Estableciendo otra configuración, observaron que existe altas temperaturas de aproximadamente 5°C más alta que la temperatura media del aire, por lo que es importante evitar colocar productos sensibles en esta posición.	Laguerre, Amara, Mojtabi, Lartigue y Flick [72]
Gabinete y Aislamiento	En la construcción de los refrigeradores domésticos es importante el aislamiento térmico, para mantener por dentro un volumen interior técnicamente acondicionado.	Griffith, Araste [73]
	Existen soluciones de materiales como los aerogeles para la construcción de aplicaciones, así como también el progreso que han ido teniendo los VIPs (panel de aislamiento al vacío) en la tecnología de la construcción.	Baetens, Jelle, Gustavsen [74]
	En general, los VIP obtienen una conductividad térmica mucho menor, y reducen fuertemente el espesor aplicado del material de aislamiento térmico.	Baetens <i>et al.</i> [75]
	Los aerogeles tienen una conductividad gaseosa baja y una transmisión infrarroja radiante baja TIR.	Ramakrishnan, Krishnan, Shankar, Srivastava, Singh, Radha [76]
	El aerogel es uno de los materiales de aislamiento térmico más prometedor de las últimas décadas. Puede llegar a tener una conductividad térmica de 2 a 2,5 veces menor que la lana mineral convencional.	Baetens, Jelle, Gustavsen [77]
	Nuevos materiales para ser utilizados como aislamiento térmico se siguen estudiando, como los paneles llenos de gas verde (GFP).	Söylemez, Ünsal [78]
Refrigerantes	Realizaron un análisis experimental para establecer las características de transferencia de calor y caídas de presión de los refrigerantes HC (R-290, R600 y la mezcla R290/R600), en el cual demostraron que los coeficientes de transferencia de calor de los HC es mayor que la del R-134a.	Mao, Yu y Wen [79]
	Demostraron que la caída de presión en los HC fue menor con respecto al del R134a.	Dalkilic and S. Wongwises [80]
	Demostró que el coeficiente de transferencia de calor por ebullición de una mezcla de HC (M09) en dos tubos horizontales lisos, es más alto que el R-134a, además utilizaron mapas para confirmar los patrones de flujo.	Kattan, Thome y Favrat [81]
	Evaluó al propano, butano y mezclas de HC (propano comercial/iso-butano/n-butano). Llegando a varias conclusiones importantes para el uso.	M. Fatouh [82]
	Experimentaron con GLP (60% de R290 y 40% de butano comercial) como alternativa del R134a. Los resultados indicaron que el COP usando GLP fue mayor que la de R134a, además se redujo el consumo de energía y la relación de tiempo de encendido en alrededor de 10,8 y 14,3%, respectivamente.	Fatouh y Kafafy [83]
	Presentaron un estudio experimental para evaluar el desempeño del isobutano puro y mezcla de HC (propano, butano e isobutano) de ello, el isobutano mostró un mejor desempeño y su rendimiento se aproxima al del HFC134a, además de reducir la carga de refrigerante no se modificó ningún elemento del sistema [84].	Mohanraj y Chandrasekar [84]
	Una mezcla de HC R436A (R290/R600a, 56/44 % en peso) mejoró la eficiencia energética de un refrigerador doméstico ya que redujo la carga del refrigerante hasta un 48%, además de reducir el tiempo de encendido en un 13%, ahorrando así 5.3% en el consumo de energía por día, lo que permitió mejorar el índice de eficiencia energética del refrigerador.	M. Rasti [85]
	Utilizaron R-600a y mezclas de HC para mejorar el rendimiento del refrigerador usando doble bucle, de esta manera controla de forma independiente la temperatura de evaporación tanto de congelación como de refrigeración. Resultados experimentales logrados indicaron que se puede ahorrar 14,2% y 18,6% usando ciclos de doble bucle optimizados con R-600a y mezclas de HC respectivamente.	Won, Jae y Yon [86]

Realizó una revisión literaria del análisis de exergía de mezclas de hidrocarburos, en la cual determinó que mejoran el rendimiento con respecto a otros refrigerantes.	J.U. Ahamed [87]
Realizó una revisión bibliográfica, enfatizando algunas características químicas y termodinámicas de los HC, indicó las excelentes características que poseen.	Claudio Crincoli [88]
Realizó un modelo termodinámico en un ordenador, que permite conocer el efecto de la refrigeración, el trabajo del compresor, y el coeficiente de rendimiento.	M.M. El-Awad [89]
Realizó una investigación con las ecuaciones de estado cubico, utilizando; GEOS3C, SRK, PR, SW y C-1, y las comparó con datos teóricos y experimentales previamente realizados, de ello la ecuación GEOS3C predice mejor la presión de vapor y el volumen de líquido saturado.	Viorel Feroiu [90]
Establece una correlación que predice el comportamiento del R600a,	Chen [91]
Investigaron otras alternativas de refrigerantes ambientalmente amigables, por ejemplo para el caso del CO2, los resultados indicaron que puede trabajar de manera aceptable en condiciones cercanas al punto crítico y por debajo de este.	Salazar, Lugo, Méndez, Zamora [92]
Prestigiosas universidades y empresas en China mostraron avances principales en investigación de refrigerantes naturales, ya que dicho país representa el mercado más influyente en el mundo, obtuvieron excelentes logros usando dióxido de carbono, agua, amoniaco, aire e HC.	Wang, Li [93]
Analizó un proceso de selección de refrigerantes, centrándose en aquellos que se encuentran en los triángulos de la matriz de derivados del metano y del etano además se discutió los refrigerantes alternativos utilizados actualmente y varios grupos de refrigerantes basados en hidrocarburos halogenados y sus problemas ambientales.	Bolaji, B.O. [94]
Indican que los HC son la alternativa más prometedora para el reemplazo de los refrigerantes tradicionales contaminantes.	Quraishi, Wankhede [95]
Llevó a cabo una revisión de las normas existentes en cuanto a refrigeración y aire acondicionado (A/C), y mencionó algunas enmiendas que se estaban realizando a dichas normas internacionales, las mismas que ya están disponibles y que proporciona medidas de seguridad y requisitos tanto para el diseño, reparación y servicio de equipos de refrigeración y A/C.	Jose M. Corberán [96]

1.4.2 Alternativas tecnológicas que se pueden implementar en la industria de la refrigeración domestica a fin de producir equipos eficientes energéticamente.

En nuevos sitios industriales, los gobiernos deberían asegurar la identificación de tecnologías y medidas de eficiencia energética durante la fase de diseño, particularmente si existe financiamiento gubernamental. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), consideran que la eficiencia energética es la medida más costo-efectiva y rápida para abordar la seguridad energética [97], así como los retos ambientales y económicos en el sector energético. Es así que en una de sus recomendaciones, proponen desarrollar a nivel industrial equipos de alta eficiencia, logro que en parte ha sido obtenido gracias a las innovaciones tecnológicas implementadas por las distintas marcas en los equipos de refrigeración.

A continuación, se realiza la descripción de algunos avances tecnológicos que se han implementado en los últimos años en equipos de refrigeración doméstica, específicamente en países que están a la vanguardia en eficiencia energética, se revisarán las innovaciones aplicadas al tipo de refrigerador Top-Mount (congelador en la parte superior y refrigerador en la parte inferior) que poseen una capacidad de almacenamiento de 200 a 300 litros. Se abordará también la revisión a aquellos refrigeradores con etiqueta energética A+, A++ y A+++, los cuales presentan un avance tecnológico que se diferencia al resto de equipos con similares funciones.

1.4.2.1 Innovación tecnológica en el compresor.

En la industria de la refrigeración doméstica, se utilizan compresores de bajo torque denominados LST (low starting torque) aplicados en refrigeradores, congeladores, mostradores comerciales, bebedores y enfriadores de líquidos, los cuales presentan temperaturas bastante bajas, en rangos que varían de -25°C a -35°C , por lo que se clasifican como compresores de baja temperatura de evaporación LBP con temperaturas de -35°C a $+10^{\circ}\text{C}$ para congeladores y refrigeradores [98].

Se estima que existen cerca de 1.400 millones de refrigeradores y congeladores en operación en el mundo, de los cuales un alto porcentaje de equipos emplean compresores alternativos y funcionan con base en el sistema de refrigeración por compresión mecánica de vapor, en la Tabla 1-9 se puede observar los compresores más utilizados en equipos de refrigeración doméstica.

Tabla 1-9 Compresores más utilizados en equipos de refrigeración doméstica. Fuente: EMBRACO.

Tipo de compresor	Familia de compresor	Modelo	Desplazamiento (cm ³)	Refrigerante	Consumo potencia en el punto de prueba (W)
ON/OFF - Velocidad constante	EG	EG 50CLP	7,15	R600a	106
		EGT 80HLC	7,15	R134a	151
	EM	EMI 30CNP	4,99	R600a	83
		EMI 50HER	4,99	R134a	123
De Velocidad variable	VEG Fullmotion	VEGZ 6H		R134a	59-153
	VEM Fullmotion	VEMY 6H		R134a	56-177
Compresor lineal	Compresor Wisemotion	WMD9C		R600a	Ahorro en el consumo eléctrico de 15-26% con respecto al compresor ON/OFF
		WMD7H		R134a	

1.4.2.1.1 Compresor giratorio o alternativo.

Los compresores que se emplean en los frigoríficos domésticos están herméticamente soldados y sellados, son compresores de desplazamiento positivo, son utilizados para sistemas de baja presión, como es el caso de los refrigeradores domésticos [99]. El funcionamiento de este tipo de compresor consiste en el trabajo que realiza un pistón sobre el refrigerante en el interior de un cilindro, de acuerdo a las etapas de admisión, compresión y descarga (ver Figura 1-7) [100].

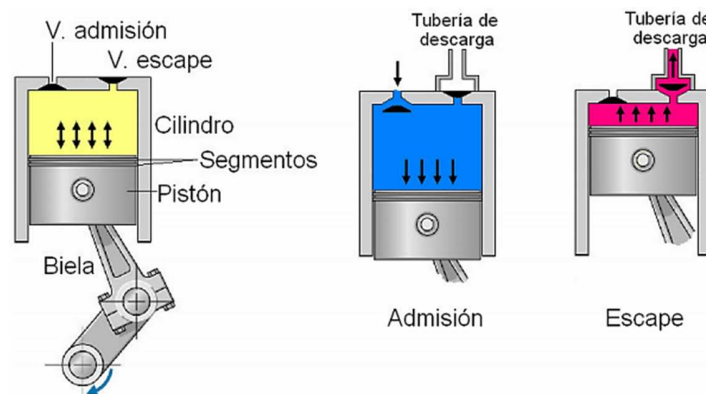


Figura 1-7: Funcionamiento de compresor alternativo. Tomado de [101].

El compresor alternativo que está siendo empleado ampliamente en la refrigeración doméstica es el Tecumseh AE2 (ver Figura 1-8), estos compresores están diseñados para operar con los refrigerantes hidrocarburo HC R600a (isobutano) y el HC R290 (propano), lo que le representa un porcentaje de disminución en el consumo eléctrico por la eficiencia demostrada de este tipo de refrigerantes naturales, además de contribuir al cuidado del medio ambiente.

La tecnología que utilizan los compresores Tecumseh, puede adaptarse al uso de otros gases refrigerantes tradicionales como el R134a y el R-404A.

Desde los criterios de eficiencia energética, la dinámica del pistón de un compresor alternativo desempeña un papel fundamental en dos procesos críticos relacionados con el flujo del fluido refrigerante, la primera se refiere a la fuga de gas a través de la holgura radial, lo que puede causar una pérdida considerable en la eficiencia de bombeo del compresor, por ende afectando al ciclo global de enfriamiento y la segunda se relaciona con el proceso de fricción viscosa asociada a la película de lubricante en la holgura radial del conjunto pistón cilindro; es por estas razones que se han desarrollado varios estudios con el fin de solventar esta situación problemática [102].

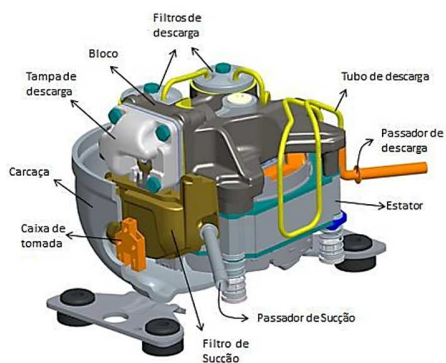


Figura 1-8: Vista tridimensional del compresor alternativo biela-manivela. Tomado de [99].

Los avances tecnológicos desarrollados en torno a este producto, representan un 25% de mejora en la eficiencia en comparación con los compresores alternativos utilizados hasta hace 5 años.

Dependiendo de la aplicación, estos compresores presentan una capacidad frigorífica de 20% más que sus similares, utiliza un 25% menos de aceite, lo que favorece la transferencia de calor del sistema, mejorando el coeficiente de operación (COP) principalmente [103].

1.4.2.1.2 Compresor Lineal

El compresor lineal es una derivación del tipo de compresores alternativos o de desplazamiento positivo, no dispone de piezas en rotación por lo que no está sujeto a procesos de fricción permitiendo un incremento en el rendimiento total. El sistema no necesita lubricantes para su operación

Un compresor lineal está compuesto por un pistón libre y válvulas de aspiración y descarga como únicos elementos dinámicos presentes en el sistema (ver Figura 1-9), la ventaja adicional de este tipo de compresores es que el sistema puede ser controlado electrónicamente.

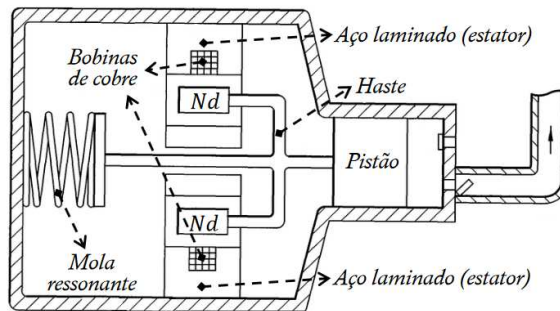


Figura 1-9: Esquema interno del compresor lineal [104]

En términos de innovación tecnológica, estos equipos representan un 20% de eficiencia más en comparación con el compresor alternativo biela-manivela, esto con base en estudios y pruebas realizadas en los laboratorios del POLO de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC) Brasil.

Por otro lado, según experimentos, el consumo de electricidad de un refrigerador top-mount de 680 litros se redujo al 24% por la sustitución del compresor a uno lineal. La reducción del 47% se ha logrado con algunas modificaciones adicionales en el refrigerador, además si se modula la capacidad de refrigeración del compresor lineal con sistemas de control electrónico, se conseguirá una reducción adicional del consumo de electricidad [105].

En la actualidad LG es la empresa que está utilizando el compresor lineal para la fabricación de refrigeradores domésticos además la empresa Embraco ha desarrollado un compresor lineal con algunas ventajas y prestaciones, a continuación se presentan algunos detalles:

1. Compresor lineal de LG.

Desde el desarrollo del compresor de inversión lineal, hace aproximadamente 16 años, LG ha trabajado continuamente para mejorar su tecnología, desarrollando el compresor de inversión lineal de quinta generación de LG (ver Figura 1-10), introducido en el año 2014, mismo que ofrece hasta un 60% de eficiencia energética y un 15% de disminución en el ruido comparado con el compresor de primera generación.

Las ventajas obtenidas de la tecnología de inversión lineal, han conseguido hasta un 60% más de eficiencia, llegando a ser utilizados en los refrigeradores que tienen clasificación A+++ de etiqueta energética, optimiza el paso directo del refrigerante dentro del intercambiador del motor reduciendo su pérdida durante el proceso cíclico de condensación.

Cabe mencionar que el gas refrigerante utilizado por el compresor lineal de LG es el HC R-600a (isobutano) [106].



Figura 1-10: Compresor Lineal Inverter de LG. Tomado de [107]

2. Compresor lineal Embraco.

Los avances tecnológicos que han tenido estos compresores han sido notables en las mejoras de su eficiencia teniendo valores de rendimiento COP más altos, además de generar menos ruido en aproximadamente 10 dB, en comparación con los compresores convencionales. En la Figura 1-11 se puede observar la evolución que han tenido los compresores para refrigeradores domésticos en los últimos años.



Figura 1-11: Evolución de los compresores Embraco Tomado de [108]

El compresor WISEMOTION posee una eficiencia superior con respecto a sus antecesores, esto se puede observar al comparar el COP con los dos modelos de compresores utilizados en refrigeración doméstica (ver Figura 1-12), ya que cumple con todas las regulaciones de eficiencia energética y está diseñado para usarlo con refrigerante R600a, este tipo de compresores estará a la venta a finales del año 2017 [93].

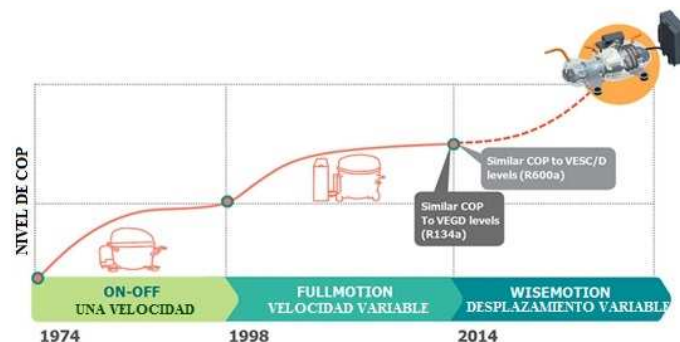


Figura 1-12: Comparaciones del rendimiento de compresores Embraco. Adaptado de [108].

A diferencia de los compresores convencionales, que requieren una operación ON/OFF para mantener una temperatura media, los compresores WISEMOTION mediante su sistema de control puede funcionar en una gama más amplia de capacidades de modulación, inclusive pueden mantenerse funcionando sin parar para evitar variaciones de temperatura [108], en la Figura 1-13 se puede observar dichas variaciones.



Figura 1-13: Comparaciones de la variación de temperatura de compresores Embraco [108].

1.4.2.2 Innovación tecnológica en el evaporador.

En los refrigeradores domésticos por lo general, se utilizan evaporadores del tipo de alimentación de refrigerante de expansión seca, es decir que el refrigerante que circula en el interior del evaporador se encuentra en estado gaseoso, ya sea vapor húmedo o saturado, para conseguir dicha vaporización, a la entrada del evaporador viene instalada una válvula de expansión.

En una investigación llevada a cabo en Brasil, por la *International Energy Initiative* se destaca un estudio computacional, acerca del trabajo que realiza el evaporador dentro del refrigerador.

En la figura 1-14, se observa el flujo interno de aire y su comportamiento; si se sigue la trayectoria marcada por la corriente de aire, se puede detectar que éste, circula por todo el espacio útil del equipo. El refrigerador y el congelador se comunican a través de una válvula denominada damper, la que permite pasar el aire frío del congelador hacia el compartimento del conservado, esta estrategia genera baja eficiencia, por estar enfriando el aire del refrigerador con un evaporador que funciona a una temperatura apropiada para el congelador y además si estos refrigeradores están equipados con compresores de velocidad constante, la eficiencia del equipo de refrigeración será aún más baja.

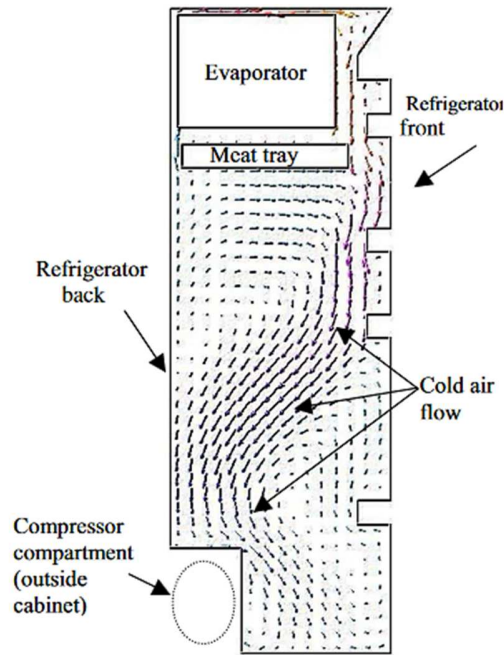


Figura 1-14: Apreciación en 2D del flujo de aire dentro de un refrigerador tradicional, con un solo evaporador [109].

Analizando desde una perspectiva de la mezcla de olores que se puede propagar al interior del refrigerador, lo que ocasionaría molestias a los usuarios, está la baja eficiencia, las cuales representan las razones principales que han motivado para plantear rediseños al sistema.

El consumo energético que representa la utilización de un solo evaporador, puede verse reflejando en términos monetarios, ya que al introducir una carga térmica dentro del equipo en cualquiera de las secciones útiles, requerirá una mayor circulación del refrigerante para evacuar el nuevo calor, por ende el compresor deberá estar en continuo funcionamiento, lo que a su vez demanda mayor consumo de energía [109].

1. Evaporadores independientes.

Algunas marcas están promoviendo en sus productos la implementación de un segundo evaporador independiente en el compartimento de refrigeración, según un estudio desarrollado en la UFDSC en Brasil [110], este nuevo intercambiador de calor tiene el objetivo de realizar un proceso de sub-enfriamiento a la entrada del dispositivo de expansión, al aumentar la capacidad del sistema y sobrecalentar el fluido refrigerante en la succión del compresor, evitando el efecto "golpe de líquido" en el compresor.

En sistemas que utilizan el tubo capilar como dispositivo de expansión, se puede añadir un intercambiador intermedio de calor entre este tubo y la línea de salida del condensador, para cumplir con el objetivo antes mencionado.

Con esta nueva disposición, un evaporador más grande trabaja para satisfacer una demanda mayor de capacidad de refrigeración en el congelador y un evaporador más pequeño para el refrigerador, a pesar de esta nueva configuración es necesario utilizar un damper para conectar los dos compartimentos, un factor muy importante es el tipo de controlador que utiliza el electrodoméstico.

En la salida de los evaporadores, el circuito de refrigeración se vuelve a unir y el compresor presenta una única succión, como se observa en la Figura 1-15, los evaporadores pueden ir configurados en serie o en paralelo, siendo este último el que mayor ventaja presenta desde el punto de vista de la eficiencia energética.

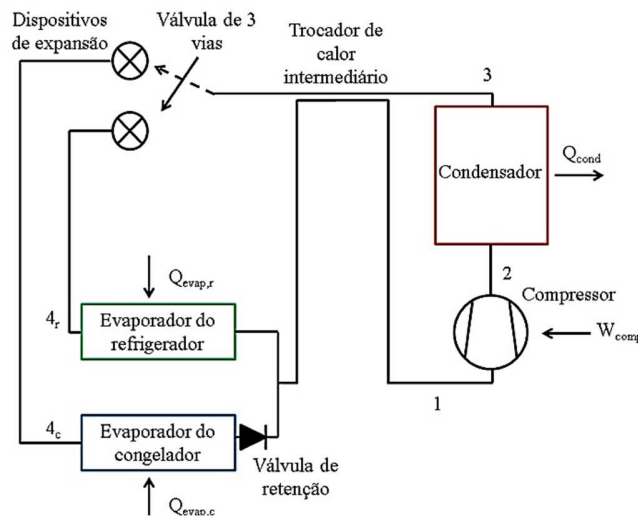


Figura 1-15: Ciclo de refrigeración de doble evaporador. Tomado de [110]

2. Tecnología Twin Cooling Plus® (Samsung)

Samsung es una de las empresas coreanas de refrigeración doméstica, más reconocidas que existen en el mundo; la certificación energética de toda la gama de Samsung es A++. La marca ha realizado el lanzamiento a inicios del año 2017 de tres nuevos modelos tipo Top-Mount, en los cuales se ha incorporado el nuevo sistema Samsung's Twin Cooling Plus®.

Estos modelos tienen dos puertas y capacidad de almacenamiento de 300, 312 y 321 litros en los que se ha incorporado un segundo evaporador en el compartimento que realiza la refrigeración, en la Tabla 1-10 se pueden observar los consumos de refrigeradores que utilizan este sistema.

Tabla 1-10: Modelos de Samsung con tecnología Twin Cooling Plus. Adaptada de [111]

Modelo	Categoría	Capacidad (litros)	Tipo	Evaporador	Marca Evap.	Consumo Energético (kWh/año)
RT35K5730SL	A+	361	TOP MOUNT	DUAL	TWIN	281,04
RT32K5730SL	A+	320			COOLING	266,28
RT29K5030S8	A+	298			PLUS	260,4

La nueva tecnología desarrollada, propone una técnica de enfriamiento dual que permite mantener los alimentos frescos. Para lograrlo, controla y transporta aire frío para la refrigeradora y el congelador de manera independiente con dos evaporadores, dos sistemas de ventiladores y un preciso control electrónico (ver Figura 1-16).

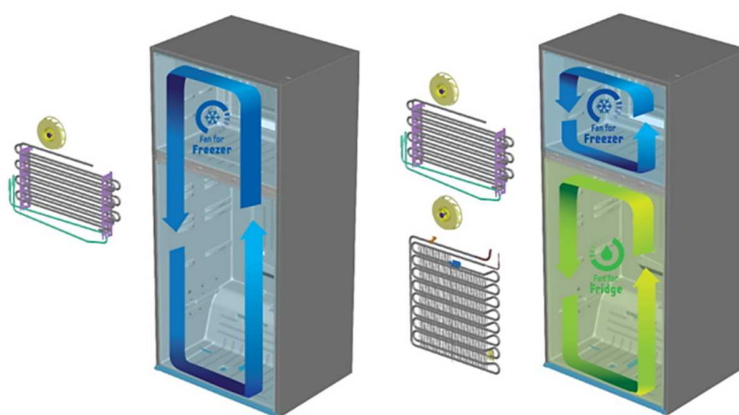


Figura 1-16: Implementación de evaporador dual. Tomado de [111].

La combinación del sistema Twin Cooling Plus® con la tecnología Digital Inverter de Samsung realiza su aporte tecnológico e innovador aportando de manera significativa al ahorro del consumo energético. Las refrigeradoras Samsung ahorran 22% más energía frente a otras del mercado, gracias a su tecnología Digital Inverter; además, el sistema Twin Cooling Plus™ agrega 30% más de eficiencia energética, dando como resultado un ahorro total de 52% en los productos de refrigeración Samsung [112].

3. Refrigeradora Cromada Inverter (LG)

De igual manera que Samsung, la marca coreana de refrigeradores LG propone el uso de evaporadores duales, trabajando en conjunto con un compresor lineal, los evaporadores duales responden a cambios en temperatura y humedad dentro del refrigerador y congelador. Mientras tanto, sensores digitales dentro de la nevera y congelador monitorean los niveles de humedad y temperatura, manteniendo un ambiente controlado, los evaporadores son totalmente independientes, en la Tabla 1-11 se pueden observar los modelos que la marca LG está comercializando con esta tecnología.

Tabla 1-11: Modelos refrigeradores domésticos LG con evaporadores independientes. Adaptado de [113].

Modelo	Capacidad (litros)	Tipo	Evap.	Marca Evap.	Consumo Energético (kWh/año)
LT32WPPX	312	TOP MOUNT	DUAL	SMART	339
GT 31BPP	410			COOLING	325.68
LT41MDP	414			PLUS	355.44

4. Whirlpool: Frigorífico Supreme NoFrost.

La empresa Whirlpool Corporation lanza en el año 2014 su nueva línea de refrigeradores tipo Top Mount, en el que incorporan un nuevo compresor y un nuevo sistema dual NoFrost. El nuevo sistema logra una temperatura mínima de hasta -18°C , lo que posiciona a esta línea de frigoríficos en la categoría A+++, mientras que otras marcas son calificadas con 2 estrellas porque sólo logran llegar hasta -12°C [114].

La tecnología que se ha implementado en los modelos de frigoríficos Supreme NoFrost de Whirlpool, consiste en dos sistemas no frost independientes, uno para la nevera y otro para el congelador, esta nueva tecnología hace que los dos compartimentos sean totalmente independientes, garantizando una excelente conservación de los alimentos: humedad óptima, aromas que no se mezclan, en la Tabla 1-12, se describe modelos del tipo Top Mount con la nueva tecnología Whirlpool.

Tabla 1-12: Modelos de refrigeradores Whirlpool, con tecnología dual NoFrost. Adaptado de: [115]

Modelo	Categoría	Capacidad (litros)	Tipo	Evap.	Consumo Energético (kWh/año)
BSNF 8452 OX	A+	261	TOP MOUNT	DUAL	296.16
BSNF 9152 W	A++	308			247
BSNF 9723 OX	A+++	349			169

1.4.2.3 Innovación tecnológica en el condensador

El condensador es uno de los 4 componentes básicos que conforma el sistema de refrigeración y cumple la tarea de evacuar el calor absorbido por el refrigerante del interior del refrigerador, convirtiendo el gas de alta presión y temperatura a un líquido de baja presión y temperatura ambiente.

En los refrigeradores domésticos del tipo Top Mount, el condensador viene instalado en la parte posterior del mismo, este consiste en un tubo de acero con ondulaciones de 180° y el proceso de evacuación de calor se da por convección natural. Por lo que los fabricantes recomiendan ubicar a los frigoríficos en habitaciones con buena circulación de aire y alejados de fuentes generadoras de calor como cocinas o estufas, además de ubicar la parte posterior del equipo a unos 15 cm de la pared para mejor evacuación del calor.

En cuanto a la tecnología de los condensadores no han existido mayores cambios en diseño y estructura.

1.4.2.4 Otras Innovaciones tecnológicas desarrolladas.

1. Innovación tecnológica en cuanto al aislante térmico.

En la actualidad el agente aislante utilizado es HCFC-141b, el cual ya presenta mejores propiedades térmicas, pero la desventaja de este es su alta contaminación a la capa de ozono, por sus componentes químicos (cloro y flúor), en este sentido se ha trabajado en un nuevo producto que pueda sustituirlo, sin alterar las propiedades aislantes.

El nuevo soplante que ya se está implementando en algunos equipos, es el ciclopentano, el mismo que tiene como base a los hidrocarburos por lo cual presenta un casi nulo potencial de agotamiento del ozono (ODP), se prevé que el nuevo material sea sustituido en los nuevos productos hasta el año 2020.

2. Innovación tecnológica en cuanto a controladores y sensores

Hoy en día, las industrias buscan que los controladores, además de las funciones naturales de accionar el compresor, ventilador y resistencias eléctricas, permitan controlar todo en los refrigeradores, al verificar la mejor hora para el deshielo, decidir si es necesario cambiar el set-point (rangos) de temperaturas para que el producto esté más frío o para que el refrigerador entre en modo nocturno y reporte ahorros de energía o disminuir la intensidad de las luces [116].

3. Controlador Digital Inverter de SAMSUNG.

La tecnología de controladores Digital Inverter desarrollada por la marca SAMSUNG deja atrás el sistema On-Off y opta por un ajuste en la temperatura cambiando la velocidad del motor, sin tener que apagarlo y prenderlo repetidamente, lo que permite un ahorro de hasta un 30% más de energía eléctrica que uno sin tecnología invertir [116].

1.4.2.5 Análisis del tipo de refrigerante

Para el análisis del tipo de refrigerante, en primera instancia se definen las dos opciones más utilizadas a nivel mundial en la industria de la refrigeración doméstica, que son: el R134a y el R600a.

Para el caso de México y Ecuador se utiliza el refrigerante R134a y para el caso de Colombia se está utilizando el R600a, se puede dar el caso que en los países mencionados sigan funcionando refrigeradores con más de 20 años de vida útil, es decir fabricados antes de 1999, los cuales utilizan el refrigerante R12, siendo una sustancia sujeta a control.

1.4.2.5.1 Refrigerante R134a

Este refrigerante fue desarrollado como una alternativa a largo plazo para reemplazar a los refrigerantes CFC y HCFC como el R12 y el R22 respectivamente, el cual posee propiedades termo-físicas muy similares en rendimiento pero con compuestos que no afectan la capa de ozono y un potencial de calentamiento atmosférico de 1430 (ver Tabla 1-13).

Este compuesto tiene una gran estabilidad térmica y química, poseen una baja toxicidad, no es inflamable, tiene una excelente compatibilidad con la mayoría de materiales siendo miscible completamente con los aceites poliésteres por lo que se recomienda usarlo siempre con este tipo de aceites en los compresores.

1.4.2.5.2 Refrigerante R600a

Es un gas natural que minimiza el impacto ambiental, es parte de la familia de los hidrocarburos; siendo un gas incoloro, inodoro y altamente inflamable, hace necesario debidas precauciones y normativas para su manejo.

Aparte de tener un porcentaje nulo de potencial de destrucción de la capa de ozono (ODP), también es ideal para los ciclos de refrigeración por compresión de vapor por su baja densidad y su baja compresibilidad (ver Tabla 1-13), lo que representa una ventaja para el compresor ya que requiere menos trabajo para mantener el ciclo termodinámico, esto definitivamente genera un ahorro en el consumo energético del refrigerador.

Tabla 1-13: Propiedades físicas y químicas de refrigerantes [117].

Refrigerante	Unidad	R-134a	R-600a
Nombre	-	Tetra fluoroetano	Isobutano

Fórmula	-	CF ₃ -CH ₂ F	(CH ₃) ₃ CH
Peso molecular	(g/mol)	102	58,1
Punto de ebullición	(°C)	-26,5	-11,6
Punto de congelación	(°C)	-103	-159
Temperatura crítica	(°C)	101,1	135
Presión crítica	(bar abs)	40,67	36,45
Densidad crítica	(kg/m ³)	508	
Densidad del líquido (-25°C)	(kg/l)	1,37	0,6
Densidad del líquido (0°C)	(kg/m ³)	1,293	
Densidad del vapor saturado a -25°C/+32°C	(kg/m ³)	4,4	1,3
Presión de vapor (25°C)	(bar abs)	5,7	3
Presión de vapor (0°C)	(bar abs)	2,92	
Calor de vaporización a punto de ebullición a 25°C	(kJ/kg)	217,2	332
Calor específico del líquido (25°C) (1,013 bar)	(kJ/kg.K)	1,44	
Calor específico del vapor (25°C) (1,013 bar)	(kJ/kg.K)	0,85	
Viscosidad del líquido (25°C)	(cP)	0,202	
Presión superficial (25°C)	(mN/m)	8,09	
Solubilidad del R134a en agua (25°C a 1,013 bar)	(wt%)	0,15	
Capacidad volumétrica refrig. (-25/55°C)	(kJ/m ³)	658	373
Inflamabilidad	-	No	$\frac{1,8\% \text{ Volumen}}{0,043 \text{ kg/m}^3 \text{ Peso}}$
ODP	-	0	0
PCA (GWP)	-	1430	0

La mayoría de las marcas internacionales de refrigeradores domésticos que son importadas al Ecuador y que tienen clasificación energética A+ o A++ poseen el refrigerante R600a, para el caso de Colombia, los refrigeradores nacionales ya cuentan con este refrigerante en su sistema.

En varios estudios analizados en la Tabla 1-8 y anexo B de este documento, se ha verificado que la utilización de refrigerantes hidrocarburos, específicamente el R600a, genera ahorros en el consumo de energía eléctrica en rangos que oscilan desde el 8% al 18%.

Capítulo 2

2. Revisión de Políticas e Índices de Eficiencia Energética en refrigeración doméstica, implementados en Latinoamérica.

2.1 Antecedentes

Está demostrado que la implementación de políticas y programas de eficiencia energética, representa una alternativa más efectiva disponible en el corto plazo que puede generar múltiples beneficios, como una disminución del nivel de pobreza, reducción de la contaminación ambiental, mejora de la seguridad energética, creación de empleos y oportunidades económicas e incluso se puede considerar el incrementar la flexibilidad en la selección de opciones de abastecimiento energético [21].

Así mismo fuentes de análisis como la Agencia Internacional de la Energía (IEA), el Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo (EBRD), América Latina y el Caribe (ALyC) y Países del norte de África y Medio Oriente (MENA) [118], presentan algunos aspectos como motivadores que han impulsado a los gobiernos a implementar estrategias que lleven a conseguir eficiencia energética. Siendo la seguridad energética el factor principal que ha incidido para que la eficiencia energética sea considerada en los planes de gobierno de muchos países.

Manteniendo el mismo horizonte de eficiencia energética en Latinoamérica, sería adecuado mencionar a la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), creada durante la crisis energética mundial a inicios de los años 70, por sectores gubernamentales y no gubernamentales, motivados a involucrarse en el ámbito energético mundial y posteriormente constituida el 2 de noviembre de 1973, como la precursora de programas de eficiencia energética y cuyo propósito fundamental es contribuir al desarrollo económico de ALyC [119].

Los países que conforman ALyC, se ven obligados a tomar medidas para satisfacer las necesidades que surgirán en cada uno de sus territorios, debido al evidente incremento energético que se dará en los próximos años. Se sabe que cada uno de estos países, requerirán aproximadamente 40% más de energía en los próximos 5 años, lo que generaría gastos considerables si no se toma en cuenta la implementación de planes y políticas de eficiencia energética.

A nivel residencial, el refrigerador doméstico conjuntamente con los sistemas de aire acondicionado son los equipos de mayor consumo eléctrico en los hogares, en vista de aquellos distintos países en el mundo como: China, EEUU, México, Brasil, Colombia, Argentina, Ecuador y los países de la UE han implementado políticas que incentivan la renovación de refrigeradores domésticos ineficientes, con el objetivos de mejorar la demanda agregada de energía y contribuir a la mitigación de los efectos del cambio climático.

Uno de los países precursores en la implementación de políticas de eficiencia energética en refrigeradores domésticos es Estados Unidos, cuyos resultados son considerablemente notorios. Con una trayectoria que data de muchos años atrás, ya que las primeras normas de “estándar mínimo de eficiencia energética” (MEPS) a nivel estatal fueron aplicadas en 1974 para refrigeradores; en 1978 a través del National Energy Conservation Policy Act (NECPA) se estableció la obligatoriedad de estos MEPS a nivel nacional. Luego se fueron introduciendo normas cada vez más estrictas en 1990, 1993 y 2001 respectivamente, en este sentido la reducción del consumo promedio de las refrigeradores por las medidas aplicadas entre 1974 y 2004, llegó a valores que oscilan en 74% [120].

Así mismo vale la pena mencionar el caso de Australia, que con la introducción de MEPS se ha logrado reducir el consumo promedio de los refrigeradores en casi un 40%, mientras que los precios reales de los aparatos decrecieron en un 20% [121].

En la Unión Europea, la eficiencia de los refrigeradores ha mejorado drásticamente en la última década, en gran medida como consecuencia de un programa de etiquetado obligatorio (aplicado desde 1995) y normas de desempeño mínimo (aplicados desde 1999). El efecto de ambos instrumentos ha sido estimado en una mejora de la eficiencia energética de estos artefactos hasta en un 27% [121].

Por otro lado, varios países de ALyC han introducido ya programas como parte de sus estrategias de eficiencia energética. En el caso de los programas de etiquetado, la mayoría de los países de la región tienen vigentes programas obligatorios de etiquetado de tipo comparativo en aparatos de uso doméstico, siendo la refrigeradora unos de los aparatos más relevantes. El ritmo de avance de los países de la región ha sido diverso. Por ejemplo Brasil, uno de los pioneros, inició su programa en el año 1984; entre tanto Colombia, que introdujo reglamentos voluntarios a inicios del año 2000, aprobó finalmente en 2015 el reglamento que establece el etiquetado obligatorio en todo su territorio [120].

2.2 Etiquetado energético y estándares mínimos de eficiencia energética.

La gestión eficiente de la energía es uno de los principales retos de los gobiernos del mundo para enfrentar el cambio climático e impacto ambiental. El etiquetado energético comparativo y los estándares mínimos de eficiencia energética se han convertido en una valiosa herramienta para lograrlo. Hasta finales del 2008 a nivel internacional, cerca de 60 países en todo el mundo tienen algún tipo de programa para regular la eficiencia energética de refrigeradores y congeladores independientes de uso doméstico [122].

Para implementar estos programas es indispensable generar primero políticas que determinen con claridad el camino y objetivo a conseguir, normativas, métodos y procedimientos que permitan la valoración de la eficiencia solicitada y validación, seguimiento y control de la ejecución de las mismas.

Los programas de etiquetado y de estándares mínimos de eficiencia, buscan con una buena implementación, retirar del mercado artefactos ineficientes, proporcionar al consumidor información para la toma de una decisión de compra más razonada y estimular a los fabricantes la elaboración de productos más eficientes.

El objetivo de los programas de etiquetado y normas mínimas de eficiencia, es disminuir el consumo innecesario de energía (electricidad, combustibles, etc.) en los hogares y las oficinas e industrias, con las siguientes consecuencias beneficiosas:

- Disminución de la inversión de capital en la infraestructura del suministro de energía.
- Mejoramiento del bienestar del consumidor, menor gasto en energía y equipos con mejoras tecnológicas.
- Aporte a la minimización del impacto ambiental y cambio climático.
- Fortalecimiento de mercados competitivos, rompe barreras comerciales y genera mayor equilibrio en el mercado interno.

2.2.1 Etiquetado energético

El etiquetado energético comparativo y los estándares mínimos de rendimiento energético se han convertido en una valiosa herramienta para lograr una disminución en el consumo innecesario de

energía. Hasta finales del 2008 a nivel internacional, cerca de 60 países en todo el mundo tienen algún tipo de programa para regular la eficiencia energética de refrigeradores y congeladores independientes de uso doméstico [122].

Para implementar estos programas es indispensable generar primero políticas que determinen con claridad el camino y objetivo a conseguir, normativas, métodos y procedimientos que permitan la valoración de la eficiencia solicitada y validación, seguimiento y control de la ejecución de las mismas.

Los programas de etiquetado y de estándares mínimos de eficiencia, buscan con una buena implementación, retirar del mercado artefactos ineficientes, proporcionar al consumidor información para la toma de una decisión de compra más razonada y estimular a los fabricantes la elaboración de productos más eficientes.

El objetivo de los programas de etiquetado y normas mínimas de eficiencia, es disminuir el consumo innecesario de energía (electricidad, combustibles, etc.) en los hogares, comercios e industrias [118].

En la Tabla 2-1 se puede observar los esfuerzos que varios países de todo el mundo están dedicando a establecer programas de etiquetado energético e implementación de normas que llevan a contar con estándares mínimos de rendimiento energético MEPS siendo en algunos casos de aplicación obligatoria o voluntaria.

Tabla 2-1: Programas de etiquetado y MEPS en varios países del mundo para equipos de: aire acondicionado, lavadoras de ropa, congeladores y refrigeradores. Fuente: Adaptado por el Autor.

Equipo	Comparativo MEPS		Comparativo MEPS		Comparativo MEPS		Comparativo MEPS		Comparativo MEPS		Comparativo MEPS		Comparativo MEPS		Comparativo MEPS		Comparativo MEPS		Comparativo MEPS		Comparativo MEPS		Comparativo MEPS	
Argentina																								
Brasil																								
Chile																								
Colombia																								
Ecuador																								
Jamaica																								
Costa Rica																								
Canadá																								
EE.UU.																								
México																								
U. Europea (25 P)																								
Noruega																								
Croacia																								
Rusia																								
AA																								
LR																								
C																								
R																								
Hong Kong																								
India																								
Irán																								
Israel																								
Filipinas																								
Japón																								
Corea																								
Singapur																								
China Taipéi																								
China																								
Australia																								
Nueva Zelanda																								
Sudáfrica																								
Túnez																								
AA																								
LR																								
C																								
R																								

(O) Obligatorio (V) Voluntario (P) Programa propuesto (OT) Otro sistema de marcado (?) No se conoce el estatus de la etiqueta (MEPS) Estándares mínimos de rendimiento energético (EO) Estándar obligatorio (EV) Estándar voluntario (PO) Propuesta de programa obligatorio (PM) Programa Meta (AA) Aire acondicionado (LR) Lavadoras de ropa (C) Congelador (R) Refrigerador.

A continuación en la Tabla 2.2 se presenta un análisis comparativo de los estándares mínimos de rendimiento energético de refrigeradores domésticos implementados por algunos países

Latinoamericanos y también de Norteamérica. Dicha tabla comparativa contiene datos de todos los tipos de refrigerador comercializados en el mercado internacional.

Tabla 2-2: Estándares mínimos de rendimiento energético de refrigeradores domésticos implementados por algunos países Latinoamericanos y también de Norteamérica. Fuente: Adaptado por el Autor.

VARIABLE	EQUIPOS	PAIS											
		ESTADOS UNIDOS Y CANADÁ	MÉXICO	COLOMBIA		ECUADOR		BRASIL					
Designación de la norma	Refrigerador, Congelador y Refrigerador/ Congelador	10 CFR, Parte 430, Subpt. B, 2011-09-15 Energy Conservation Program: Standards for Residential Refrigerators, Refrigerator-Freezers, and Freezers.	NOM-015-ENER-2012: "Eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos. Límites, métodos de prueba y etiquetado"	NTC COLOMBIANA 5020 2009: "Eficiencia energética en artefactos refrigeradores, refrigeradores - congeladores y congeladores para uso doméstico"		RTE INEN 035:2009 "Eficiencia energética en artefactos de refrigeración de uso doméstico. Reporte de consumo de energía, métodos de prueba y etiquetado".		LEY DE EFICIENCIA ENERGÉTICA N°10.295 (2001) PORTARIA INTERMINISTERIAL No 362, DE 24 DE DEZEMBRO DE 2007.					
Tipo de clima	Todo los equipos considerados en la norma	No establece	No establece	"T" (+32°C)		"N, SN y ST" (+25°C)		Tropical "T" (+32°C)		Subtropical "ST" (+25°C)		No establece	
				mn	CE on	mn	CE on	mn	CE on	mn	CE on	Agente expansor Espuma: R141b	Agente expansor Espuma: Ciclopentano
Límites de consumo de energía máximos	Refrigerador solo, convencional y refrigerador-congelador (R/C) con deshielo manual o semiautomático.	0.282VA + 225.0	0,31VA+248,4	1,05	254	0,6	235	1,05	254	0,6	235	0,0422VA + 23,3227	0,0416VA + 22,9786
	Refrigerador-congelador con deshielo parcialmente automático.	0.282VA + 225.0	0,31VA+248,4	1,05	254	0,6	235	1,05	254	0,6	235	0,1292VA + 9,1332	0,1258VA + 8,18936
	Refrigerador-congelador con deshielo automático y congelador montado en la parte superior, sin despachador de hielo, y refrigeradores solos con deshielo automático.	0.285VA + 233.7	0,35VA+276,0	0,33	640	0,6	235	0,33	640	0,6	235	No especifica	No especifica
	Refrigerador-congelador con deshielo automático y congelador montado lateralmente, sin despachador de hielo.	0.301VA + 297.8	0,17VA+507,5	0,33	640	0,6	235	0,33	640	0,6	235	No especifica	No especifica
	Refrigerador-congelador con deshielo automático y congelador montado en la parte inferior, sin despachador de hielo.	0.312VA + 317.0	0,16VA+459,0	0,33	640	0,6	235	0,33	640	0,6	235	No especifica	No especifica

Refrigerador-congelador con deshielo automático y congelador montado en la parte inferior, con despachador de hielo a través de la puerta.	0.297VA + 385.4	0,18 VA + 539	0,62	391	0,78	305	0,62	391	0,78	305	No específica	No específica
Refrigerador-congelador con deshielo automático y congelador montado en la parte superior, con despachador de hielo.	0.285VA + 317.7	0,36VA+356,0	0,62	391	0,78	305	0,62	391	0,78	305	No específica	No específica
Refrigerador-congelador con deshielo automático y congelador montado lateralmente, con despachador de hielo.	0.302VA + 432.8	0,36VA+406,0	0,57	527	0,78	305	0,57	527	0,78	305	No específica	No específica
Congelador vertical con deshielo manual.	0.197VA + 193.7	0,27VA+258,3	0,36	264	0,47	289	0,36	264	0,47	289	0,0257V A + 47,8582	0,0254VA + 47,1521
Congelador vertical con deshielo automático.	0.305VA + 228.3	0,44VA+326,1	0,52	391	0,62	376	0,52	391	0,62	376	0,0217V A + 71,6286	0,0214VA + 70,5718
Congelador horizontal y todos los demás congeladores, excepto congelador compacto.	0.257VA + 107.8	0,35VA+143,7	0,38	160	0,48	195	0,38	160	0,48	195	No específica	No específica
Congelador horizontal con deshielo automático.	0.305av + 228.3	0,52 VA+ 211,5	0,38	160	0,48	195	0,38	160	0,48	195	No específica	No específica
Refrigerador y refrigerador-congelador compacto con deshielo manual.	0.319VA + 252.3	0,38VA+299,0	0,47	299	0,22	237	0,47	299	0,22	237	No específica	No específica
Refrigerador-congelador compacto con deshielo parcialmente automático.	0.209VA + 335.8	0,25VA+398,0	0,33	640	0,6	235	0,33	640	0,6	235	No específica	No específica
Refrigerador-congelador compacto con deshielo automático y congelador montado en la parte superior y refrigerador solo compacto con deshielo automático.	0.417VA + 339.2	0,45VA+355,0	0,33	812	0,78	305	0,33	812	0,78	305	No específica	No específica
Refrigerador-congelador compacto con deshielo automático y congelador montado lateralmente.	0.241VA + 456.9	0,27VA+501,0	0,6	970	0,78	305	0,6	970	0,78	305	No específica	No específica
Refrigerador-congelador compacto con deshielo automático y congelador montado en la parte inferior.	0.417VA + 339.2	0,46VA+367,0	0,58	367	0,78	305	0,58	367	0,78	305	No específica	No específica

	Congelador vertical compacto con deshielo manual.	0.306VA + 225.7	0,35VA+250,8									No especifica	No especifica
	Congelador vertical compacto con deshielo automático.	0.359VA + 351.9	0,40VA+391,0									No especifica	No especifica
	Congelador horizontal compacto.	0.327VA + 136.8	0,37VA+152,0									0,0925V A + 15,9759	0,0911VA + 15,7402
Consumo de energía - temperatura ambiente	Todos los equipos	32.2 ± 0.6 °C	32,2°C ± 0,6°C.	25 °C		25 °C						No especifica	No especifica
Consumo de energía - temperatura alimentos frescos	Todos los equipos	3.5°C	3,3 °C de manera general y menores de 7,2 °C	5 °C		5 °C						No especifica	
Consumo de energía - temperatura de congelación	Todos los equipos	0°F (-17.8°C) for a separate freezer.	-9,4/-15/ -17,8 °C	-6/-12/ -18 °C		-6/-12/ -18 °C						-6/-12/ -18°C	
Consumo de energía para congelación	No especifica	No especifica	A veces con carga	No especifica		No especifica						No especifica	
Pruebas de operación - temperaturas ambiente	Todos los equipos	Ninguno	Ninguno	18/43 (T)	16/32 (N), 10/32 (SN), 18/38 (ST)	18/43 (T)	18/38 (ST)					Ninguno	
Pruebas de operación - temperaturas de alimentos frescos	Todos los equipos	Ninguno	Ninguno	No especifica		No especifica						No especifica	
Pruebas de operación - temperaturas congelación	Todos los equipos	No	No	No		No						No	
Prueba tiempo enfriamiento equipo - pull down test	Todos los equipos	No	No	No		No						No	
Prueba de capacidad de congelación	Todos los equipos	No	No	No		No						No	
Capacidad hacer hielo	Todos los equipos	No	No	No		No						No	
Tiempo de incremento temperatura	Todos los equipos	No	No	No		No						No	
Otras pruebas de eficiencia	Todos los equipos	No	No	No		No						No	
Volumen bruto	Todos los equipos	No especifica	No especifica	No especifica		Especificada en la NTE INEN 2206:2011						No especifica	
Volumen de almacenamiento	Todos los equipos	No especifica	Todos los niveles	Todos los niveles		Especificada en la NTE INEN 2206:2011						No especifica	

Volumen utilizado para MEPS y etiquetado energético	Todos los equipos	MEPS levels AV (Adjusted volume, cu ft) = Volume of fresh food compartment (Liters) + (FA × volume of freezer compartment (Liters)).	Almacenamiento (VA= Volumen de compartimiento de alimentos litros + volumen de congelador litros * FA)	Almacenamiento (VA= volumen bruto del compartimiento de alimentos frescos, en litros + volumen bruto del compartimiento de baja temperatura en litros * FA)		Almacenamiento (VA= volumen de alimentos frescos, en litros + volumen bruto compartimiento de baja temperatura * FA)		Almacenamiento (VA= Volumen de compartimiento de alimentos + volumen de congelador * FA)
Factor de ajuste para el cálculo del volumen ajustado (FA)	Refrigerador solo y Tipo(*) (-6 °C de referencia del compartimiento de baja temperatura)	1	1	1,4	1,55	1,4	1,55	1,41
	Refrigerador convencional y Tipo (**) (-12 °C de referencia del compartimiento de baja temperatura)	1,44	1,44	1,63	1,85	1,63	1,85	1,63
	Refrigerador congelador y Tipo (***) (-18 °C de referencia del compartimiento de baja temperatura)	1,63	1,63	1,85	2,15	1,85	2,15	1,85
	Congelador	1,73						
Ajuste de energía - congelador separado	Congeladores horizontales	0,7	0,7	No especifica		No especifica		No especifica
	Congeladores verticales	0,85	0,85	No especifica		No especifica		No especifica
	Refrigeradores electrodomésticos	1	1	No especifica		No especifica		No especifica
Cubiertas de los sistemas de: fuentes de energía y refrigeración	Todos los equipos	120 V, 60 Hz	Toda la red eléctrica de CA, 60 Hz, 115 V +/- 1 V	No especifica		115 V +/- 1 %		110V / 220V, 60HZ
Humedad			No especifica	No especifica		No especifica		No especifica
Calentadores anti-condensación durante las pruebas de consumo de energía	Todos los equipos		Promedio en On y Off	Condición de máximo consumo de energía		Condición de máximo consumo de energía		No especifica

2.2.2 Evolución de estándares mínimos de eficiencia en países desarrollados

El país pionero en estándares de consumo energético fue Polonia, estableciendo por primera vez estándares mínimos de rendimiento energético (minimum energy performance standards – MEPS) en un rango de productos del sector industrial. La primera experiencia de implementación de MEPS en artefactos de uso doméstico se remonta al año de 1966, cuando Francia decide aplicarlo a refrigeradores. Entre finales de los años 60 y la década de los 70, otros países de Europa y Rusia siguieron el ejemplo, pero la aplicación incluyendo a Francia fue débil y con resultados de ahorros energéticos pequeños, lo que provocó que no evolucionen estos programas. El primer caso de éxito en la implementación de estándares mínimos de eficiencia, con significativos ahorros de energía eléctrica fue establecido en 1974 e implementado por el estado de California en 1977.

A partir del éxito logrado en California, en Estados Unidos de Norte América se implementan estándares mínimos para refrigeradores de uso doméstico, con revisiones estrictas en 1990, 1993 y

2001. Como consecuencia directa, se obtuvo reducciones de consumo energético residencial en promedio del 74% desde la implementación en California [123].

En Europa también realizan regulaciones globales y consensuadas con implantaciones de MEPS desde 1994, sin embargo ya se habían presentado intentos de varios países por implementar programas de etiquetado eficiente obligatorio como Dinamarca en 1990 y Holanda, de igual manera para refrigeradores de uso doméstico, pero la Comisión Europea no dio paso a estas iniciativas aduciendo que los programas individuales pueden constituir obstáculos para el armónico desarrollo de la región. En 1994 se implementó el “Programa de etiquetado energético obligatorio”, orientado a su aplicación en refrigeradores y congeladores de uso doméstico y en 1999 aparecieron estándares de desempeño mínimos para estos equipos, cuyo impacto alcanzó logros de mejora de eficiencia energética en estos artefactos del 27% aproximadamente [123].

Australia y Nueva Zelanda establecen estrategias técnicas, comerciales y administrativas conjuntas en eficiencia energética, con un programa denominado “Equipment Energy Efficiency”.

Australia estableció desde 1986 etiquetas de eficiencia energética en los refrigeradores y congeladores de uso doméstico, establece MEPS para estos equipos en el año 1999, mientras que Nueva Zelanda lo hace en el año 2002.

2.2.3 Evolución de etiquetado y estándares mínimos de eficiencia en América Latina

Los países pioneros en América Latina en desarrollar programas relacionados con etiquetado eficiente y obligatoriedad de estándares mínimos de eficiencia son: Brasil que arrancó en 1984 y México en 1992. Brasil implementa el proceso de etiquetado en el año de 1984 con el programa Brasileño de Etiquetado (PBE). En 1985 inicia su operación el PROCEL (Programa Nacional para Conservación de Energía Eléctrica), que tiene como objetivo fundamental promover la producción racional y el uso eficiente de la energía eléctrica, es regentado por la empresa Electrobras. Desde el año 1986 hasta el año 2005, PROCEL ha logrado un ahorro de energía de 21.753 GWh anuales, o una potencia de generación de 5.124 MW, para lo que ha invertido 461 millones de dólares, pero ha postergado inversiones en infraestructura energética de 8.027 millones de dólares. En el año 2001, en Brasil se crea la ley de Eficiencia Energética 10.295/2001: mandato del gobierno para ordenar estándares mínimos de eficiencia energética (MEPS), en el 2002 y posterior revisión en el año 2005 se establecen MEPS para motores eléctricos trifásico, en el 2007 se establecen para Refrigeradores y congeladores de uso doméstico.

México aprueba en el año 1992 la Ley Federal de Metrología y Normalización e inicia el desarrollo de normas enfocadas a la eficiencia energética, en 1995 se implementan las primeras Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Eficiencia Energética. Desde el año 2003 se produce la alineación de normas de Refrigeradores / congeladores de uso doméstico y otras con MEPS utilizados en EEUU y Canadá. En el período 1993–2004 generaron ahorros de 52.700 GWh, que equivale a 2.844 MW de generación eléctrica, y que representó el 25% de la generación eléctrica nacional [21].

Argentina implementa en 1999 el programa de calidad de artefactos energéticos para el hogar (PROCAEH), que incluye normas de ensayo y de etiquetado para refrigeradores y congeladores.

Chile implementa en 2005 el programa país de eficiencia energética (PPEE), que incluye el etiquetado obligatorio para refrigeradores / congeladores, y otros.

Uruguay implementa en 2005 el programa nacional de eficiencia energética, en 2008 se establece la norma técnica para etiquetado eficiente en aparatos de refrigeración de uso doméstico, decretándose obligatorio para artefactos eléctricos y a gas en 2009.

Colombia implementa en 2001 el proyecto piloto denominado programa CONOCE, además la UPME e ICONTEC establecen métodos de ensayo y normas para 30 tipos de artefactos y equipos, en los que se incluye refrigeradores y congeladores. Hasta 2009 el etiquetado era todavía voluntario.

Venezuela en 1996, establece métodos de ensayo y normas de etiquetado para refrigeradores/congeladores y acondicionadores de aire; en 1999 llega a ser obligatorio el proceso de etiquetado de refrigeradores y congeladores.

Perú implementa en 1996, métodos de ensayo para refrigeradores y congeladores además de lámparas, balastos y otros; en 2007 se cuenta ya con MEPS, para lámparas fluorescentes.

El 8 de octubre del 2008 en el Ecuador fue aprobado el reglamento técnico ecuatoriano RTE INEN 035 “Eficiencia energética en artefactos de refrigeración de uso doméstico. Reporte de consumo de energía, métodos de prueba y etiquetado” sean de fabricación nacional o importados que se comercialicen en la República del Ecuador [123], además en el año 2011 inicia un programa de renovación de refrigeradores ineficientes, con lo que se proyectan ahorros de energía eléctrica significativos.

En otros países de Latinoamérica y el Caribe, la calidad de las estadísticas e indicadores de desempeño que permiten cuantificar los resultados de los programas nacionales de eficiencia energética ha sido insuficiente. Para superar esta carencia, la CEPAL ha articulado el Programa Regional BIEE (Base de Indicadores de Eficiencia Energética para América Latina y el Caribe). Siguiendo el proceso técnico-político y la lógica de funcionamiento del programa de análisis y medición de la eficiencia energética denominado ODYSSEE [124], desarrollado por la Comisión Europea y gestionado por la agencia Francesa: ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie).

2.3 Programas de renovación de refrigeradores domésticos.

2.3.1 Programa PROCAE en Argentina

En la República Argentina, mediante la Ley N° 25.438, en el año 2001 se aprobó el Protocolo de Kyoto, en donde se afirma la necesidad de asegurar el fomento de la eficiencia energética en los sectores pertinentes de la economía nacional, la aplicación de políticas de eficiencia energética que consideren exigencias ambientales, una contribución al establecimiento de condiciones que favorezcan el desarrollo sostenible de la nación y el crecimiento del empleo y el aumento de la productividad [125].

De acuerdo al censo del año 2010, en Argentina se cuenta con 40,1 millones de habitantes, si se considera que la demanda de energía eléctrica en 2011 del Sistema Argentino de Interconexión (SADI) fue de 121.216 GWh y estimando un crecimiento de la demanda en un 4% anual, se tendría para el año 2016 una demanda de 147.477 GWh; esto implicaría la necesidad de ampliar la capacidad instalada de generación [126] o buscar ahorros de energía eléctrica que estabilicen dicha capacidad.

En este sentido, en la actualidad en Argentina se cuenta con un programa de eficiencia energética llamado PRONUREE (Programa Nacional de Uso Racional y Eficiente de la Energía), que contempla los siguientes proyectos: proyecto de eficiencia energética – experiencia piloto (Secretaría de Energía – Unión Industrial Argentina), programa de calidad de artefactos eléctricos (PROCAE), programa de

recambio de alumbrado público ineficiente y programa de reemplazo de lámparas incandescentes, mismos que han sido relativamente eficaces y con los cuales se esperan para el año 2016 obtener una reducción del 16% del consumo de energía eléctrica, lo que significa una reducción de 20.000 GWh en los requerimientos de energía eléctrica [126].

Como parte del programa PROCAE se ha hecho efectivo el etiquetado de eficiencia energética obligatorio para refrigeradores (resolución SE 396/2009), con estándar de eficiencia energética mínima clase C a partir de julio de 2009 y para congeladores (resolución SE 198/2011) a partir de septiembre de 2011 [125] [126], así como para otros tipos de electrodomésticos.

En la Figura 2-1 se muestra la etiqueta de eficiencia energética utilizada para refrigeradores y congeladores domésticos.



Figura 2-1: Etiqueta de eficiencia energética para aparatos de refrigeración de uso doméstico. Tomado de [126].

Para el caso de los refrigeradores, en el año 2006 se identificó un mercado de equipos de eficiencia D, E y F, con una existencia de aproximadamente un 30% del total existente. Luego de la implementación de las primeras acciones de eficiencia energética, para el año 2010, el 55% de dicho mercado posee una eficiencia del tipo B y el resto se distribuye equitativamente entre las clases A y C [125].

De acuerdo a estos estudios se estima que los ahorros de energía debidos a la implementación de estos programas alcanzan los 1.000 GWh en el año 2011.

Según la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente ASADES la incorporación del sistema de etiquetado de eficiencia energética, aportaría hacia un ahorro energético al año 2020 de entre 2,5 a 3,9 TWh/año, una reducción de la demanda de potencia de entre 274 y 528 MW, y una disminución acumulada de las emisiones de gases de efecto invernadero de 9.100 a 14.200 Gg CO₂ [127].

En el año 2001, antes de la implementación del programa PROCAE, el consumo promedio de refrigeradores/congeladores fue estimado en 848 kWh/año, mientras que los refrigeradores solos presentaban un consumo de 635 kWh/año, El consumo medio ponderado para refrigeradores fue

de 740 kWh/año, comparando con el consumo promedio de energía eléctrica de los hogares registrado en valores aproximadamente de 2.100 kWh/año, se establece que el 30% del consumo de electricidad en el sector residencial es por el consumo del refrigerador doméstico [128].

2.3.2 Programa PROCEL en Brasil

Después de la crisis en el sector eléctrico, ocurrida entre 2001-2002 llamada popularmente como "apagón" [129], causado principalmente por la falta de inversión en el sistema nacional de interconexión, el gobierno brasileño se vio obligado a reducir el consumo de electricidad hasta el 20% en la mayoría de los estados brasileños [130].

Tales eventos mencionados propendieron a la creación de programas de control y políticas que contribuyeran con la racionalización de los recursos energéticos.

Dentro de todos estos programas de control se encuentra el Programa Brasileño de Etiquetado (PBE), que tiene como objetivo principal, el de estimular la producción y la utilización de equipos más eficientes y seguros en Brasil. En el ámbito de los programas de eficiencia energética del Gobierno Federal, son coordinadas por el Inmetro–Instituto Nacional de Metrología, Normalización y Calidad Industrial– y cuentan con la colaboración de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas, así como de las asociaciones comerciales o colegios profesionales de los distintos sectores, en función del tipo de equipo etiquetado [131].

La clasificación o el etiquetado en los refrigeradores consiste en un mecanismo de difusión del rendimiento de los productos analizados en el marco del programa, se atribuye a los aparatos un color al que corresponden letras, desde la “A” (más eficiente) hasta la “E” (menos eficiente) tal y como podemos observar en la Fig. 2.2.

Los refrigeradores domésticos, conjuntamente con las duchas eléctricas están considerados como los mayores consumidores de electricidad dentro de una residencia, y su consumo de energía corresponde al 30% del consumo del hogar [130].

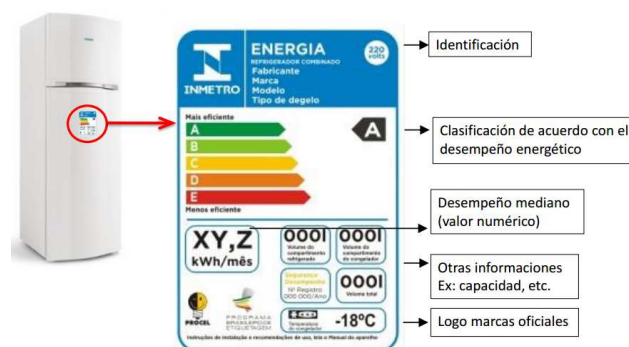


Figura 2-2: Etiqueta utilizada en Refrigeradores en Brasil [132].

En su formato actual, el PBE consta de 38 categorías de productos y miles de modelos etiquetados. En diciembre de 1985 se creó el Programa Nacional de Conservación de la Energía Eléctrica (PROCEL) y para el año 1991 este programa se transformó en un programa del gobierno, de esta manera se ampliaron sus responsabilidades y sus incumbencias. El programa establece metas de reducción de gastos innecesarios de energía que son consideradas en el planeamiento del sector eléctrico y dimensiona las necesidades de expansión de la oferta de energía y de transmisión.

El Sello PROCEL de Economía de Energía, o simplemente el Sello PROCEL, fue instituido por medio del Decreto presidencial de diciembre de 1993. Esto no necesariamente significa que un aparato etiquetado con la letra A tenga este sello, ya que puede no ser el más eficiente (ver Figura 2-2).

Luego de haber implementado el etiquetado con el sello Procel en refrigeradores de uso doméstico, se ha verificado una disminución en el consumo eléctrico de hasta un 36% en el año 2009, lo que representa un ahorro considerable para la población brasileña [133].

2.3.3 Programa de eficiencia energética para refrigeradores domésticos en Chile

De acuerdo a un estudio de desagregación de usos eléctricos a nivel nacional en hogares para el año 2010, en Chile se considera que el refrigerador doméstico es el artefacto que más energía eléctrica consume, llegando a valores del 30% del total de consumo domiciliario [134]. Por esa razón es imprescindible la mejora de la eficiencia energética de artefactos domésticos para avanzar en las políticas de sustentabilidad en Chile.

La Norma Oficial Chilena en eficiencia energética para refrigeradores de uso doméstico es la PE N° 1/17/2, NCh3000 Of.2006, que establece la metodología para la clasificación de refrigeradores, congeladores y refrigeradores/congeladores de uso doméstico, alimentados por la red eléctrica de acuerdo con su desempeño energético. Además, indica el método de ensayo y las características de la etiqueta de eficiencia energética. Esta norma también establece los requisitos que debe cumplir la etiqueta de eficiencia energética de dichos equipos.

El etiquetado de eficiencia energética en Chile, es una herramienta pensada para facilitar a los consumidores el buen uso de la energía, la cual debe contener aparte de la eficiencia energética, información como vida útil en el caso de lámparas y el consumo mensual en el de refrigeradores.

En el caso de los refrigeradores, además de las clases A - G, existen otras dos: las clases A+ y A++, mismas que tienen una eficiencia energética aún mayor y se han creado debido a las mejoras técnicas de los últimos años en la fabricación de refrigeradores. Por lo que la escala de clases energéticas de la etiqueta para refrigeradores y congeladores llega a 9 escalones (ver Figura 2-3).

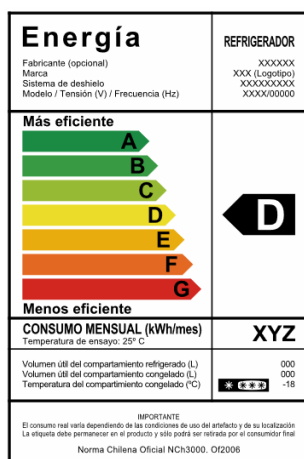


Figura 2-3: Etiqueta de Eficiencia Energética de Refrigerador de acuerdo a normas NCh [135].

En vista de que los refrigeradores y la iluminación representan casi el 60% del consumo eléctrico en los hogares chilenos, dado su impacto se implementaron un sistema de etiquetado para estos

artefactos, además de promover la introducción de estándares mínimos de eficiencia energética (MEPS) y el recambio de los electrodomésticos ineficientes, los cuales apuntan a modificar la oferta y la demanda de artefactos nuevos hacia una mayor Eficiencia Energética, con una meta estimada en artefactos residenciales y comerciales para el año 2020 en un 13%, lo que representa aproximadamente 63 mil millones de dólares y una reducción de gases de efecto invernadero estimado en 633.871 toneladas de CO₂ [136].

2.3.4 Programa PROURE en Colombia

Con la ley 607 de 2001 se crea el programa de uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales PROURE, estableciéndose así, el inicio del trabajo en eficiencia energética en Colombia, luego de esto, se adoptan metas ambientales establecidas en los decretos presidenciales 2532 de 2001, 3172 del 2003 y 2501 del 2007 [118].

En lo que respecta al consumo de energía, el mayor consumidor es el sector del transporte con el 44%, le siguen la industria manufacturera y el sector residencial con el 21% y 19% respectivamente.

Específicamente para el sector residencial se ha establecido medidas prioritarias, como: la promoción en el uso de refrigeradores, aires acondicionados y sistemas de iluminación eficientes y la promoción de la eficiencia energética en el diseño, la construcción y el uso de edificaciones.

Con estas medidas se proyecta al 2020 obtener reducciones de hasta el 6% de la demanda de electricidad, lo que representaría una reducción en las emisiones de 564 mil toneladas de CO₂ [118].

Es de interés conocer también que dentro de este tema energético, las neveras son responsables de entre el 20 y 50% del consumo de energía. En los hogares colombianos se estima que tienen en uso cerca de cuatro millones de neveras producidas antes de 1997, esto significa que están en el grupo de 20 a 25 años de vida útil. En un escenario de 10 años, los ahorros de energía por año se estiman en 2441 GWh [118].

En lo que respecta a costos, la Unidad de Planeación Minero Energético (UPME) estimó una inversión de 1540 millones de dólares en 10 años a fin de ejecutar el proyecto de sustitución, con alcance de 4 millones de neveras [137].

Con el fin de incentivar y generalizar la eficiencia energética, el gobierno colombiano ha aprobado una serie de normas y regulaciones enfocadas en el uso eficiente de la energía, haciendo de esto una reducción considerable de la demanda y costos de energía proporcionando grandes beneficios a corto y mediano plazo.

El gobierno colombiano en el año 2001 declaró el uso racional y eficiente de la energía por lo cual se creó el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y fuentes no convencionales – PROURE, conjuntamente con este proyecto se inicia la implementación del Proyecto de Normalización y Etiquetado de Eficiencia Energética en Colombia (N&E Colombia).



Figura 2-4: Etiqueta de Refrigeradores domésticos en Colombia [138].

Como caso de plan de renovación de refrigeradores domésticos en Colombia se menciona al plan piloto implementado en la ciudad de Bogotá, que consistió en la sustitución de refrigeradores domésticos, de diferentes tamaños y marcas comerciales, que contenían compuestos clorofluorocarbonados (CFCs) y que se encontraban en poder de los usuarios finales (consumidores) y la gestión de los residuos provenientes de estos equipos, la cual incluyó aprovechamiento de partes y destrucción de los CFCs del circuito de refrigeración y de la espuma de poliuretano usada como aislamiento térmico.

Colombia ha reconvertido la totalidad de las empresas fabricantes de refrigeradores domésticos a tecnologías libres de CFC y, desde el año 1997, no se producen estos equipos en el país con las sustancias agotadoras de ozono CFC-11 y CFC-12. Sin embargo, el país debe considerar que existen en poder de los usuarios finales, cerca de tres millones de refrigeradores domésticos, los cuales fueron fabricados antes de 1997 y que aún contienen y requieren CFC para su funcionamiento.

Mediante la Resolución 1652 del 10 de septiembre de 2007, se prohibió la fabricación e importación de equipos y productos que contuvieran o requiriesen para su producción u operación las sustancias agotadoras de la capa de ozono, dentro de los cuales se encuentran los equipos de refrigeración para uso doméstico, comercial e industrial.

Las normas que rigen en Colombia para artefactos refrigeradores y refrigeradores domésticos, es emitida por el Organismo Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), mismo que hace referencia al Decreto 2269 de 1993, las normas relacionadas al tema son las siguientes:

- NTC 5891, Artefactos de refrigeración doméstico. características y métodos de ensayo.
- NTC 5020, Eficiencia energética en artefactos refrigeradores, refrigeradores - congeladores y congeladores para uso doméstico.
- NTC 5182, Refrigeradores, conservadores y congeladores de uso doméstico y similares. medición de la emisión del ruido aéreo.

Además, en Colombia, a través de la Resolución 41012 del 18 de septiembre de 2015, se aprobó el Reglamento Técnico de Etiquetado RETIQ, que es la norma que rige el etiquetado en eficiencia energética, y su elaboración estuvo a cargo del Ministerio de Minas y Energía.

La etiqueta que se propone, tiene un límite inferior que funciona como un estándar mínimo de eficiencia energética, este parámetro representa el “Ahorro Relativo (Ar)” donde la referencia de

consumo corresponde a equipos convencionales, este valor se obtiene como la razón entre la diferencia de consumo de energía eléctrica entre el equipo equivalente convencional de referencia y el equipo bajo ensayo, respecto del consumo del equipo de referencia, para el caso de rango A de eficiencia energética, el Ar debe ser mayor al 78% [118].

Para el año 2015, el Ministerio de Minas y Energía expidió el Reglamento Técnico de Etiquetado Energético – RETIQ, reglamento que entró en vigencia el 31 de agosto de 2016 y es de aplicación obligatoria

2.3.5 Programa cambia tu viejo por un nuevo de México

En México se crea un fideicomiso especial para Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), el cual tiene como objetivo principal de promover e inducir, con acciones y resultados concretos el ahorro de energía eléctrica entre los consumidores.

El programa de Refrigeradores Domésticos es una de las iniciativas de FIDE que consiste en dar apoyo financiero a los consumidores residenciales para que cambien sus refrigeradores ineficientes de más de 8 años de antigüedad, por equipos eficientes de la misma capacidad o como máximo la capacidad inmediatamente superior, con lo cual ellos obtendrán ahorros energéticos de más del 40% de sus consumos.

En Mayo del 2002, se lanzó el programa piloto cuyo objetivo fue reemplazar 2.000 refrigeradores en seis ciudades, esperando obtener ahorros de 0,73 GWh/año y 0,84 MW de consumo eléctrico y demanda. El éxito de esta etapa permitió expandirlo a nivel nacional.

El FIDE es el administrador global del financiamiento y recibe la línea de crédito de Nacional Financiera, que asciende a tres mil millones de pesos (US\$ 273 millones aprox.), mientras que CFE (Comisión Federal de Electricidad) funciona como el medio de recuperación del crédito, otorga garantías y cubre los costos de operación del programa. Para la operación del programa el FIDE mantiene convenios con los fabricantes Mabe, Whirlpool, LG, y Samsung.

El Programa de Sustitución de refrigeradores y aires acondicionados, tiene vigencia en todos los estados del país donde la CFE suministra el servicio de energía eléctrica.

El crédito se ejerce mediante financiamiento, a través de distribuidores de línea blanca, con el apoyo de los fabricantes de equipos de aire acondicionado, refrigeradores y de aislamiento térmico, a los usuarios, quienes lo reembolsarán mediante cargos en su facturación eléctrica, en un período de 36 meses, con una tasa de interés fija del 21% del costo del refrigerador.

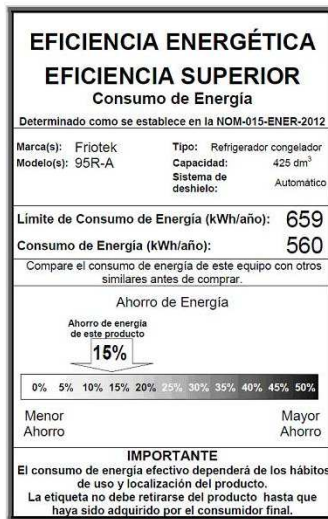


Figura 2-5: Etiqueta de Refrigeradores domésticos en México [139].

Desde el año de 1995 en México se implementan estándares mínimos de rendimiento energético (MEPS siglas en inglés), creándose 21 normas oficiales mexicanas de eficiencia aplicándose en los diferentes aparatos y equipos que consumen energía eléctrica y que se comercializan en todo el país, México utiliza un programa del Departamento de Energía (DOE) de los EEUU para así poder normalizar, etiquetar u homologar los diferentes tipos de aparatos eléctricos que se encuentran en el país [140].

La primera norma en aplicar en el país fue la NOM-072-SCFI-1994, creada para empezar a utilizar los estándares del DOE para los refrigeradores domésticos en 1995, luego se emplea la norma NOM-015-ENER-1997 para que esta sea revisada por el DOE y así poder regular los MEPS de refrigeradores en mayo del 2003 [140].

La última norma aplicada en México es la NOM-015-ENER-2002, por la cual el DOE publica una notificación de propuesta regulatoria para los refrigeradores y congeladores domésticos, misma que entra en vigencia en enero del 2014 [140].

En México, desde el inicio oficial de la normalización de EE en el año de 1993, el etiquetado energético de los refrigeradores de uso doméstico ha sido considerado como un requisito imprescindible especificado en cada norma, es así que desde el año 1994 con la aplicación de la NOM-072-SCFI-1994, se comienza a utilizar la primera etiqueta energética para refrigeradores y congeladores, en la cual se exhibía el costo anual de energía, calculado con base en el costo nominal de la energía eléctrica y su consumo. Por los constantes incrementos en el costo de energía eléctrica, esta etiqueta fue eliminada en el año de 1997 con la aplicación de la NOM-015-ENER-1997, utilizándose el formato europeo de la etiqueta. En el año 2002 se armonizaron las normas de eficiencia energética con los Estados Unidos de Norte América (principales socios comerciales de México), mediante la NOM-015-ENER-2002, con la que se adoptó la etiqueta utilizada por ellos [141].

2.3.6 Programa Renova refrigerador Ecuador

El Gobierno Nacional del Ecuador a través del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable – MEER, ha planificado implementar un nuevo mecanismo de reducción del consumo de potencia y energía eléctrica en el sector residencial, mediante la renovación de refrigeradoras obsoletas con más

de 10 años de uso por nuevas y eficientes que consumen en el orden de cuatro veces menos energía, el mismo que se denomina: “Programa para la Renovación de Equipos de Consumo Energético Ineficiente – Proyecto N° 1 Sustitución de Refrigeradoras ineficientes. Decreto Ejecutivo N° 741 de 21 de abril de 2011”.

El Proyecto de Sustitución de Refrigeradoras busca la renovación de 330.000 refrigeradoras de consumo ineficiente (mayor de 10 años de uso) por otras de alta eficiencia (rango A), de un volumen de enfriamiento entre 280 y 340 litros (10 a 12 pies cúbicos), para lo cual se está entregando un estímulo a los usuarios del sector residencial que consuman hasta 200 kWh por mes. Ello permitirá contribuir al cambio de la matriz energética del país a través de la reducción de la demanda de electricidad en el sector residencial por el uso de electrodomésticos más eficientes; estimular la producción nacional de equipos y electrodomésticos de alta eficiencia; y, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero que potencian el calentamiento global.

El monto total del proyecto, es de USD 121'810.000,00 que corresponde al valor de todas las actividades, menos la recuperación de la cartera.

Una vez se alcance la sustitución de las 330.000 refrigeradoras por las denominadas del tipo A, según el RTE INEN 035:2009 y RTE INEN 009:2015, se obtendrán beneficios, como una reducción de 20,6 MW en la demanda de potencia, un ahorro anual de 215.780 MWh; lo cual representa un beneficio económico de USD 26'972.550/año considerando un costo de la energía de 12,5 cUSD/kWh. Durante la vida estimada de los nuevos equipos (10 años), el ahorro sería de USD 292.083.000.

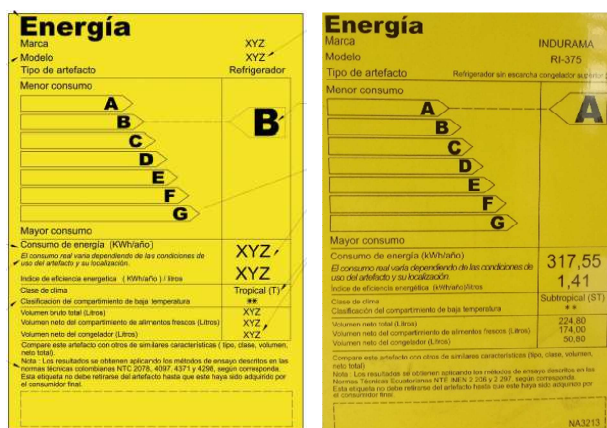


Figura 2-6: Etiqueta de Refrigeradores domésticos en Ecuador. Fuente Autor.

La norma RTE INEN 035 “Eficiencia energética en artefactos de refrigeración de uso doméstico. Reporte de consumo de energía, métodos de prueba y etiquetado” y sus modificatorias en la que se establece que a partir de marzo de 2011 se permitió únicamente la comercialización de aparatos de refrigeración de rango energético A; por otro lado desde julio de 2014 se realiza el etiquetado de refrigeradores domésticos, bajo la norma NTE INEN-IEC 62552 “Aparatos Domésticos de Refrigeración - Características y Métodos de Ensayo (IEC 62552:2007, IDT)”, aplicada para refrigeradoras de fabricación nacional y para refrigeradoras que son importadas, en esta norma se establece los procedimientos y requisitos para reportar los valores de consumo de energía de referencia (CER) y los rangos de consumo de energía que presentan los refrigeradores, adicionalmente a esto también se especifica el contenido de la etiqueta de consumo de energía para todos los tipos de artefactos de refrigeración doméstica.

Capítulo 3

3. Modelo

3.1 Justificación para la utilización de la metodología de Dinámica de Sistemas como herramienta de simulación

En este capítulo se puntualiza la metodología utilizada para determinar el impacto tecnológico en la industria de la refrigeración doméstica en Latinoamérica, por la implementación de políticas de eficiencia energética. Se justifica el uso de la simulación en el análisis de políticas energéticas, se presentan algunos métodos de simulación utilizados para el análisis de políticas energéticas, se justifica el uso de Dinámica de Sistemas y finalmente se establecen los pasos del proceso de modelado.

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, la aplicación de políticas energéticas ha sido un factor común en varios países Latinoamericanos, ya que se han identificado como alternativas para conseguir ahorros en el consumo eléctrico, manteniendo la capacidad de generación eléctrica instalada. En este sentido distintos modelos han sido aplicados para facilitar la toma de decisiones en la gestión y la implementación de acciones que lleven a conseguir mejoras en la eficiencia energética además de las implicaciones que pueden resultar de la introducción de nuevas tecnologías.

El estudio desarrollado en este documento se orienta hacia el análisis del comportamiento del consumo eléctrico en el sector residencial, específicamente el consumo que presentan los refrigeradores domésticos utilizados en los hogares de países Latinoamericanos como México, Colombia y Ecuador, cuando se aplican políticas de eficiencia energética que obligan fundamentalmente a que los fabricantes de estos equipos incorporen mejoras tecnológicas y los usuarios se motiven a renovar sus equipos considerando una vida útil de 10 años como máximo. Por la complejidad que requiere el análisis se hace necesario el uso de simulación como herramienta metodológica que posibilite el estudio del comportamiento del sistema y las relaciones entre sus variables.

No se han podido identificar modelos de simulación que determinen el ahorro eléctrico que se puede conseguir en el sector residencial al incorporar políticas de eficiencia energética basadas principalmente en la implementación de normas e índices de eficiencia energética, mejoras tecnológicas que sintonicen dichas normas y planes de renovación de equipos más eficientes que posibiliten la conversión voluntaria por parte de los usuarios. Sin embargo, se han verificado distintos modelos que estudian políticas energéticas, políticas en general, tecnología e innovación y desarrollo sostenible por separado. Motivo por el cual se hace necesario una revisión de diferentes técnicas de simulación para seleccionar la más adecuada.

A continuación se describen tres técnicas de simulación robusta que permiten representar diferentes formas las relaciones y conexiones de los componentes de un sistema.

1. **Simulación de eventos discretos:** es una técnica computacional de modelado, se caracteriza por establecer un control del tiempo, lo que permite analizar el sistema en intervalos variables, en función de la proyección de la ocurrencia de eventos a un futuro definido, se debe considerar que las variables que definen el sistema no cambian su comportamiento durante el intervalo de simulación.
2. **Simulación basada en agentes:** representa un nuevo método de investigación que permite tratar de manera sencilla la complejidad, la emergencia y la no-linealidad típica de muchos

fenómenos sociales, para el modelado, los sistemas complejos están compuestos por agentes autónomos que interactúan de manera dinámica e influyen el comportamiento entre ellos. Las aplicaciones de este método se las ha desarrollado en una diversidad de áreas como cadenas de suministro, predicciones en general, análisis del comportamiento del consumidor, etc.

- 3. Dinámica de sistemas:** es una metodología que permite estudiar el comportamiento de sistemas continuos y complejos en el tiempo, sistemas de la vida real que presentan actuaciones no lineales y contraintuitivas. Las herramientas informáticas con las que cuenta utilizan estructuras de lazos de realimentación entre variables para el modelado.

La Dinámica de Sistemas presenta posibilidades de análisis con un enfoque en el comportamiento de un sistema social que permite analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes situaciones, por ese motivo su utilización ha sido muy grande y diversa dada sus prestaciones para estudiar sistemas en donde en base a cambios que se pueden incorporar en el sistema (políticas) se puede establecer un comportamiento a mediano y principalmente a largo plazo.

Por la valía que representa la metodología de la Dinámica de Sistemas, en el Anexo C se desarrolló una revisión de distintos trabajos de investigación que han sido publicados en revistas de alto impacto en los últimos dos años principalmente, con los cuales se asegura la utilización de la metodología de la dinámica de sistemas, como una alternativa válida para análisis del comportamiento del consumo eléctrico en el sector residencial, específicamente el consumo que presentan los refrigeradores domésticos utilizados en los hogares de países Latinoamericanos como México, Colombia y Ecuador, cuando se aplican políticas de eficiencia energética que obligan fundamentalmente a que los fabricantes de estos equipos incorporen mejoras tecnológicas y los usuarios se motiven a renovar sus equipos considerando una vida útil de 10 años como máximo.

3.2 Modelo de Dinámica de Sistemas

A continuación se presentan los primeros cuatro (4) pasos del proceso de modelado seguido en esta investigación:

1. Límites del modelo, en donde se establece una revisión general de todos los subsistemas involucrados a fin contar con una contextualización general del sistema a modelar, estos subsistemas se refieren a distintos actores, como la oferta de refrigeradores domésticos por parte de la industria de la refrigeración, la tecnología que se utiliza en los equipos de refrigeración, la demanda de equipos que existe por parte de la población y las normativas y planes de eficiencia energética implementadas por parte de entidades gubernamentales principalmente.
2. Hipótesis dinámica, aquí se presenta la estructura causal desarrollada para explicar el comportamiento del mercado de refrigeradores domésticos, considerando la influencia que tendrían las normas, regulaciones, planes y las oportunidades tecnológicas que tendrían la industria de la refrigeración doméstica para su crecimiento.
3. Estructura dinámica, aquí se muestra la estructura del modelo a través del diagrama de Forrester y el conjunto de ecuaciones que explica las relaciones entre las variables.
4. Validación del modelo, este paso constituye uno de los más importantes en la metodología de dinámica de sistemas, ya que permite verificar si el modelo construido refleja de manera razonable el comportamiento del sistema real, sus similitudes y consistencia.

3.2.1 Límites del Modelo

A continuación se presentan varios de los límites de referencia considerados en el modelo de simulación, mismos que han sido organizados de acuerdo a su naturaleza.

3.2.1.1 Factores demográficos.

3.2.1.1.1 Número de habitantes.

En la Figura 3-1 se pueden observar el número de habitantes de México, Colombia y Ecuador para el período de análisis de 1995 – 2050, los datos se obtuvieron en función de las estadísticas encontradas en el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) de México, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) en Colombia y el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) en Ecuador. Cabe indicar que para obtener varios datos de proyección se recurrió a determinar funciones matemáticas de comportamiento.

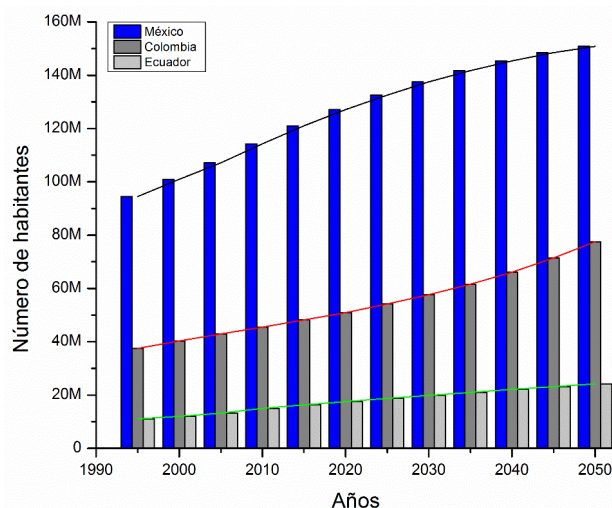


Figura 3-1: Número de habitantes de México, Colombia y Ecuador para el período 1994-2050. Fuente: adaptado por el Autor de INEGI, DANE e INEC.

3.2.1.1.2 Número de personas por hogar

De igual manera como se obtuvieron los datos del número de habitantes para el período de análisis, se establecieron los valores correspondientes al número de personas que habitan por hogar, esto con la intención de obtener la cantidad de hogares existentes en los países de estudio, en la Tabla 3-1 se puede observar el tamaño promedio por hogar de México, Colombia y Ecuador.

Tabla 3-1: Número de personas promedio por hogar en México, Colombia y Ecuador. Fuente adaptado por el Autor de INEGI, DANE e INEC

Año	México	Colombia	Ecuador
1995	5,14	4,46	4,46
2000	4,68	4,18	4,18
2005	4,34	3,91	3,91
2010	4,10	3,80	3,80
2015	3,92	3,60	3,60
2020	3,77	3,43	3,43
2025	3,62	3,21	3,21

2030	3,45	3,01	3,01
2035	3,22	2,82	2,82
2040	2,91	2,65	2,65
2045	2,75	2,49	2,49
2050	2,75	2,35	2,35

3.2.1.1.3 Número de hogares

Al establecer un cociente directo entre la estadística del número de habitantes y el tamaño promedio de personas que habitan en un hogar se determinó el número de hogares existentes en los países de estudio, como se puede observar en la Figura 3-2.

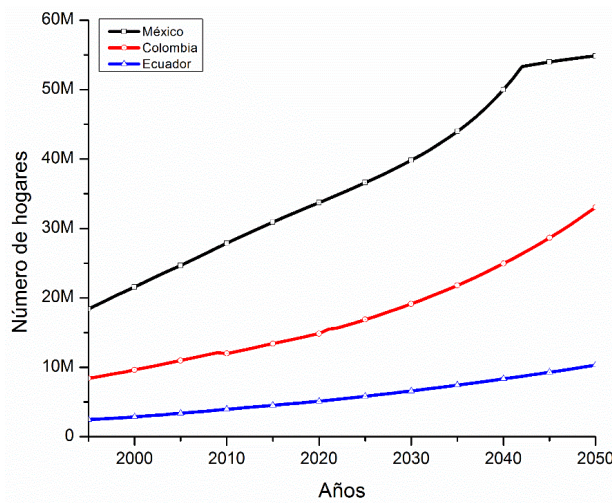


Figura 3-2: Número de hogares existentes en México, Colombia y Ecuador para el período 1995-2050.
Fuente: adaptado por el autor de INEGI, DANE e INEC.

3.2.1.2 Posesión de refrigeradores y acceso a la electricidad

El refrigerador es uno de los electrodomésticos de mayor utilización a nivel mundial, sin embargo se ha podido verificar que un pequeño porcentaje de hogares de México, Colombia y Ecuador no lo tienen, fundamentalmente por no poseer energía eléctrica en sus casas, en este sentido ha sido necesario determinar un índice de posesión de refrigeradores domésticos para cada uno de los países de análisis, considerando datos registrados de refrigeradores por hogar, número de hogares y las estadísticas de conexión a redes eléctricas interconectadas obtenidas de fuentes primarias de información como son el INEGI, el DANE, el INEC y el Banco Mundial [142]. En las Figuras 3-3 y 3-4 se puede observar el índice de posesión de refrigeradores domésticos y el acceso a electricidad para México, Colombia y Ecuador.

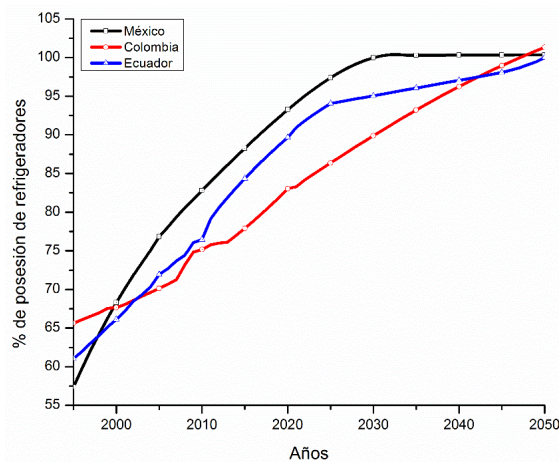


Figura 3-3: Porcentaje de posesión de refrigeradores domésticos en México, Colombia y Ecuador en el período 1995-2050. Fuente adaptado por el Autor de INEGI, DANE e INEC.

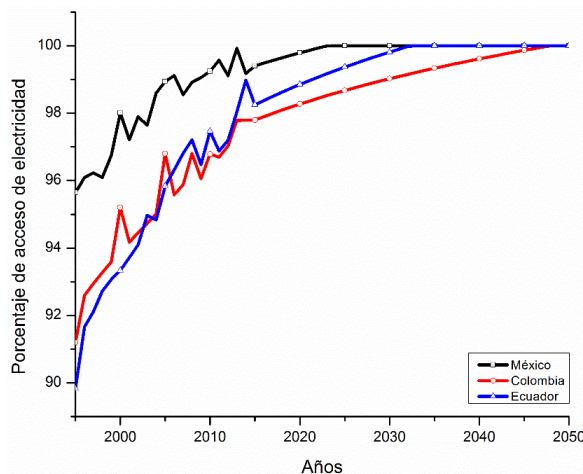


Figura 3-4: Porcentaje de acceso a la electricidad en México, Colombia y Ecuador en el período 1995-2050. Fuente adaptado de [142].

3.2.1.3 Consumo de electricidad de refrigeradores domésticos por vida útil

Para hacer los análisis de consumo total de energía eléctrica por uso de refrigeradores domésticos en la situación actual de los países en estudio, se establecieron los valores de consumo de energía eléctrica de acuerdo a la vida útil en la que se encuentra y en referencia a los equipos refrigerador/congelador Top Mount de tamaño inferior a los 16,5 pies³, los cuales representan hasta el 80% de los equipos comercializados en México, Colombia y Ecuador. En la Tabla 3-2 se puede observar el consumo promedio de energía eléctrica de un refrigerador/congelador de 2 puertas Top Mount con base en su tamaño y año de adquisición.

Tabla 3-2: Consumo promedio de energía eléctrica de un refrigerador/congelador de 2 puertas Top Mount. Fuente: adaptado de [143].

RD adquiridos entre el año	Rango de años de uso al 2016	Consumo promedio de energía en kWh/año				
		Menor a 16,5 pies ³	Entre 16,5 y 18,9 pies ³	Entre 19 y 21,4 pies ³	Entre 21,5 y 24,4 pies ³	24,5 pies ³ y mas
2010 - 2015	1 a 6	374	412	438	459	508

2001 - 2010	6 a 15	556	613	651	683	758
1993 - 2000	16 a 23	861	962	1031	1090	1223
1990 - 1993	23 a 26	1272	1432	1539	1630	1839

En la Tabla 3-3 se puede observar el consumo promedio de refrigeradores ineficientes, considerando el rango de tamaños más comercializados en México y sus años de utilización.

Tabla 3-3: Consumo de energía promedio para refrigeradores domésticos ineficientes [144].

Electrodomésticos	Año	Años de uso al 2016	Consumo promedio (kWh/año)
Refrigeradores/ Congeladores	2002	14	876.92
	2003	13	909.89
	2004	12	944.10
	2005	11	936.76
	2006	10	875.25
	2007	9	925.02
	2008	8	977.61

De acuerdo con las Tablas 3-2 y 3-3, se ha determinado para el caso de esta investigación, los valores de consumo promedio de energía eléctrica para cada uno de los grupos de vida útil establecidos anteriormente (ver Tabla 3-4).

Cabe resaltar que se considera refrigeradores eficientes (RDE), a aquellos equipos que poseen una vida útil de hasta 10 años, los demás pasan a ser ineficientes (RDNE).

Tabla 3-4: Consumo de energía eléctrica promedio para refrigeradores por grupo de vida útil. Fuente Autor.

Grupo de vida útil	Consumo promedio (kWh/año)
RDE 1 a 5 años	395
RDE de 6 a 10 años	480
RDNE de 11 a 15 años	643
RDNE de 16 a 20 años	862
RDNE de 21 a 25 años	1155

3.2.1.4 Ajustes de consumo eléctrico por el piso térmico, uso y ubicación inadecuada del refrigerador.

En México, es complicado precisar el clima por zonas térmicas, debido a la variabilidad de las estaciones, sin embargo, haciendo un análisis en el mes de junio y estableciendo que las temperaturas menores a 18°C corresponde a zona fría, entre 18 y 25°C corresponde a zona templada y mayores a 25°C es para zona cálida, se obtienen resultados que indican que el 41,33% de la población de México vive en clima cálido, el 53,24% vive en clima templado y el 5,42% vive en clima frío [145].

Colombia es un país mayoritariamente urbano, que concentra más del 70% de su población en las grandes ciudades, especialmente en la Región Andina y, en segundo plano en la Región del Caribe. Con base en una ponderación aplicada al número de habitantes que viven en las 20 ciudades más pobladas y su clima se ha establecido que: el 40% de la población habita en clima frío, el 21,62 % vive en clima templado y el 38,38 % en clima cálido secos o húmedos [146].

En el Ecuador se ha establecido los porcentajes de la población que viven en distintos climas, determinando la temperatura ambiente promedio de las 24 provincias, es así que los resultados indican que el 39,33% de la población habita en clima frío, el 7,62% en clima templado y el 53,05% vive en clima cálido.

Lo manifestado antes, al respecto de los porcentajes de la población versus el clima en el que habitan, conlleva a que los consumos de energía eléctrica de un refrigerador doméstico que funcione en clima cálido (temperaturas mayores a 25°C) se vea incrementado por efectos de la temperatura ambiente. En este sentido se considera que el consumo de energía eléctrica por uso de refrigeradores domésticos se incremente hasta llegar a valores del 20%.

Por otro lado es importante considerar que el consumo eléctrico de un refrigerador doméstico puede verse afectado también por la inadecuada utilización y ubicación en los hogares, pudiendo incrementarse hasta valores del 10%.

3.2.1.5 Costo anual equivalente

Es sumamente complicado determinar un precio exacto de un refrigerador doméstico en México, ya que un mismo modelo puede presentar distintos precios, de acuerdo a los establecimientos que lo distribuyen, pudiendo llegar a presentar diferencias superiores al 20%; además es importante considerar que el precio de estos grandes electrodomésticos es muy variado y está en función de sus características como por ejemplo, capacidad, material de fabricación, sistema de deshielo y demás atributos.

Por otro lado para establecer los precios históricos de los refrigeradores domésticos, será necesario considerar la variación anual porcentual de los precios al consumidor, valores que presentan un comportamiento variable que oscila entre un 2% y un 4%, presentándose en algunos años hasta un 8% para el caso de productos metálicos, maquinaria y equipos, como se indican en los informes sobre la inflación en México, por mencionar un caso [147]. En este sentido se ha planteado costos promedio de equipos de refrigeración de 11 pies³, modelo Top-Mount, considerando una tasa de inflación histórica del 3%.

Es importante mencionar que los costos de los equipos de refrigeración, sean estos nuevos o de uso, son el insumo principal para determinar tanto el costo anual equivalente de refrigeradores nuevos (CAE RDE) y el costo anual equivalente de refrigeradores con más de 10 años de vida útil (CAE RDNE).

En la Tabla 3-5 se puede observar los datos ingresados en una hoja de cálculo, haciendo referencia a un refrigerador doméstico de 291 litros, tipo Top –Mount comercializado en el Ecuador a un precio de 771,72 USD, además considerando que consume 497 kWh/año y el precio de la electricidad es de 0.12 USD/kWh, se ha ingresado el valor de 59,64 USD por año como rubro de operación. De esto se calcula el CAE, mismo que podrá ser para equipos nuevos, para equipos de 11 a 15 años de vida útil, de 16 a 20 años y de 21 y más años de vida útil.

Tabla 3-5: Determinación del costo anual equivalente para un refrigerador doméstico. Fuente Autor.

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión inicial	771,72										
Costo de operación		59,64	59,64	59,64	59,64	59,64	59,64	59,64	59,64	59,64	59,64
Costo mantenimiento											
Costo recuperación											-200

Totales	771,72	59,64	59,64	59,64	59,64	59,64	59,64	59,64	59,64	59,64	59,64	-140,36
----------------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	---------

TMAR	12%
Valor presente (VP)	1044,30
CAE	184,83

3.2.1.6 Parámetros, variables endógenas y exógenas del modelo.

Las variables presentadas en los límites del sistema y otras de menor importancia, han sido clasificadas para la construcción del modelo de simulación, las cuales se pueden categorizar de acuerdo a la naturaleza dinámica del elemento como una variable o un parámetro; al mismo tiempo las variables se sub clasifican en endógenas y exógenas.

Esta identificación de las distintas variables y parámetros seleccionados sintonizan directamente con el sistema real que se pretende simular, por lo que se asegura la efectividad de la construcción del modelo de simulación. En la Tabla 3-6 se puede identificar los parámetros y las variables endógenas y exógenas consideradas.

Tabla 3-6: Parámetros y variables endógenas y exógenas consideradas. Fuente: Autor

Elemento	Variable Endógena	Variable Exógena
Variable	Número de hogares Refrigeradores en el país Refrigeradores nuevos Conversión de RD de 11 a 15 años Conversión de RD de 16 a 20 años Conversión de RD de 21 y más años Refrigeradores ineficientes convertidos Refrigeradores para chatarrización Refrigeradores dañados de 1 a 5 años Refrigeradores dañados de 6 a 10 años Refrigeradores dañados de 11 a 15 años Refrigeradores dañados de 16 a 20 años Refrigeradores dañados de 21 y más años Conversión de refrigeradores de 11 a 15 años Conversión de refrigeradores de 16 a 20 años Conversión de refrigeradores de 21 y más años Refrigeradores de 1 a 5 años Refrigeradores de 6 a 10 años Refrigeradores de 11 a 15 años Refrigeradores de 16 a 20 años Refrigeradores de 21 y más años Refrigeradores en operación Consumo eléctrico por uso de refrigeradores Ahorro de energía eléctrica por uso de refrigeradores	Población Tamaño promedio por hogar Posesión de refrigeradores por hogar Acceso a la electricidad Consumo eléctrico promedio de refrigeradores de 0 a 5 años Consumo eléctrico promedio de refrigeradores de 6 a 10 años Consumo eléctrico promedio de refrigeradores de 11 a 15 años Consumo eléctrico promedio de refrigeradores de 16 a 20 años Consumo eléctrico promedio de refrigeradores de 21 y más años
Parámetro		Porcentaje de daño severo Porcentaje de daño refrigeradores 1 a 5 años Porcentaje de daño refrigeradores 6 a 10 años Porcentaje de daño refrigeradores 11 a 15 años Porcentaje de daño refrigeradores 16 a 20 años Porcentaje de daño refrigeradores 21 y más años Costo anual equivalente de refrigeradores eficientes Costo anual equivalente de refrigeradores ineficientes de 11 a 15 años

	Costo anual equivalente de refrigeradores ineficientes de 16 a 20 años
	Costo anual equivalente de refrigeradores ineficientes de 21 y más años
	Porcentaje de evaluación de la conversión de refrigeradores de 11 a 15 años
	Porcentaje de evaluación de la conversión de refrigeradores de 16 a 20 años
	Porcentaje de evaluación de la conversión de refrigeradores de 21 y más años
	Porcentaje de refrigeradores que funcionan en clima tropical
	Porcentaje de refrigeradores que funcionan en clima subtropical

3.2.2 Hipótesis Dinámica

La hipótesis dinámica se explica, a partir de la estructura causal que se ha construido para expresar el comportamiento del ahorro de energía eléctrica que se puede conseguir con la introducción de refrigeradores domésticos eficientes que estén sintonizados con normas e índices de eficiencia energética más exigentes, presentándose una oportunidad de exportación para las empresas fabricantes de refrigeradores domésticos. En la Figura 3-5 se presenta la dinámica general del sistema, misma que contienen doce (12) ciclos de realimentación, en los cuales se identifican cada una de las variables y sus relaciones de causalidad; de los ciclos de realimentación se puede identificar en primera instancia ocho (8) ciclos de balance, lo que ocasiona un cambio negativo en las variables, estabilizando y autoajustando el sistema, específicamente estos lazos de balance se presentan en los grupos de vida útil de los refrigeradores domésticos que operan en el sector residencial para el período de análisis; en segunda instancia se presentan cuatro (4) ciclos de refuerzo, lo que significa que las relaciones causales son positivas y por consiguiente en consecuencia un cambio positivo refuerza el efecto en todas las variables del ciclo, en la Figura 3-5 este comportamiento se presenta en la dinámica de conversión de refrigeradores ineficientes que se encuentran en los grupos de vida útil de 11 años en adelante.

Cabe resaltar que los 12 ciclos de realimentación tanto positivos como negativos determinan el comportamiento de la variable “Refrigeradores Nuevos”, los cuales se contabilizan una vez que se compara con la cantidad de refrigeradores existentes en el sector residencial, esto con base en la cantidad de hogares, acceso a la electricidad y posesión de refrigeradores principalmente.

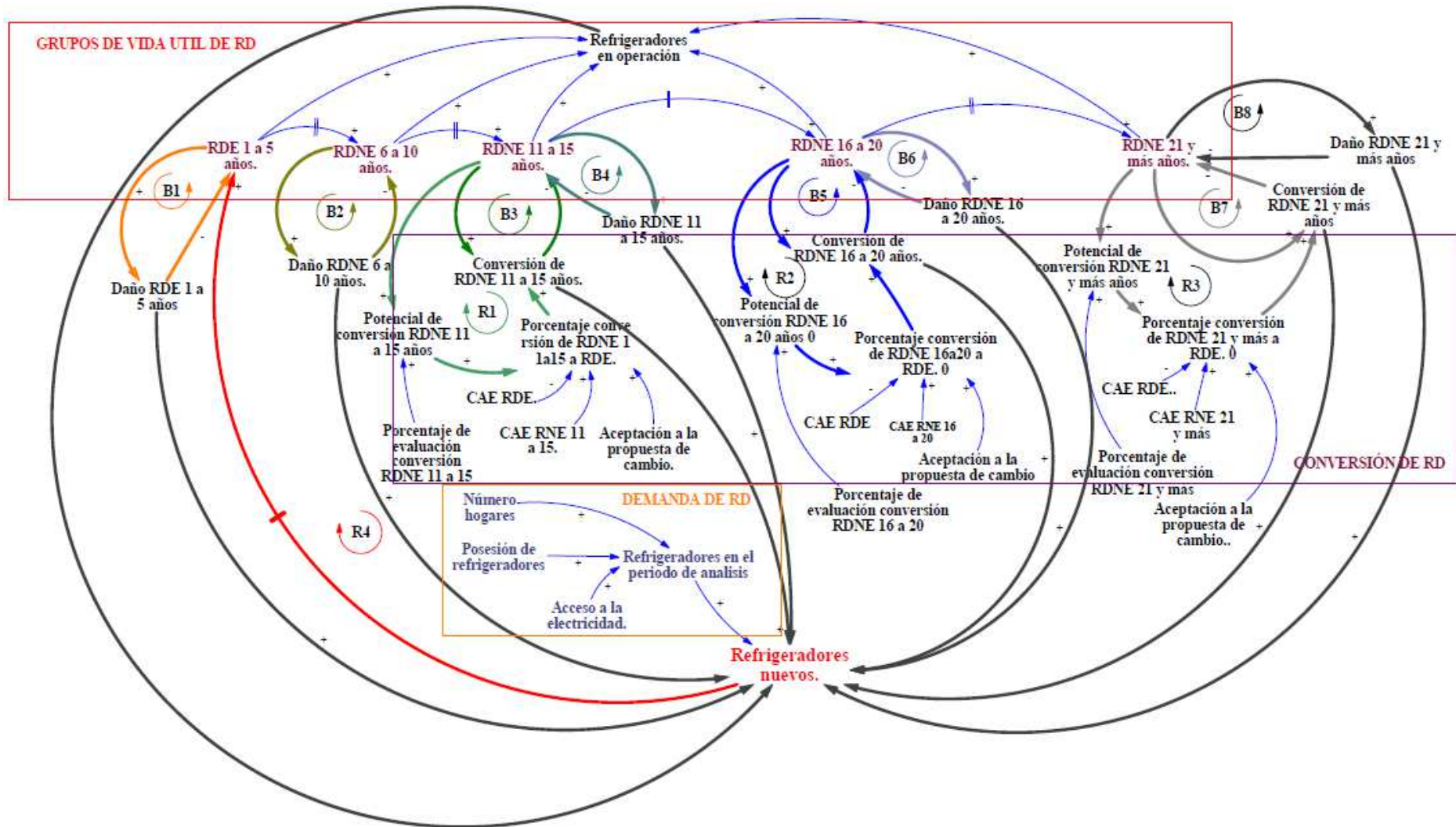


Figura 3-5: Estructura dinámica de realimentación de refrigeradores domésticos por grupo de vida útil y la conversión de equipos de más de 10 años a refrigeradores nuevos. Fuente: Autor.

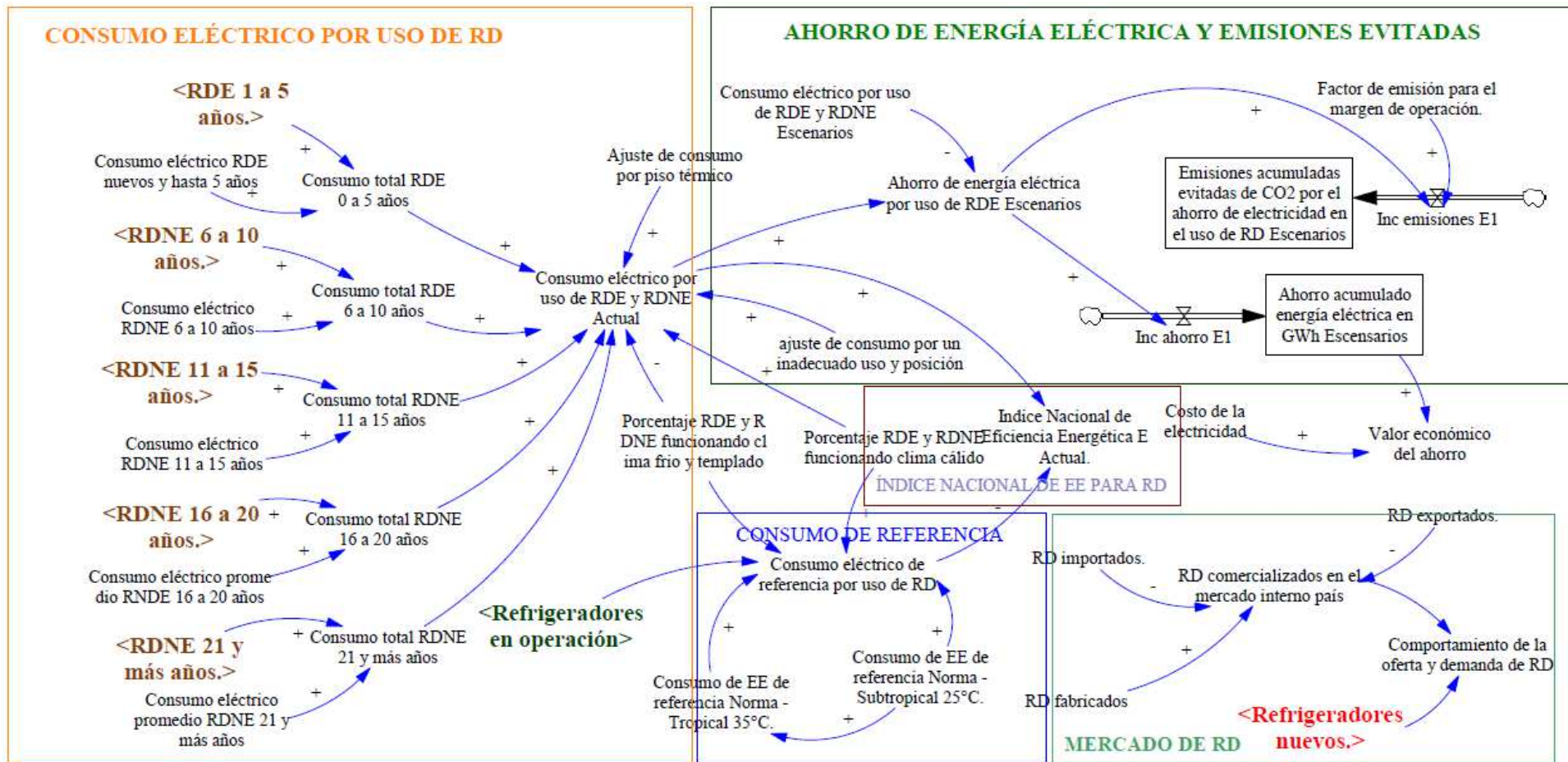


Figura 3-6: Estructura para la determinación del ahorro de energía eléctrica, emisiones evitadas por el ahorro y comportamiento del mercado de refrigeradores domésticos. Fuente: Autor.

Las variables de refrigeradores domésticos por grupos de vida útil, refrigeradores en operación en el sector residencial y los refrigeradores nuevos, representan las entradas del sistema modelado en la Figura 3-6, con las cuales se determinan el consumo de energía eléctrica actual, mismo que al compararlo con los consumos eléctricos determinados por escenarios se obtienen los ahorros de energía eléctrica por uso de refrigeradores domésticos por escenario, con estos valores de calculan las emisiones de CO₂ evitadas por el ahorro conseguido.

En la Figura 3-6 se presentan también el comportamiento del mercado nacional de refrigeradores domésticos, considerando las importaciones, exportaciones y la comercialización local. El índice de eficiencia energética nacional se consigue al realizar una división entre el consumo de electricidad por uso de refrigeradores domésticos y el consumo de referencia en función a lo establecido en las normas. El modelo desarrollado fue elaborado con ayuda del Software Vensim@ PLE PLUS, en consecuencia los diagramas causales representados en las Figuras 3-5 y 3-6 también se construyeron mediante el software mencionado.

3.2.2.1 Modelo de conversión de refrigeradores domésticos.

El modelo de conversión de refrigeradores domésticos permite entender cómo los usuarios toman la decisión de convertir (renovar) su refrigerador ineficiente de más de 10 años de vida útil por un refrigerador eficiente nuevo y de tecnología de bajo consumo energético.

Este modelo considera tres lazos de realimentación, identificados en dos lazos de balance y uno de refuerzo (ver la Figura 3-7).

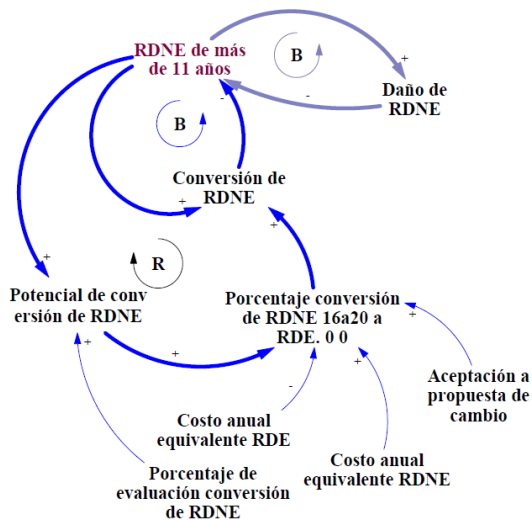


Figura 3-7: Modelo de conversión de refrigeradores domésticos. Fuente: Autor

Al incorporar los criterios de conversión en el modelo que se propone en este trabajo, estos buscan ser una herramienta que permite evaluar algunas políticas de eficiencia energética en refrigeración doméstica implementadas en países Latinoamericanos a partir de 1995 para el sector residencial. Una de las políticas hace referencia a la implementación de normas y posterior incorporación de planes de renovación de refrigeradores ineficientes, la renovación de estos RDNE se puede suscitar por tres razones: la primera, a través de la conversión de los RDNE de más de 10 años que se encuentren en funcionamiento en los hogares a RDE de manera voluntaria; la segunda, por la adquisición normal

de RDE debido al crecimiento poblacional y, la tercera, debido a un daño irreparable que pueda presentar el equipo sobre todo cuando ha alcanzado una vida útil de más de 10 años.

La decisión de convertir un RDNE a un RDE depende directamente del costo anual equivalente (CAE) de los equipos, tanto el ineficiente como el eficiente que podría adquirirlo para sustituirlo. El mecanismo por el cual se da la conversión en el modelo es a través del método denominado “Consumer Choice” o conocido también como modelo Logit [148].

Variaciones de este modelo han sido implementados como el desarrollado para evaluar el comportamiento del ahorro eléctrico a nivel residencial mediante la renovación de electrodomésticos, para ello se utiliza un modelo denominado “probit” o “logit” [149].

En el caso específico de esta investigación, el modelo entrega resultados de decisión del consumidor en convertir su equipo ineficiente por uno eficiente, dependiendo directamente de un parámetro "gama", que para el caso del modelo se lo ha denominado como “aceptación a la propuesta de cambio”.

El parámetro "gama" representa qué tan fuerte es la aceptación de los consumidores a cambiar su refrigerador ineficiente, dependiendo del costo anual equivalente que tenga tanto, el nuevo (CAE RDE) y el viejo, por el que lo cambia (CAE RDNE), esto se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Conversión} = \frac{CAE_RDE^{-Gama}}{CAE_RDE^{-Gama} + CAE_RDNE^{-Gama}}$$

3.2.2.2 Modelo para determinar la cantidad de refrigeradores domésticos por grupo de vida útil.

En la Figura 3-8 se puede observar el diagrama Forrester de la dinámica de la cantidad de refrigeradores domésticos por grupo de vida útil que se pueden identificar en el sector residencial de un país, la variable de ingreso al modelo son los “Refrigeradores Nuevos”, mismos que se integran en el primer grupo denominado “RDE nuevos y hasta 5 años”, de este grupo al cabo de un retardo de 5 años pasarán al siguiente grupo denominado “RDNE 6 a 10 años”; en estos dos grupos se han considerado una disminución debido a factores de daño.

Una vez que el refrigerador se encuentra en el grupo de 6 a 10 años, pasa a un siguiente grupo considerando retardos de 5 años, es así que se ha contabilizado los grupos de 11 a 15 años, 16 a 20 y 21 y más años de vida útil, para estos tres últimos grupos se consideran disminuciones por daño y sobre todo por conversión a refrigeradores domésticos eficientes.

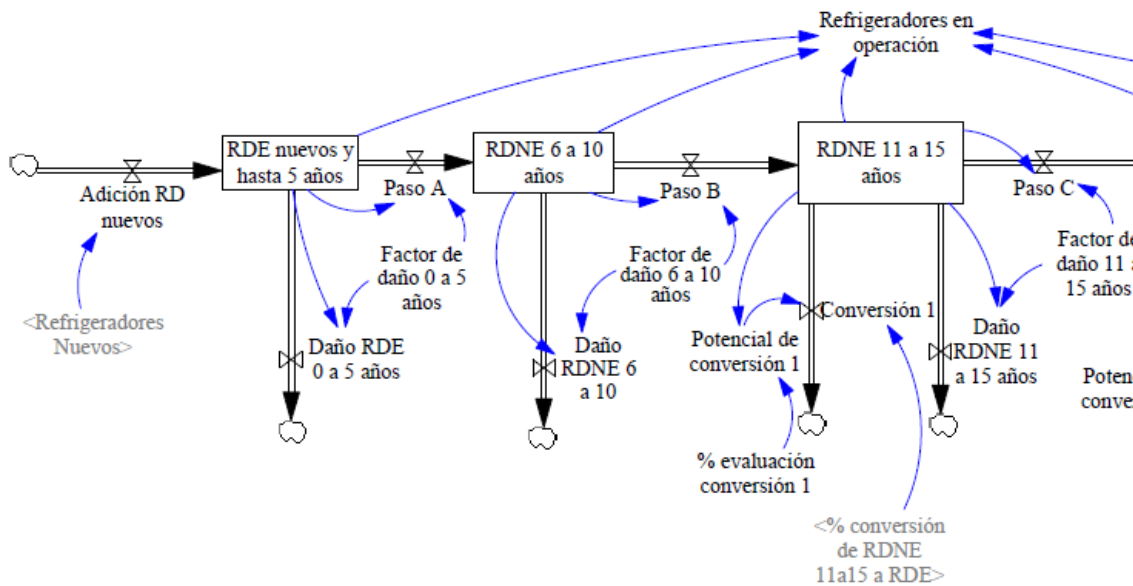


Figura 3-8: Modelo para determinar la cantidad de refrigeradores domésticos por grupo de vida útil. Fuente: Autor

3.2.2.3 Modelo para determinar la cantidad de refrigeradores domésticos nuevos.

Una vez contabilizado el número de refrigeradores convertidos y los refrigeradores en operación (que incluye todos los equipos existentes en los grupos de vida útil) se restan de los refrigeradores en el sector residencial para obtener el resultado de la variable “Refrigeradores Nuevos” (ver Figura 3-9).

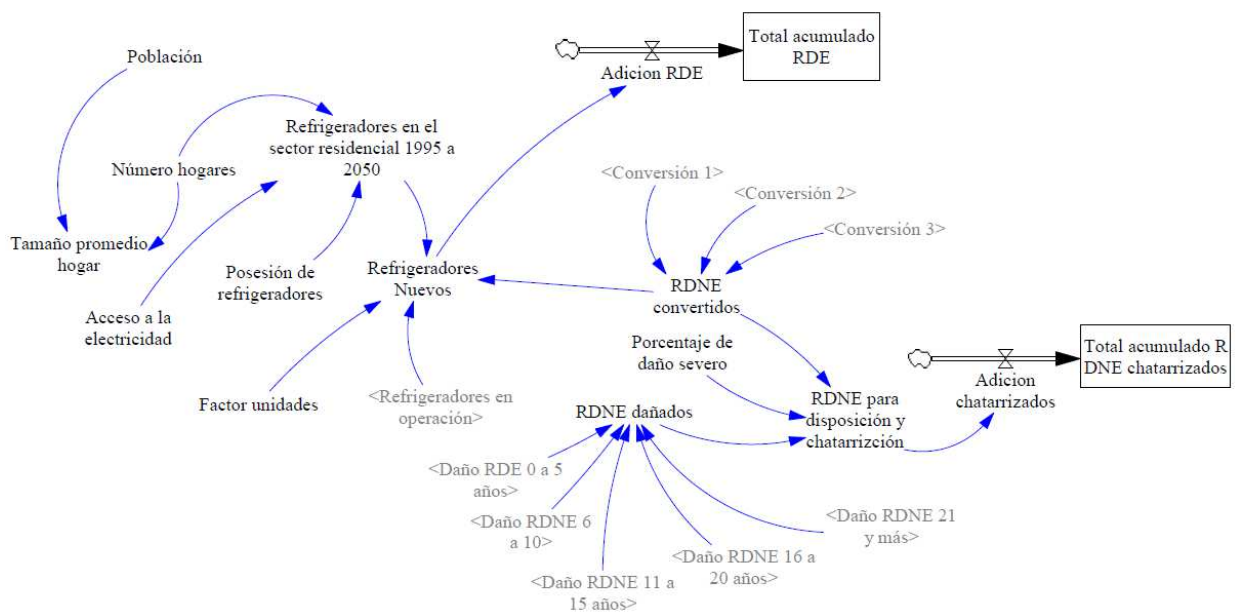


Figura 3-9: Modelo para determinar la cantidad de refrigeradores domésticos nuevos. Fuente: Autor

El modelo permite también determinar el total acumulado de RDNE que deberían destinarse a un plan de reciclaje, chatarrización y recuperación de gases refrigerantes.

3.2.3 Validación

El proceso de validación del modelo representa un paso muy importante en la aplicación de la metodología de dinámica de sistemas, ya que permite determinar si el modelo desarrollado presenta características de similitud y consistencia con respecto al sistema real, para el caso específico de este documento el sistema se refiere a la dinámica del mercado de refrigeradores a nivel residencial, de un país que se preocupa en implementar políticas y normas de eficiencia energética a fin de conseguir que se utilicen cada vez más equipos con bajos consumos eléctricos que lleven a obtener ahorros significativos de energía, disminución de las emisiones de CO₂ y sobre todo que represente para la industria una oportunidad de exportación a nuevos mercados con índices de eficiencia energética más exigentes.

Para la calibración del modelo desarrollado e incrementar la confianza de los resultados de simulación existen distintos tipos de pruebas, en este sentido se presentan las tres etapas del proceso de validación que son: pruebas aplicadas a la estructura del modelo, pruebas de la estructura del modelo desde su comportamiento y pruebas finales de comportamiento del modelo.

3.2.3.1 Pruebas aplicadas a la estructura del modelo

La validez de la estructura del modelo se evalúa de manera general haciendo comparaciones directas entre algunas características del sistema real y sus correspondientes en el modelo como son los parámetros y la consistencia dimensional; cabe indicar que este proceso no requiere de simulación.

a. Consistencia dimensional

Luego del análisis correspondiente en cuanto a la declaración de unidades de cada una de las ecuaciones implementadas en los niveles, flujos y variables que forman parte del modelo desarrollado a través de la herramienta informática Vensim PLE Plus Versión 6.3G, se determina que el modelo en general presenta una consistencia dimensional.

b. Confirmación de parámetros y variables exógenas

Los parámetros utilizados en el modelo fueron identificados en el sistema real. Todos ellos fueron obtenidos o estimados a partir de información confiable, obtenida de documentos generados por organizaciones gubernamentales y no gubernamentales de cada uno de los países motivo de este análisis, además de artículos científicos publicados en revistas de alto impacto y conferencias de alto nivel. En la Tabla 3-7 se explica cada uno de los parámetros utilizados en el modelo.

Tabla 3-7 Parámetros utilizados en el modelo. Fuente: Autor

No.	Componente exógeno	Detalle	México	Colombia	Ecuador
1	Porcentaje de daño severo	Tanto en México, Colombia y Ecuador, existen talleres de reparación de equipos de refrigeración, mismos que atienden problemas generales de daño, principalmente por fugas en las líneas del refrigerante, mismas que suceden por una mala utilización o por el número de años de servicio del equipo. Los problemas de daño severo se van presentando por daño estructural debido a la corrosión, daño del compresor y motor, daño	30%	30%	30%
2	Porcentaje de daño refrigeradores 1 a 5 años		0,6%	0,6%	0,6%
3	Porcentaje de daño refrigeradores 6 a 10 años		3,6%	3,6%	3,6%
4	Porcentaje de daño refrigeradores 11 a 15 años		10%	10%	10%
5	Porcentaje de daño refrigeradores 16 a 20 años		20%	20%	20%
6	Porcentaje de daño refrigeradores 21 y más años		50%	50%	50%

		de los recubrimientos internos y daño del aislamiento.			
7	Costo anual equivalente de refrigeradores eficientes	El costo anual equivalente (CAE) es un método usado para comparar alternativas de inversión, significa que todos los desembolsos irregulares y uniformes deben convertirse en un CAE, es decir, una cantidad de fin de año que es la misma para cada año. Para el caso de los refrigeradores se ha calculado para un ciclo de vida útil de 10 años.	116,86	135,31	184,33
8	Costo anual equivalente de refrigeradores ineficientes de 11 a 15 años		209,12	209,12	209,12
9	Costo anual equivalente de refrigeradores ineficientes de 16 a 20 años		216,84	216,84	216,84
10	Costo anual equivalente de refrigeradores ineficientes de 21 y más años		270,76	270,76	270,76
11	Porcentaje de evaluación de la conversión de refrigeradores de 11 a 15 años	El porcentaje de revisión del equipo de refrigeración que poseen en los hogares con fines de conversión, depende fundamentalmente de los años de utilización en los que se encuentre, por lo que esos valores fueron estimados.	4%	4%	4%
12	Porcentaje de evaluación de la conversión de refrigeradores de 16 a 20 años		45%	45%	45%
13	Porcentaje de evaluación de la conversión de refrigeradores de 21 y más años		95%	95%	95%
14	Porcentaje de refrigeradores que funcionan en clima tropical	En cada uno de los países de estudio, se realizó un análisis del clima que poseen cada una de las ciudades más grandes, de aquello se determinó de manera porcentual el porcentaje de la población que vive en clima tropical (con temperaturas superiores a los 25°C) y en clima subtropical y frío (con temperaturas inferiores a los 25°C)	41,33%	38,38%	53,05%
15	Porcentaje de refrigeradores que funcionan en clima subtropical y frío		58,67%	61,62%	46,95%
16	Ajuste de consumo eléctrico por mala utilización y posición inadecuada	Cuando un refrigerador se somete a muchas aperturas y cierres de puertas, este puede presentar pérdidas térmicas que hacen que el compresor deba trabajar más para conseguir las temperaturas deseadas, consumiendo una mayor cantidad de energía, sumado a esto por la inadecuada posición del equipo de refrigeración en la cocina se puede limitar la transferencia de calor, en este sentido se asume que por estos efectos se debe ajustar los consumos en un 10%.	10%	10%	10%
17	Ajuste de consumo eléctrico por piso térmico	Se considera que un refrigerador doméstico consume alrededor de un 20% más de energía eléctrica cuando trabaja en condiciones ambientales que superan los 25°C. Esto se debe fundamentalmente a la disminución del gradiente de temperatura existente entre la	20%	20%	20%

		superficie del condensador y el ambiente.			
18	Factor de emisiones de CO2 para el margen e operación	Para la producción de energía eléctrica se utilizan distintas tecnologías y combustibles que presentan factores de emisión de CO2, de acuerdo a lo establecido en los subcapítulos 1.3.2; 1.3.3 y 1.3.4 se ha determinado los factores de emisión para cada país motivo de análisis	669 Ton CO2/GWh	388 Ton CO2/GWh	731,6 Ton CO2/GWh

En la construcción del modelo también se incorporaron variables exógenas, los valores de estas variables fueron obtenidos desde diferentes fuentes de información. En la Tabla 3-8 se presentan las variables mencionadas y un detalle de la explicación. No se presentan los valores de las variables por cuanto la información se hace muy grande, ya que tiene que ver el conjunto de variables para cada país motivo de análisis.

Tabla 3-8 Variables exógenas utilizadas en el modelo. Fuente: Autor

No.	Variable Exógena	Detalle
1	Población	El detalle de esta variable se encuentra en el subcapítulo 3.1.1.1
2	Tamaño promedio por hogar	El detalle de esta variable se encuentra en el subcapítulo 3.1.1.2
3	Posesión de refrigeradores por hogar	El detalle de esta variable se encuentra en el subcapítulo 3.1.2
4	Acceso a la electricidad	El detalle de esta variable se encuentra en el subcapítulo 3.1.2
5	Consumo eléctrico promedio de refrigeradores de 0 a 5 años	
6	Consumo eléctrico promedio de refrigeradores de 6 a 10 años	
7	Consumo eléctrico promedio de refrigeradores de 11 a 15 años	El detalle de estas variables se encuentran en el subcapítulo 3.1.3
8	Consumo eléctrico promedio de refrigeradores de 16 a 20 años	
9	Consumo eléctrico promedio de refrigeradores de 21 y más años	

3.2.3.2 Pruebas de comportamiento

La prueba de comportamiento que se aplicará en el caso de esta investigación es la de “patrón de comportamiento”. Con esta prueba se evalúa si el modelo genera el modo de referencia observado en el sistema real, por lo que se presenta una evaluación cuantitativa de los resultados de la cantidad de refrigeradores domésticos nuevos obtenidos en el modelo en función de las conversiones establecidas para los grupos de refrigeradores de 11 años de vida útil en adelante, en comparación con los datos de la cantidad de refrigeradores domésticos vendidos a nivel nacional en México como modo de referencia.

Los datos del modo de referencia son el resultado de un informe sobre las cantidades de refrigeradores vendidos durante el período 1995–2010 (ver Figura 3-10), presentados en el año 2011 por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) de México.

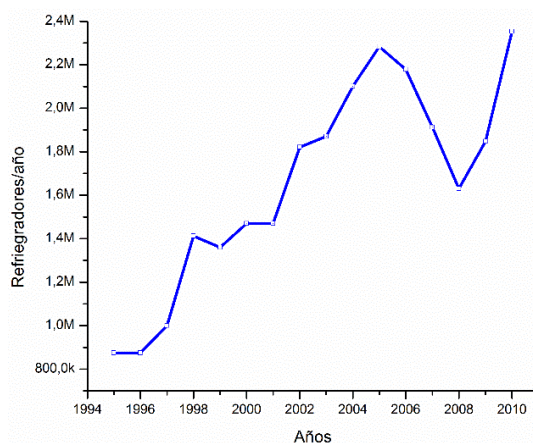


Figura 3-10: Estadísticas de venta de refrigeradores domésticos en México en el período 1995-2010. Fuente ANFAD-CONUEE.

En vista de que el período de análisis establecido para la simulación del modelo se presenta desde el año 1995 hasta el año 2050, se ha procedido a obtener la función exponencial $y=748268*(x^{0,4187})$ que identifica los datos del informe a fin de determinar los valores para los años 2011 a 2050 obteniendo la proyección de las estadísticas de ventas de refrigeradores domésticos en México para el período de análisis 1995 al 2050 como modo de referencia (ver Figura 3-11).

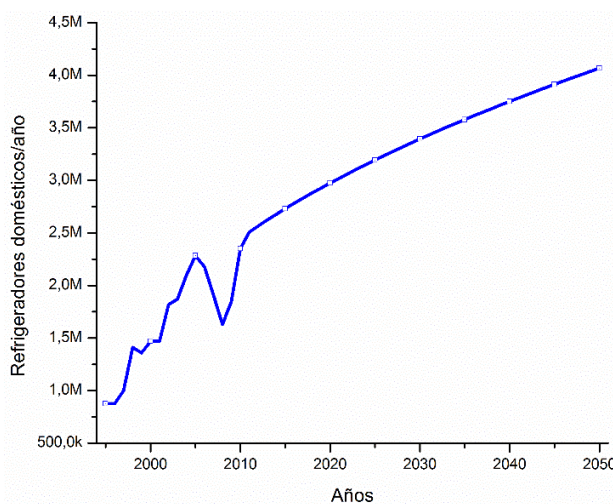


Figura 3-11: Estadísticas de venta de refrigeradores domésticos en México para el período 1995-2050 como modo de referencia. Fuente ANFAD-CONUEE, Adaptado autor.

En la Figura 3-12, se puede observar las curvas de comportamiento de refrigeradores vendidos en México versus la de los refrigeradores nuevos obtenidos del modelo desarrollado, se puede apreciar que mantienen una relación directa con un error promedio de 9,5%.

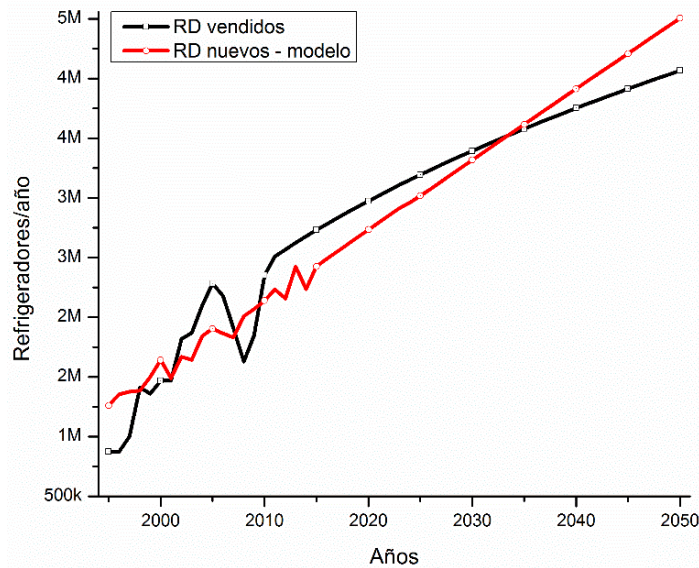


Figura 3-12: Comportamiento de la cantidad de refrigeradores vendidos en México versus la cantidad de refrigeradores nuevos obtenidos del modelo para el período 1995-2050. Fuente autor.

Si los datos observados en la Figura 3-12 se los acumula para el período de análisis, se obtienen las curvas de comportamiento de la Figura 3-13, en donde se puede apreciar que mantienen una relación directa con un error promedio de 4,8%.

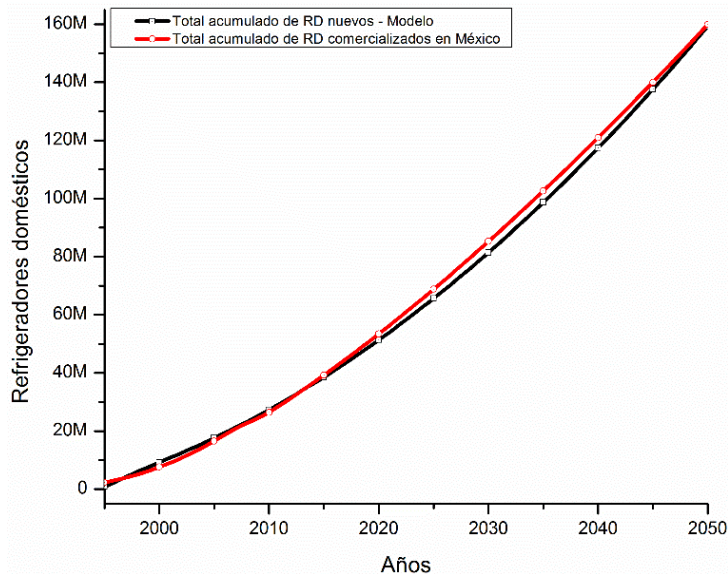


Figura 3-13: Comportamiento del total acumulado de refrigeradores vendidos en México versus el total acumulado de refrigeradores nuevos obtenidos del modelo para el período 1995-2050. Fuente autor.

En la Tabla 3-9, se puede identificar el total acumulado de refrigeradores domésticos nuevos generados en el modelo de simulación y los comercializados en México, los cuales fueron obtenidos con la base de datos estadísticos presentados por ANFAD-CONUEE.

Tabla 3-9: Valores del total acumulado de refrigeradores nuevos y refrigeradores comercializados en México para el periodo 1995-2050. Fuente autor.

Año	Total acumulado RD nuevos	Total acumulado RD vendidos	Diferencia	Porcentaje
1995	2074250	2231250	-157000	7,6
1996	3360840	3106250	254590	7,6
1997	4717390	4012500	704890	14,9
1998	6091120	5042500	1048620	17,2
1999	7507610	6222500	1285110	17,1
2000	9046850	7610000	1436850	15,9
2001	10632200	9080000	1552200	14,6
2002	12173900	10637500	1536400	12,6
2003	13827200	12470000	1357200	9,8
2004	15528600	14397600	1131000	7,3
2005	17384900	16543900	841000	4,8
2006	19269200	18801000	468200	2,4
2007	21116200	20913100	203100	1,0
2008	22998800	22754500	244300	1,1
2009	25021900	24438900	583000	2,3
2010	27107700	26412900	694800	2,6
2011	29270600	28804800	465800	1,6
2012	31472400	31328900	143500	0,5
2013	33711000	33910100	-199100	0,6
2014	36066500	36546700	-480200	1,3
2015	38358700	39237000	-878300	2,3
2016	40799300	41979600	-1180300	2,9
2017	43303300	44773200	-1469900	3,4
2018	45868700	47616400	-1747700	3,8
2019	48494700	50508200	-2013500	4,2
2020	51181300	53447500	-2266200	4,4
2021	53928300	56433100	-2504800	4,6
2022	56735700	59464100	-2728400	4,8
2023	59603700	62539500	-2935800	4,9
2024	62527700	65658600	-3130900	5,0
2025	65500800	68820500	-3319700	5,1
2026	68530400	72024300	-3493900	5,1
2027	71619500	75269300	-3649800	5,1
2028	74769000	78554900	-3785900	5,1
2029	77978800	81880300	-3901500	5,0
2030	81248900	85244900	-3996000	4,9
2031	84579100	88648100	-4069000	4,8
2032	87969200	92089200	-4120000	4,7
2033	91419100	95567700	-4148600	4,5
2034	94928600	99083000	-4154400	4,4
2035	98497600	102635000	-4137400	4,2
2036	102126000	106222000	-4096000	4,0
2037	105814000	109845000	-4031000	3,8
2038	109561000	113502000	-3941000	3,6
2039	113368000	117194000	-3826000	3,4
2040	117234000	120920000	-3686000	3,1
2041	121160000	124680000	-3520000	2,9
2042	125144000	128472000	-3328000	2,7
2043	129191000	132298000	-3107000	2,4
2044	133296000	136155000	-2859000	2,1
2045	137459000	140045000	-2586000	1,9
2046	141682000	143966000	-2284000	1,6
2047	145965000	147918000	-1953000	1,3
2048	150306000	151902000	-1596000	1,1
2049	154708000	155916000	-1208000	0,8
2050	159169000	159960000	-791000	0,5

Capítulo 4

4. Modelado

El objetivo central de este proyecto, es determinar si es posible cuantificar el impacto tecnológico que podría tener la industria de la refrigeración doméstica en Latinoamérica, por la implementación de tecnologías que incrementen la eficiencia energética de los refrigeradores domésticos y que cumplan estándares mínimos de desempeño energético (MEPS) más exigentes.

Esto es trascendental para la industria de la refrigeración doméstica, ya que mediante la implementación de tecnologías que incrementen la eficiencia energética de sus productos, en sintonía del cumplimiento de estándares mínimos de desempeño energético (MEPS) más exigentes, la industria tendrá oportunidades de comercializar sus productos en nuevos mercados.

4.1 Planteamiento del caso base de modelado

4.1.1 Antecedentes

Como antecedente para el planteamiento del caso base, se ha considerado que en varios países Latinoamericanos se han desarrollado distintas actividades en materia de eficiencia energética, para el caso de este trabajo, directamente en actividades relacionadas a la disminución del consumo de energía eléctrica por el uso de refrigeradores domésticos en el sector residencial, en este sentido se citan algunas experiencias puntuales:

1. En el año 1994 en México, se aplica la primera norma y etiqueta energética que regula la eficiencia de los refrigeradores domésticos, además en el año 2002 se armonizan los índices de eficiencia energética con los utilizados en los EEUU y arranca un primer plan de conversión de refrigeradores domésticos,
2. En Colombia, recién en el año 2001 inician las primeras actividades en eficiencia energética con la creación del PROURE, presentándose en lo posterior algunos planes de conversión de refrigeradores como el aplicado en Bogotá, en el año 2015 se aprueba el programa RETIQ que trata sobre el etiquetado energético obligatorio para refrigeradores domésticos.
3. Recién en el año 2008, en el Ecuador inician las primeras actividades en materia de eficiencia energética y en el año 2011 se inicia con el plan de conversión de refrigeradores domésticos de más de 10 años de vida útil.

Para el caso del modelo desarrollado, se considera que estas actividades ya influenciaron directamente en la decisión de los usuarios para convertir (renovar) su refrigerador ineficiente, para poder reflejar este comportamiento se han establecido variables que permiten suponer un porcentaje de evaluación de la conversión de refrigeradores que se encuentran en los grupos de más de 10 años de vida útil, de acuerdo a lo siguientes rangos (ver Tabla 4-1):

Tabla 4-1: Rangos porcentuales para la evaluación de la conversión por grupos de vida útil. Fuente Autor.

Grupo para evaluación de la conversión	Rango porcentual
RDNE de 11 a 15 años de vida útil	0 a 3
RDNE de 16 a 20 años de vida útil	10 a 35
RDNE de 21 y más años de vida útil	20 a 60

Es importante mencionar que un refrigerador llega al final de su vida útil a los 10 años y se recomienda sean cambiados, aun estos sigan en funcionamiento ya que por los desgates que llegan a tener pueden presentar altos consumos de energía eléctrica.

4.1.2 Caso base

Para cuantificar el consumo de energía eléctrica por el uso de refrigeradores domésticos en el sector residencial, se establece como escenario base común para los tres países Latinoamericanos, que son motivo de estudio, de la siguiente manera:

En el sector residencial de los países motivo de estudio siguen funcionando refrigeradores domésticos fabricados antes de 1999, esto significa que ya tienen más de 18 años de vida útil, por lo que para el cálculo del consumo de energía eléctrica por el uso de estos equipos en el caso base se consideran todos los grupos de vida útil establecidos en el modelo, además en vista de las acciones emprendidas por los gobiernos se utilizan los rangos de valores de la Tabla 4-1, para los porcentajes de evaluación de la conversión.

De lo antes mencionado se puede identificar que la variable que estaría sujeta a cambio por las políticas implementadas es la denominada “Refrigeradores nuevos”, mismos que serán adquiridos por parte de la población de México, Colombia y Ecuador, en función de las variables de “Porcentaje de conversión de RDNE a RDE” para los grupos de equipos que se encuentran en los grupos de 11 a 15 años, 16 a 20 años y 21 y más años.

Este comportamiento será variable para cada grupo de vida útil y se lo determina de acuerdo al diagrama causal presentado en la Figura 4-1, el cual está compuesto por 2 ciclos de realimentación, estableciéndose un ciclo de balance en las variables que determinan las cantidades de RDNE existentes en cada grupo clasificado por vida útil, los cuales siguen incrementándose por la no decisión de convertirlos a RDE y un ciclo de refuerzo en las variables que determinan las cantidades de RDE y su incremento debido a la decisión de conversión.

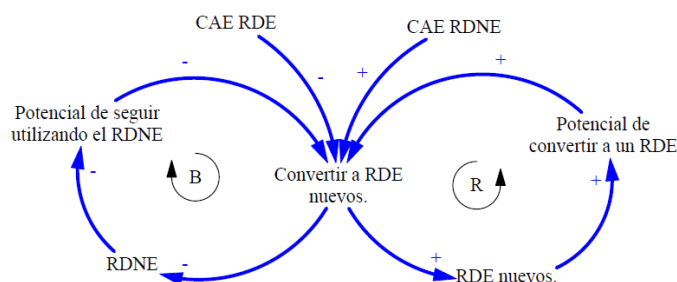


Figura 4-1: Diagrama causal de proceso de conversión a RDE nuevos. Fuente Autor.

La dinámica del mercado de refrigeradores domésticos en los países analizados, proporciona el soporte requerido para calcular el consumo de energía eléctrica por el uso de RDE, pero esta depende fundamentalmente de la estructura de conversión a RDE nuevos que sea posible en la realidad de los potenciales consumidores.

4.2 Resultados del Caso Base

Los países analizados presentan un continuo crecimiento de su población, así como de la producción de refrigeradores domésticos, por esa razón la dinámica establecida en el modelo, depende fundamentalmente de las posibilidades de conversión a RDE nuevos que puedan tener los

consumidores en función de los costos de los equipos y sobre todo por propuestas de financiamiento o subsidios que incluyan los planes y políticas emprendidas por los gobiernos. En la Figura 4-2 se puede observar las cantidades de RDE nuevos determinados a través del modelo desarrollado para el período de análisis. Allí se puede notar que para el año 2017 en México se tiene una demanda de 2.551.800 RD, en Colombia una demanda de 959.972 unidades y en Ecuador una demanda de 375.582 equipos de refrigeración doméstica

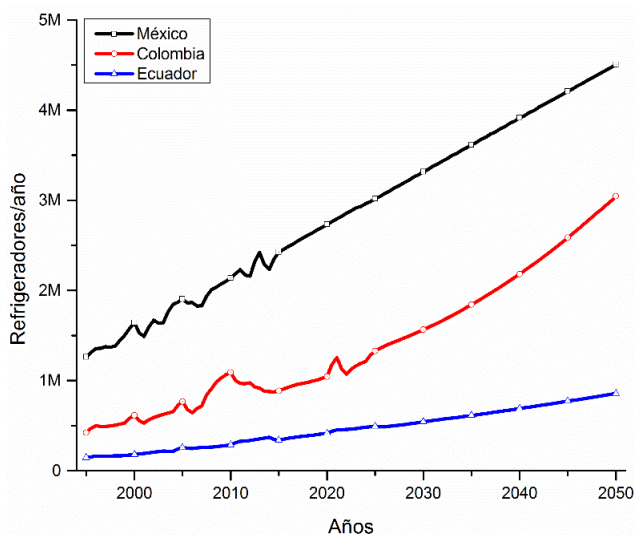


Figura 4-2: Demanda de refrigeradores domésticos nuevos en México, Colombia y Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

Los refrigeradores ineficientes de más de 10 años convertidos, deben estar sujetos a procesos de gestión, disposición y reciclaje, ya que estos electrodomésticos considerados como grandes, poseen residuos que están compuestos en gran medida por materiales que pueden ser aprovechados y reintegrados a la cadena productiva que mantienen los países.

En este sentido se ha verificado que en México se desarrolló el Programa de Sustitución de Equipos Electrodomésticos para el ahorro de energía (PSEE) del Fideicomiso para el Ahorro de Energía (FIDE), mismo que reporta una recuperación de metales, aceites, gases y otros materiales a nivel nacional en una cantidad aproximada de 50 mil toneladas durante el período 2009-2011, de los cuales los refrigeradores fueron los que aportaron con un 80,52% del total, es decir aproximadamente 40 mil toneladas, lo que significa 1 millón de unidades considerando un peso promedio de 40 kg. El FIDE reportó que en el período 2009-2011 se recibió 1.507.725 refrigeradores inhabilitados [150].

Para el caso de Colombia, en el año 2015 se instituye la red de recuperación, reciclaje y regeneración de gases refrigerantes Red R&R&R, con el objetivo de recuperar, reciclar, regenerar y reutilizar el gas refrigerante que ha sido utilizado en equipos de refrigeración doméstica y aire acondicionado a fin de reducir las emisiones a la atmósfera y disminuir el consumo de gas refrigerante virgen [151]. En lo referente a los equipos de refrigeración se implementó un plan piloto de sustitución de 2000 refrigeradoras en Bogotá, proveyendo a nivel nacional la asignación de importantes recursos dentro del programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales – PROURE, específicamente en el subprograma prioritario de uso eficiente de energía en equipos de refrigeración y aire acondicionado doméstico incluido dentro del programa mencionado, plantea una

inversión de 770 millones de dólares para el reemplazo y chatarrización de 2 millones de neveras durante el período 2015-2025 [152].

Para el caso de Ecuador se establece en el año 2011, el proyecto de sustitución de refrigeradores ineficientes, con el cual se prevé renovar 330.000 equipos en 5 años, este plan mantiene el soporte del RTE 035:2009 y RTE 009:20054 y permitirá obtener una reducción de 20,6 MW en la demanda de potencia y un ahorro anual de 215.780 MWh beneficios al final de su implementación [153]. En este sentido se requerirá gestionar la disposición y chatarrización de 330.000 refrigeradores en 5 años, como resultado del plan de sustitución mencionado.

Con base a lo dicho anteriormente, a continuación se presenta en la Figura 4-3 los resultados de simulación del número de equipos de refrigeración que son potenciales a ser parte de los planes de gestión, disposición y reciclaje de equipos de refrigeración en desuso, ya que fueron desechados principalmente por conversión o por daño severo; en este sentido al año 2017 se tendría que disponibilizar en procesos de chatarrización en México un total de 911.626, en Colombia un total de 371.470 y en Ecuador un total de 120.559 refrigeradores domésticos en desuso.

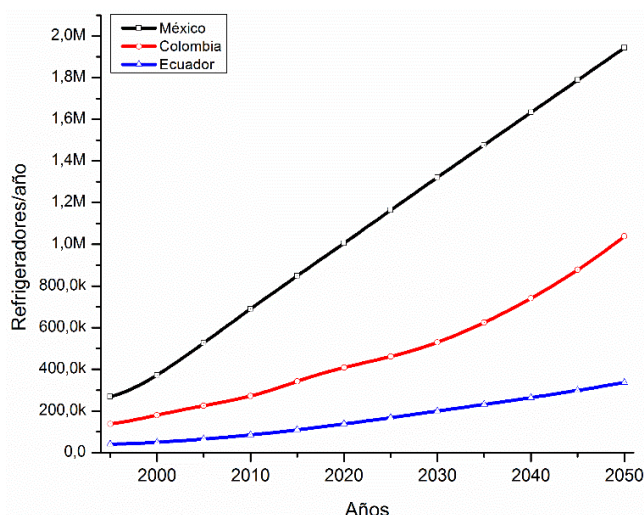


Figura 4-3: Refrigeradores domésticos para disposición y reciclaje en México, Colombia y Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

La esperanza de vida de los refrigeradores domésticos está entre 10 y 16 años ya que su operación es continua en las 24 horas al día, rango que puede variar drásticamente de acuerdo al sitio en donde funciona y la forma de utilización al que ha estado sujeto, debido fundamentalmente a los desgastes que se presentan ocasionando grandes incrementos en las pérdidas térmicas, haciendo que el consumo eléctrico llegue a superar el triple del valor para el que fue diseñado, limitando su vida útil a 10 años y menos.

Por lo menos la mitad de los refrigeradores domésticos en existencia en países Latinoamericanos como México, Colombia y Ecuador, tienen más de 10 años de antigüedad y representan el grupo de refrigeradores domésticos no eficientes (RDNE), esto se debe a que de manera general los usuarios no dan mucha importancia a las recomendaciones de vida útil limitada de estos equipos que oscila entre 10 y 16 años y lo sustituyen únicamente por daño severo debido a los años de utilización a los que ha estado sujeto lo que ocasiona que siga funcionando hasta por más de 21 años, sobre todo en

zonas de clima frío; En este sentido el modelo considera la cuantificación de los refrigeradores domésticos en grupos de vida útil de acuerdo a la clasificación siguiente:

- RDE nuevos y hasta 5 años
- RDNE de 6 a 10 años
- RDNE de 11 a 15 años
- RDNE de 16 a 20 años
- RDNE de 21 y más años

En la Figura 4-4 se puede observar el número de refrigeradores por año, que se clasifican dentro de los grupos de vida útil indicados para el período de análisis. En este sentido para el año 2017 en México se considera que se encuentran en funcionamiento 10.954.100 de refrigeradores de 0 a 5 años de edad, 8.412.930 de 6 a 10 años, 4.808.810 de 11 a 15 años, 1.295.060 de 16 a 20 años y 250.643 de 21 y más años.

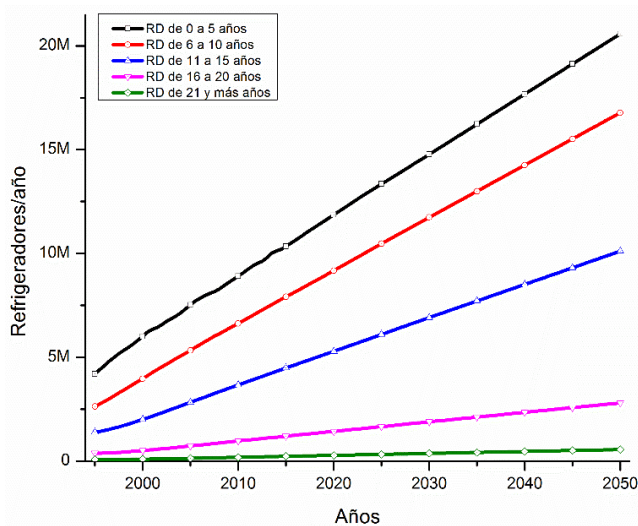


Figura 4-4 Refrigeradores domésticos por grupos de vida útil existentes en México para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

Para el año 2017 en Colombia se considera que se encuentran en funcionamiento 4.354.340 de refrigeradores de 0 a 5 años de edad, 3.485.720 de 6 a 10 años, 1.999.330 de 11 a 15 años, 543.156 de 16 a 20 años y 105.427 de 21 y más años (ver Figura 4-5).

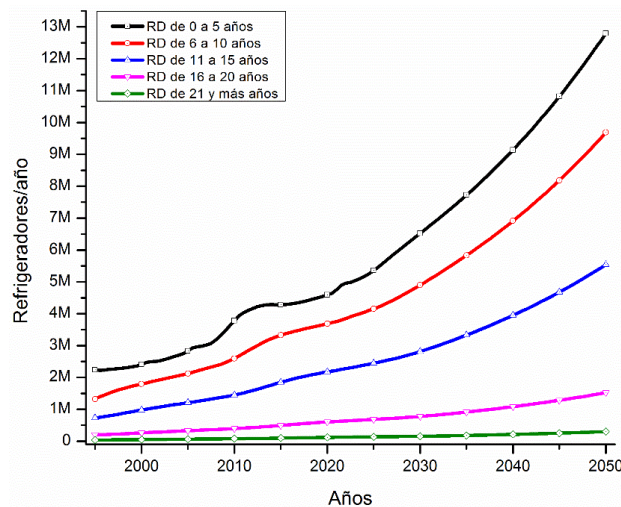


Figura 4-5: Refrigeradores domésticos por grupos de vida útil existentes en Colombia para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

Para el año 2017 en Ecuador se considera que se encuentran en funcionamiento 1.582.980 de refrigeradores de 0 a 5 años de edad, 1.172.050 de 6 a 10 años, 649.412 de 11 a 15 años, 180.627 de 16 a 20 años y 26.554 de 21 y más años (ver Figura 4-6).

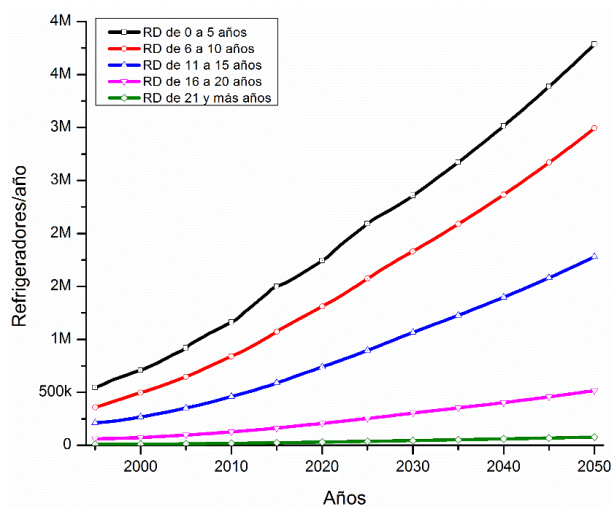


Figura 4-6: Refrigeradores domésticos por grupos de vida útil existentes en Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

Como meta final, se pretenderá que los refrigeradores domésticos que se utilicen a nivel residencial posean una vida útil máxima de hasta 10 años, en este sentido, en la Figura 4-7 se presenta la cantidad de refrigeradores de 0 a 10 años que se encuentran en operación en los tres países de estudio para el período de análisis desde 1995 - 2050. Se puede identificar que para el año 2017 existen 19.367.030 refrigeradores en los hogares mexicanos, 7.840.060 refrigeradores en los hogares colombianos y 2.755.030 refrigeradores en los hogares ecuatorianos.

De acuerdo a los datos, el número de refrigeradores de 0 a 10 años en México representa aproximadamente 2,5 veces que el existente en Colombia y un poco más de 7 veces que el existente en el Ecuador.

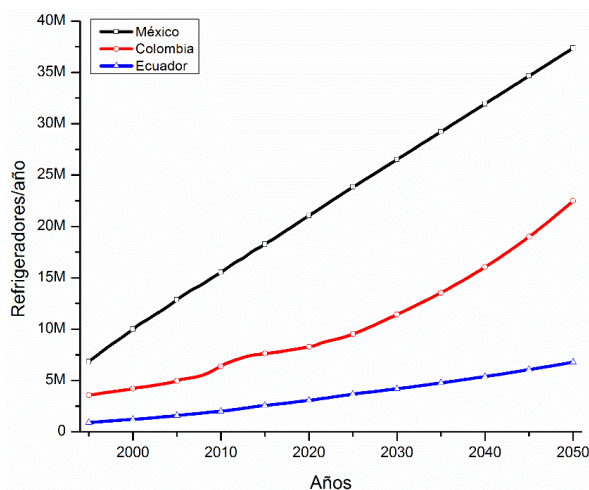


Figura 4-7: Refrigeradores domésticos de 0 a 10 años en operación en México, Colombia y Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

Se considera como un caso excepcional que en los países de estudio, se utilicen únicamente refrigeradores de hasta 10 años, sin embargo en la simulación se puede apreciar que a estos se suman también los equipos de los grupos de vida útil restantes, llegando a totalizar la variable “refrigeradores en operación”, por lo que se ha obtenido la cantidad resultante de equipos de refrigeración que se encuentran operando en los hogares para el período 1995-2050 (ver Figura 4-8).

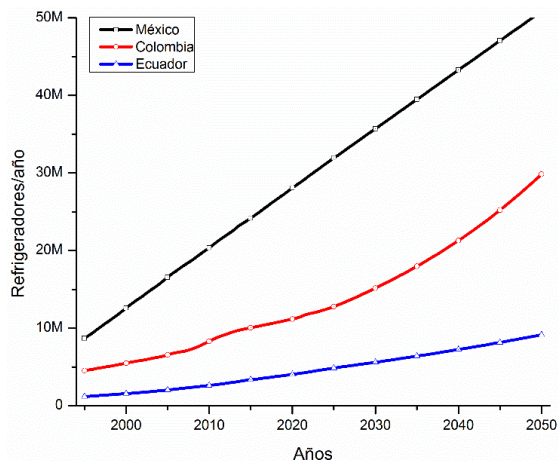


Figura 4-8: Refrigeradores domésticos que se encuentran en operación en los hogares de México, Colombia y Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

Una vez que se ha determinado la dinámica de los refrigeradores que se encuentran en operación en cada uno de los países de estudio, se ha procedido a calcular el consumo total de energía eléctrica por el uso de estos electrodomésticos a nivel residencial, multiplicando las cantidades de refrigeradores de cada uno de los grupos de vida útil por el valor de consumo promedio de energía eléctrica del refrigerador de acuerdo a los años de utilización clasificados anteriormente (ver Figura 4-9).

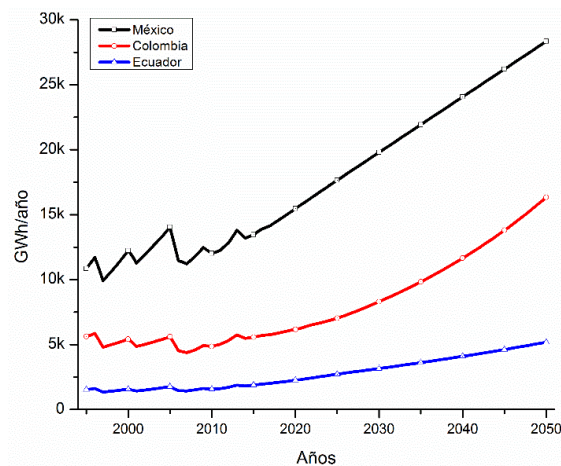


Figura 4-9: Consumo promedio de energía eléctrica por el uso de Refrigeradores domésticos que se encuentran en operación en los hogares de México, Colombia y Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

En la Figura 4-9 se puede diferenciar al 2017 un consumo promedio de electricidad por el uso de refrigeradores domésticos en México de 14.156 GWh/año (14,156 TWh/año), en Colombia un consumo promedio de 5.766 GWh/año y en Ecuador de 2.014 GWh/año.

4.3 Análisis del impacto en la industria de la refrigeración doméstica

4.3.1 Estrategias a implementar en los escenarios

Con los datos obtenidos de la industria de la refrigeración doméstica en Latinoamérica y específicamente en México, Colombia y Ecuador como casos de estudio, se ha podido conocer que el refrigerador más utilizado en los hogares es el del tipo Top-Mount, además se ha verificado que la tecnología de compresores, evaporadores, condensadores y aislamiento principalmente, utilizadas para la producción local de refrigeradores domésticos, los ha llevado a identificarse con una etiqueta energética tipo A, los cuales han sido utilizados en muchos casos para los programas de renovación o conversión que han impulsado los gobiernos de varios países de Latinoamérica. Además se ha verificado que en el mundo se está utilizando tecnologías eficientes para la fabricación de refrigeradores las cuales incrementan la eficiencia energética de los equipos en porcentajes significativos posicionándolos con etiquetas energéticas del tipo A++ y A+++.

Adicionalmente a lo manifestado se estudiaron las políticas, normas y procesos de etiquetado implementados en distintos países de Latinoamérica, en donde se ha conseguido determinar algunas particularidades que aportaron a la definición de los escenarios para la simulación del modelo desarrollado.

En este sentido y con la intención de determinar el impacto que se genera en la industria de la refrigeración doméstica luego de implementar políticas, normas y procesos de etiquetado que posibiliten en un incremento de la conversión de equipos de refrigeración doméstica ineficiente se pueden identificar las siguientes estrategias a analizar en función de los escenarios:

- Estrategia regulatoria.- implementación de normas e índices de eficiencia energética más exigentes a la realidad del país.
- Estrategia económica – financiera.- Subsidios a la conversión de refrigeradores eficientes y financiamiento a mediano plazo. Además de apoyo económico a la industria.

- Estrategia tecnológica.- Adopción de tecnologías eficientes que posibiliten clasificar energéticamente al refrigerador en una categoría A++ o A+++.

El criterio de evaluación de las estrategias será el de patrón de comportamiento, ya que este patrón puede ser estudiado cualitativa y cuantitativamente.

Al haber elegido la metodología de la Dinámica de Sistemas para el estudio del problema, se afirma que esta facilita el análisis cualitativo y permite explicar los efectos de las estrategias a partir de la variación que se presenta en el proceso de conversión (renovación) y en consecuencia la adquisición de refrigeradores eficientes ofertados en los planes de renovación o simplemente los comercializados en los mercados locales.

Las estrategias planteadas de seguro influyen de manera directa el proceso de conversión, en primera instancia la implementación de normas e índices de eficiencia energética más exigentes posibilitan de manera general una transformación de la dinámica del mercado de refrigeradores domésticos y por ende la industria de la fabricación de estos electrodomésticos, el hecho de adoptar tecnologías eficientes para fabricar neveras que cumplan con los nuevos índices energéticos, les ubica a estos productos en una posición competitiva con respecto a otros mercados, esto será una oportunidad para la industria local ya que podría ampliar sus cuotas de exportación, llevándolos a un crecimiento paulatino; además al comercializar estos productos al interior del país conlleva un ahorro de energía eléctrica significativo.

En segunda instancia los gobiernos pueden impulsar programas de conversión de refrigeradores ineficientes de más de 10 años de vida útil por refrigeradores eficientes producidos por la industria local, proponiendo subsidios y financiamientos que impulsen a los usuarios a anticiparse en tomar la decisión de la conversión de su equipo de refrigeración. La inversión que se realice puede ser recuperada en los ahorros de energía eléctrica a mediano plazo que se puedan conseguir, esto permite enfrentar el crecimiento de la demanda sin tener que incrementar la capacidad instalada de generación.

En tercera instancia, adoptar tecnologías eficientes en refrigeración doméstica que se utilizan en países desarrollados y que se encuentran clasificados con etiquetas A+, A++ y A+++ , a más de representar un incremento en los costos de producción y por ende un incremento del costo de venta al público del equipo de refrigeración, los beneficios son varios, empezando por el ahorro energético que le representaría al usuario, el ahorro acumulado a nivel residencial dentro del país y desde el punto de vista medio ambiental, las toneladas de CO₂ que se evitarían en el caso que esa energía ahorrada se hubiera generado por medios no renovables.

Para facilitar el análisis de los resultados únicamente se seleccionarán como indicadores cuantitativos los resultados de las variables del modelo desarrollado, como: consumo y ahorro de energía eléctrica por el uso de refrigeradores para cada uno de los escenarios planteados, además de las emisiones de CO₂ evitadas por el ahorro de energía eléctrica. De este modo se puede cuantificar la medida del efecto final de la estrategia aplicada.

4.3.1.1 Estrategia Regulatoria

De acuerdo con la información revisada en el capítulo 2, se puede afirmar que en varios países Latinoamericanos existe el involucramiento y el apoyo del gobierno para establecer políticas que lleven a una implementación de normas de eficiencia energética en refrigeración doméstica. Entre las medidas que se pueden aplicar se encuentra el impulso del uso de índices de eficiencia energética más

exigentes, como aquellos que están regulados en países desarrollados como EEUU, países de la Unión Europea y China.

En vista de que el refrigerador más comercializados en México, Colombia y Ecuador es el refrigerador doméstico tipo Top-Mount, se ha establecido al refrigerador de la marca Whirlpool tipo Top Mount de 385 L / 13.59 pies³ Modelo # WT4020S (ver Figura 4-10), como referente para el análisis.



- Dimensiones: Alto 181.36 cm, Ancho 60.96 cm, Fondo: 71.63 cm
- Capacidad Total 384.88 L
- Capacidad de Congelador: 87.73 L = 3.096755 pie³
- Capacidad de Refrigerador: 296.58 L = 10.468888 pie³
- Fondo con Jaladeras: 71.63 cm
- Peso Neto: 338.80 kg
- Defrost Automático, Tipo de Enfriamiento Evaporador sencillo
- Tipo de Control: Manual
- Volts: 127
- Consumo energético: 300 kWh/año

Figura 4-10: Refrigerador doméstico Whirlpool tipo Top Mount de 385.00 L / 13.59 pies³ Modelo #: WT4020S. Fuente: Autor.

En este sentido a continuación se presenta el cálculo del límite de consumo máximo de energía eléctrica o de referencia de acuerdo a las normas y regulaciones que se están aplicando en EEUU y Canadá, México, Colombia y Ecuador.

4.3.1.1.1 Norma aplicada en Estados Unidos y Canadá: 10 CFR, Parte 430, Subpt. B, 2011-09-15 Energy Conservation Program: Standards for Residential Refrigerators, Refrigerator-Freezers, and Freezers; Final Rule.

Límites de consumo de energía máximos para refrigerador-congelador con deshielo automático y congelador montado en la parte superior, sin despachador de hielo, y refrigeradores solos con deshielo automático:

$$\text{Límite consumo energía máximo} = (0,285 * AV) + 233,7 \quad [AV \text{ en Litros}]$$

$$\text{Límite consumo energía máximo} = (0,285 * 439,58) + 233,7 = \mathbf{358,98 \text{ kWh/año}}$$

$$\text{Límite consumo energía máximo} = (8,07 * AV) + 233,7 \quad [AV \text{ en pie}^3]$$

$$\text{Límite consumo energía máximo} = (8,07 * 15,52) + 233,7 = \mathbf{358,95 \text{ kWh/año}}$$

Volumen utilizado para MEPS y etiquetado energético: MEPS levels AV (adjusted volume) = volume of fresh food compartment + (FA × volume of freezer compartment) [L/cu ft].

$$AV = \text{Volumen de compartimiento de alimentos frescos} + (FA * \text{Volumen de compartimiento de congelador}) \quad [\text{Litros o pie}^3]$$

$$AV = 296,58 + (1,63 * 87,73) = 439,58 \text{ L}$$

$$AV = 10,47 + (1,63 * 3,097) = 15,52 \text{ pie}^3$$

Factor de ajuste para el cálculo del volumen ajustado (FA): Refrigerador congelador y Tipo (***) (-18 °C de referencia del compartimiento de baja temperatura).

$$FA = 1.63$$

4.3.1.1.2 Norma aplicada en México la NOM-015-ENER-2012: Eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos. Límites, métodos de prueba y etiquetado [139].

Límites de consumo de energía máximos para refrigerador-congelador con deshielo automático y congelador montado en la parte superior, sin despachador de hielo, y refrigeradores solos con deshielo automático (clasificados con el número 3):

$$\text{Límite consumo energía máximo} = (0,35 * VA) + 276 \quad [AV \text{ en Litros}]$$

$$\text{Límite consumo energía máximo} = (0,35 * 439,58) + 276 = \mathbf{429,85 \text{ kWh/año}}$$

Volumen utilizado para MEPS y etiquetado energético: Almacenamiento (VA= Volumen de compartimiento de alimentos + volumen de congelador * FA). Litros (dm³)

$$VA = \text{Volumen de compartimiento de alimentos frescos} + (FA * \text{Volumen de compartimiento de congelador}) \quad [\text{Litros}]$$

$$VA = 296,58 + (1,63 * 87,73) = 439,58 \text{ L}$$

Para refrigeradores convencionales el factor de ajuste es:

$$FA = 1.44$$

Factor de ajuste para el cálculo del volumen ajustado (FA): Refrigerador congelador y Tipo (***) (-18 °C de referencia del compartimiento de baja temperatura).

$$FA = 1.63$$

Si el consumo de energía de un aparato comprendido en el campo de aplicación de esta Norma, presenta una reducción de por lo menos un valor igual o superior al 10% del especificado, puede ostentar en la etiqueta la leyenda "EFICIENCIA SUPERIOR" (ver Figura 2-5).

4.3.1.1.3 Norma aplicada en Colombia NTC 5020 2009: Eficiencia energética en artefactos refrigeradores, refrigeradores - congeladores y congeladores para uso doméstico [138].

El consumo de energía nacional para un artefacto refrigerador y/o refrigerador congelador clasificado según diseño de producto con el número 4 es:

$$\text{Consumo de energía nacional } (CER_n) = (m_n * VA) + CE_{on}$$

Para un clima tipo "T" (+32°C)

$$m_n = 0,33; \quad CE_{on} = 812$$

$$\text{Consumo de energía nacional } (CER_n) = (0,33 * 458,88) + 812 = 963,43 \text{ kWh/año}$$

Para un clima tipo "N, SN y ST" (+25°C)

$$m_n = 0,78; \quad CE_{on} = 305$$

$$\text{Consumo de energía nacional } (CER_n) = (0,78 * 485,19) + 305 = 683,45 \text{ kWh/año}$$

Volumen utilizado para MEPS y etiquetado energético:

$$VA = \text{Volumen de compartimiento de alimentos frescos} + (FA * \text{Volumen de compartimiento de congelador}) \quad [\text{Litros}]$$

Para clima "T":

$$VA = 296,58 + (1,85 * 87,73) = 458,88 \text{ L}$$

Para clima "ST":

$$VA = 296,58 + (2,15 * 87,73) = 485,19 \text{ L}$$

Factor de ajuste para el cálculo del volumen ajustado (FA): Refrigerador congelador y Tipo (***) (-18 °C de referencia del compartimiento de baja temperatura).

Para clima T:

$$FA = 1.85$$

Para clima N, SN y ST:

$$FA = 2,15$$

Los consumos de energía de referencia (CER_i) se definen como la relación lineal entre el volumen ajustado expresado en litros y el consumo de energía expresado en kWh/año. Los CER están definidos por la siguiente ecuación lineal:

$$\text{Consumo de energía de referencia } (CER_i) = (m_i * VA) + CE_{oi}$$

En la tabla 4-2 se pueden observar los distintos valores de consumos de energía de referencia.

Tabla 4-2: Consumos de energía de referencia. Fuente [138].

i	CER_i	m_i	CE_{oi}
0	CER_0	$m_0=0*m_n$	$CE_{o0}=0*CE_{on}$
1	CER_1	$m_1=0,675*m_n$	$CE_{o1}=0,675*CE_{on}$
2	CER_2	$m_2=0,775*m_n$	$CE_{o2}=0,775*CE_{on}$
3	CER_3	$m_3=0,925*m_n$	$CE_{o3}=0,925*CE_{on}$
4	CER_4	$m_4=1,075*m_n$	$CE_{o4}=1,075*CE_{on}$
5	CER_5	$m_5=1,225*m_n$	$CE_{o5}=1,225*CE_{on}$
6	CER_6	$m_6=1,325*m_n$	$CE_{o6}=1,325*CE_{on}$
α	CER_α	$m_\alpha=0*m_n$	$CE_{o\alpha}=\alpha*CE_{on}$

A continuación se realiza el cálculo de los primeros CER

$$\text{Consumo de energía de referencia 0 } (CER_0) = 0 \text{ kWh/año}$$

Para un clima tipo "T" (+32°C)

$$\begin{aligned} \text{Consumo de energía de referencia 1 } (CER_1) &= (0.675 * 0,33 * 458,88) + (0,675 * 812) \\ &= 650,315 \text{ kWh/año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Consumo de energía de referencia 2 (CER}_2) &= (0,775 * 0,33 * 458,88) + (0,775 * 812) \\ &= 746,66 \text{ kWh/año} \end{aligned}$$

Para un clima tipo "N, SN y ST" (+25°C)

$$\begin{aligned} \text{Consumo de energía de referencia 1 (CER}_1) &= (0,675 * 0,78 * 485,19) + (0,675 * 305) \\ &= 461,33 \text{ kWh/año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Consumo de energía de referencia 2 (CER}_2) &= (0,775 * 0,78 * 485,19) + (0,775 * 305) \\ &= 529,67 \text{ kWh/año} \end{aligned}$$

De acuerdo a lo establecido en la norma NTC 5020, si el consumo de energía determinado según lo establecido en el ensayo, se encuentra el espacio comprendido entre el CER0 y el CER1 incluido, el refrigerador doméstico se etiqueta con el tipo A, si está entre el CER1 y el CER2 se etiqueta con B, etc.

4.3.1.1.4 Norma aplicada en Ecuador RTE INEN 035:2009: Eficiencia energética en artefactos de refrigeración de uso doméstico. Reporte de consumo de energía, métodos de prueba y etiquetado [154].

El consumo de energía nacional para un artefacto refrigerador y/o refrigerador congelador clasificado según diseño de producto con el número 4 es:

$$\text{Consumo de energía nacional (CER}_n) = (m_n * VA) + CE_{on}$$

Para un clima tipo "T" (+32°C)

$$m_n = 0,33; \quad CE_{on} = 812$$

$$\text{Consumo de energía nacional (CER}_n) = (0,33 * 458,88) + 812 = 963,43 \text{ kWh/año}$$

Para un clima tipo "ST" (+25°C)

$$m_n = 0,78; \quad CE_{on} = 305$$

$$\text{Consumo de energía nacional (CER}_n) = (0,78 * 485,19) + 305 = 683,45 \text{ kWh/año}$$

Volumen utilizado para MEPS y etiquetado energético:

$$\begin{aligned} VA &= \text{Volumen de compartimiento de alimentos frescos} + (FA \\ &\quad * \text{Volumen de compartimiento de congelador}) \quad [\text{Litros}] \end{aligned}$$

Para clima "T":

$$VA = 296,58 + (1,85 * 87,73) = 458,88 \text{ L}$$

Para clima "ST":

$$VA = 296,58 + (2,15 * 87,73) = 485,19 \text{ L}$$

Factor de ajuste para el cálculo del volumen ajustado (FA): Refrigerador congelador y Tipo (***) (-18 °C de referencia del compartimiento de baja temperatura).

Para clima T:

$$FA = 1.85$$

Para clima ST:

$$FA = 2,15$$

Los consumos de energía de referencia (CER_i) se definen como la relación lineal entre el volumen ajustado expresado en litros y el consumo de energía expresado en kWh/año. Los CER están definidos por la siguiente ecuación lineal:

$$\text{Consumo de energía de referencia } (CER_i) = (m_i * VA) + CE_{oi}$$

En la tabla 4-1 al igual que la norma NTC 5020, la RTE INEN 035, considera distintos valores de consumos de energía de referencia, con fines de etiquetado.

A continuación se realiza el cálculo de los primeros CER

$$\text{Consumo de energía de referencia 0 } (CER_0) = 0 \text{ kWh/año}$$

Para un clima tipo "T" (+32°C)

$$\begin{aligned} \text{Consumo de energía de referencia 1 } (CER_1) &= (0,675 * 0,33 * 458,88) + (0,675 * 812) \\ &= 650,315 \text{ kWh/año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Consumo de energía de referencia 2 } (CER_2) &= (0,775 * 0,33 * 458,88) + (0,775 * 812) \\ &= 746,66 \text{ kWh/año} \end{aligned}$$

Para un clima tipo "N, SN y ST" (+25°C)

$$\begin{aligned} \text{Consumo de energía de referencia 1 } (CER_1) &= (0,675 * 0,78 * 485,19) + (0,675 * 305) \\ &= 461,33 \text{ kWh/año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Consumo de energía de referencia 2 } (CER_2) &= (0,775 * 0,78 * 485,19) + (0,775 * 305) \\ &= 529,67 \text{ kWh/año} \end{aligned}$$

De acuerdo a lo establecido en la norma RTE INEN 035, si el consumo de energía determinado según lo establecido en el ensayo, se encuentra el espacio comprendido entre el CER0 y el CER1 incluido, el refrigerador doméstico se etiqueta con el tipo A, si está entre el CER1 y el CER2 se etiqueta con B, etc.

Una vez determinado los consumos de energía máximos para el volumen ajustado del refrigerador doméstico tipo Top Mount de 385.00 L / 13.59 pies³ Modelo #: WT4020S de la marca Whirlpool, el cual consume 300 kWh/año, para cada una de las normas establecidas en distintos países se puede observar la etiqueta que le corresponde con base en los porcentajes de reducción de consumo calculados (ver Tabla 4-3)

Tabla 4-3: Comparativa del consumo energético del RD Top Mount Modelo WT4020S Whirlpool. Fuente: Autor

País	Límite máximo consumo de energía - refrigeradores máxima eficiencia	Reducción del consumo de energía		Etiqueta
	kWh/año	kWh/año	%	
EEUU y Canadá	358,98	58,98	16,43	A++

México	429,85	129,85	30,21	Eficiencia Superior
Colombia	650,315	350,315	53,87	A
Ecuador	650,315	350,315	53,87	A

4.3.1.2 Estrategia Económica – Financiera.

Se ha podido identificar que los planes de renovación de neveras en países Latinoamericanos como México y Ecuador, estuvieron establecidos con propuestas de financiamiento y de subsidio, a fin de que el usuario se motive en cambiar su equipo ineficiente de más de 10 años de vida útil por otro eficiente. Específicamente en el caso de Ecuador con el plan Renova se estableció un subsidio de hasta 250 USD a cambio del equipo viejo y se financió el saldo hasta 3 años plazo, para el caso de México en las iniciativas del FIDE, se establecieron políticas similares con la diferencia que el usuario podía optar por el equipo del plan o cualquier otro equipo comercializado en el mercado interno del país.

El financiamiento para la compra de un equipo de refrigeración nuevo puede hacerse hasta 3 años plazo y los valores correspondientes podrían recaudarse en las planillas eléctricas directamente en las empresas de comercialización eléctrica en el país. En lo referente al subsidio, este dependerá del presupuesto que el estado destine a los planes de conversión de equipos ineficientes; por la experiencia identificada en distintas realidades analizadas, dicho subsidio puede llegar hasta valores de un 40 % del costo del equipo nuevo.

En lo referente al apoyo industrial se ha verificado que en el Ecuador, por citar un caso, el estado aportó con alrededor de 2 millones de dólares a la industria de electrodomésticos, con la finalidad de que se establezcan mejoras en la calidad de los productos y sus consumos energéticos sean más bajos.

Por lo antes mencionado se pueden establecer estas estrategias como parte de las políticas de eficiencia energética a implementarse en países Latinoamericanos como México, Colombia y Ecuador, en aras de conseguir un ahorro de energía eléctrica por el uso de refrigeradores domésticos eficientes.

4.3.1.3 Estrategia Tecnológica.

Esta estrategia está directamente relacionada con la estrategia regulatoria y la estrategia económica-financiera, ya que la implementación de mejoras en la tecnología de los equipos de refrigeración exigidas por una posible sintonización con normas e índices de eficiencia energética más exigentes, afectaría directamente en el costo de producción de los nuevos refrigeradores eficientes y por ende en el costo al público; lo que podría ocasionar un efecto adverso, haciendo necesario el planteamiento de estrategias de financiamiento, subsidios y apoyo industrial.

4.3.2 Planteamiento de escenarios

A partir de las estrategias consideradas anteriormente, se ha decidido establecer varias propuestas de políticas a fin de evaluar la aplicación del modelo desarrollado en México, Colombia y Ecuador, las cuales incluyen la implementación de normas y programas de etiquetado energético que estimulan la sustitución voluntaria de refrigeradores ineficientes, que pueden o no ofrecer también incentivos económicos y financiamiento tanto para fabricantes como para usuarios además de programas de información en buenas prácticas de uso y de ubicación, dirigidos a los usuarios de los refrigeradores que lleven a disminuir el consumo de energía.

Los escenarios para el análisis de las alternativas que servirán para la toma de decisiones se plantearon en esencia con los mismos criterios para México, Colombia y Ecuador, sin embargo se han diferenciado algunos detalles como los costos de los equipos de refrigeración y los porcentajes por grupos de vida útil que presentan cada país en los modelos desarrollados.

En lo referente a los costos de los equipos de refrigeración, considerados en el plan de cada país se mencionan a continuación:

- Caso México: 6.890 MXN (382,7 USD) con un cambio de 18 MXN por dólar
- Caso Colombia: 1.290.900 COP (469,42 USD) con un cambio de 2740 COP por dólar
- Caso Ecuador: 771,62 USD

Se plantearon 4 escenarios para cada uno de los modelos desarrollados para los países de análisis, los cuales son iguales y únicamente presentan cambios en los porcentajes de existencia por grupo de vida útil, de la siguiente manera:

4.3.2.1 Escenario 1:

Con la intención de eliminar del sector residencial los refrigeradores de más de 15 años de vida útil, el estado inicia una campaña de sustitución de estas neveras, en la que se estimula al usuario a realizar la conversión de dichos equipos por unos eficientes, subsidiando un 20% en el valor del refrigerador del plan, además de un financiamiento del saldo hasta 3 años plazo. Para ello el estado a partir del año 2018 pretende sustituir las siguientes cantidades en los países de estudio (ver Tabla 4-4):

Tabla 4-4: Número de unidades de refrigeradores para plan de conversión - escenario 1. Fuente: Autor

País	Año					Total Ref. a sustituir
	2018	2019	2020	2021	2022	
México	480.000	540.000	600.000	660.000	720.000	3.000.000
Colombia	240.000	270.000	300.000	330.000	360.000	1.500.000
Ecuador	60.000	75.000	90.000	105.000	120.000	450.000

En este sentido, para efectos del modelo, en el mercado del país funcionan refrigeradores únicamente de hasta 15 años de vida útil, así que los refrigeradores que se encuentran en los grupos de más de 16 años son convertidos de manera voluntaria a refrigeradores del grupo de 0 a 5 años. Para ello se ha contabilizado un promedio porcentual de existencia tanto de los equipos de 16 a 20 años como los de 21 y más años y se ajusta dicho porcentaje haciendo un incremento en el grupo de refrigeradores nuevos y hasta de 5 años de vida útil.

4.3.2.2 Escenario 2:

Con la intención de eliminar del sector residencial los refrigeradores de más de 20 años de vida útil, el estado inicia una campaña de sustitución de estas neveras, en la que se estimula al usuario a realizar la conversión de dicho equipo por uno eficiente, subsidiando un 20% en el valor del refrigerador del plan, además de un financiamiento del saldo hasta 3 años plazo. Para ello el estado a partir del año 2018 pretende sustituir las siguientes cantidades en los países de estudio (ver Tabla 4-5):

Tabla 4-5: Número de unidades de refrigeradores para plan de conversión - escenario 2. Fuente: Autor

País	Año					Total Ref. a sustituir
	2018	2019	2020	2021	2022	
México	160.000	180.000	200.000	220.000	240.000	1.000.000

Colombia	80.000	90.000	100.000	110.000	120.000	500.000
Ecuador	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	150.000

En este sentido, para efectos del modelo, en el mercado del país funcionan refrigeradores únicamente de hasta 20 años de vida útil, así que los refrigeradores que se encuentran en el grupo de 21 y más años son convertidos de manera voluntaria a refrigeradores del grupo de 0 a 5 años. Para ello se ha contabilizado un promedio porcentual de existencia de los equipos de 21 y más años y se ajusta dicho porcentaje haciendo un incremento en el grupo de refrigeradores nuevos y hasta de 5 años de vida útil.

4.3.2.3 Escenario 3:

Este escenario es idéntico al propuesto en el 1, pero con la única diferencia que los refrigeradores del plan de conversión serán aquellos con tecnología de compresor lineal, refrigerante R600a y que llegue a ser etiquetado energéticamente con A++, así como algunos modelos con los que cuentan las marcas Samsung, LG y Whirlpool.

4.3.2.4 Escenario 4:

Este escenario es idéntico al propuesto en el 1, pero con la única diferencia que los refrigeradores del plan de conversión serán aquellos con tecnología de compresor lineal, refrigerante R600a y que llegue a ser etiquetado energéticamente con A+++, así como algunos modelos con los que cuentan las marcas Samsung, LG y Whirlpool.

4.3.3 Resultados de los Escenarios

Para cada uno de los escenarios planteados se ha determinado el consumo promedio de energía eléctrica por el uso de refrigeradores domésticos que se encuentran en operación en los hogares de México, Colombia y Ecuador para el período 1995-2050 (ver Figuras 4-11, 4-12 y 4-13).

En México para el año 2017, considerando el escenario 1, el consumo eléctrico por el uso de refrigeradores será de 11.777 GWh/año, para el escenario 2 será de 13.214 GWh/año. Para el escenario 3 será de 10.950 y para el escenario 4 será de 10.823 GWh/año (ver Figura 4-11).

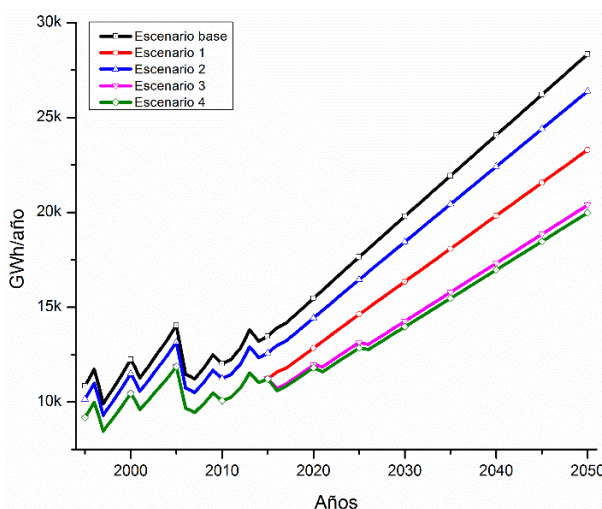


Figura 4-11: Resultados por escenarios de consumo promedio de energía eléctrica por uso de Refrigeradores domésticos en operación en los hogares de México para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

En Colombia para el año 2017, considerando el escenario 1, el consumo eléctrico por el uso de refrigeradores será de 4.786 GWh/año, para el escenario 2 será de 4.367 GWh/año. Para el escenario 3 será de 4.458 y para el escenario 4 será de 4.435 GWh/año (ver Figura 4-12).

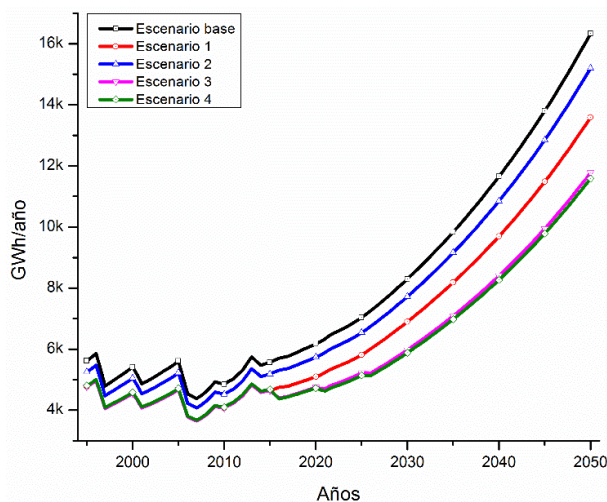


Figura 4-12: Resultados por escenarios del consumo promedio de energía eléctrica por uso de Refrigeradores en operación en los hogares de Colombia para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

En Ecuador para el año 2017, considerando el escenario 1, el consumo eléctrico por el uso de refrigeradores será de 1.708 GWh/año, para el escenario 2 será de 1.993 GWh/año. Para el escenario 3 será de 1.582 y para el escenario 4 será de 1.562 GWh/año (ver Figura 4-13).

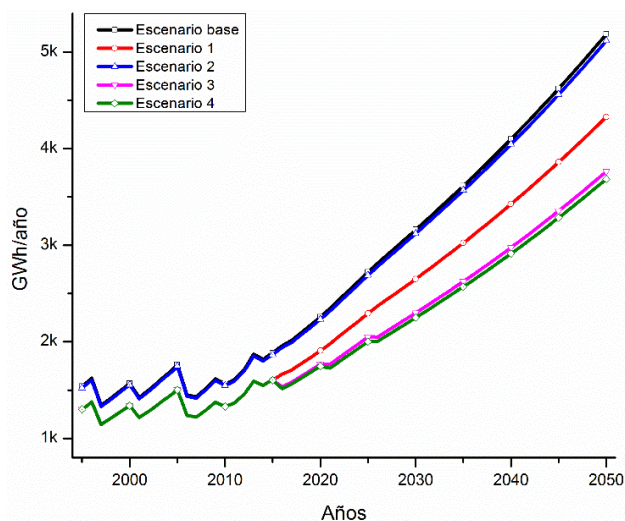


Figura 4-13: Resultados por escenarios del consumo promedio de energía eléctrica por uso de Refrigeradores en operación en los hogares de Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

Una vez determinado los consumos promedio de electricidad, se ha calculado el valor del ahorro de energía eléctrica por escenarios para cada uno de los países motivo de análisis, restando los consumos eléctricos por escenarios del valor de consumo del caso base (ver Figura 4-14, 4-15, 4-16).

En México para el año 2017, considerando el escenario 1, el ahorro de energía eléctrica por el uso de refrigeradores será de 2.378 GWh/año, para el escenario 2 será de 941 GWh/año. Para el escenario 3 será de 3.205 y para el escenario 4 será de 3.332 GWh/año (ver Figura 4-14).

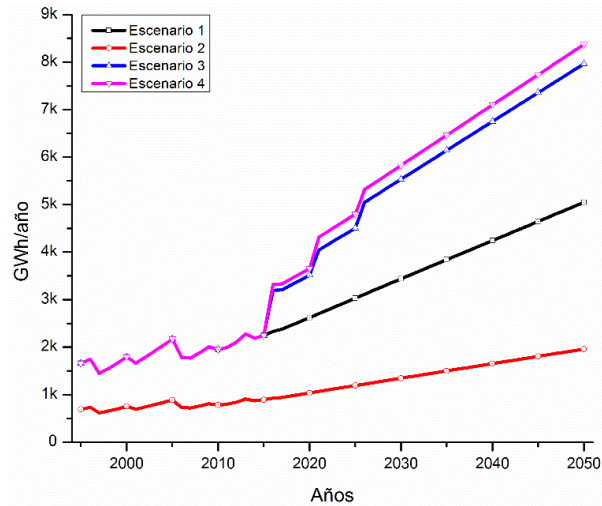


Figura 4-14: Resultados por escenarios del ahorro de energía eléctrica por el uso de Refrigeradores domésticos eficientes en México para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

En Colombia para el año 2017, considerando el escenario 1, el ahorro de energía eléctrica por el uso de refrigeradores será de 980 GWh/año, para el escenario 2 será de 400 GWh/año. Para el escenario 3 será de 1.308 y para el escenario 4 será de 1.331 GWh/año (ver Figura 4-15).

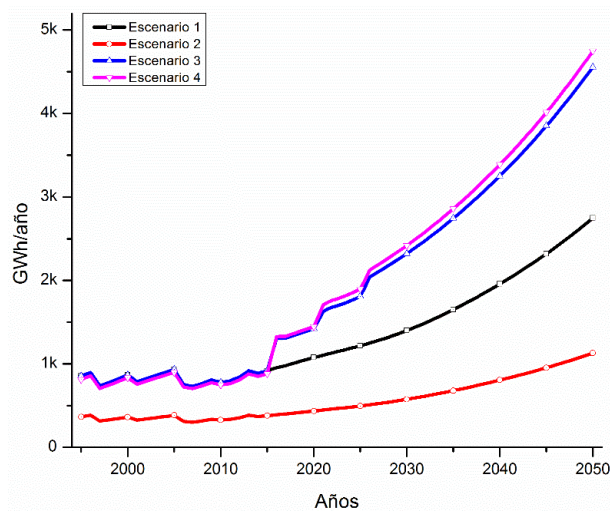


Figura 4-15: Resultados por escenarios del ahorro de energía eléctrica por el uso de Refrigeradores domésticos eficientes en Colombia para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

En Ecuador para el año 2017, considerando el escenario 1, el ahorro de energía eléctrica por el uso de refrigeradores será de 306 GWh/año, para el escenario 2 será de 21 GWh/año. Para el escenario 3 será de 432 y para el escenario 4 será de 451 GWh/año (ver Figura 4-16).

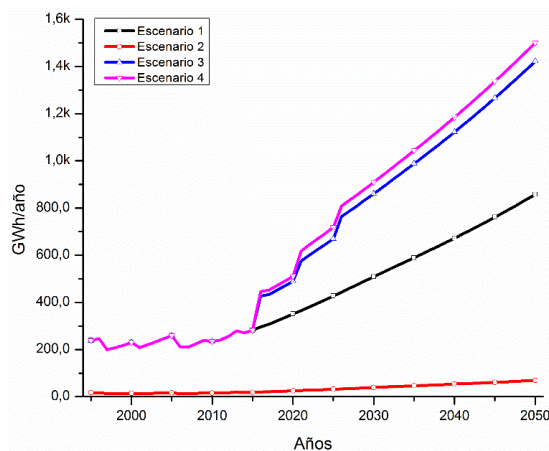


Figura 4-16: Resultados por escenarios del ahorro de energía eléctrica por el uso de Refrigeradores domésticos eficientes en Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

Por otro lado en lo referente al cálculo de las emisiones de CO₂ que se lograrían evitar por el ahorro de energía eléctrica conseguido a través de la implementación de políticas de eficiencia energética en refrigeración doméstica, es necesario conocer el factor de emisiones por generación de energía eléctrica ya que para producirla se utilizan diferentes tecnologías y combustibles; en este sentido se utilizará el factor de emisiones por generación de electricidad en México presentado en el subcapítulo 1.3.2 de este documento, el cual se establece en el valor de 669 Ton CO₂/GWh. Para el caso de Colombia, de igual manera se utiliza el factor de emisión de 388 Ton CO₂/GWh establecido en el subcapítulo 1.3.3 de este documento. Por último para el caso de Ecuador el factor promedio anual de CO₂ es de 731,6 Ton CO₂/GWh, como se plantea en el apartado 1.3.4. En las Figuras 4-17, 4-18 y 4-19 se presentan los resultados del modelo al respecto del total acumulado de emisiones de CO₂ evitadas por el ahorro eléctrico conseguido.

En México para el año 2017, considerando el escenario 1, las emisiones de CO₂ evitadas por el ahorro de energía eléctrica será de 33 millones de toneladas, para el escenario 2 será de 14 millones de toneladas, para el escenario 3 será de 33,7 millones de toneladas y para el escenario 4 será de 33,8 millones de toneladas (ver Figura 4-17).

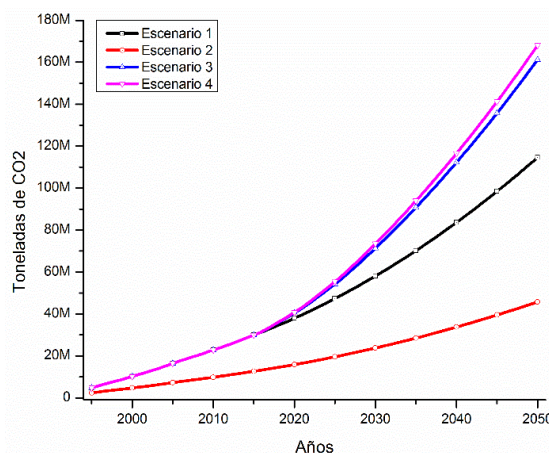


Figura 4-17: Resultados por escenarios de las emisiones de CO₂ evitadas por el ahorro de energía eléctrica en México para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

En Colombia para el año 2017, considerando el escenario 1, las emisiones de CO₂ evitadas por el ahorro de energía eléctrica será de 8,7 millones de toneladas, para el escenario 2 será de 3,75 millones de toneladas, para el escenario 3 será de 8,61 millones de toneladas y para el escenario 4 será de 8,8 millones de toneladas (ver Figura 4-18).

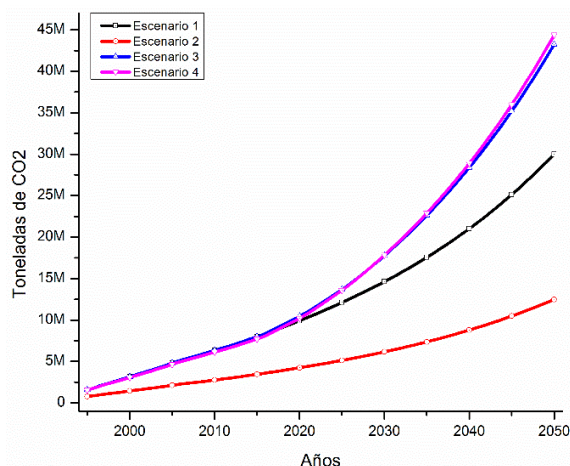


Figura 4-18: Resultados por escenarios de las emisiones de CO₂ evitadas por el ahorro de energía eléctrica en Colombia para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

En Ecuador para el año 2017, considerando el escenario 1, las emisiones de CO₂ evitadas por el ahorro de energía eléctrica será de 4,4 millones de toneladas, para el escenario 2 será de 0,36 millones de toneladas, para el escenario 3 será de 4,56 millones de toneladas y para el escenario 4 será de 4,58 millones de toneladas (ver Figura 4-19).

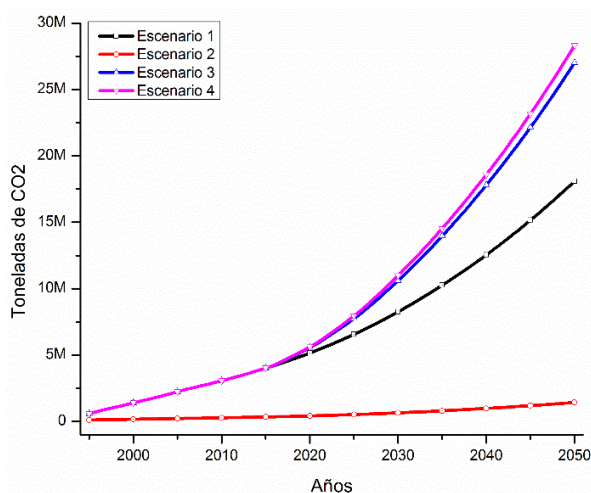


Figura 4-19: Resultados por escenarios de las emisiones de CO₂ evitadas por el ahorro de energía eléctrica en Ecuador para el período 1995-2050. Fuente: Autor.

Conclusiones

Las investigaciones realizadas en compresores para refrigeradores domésticos se están enfocando en la mejora del rendimiento y la optimización de su trabajo, para ello se están utilizando compresores de funcionamiento lineal, que permiten variar la velocidad del compresor en función de la demanda de

refrigeración, posibilitando ahorros de energía eléctrica significativos y disminuyendo la contaminación ambiental debido a dicho ahorro.

Los aerogeles son uno de los materiales de aislamiento térmico más satisfactorios y más prometedores en los últimos tiempos, ya que presentan características muy importantes, como el no ser inflamables y no reactivos, se utilizan como material protector del fuego. Puede llegar a tener una conductividad térmica de 2 a 2,5 veces menor que la lana mineral convencional. El alto potencial de los aerogeles se puede encontrar sobre todo en su translucidez y transparencia posible, ya que los aerogeles pueden proporcionar un gran ahorro energético.

Es importante que continúen los estudios sobre transferencia de calor en el interior del refrigerador doméstico, tomando en cuenta los ciclos de encendido y apagado del compresor recíprocante. Además, podría desarrollarse un modelo tridimensional más complejo con el fin de predecir la distribución de la temperatura en el interior del compartimento de refrigeración.

Los hidrocarburos (HC) y sus mezclas pueden reemplazar a los refrigerantes tradicionales contaminantes ya que además de poseer cero potencial de destrucción del ozono (ODP) y un muy bajo potencial de calentamiento global (GWP), tienen excelentes características termodinámicas, que permiten mejorar el comportamiento de refrigeración, disminuir el tiempo de descenso de la temperatura, reducir el tiempo de encendido y lograr ahorros de energía significativos, además tienen miscibilidad con aceites minerales y compatibilidad con los materiales comúnmente utilizados lo que permite utilizarlos sin modificar el sistema de refrigeración es así que varias empresas especialmente en Europa y Asia ya usan hidrocarburos como refrigerantes en los sistemas de refrigeración que producen.

Por el hecho de que los HC son inflamables, algunos autores se han enfocado en la viabilidad de superar este hecho, considerando la seguridad y el peligro de inflamabilidad en caso de fugas, para ello demostraron que la concentración del HC en el aire (hasta 0,15 kg) en una habitación estándar no es peligrosa, sin embargo a escala industrial el grado de inflamabilidad de estos refrigerantes se vuelve un problema que requiere de la implementación de sistemas de seguridad.

Si la industria de la refrigeración doméstica presente en varios países de Latinoamérica como México y Ecuador, considerando que el R600a resulta ser un refrigerante que mejora la eficiencia energética de los equipos que lo utilizan hasta en un 15%, decide utilizar este refrigerante para la producción de sus refrigeradores domésticos, deberán necesariamente regirse estrictamente a la norma de seguridad para evitar explosiones, para ello se puede aplicar la hoja técnica IEC TS 95006 y una adaptación a la norma IEC/EN 60335-2-24 que son normas de seguridad eléctrica.

En México, Colombia y Ecuador por los altos consumos eléctricos que representan el uso de refrigeradores domésticos a nivel residencial, en los últimos años se está aplicando planes y programas que lleven a un incremento en la eficiencia energética, los cuales sin duda han sido de gran importancia, dando como resultado ahorros significativos de energía eléctrica, lo que se transforma en beneficio económico tanto para los usuarios como para los gobiernos y sobre todo en una oportunidad para que las industrias puedan crecer y expandir sus productos en otros mercados internacionales.

Actualmente en países como México, Colombia y Ecuador se está aplicando normativas que han establecido procesos de etiquetado energético, las cuales clasifican a los refrigeradores domésticos de acuerdo a su consumo energético; todo esto con el fin de que los usuarios puedan elegir el artefacto

que les garantice un ahorro económico y mejores prestaciones. Se aspira que el etiquetado energético a futuro sea mandatorio para muchos otros productos.

El mundo entero ha experimentado crisis energéticas y económicas, lo que ha obligado a los gobiernos a buscar alternativas de solución, es por ello que, como una vía de solución se están aplicando programas de eficiencia energética a distintos equipos utilizados a nivel residencial. Estos programas han sido implementados en muchos países, destacándose EE.UU., China, Canadá, países miembros de la Unión Europea y varios países de Latinoamérica como México, Brasil, Colombia y Ecuador.

Actualmente en México se está aplicando la norma NOM-015-ENER-2012, la NTC 5020 2009 en Colombia y la norma RTE INEN 035:2009 en el Ecuador, las cuales especifican las características esenciales de los refrigeradores domésticos y establece los métodos de prueba para determinar el consumo energético, esto con el fin de que los usuarios puedan elegir el artefacto que les garantice un ahorro económico.

El modelo desarrollado presenta módulos de análisis para determinar el número de refrigeradores nuevos y el número total de refrigeradores existentes en los hogares a nivel país, además de una desagregación por grupos de edades que permiten establecer cantidades de refrigeradores que se encuentran en uso de 1 a 21 años y más, también se determina el consumo total de energía eléctrica por el uso de los refrigeradores existentes, en donde se considera la variación por el grupo de vida en el que se encuentren y el piso térmico en el que funcione principalmente.

Para el caso de los escenarios implementados en el modelo se puede notar que los que generan un mayor ahorro eléctrico son el 3 y el 4, los cuales consideran una eliminación total de los refrigeradores domésticos de más de 15 años y una sustitución y uso de refrigeradores eficientes que utilicen la tecnología de compresores lineales. Para el caso del escenario 1, este elimina los refrigeradores de más de 15 y los sustituye por equipos eficientes que actualmente se comercializan en mayor porcentaje en los países de estudio.

El subprograma para el uso eficiente de energía en equipos de refrigeración y aire acondicionado doméstico contemplado en el programa general del PROURE, hace referencia a la sustitución de neveras con más de 25 años de vida útil por neveras eficientes, ya que se considera que en Colombia existen alrededor de 10 millones de neveras en el sector residencial, de las cuales entre 3 y 4 millones, se encuentran en edades de uso de 21 años en adelante.

El modelo desarrollado, mediante la metodología de la Dinámica de Sistemas, permite tener una visión integrada de la realidad del uso de refrigeradores domésticos en los países de estudio, por medio de la representación gráfica de sus variables estructurales, desde la identificación de refrigeradores domésticos por grupo de años de vida útil, pasando por la cuantificación de refrigeradores nuevos, por el consumo de energía eléctrica que considere la edad en la que se encuentre y por el piso térmico en el que funcione, además del consumo de energía eléctrica por uso de refrigeradores y hasta llegar a los valores correspondientes de emisión de CO₂.

Se establece como escenario actual, la aplicación de subsidios al plan de renovación de refrigeradores domésticos, abaratando el costo de un refrigerador doméstico eficiente RDE y provocando que la conversión sea favorable para cumplir con los objetivos del plan.

Al implementar escenarios distintos, el modelo permite contar con datos relevantes que facilitan la comprensión de las relaciones causa-efecto del sistema, pudiendo experimentar y ensayar hipótesis

dinámica de trabajo y utilizarlas como apoyo para la toma de decisiones y, sobre todo, en la definición de nuevas políticas de acción que permitan avanzar hacia un país más sostenible.

Mediante el modelo se han podido determinar los valores de ahorro de energía eléctrica acumulado y las toneladas de CO₂ evitadas por dicho ahorro, en función de la aplicación de estándares mínimos de desempeño energético y etiquetado para refrigeradores domésticos en los países de estudio para el período 1995 – 2050. Para garantizar estos resultados, se ha utilizado el modelo aplicado en México para calibrarlo y validarlo a través de la comparación con los datos obtenidos en un estudio realizado por Lawrence Berkeley National Laboratory.

Se ha modelado el comportamiento de los refrigeradores existentes en México, Colombia y Ecuador, con base en variables que establecen el número de hogares existentes, la tasa de posesión de refrigeradores, la tasa de acceso a la electricidad y los refrigeradores nuevos que se adquieren normalmente, en función de la demanda existente por hogares nuevos.

En México, Colombia y Ecuador, el consumo energético en el sector residencial es causado por el uso continuo de electrodomésticos. Uno de los equipos que más consume electricidad dentro de un hogar a nivel nacional es el refrigerador, con un consumo que oscila entre un 24% al 35% de energía eléctrica con respecto al consumo total del hogar, sin embargo, según estadísticas, gran parte de los hogares utilizan refrigeradores de más de 10 años de vida útil, razones que han hecho que el consumo energético se incremente considerablemente hasta valores que oscilan un 60%.

De acuerdo con la revisión de modelos y estudios que aplican políticas de eficiencia energética y las diferentes metodologías de simulación consultadas se puede afirmar que la Dinámica de Sistemas es una metodología pertinente que utiliza herramientas informáticas versátiles para modelar cualquier tipo de sistema, utilizando para ello lazos de retroalimentación entre sus variables.

La facilidad para estructurar y desarrollar cualquier modelo que permita estudiar un comportamiento específico de un sistema dinámico, ha influenciado en la decisión de utilizar la metodología de la Dinámica de Sistemas y sus herramientas para la elaboración del modelo dinámico que permita el estudio del impacto de las políticas energéticas en la industria de la fabricación de refrigeradores domésticos en países de Latinoamérica como México, Colombia y Ecuador.

La identificación de las variables dentro de una dinámica de sistemas es de mucha importancia, puesto que de éstas dependen los resultados que se obtendrán posteriormente. El análisis y el pronóstico del comportamiento del sistema obedecen directamente a las variables establecidas.

En Dinámica de Sistemas la identificación de estas variables de interés y las relaciones que las unen entre sí, determinan la complejidad del sistema; es decir, mientras más variables, más complejo será el sistema. Esta relación a más de determinar la complejidad del modelo, también le aproximan más a la realidad de la situación estudiada.

El uso correcto del software VenSim® PLE PLUS permite tener una visión más acertada de la realidad del sistema analizado en los países de estudio.

Luego de realizar un análisis de las tecnologías utilizadas en la fabricación de refrigeradores domésticos, específicamente los del tipo Top-Mount que representa el equipo más comercializado en varios países Latinoamericanos, se ha podido determinar que poseen tecnologías similares de condensador, evaporador, tubo capilar, compresor y aislante térmico, únicamente los refrigeradores

de la marca LG, SAMSUNG y ELECTROLUX utilizan variantes sobre todo en el compresor, siendo los equipos de mayor eficiencia en el mercado.

Mediante la identificación de los componentes que poseen los refrigeradores más eficientes comercializados en el mercado, se pudo establecer que las variables tecnológicas más importantes que influyen en el consumo energético son el compresor y el fluido refrigerante.

Para las industrias fabricantes, el impacto de la implementación de un compresor más eficiente no requiere mayor inversión en su proceso de producción, ya que solo se debe considerar un cambio dimensional en la estructura interna del refrigerador por contar con un compresor más compacto que ocupa menos espacio. Sin embargo esta implementación involucra el uso del refrigerante R600a, el cual requiere cambios drásticos en la industria, además de una inversión considerable tomando en cuenta que el refrigerante es un hidrocarburo altamente inflamable que requiere cuidados para su almacenamiento, transporte y carga en los refrigeradores.

A más de considerar un cambio en el compresor y el refrigerante, es sumamente importante establecer planes comunicacionales a fin de conseguir que los usuarios de los refrigeradores domésticos puedan adquirir costumbres de uso adecuado y sobre todo que conozcan estrategias para ubicar el equipo de refrigeración en sitios al interior de la cocina que permitan un gradiente de temperatura idóneo.

Las empresas fabricantes de refrigeradores domésticos deben estar conscientes que la mejora de la eficiencia energética de sus productos les posibilitaría comercializarlos en nuevos mercados y sobre todo en aquellos que utilizan índices de eficiencia energética más exigentes.

Cumplimiento de Objetivos

A continuación se presenta el detalle de cumplimiento de los objetivos específicos planteados y los logros alcanzados en relación a cada uno:

Objetivo específico 1: Describir la industria de refrigeración doméstica desde la participación en el mercado latinoamericano, su situación tecnológica, la generación de empleo y la cadena productiva (suministros).

En el capítulo 1 de este documento, se analizan tres temas principales que describen la industria de la refrigeración doméstica, en primera instancia se investigó el tipo de refrigerador más vendido en varios países Latinoamericanos sobre todo en México, Colombia y Ecuador, la tecnología utilizada para la fabricación del refrigerador más comercializado y de manera general se determinó las tecnologías eficientes utilizadas en los refrigeradores domésticos comercializados en el mercado Latinoamericano. Todo esto permitió contar con información valiosa para la construcción del modelo de simulación como la definición del tipo de refrigerador, su consumo eléctrico con base en la tecnología que se utiliza y sobre todo contar con datos de consumos eléctricos de refrigeradores con alta eficiencia energética identificados con etiquetas energéticas A++ y A+++, para utilizarlos en los escenarios posibles que lleven a los países a conseguir ahorros energéticos significativos.

En segunda instancia se estudió el mercado de refrigeradores domésticos en México, Colombia y Ecuador, revisando sobre todo los volúmenes de importación y exportación de equipos de refrigeración, además de la identificación de las empresas fabricantes, su participación en el mercado, generación de empleo y cadena productiva. Esto permitió contar con datos fundamentales para la calibración del modelo, como en el caso del modelo de México, la estadística histórica de neveras comercializadas sirvió para la calibración de dicho modelo, a través de una comparación con los resultados obtenidos de la variable del modelo denominada “cantidad de refrigeradores nuevos” adquiridos en el período de análisis.

En tercera instancia y con la intención de determinar, los resultados en el ahorro de energía eléctrica por la implementación de planes y programas de eficiencia energética en refrigeración doméstica, frente al consumo eléctrico en el sector residencial y de contar con alternativas tecnológicas que mejoren la eficiencia energética de refrigeradores domésticos que pudieran ser incorporados en la realidad de países latinoamericanos, se realizó una revisión de la situación eléctrica de Latinoamérica, México, Colombia y Ecuador, el estado del arte de las mejoras en la eficiencia energética y las alternativas tecnológicas que se pudieran implementar en la industria de la refrigeración doméstica a fin de producir equipos eficientes energéticamente.

Objetivo específico 2: Analizar la evolución de los índices de eficiencia energética y las políticas energéticas establecidas en la región.

En el capítulo 2 se hace el estudio de los planes, programas y normas implementadas en varios países latinoamericanos, principalmente en México, Colombia y Ecuador, permitiendo determinar los ahorros de energía eléctrica por el uso de refrigeradores domésticos que se han conseguido durante los períodos de aplicación en dichos países, esto ha sido fundamental para garantizar los resultados de la simulación del modelo desarrollado.

Objetivo específico 3: Modelar y simular mediante el uso de la dinámica de sistemas, el comportamiento del mercado de los productos de refrigeración doméstica en la región, ante la implementación de nuevas políticas de eficiencia energética.

En el capítulo 3, se inicia ratificando la metodología de la Dinámica de Sistemas para el cumplimiento de este objetivo, por lo que se hace referencia al Anexo B, en donde se da soporte a la utilización de la metodología de Dinámica de Sistemas y el uso de las herramientas informáticas con las que cuenta, a través de una revisión bibliográfica de artículos científicos publicados en revistas de alto impacto que han desarrollado estudios en políticas de eficiencia energética, tecnología e innovación, desarrollo sostenible y otras relacionadas con la temática trabajada en esta tesis.

Una vez ratificada la metodología a utilizar, se desarrolló el modelo de simulación a partir del cual es posible determinar la cantidad de refrigeradores domésticos nuevos que son adquiridos por dos vías principales, el crecimiento poblacional y en consecuencia la cantidad de hogares y por la influencia que ocasionan los planes y programas que motivan la renovación de refrigeradores ineficientes con más de 10 años de uso.

El modelo propuesto es la principal contribución metodológica de esta investigación el cuál puede ser adaptado para el análisis de otras problemáticas relacionadas. Los aportes logrados con la integración de variables de decisión pueden ser usados para estudiar otros problemas de conversión o renovación en otros productos e industrias.

Objetivo específico 4: Evaluar los impactos que afectarían la industria nacional frente a los retos que imponen las políticas de eficiencia energética en la región.

En el capítulo 4 se desarrolla el modelado del sistema general construido durante la realización de este proyecto, por lo que en primera instancia se obtienen los resultados para el caso base de la demanda de refrigeradores domésticos, la cantidad de refrigeradores ineficientes convertidos para disposición y reciclaje, cantidades de refrigeradores por grupos de vida útil en operación y el consumo promedio de electricidad por el uso de refrigeradores principalmente, todo esto para las realidades de México, Colombia y Ecuador como casos de estudio.

Con la intención de establecer estrategias y poder medir su impacto se plantearon 4 escenarios de simulación, el primero y el segundo establecen el retiro de los refrigeradores de más de 15 y 20 años de operación respectivamente, esta conversión se lo impulsaría introduciendo planes y programas de renovación con equipos eficientes categoría A que se comercializan en cada uno de los países de estudio, para el caso de los escenarios 3 y 4, se plantea la conversión de los refrigeradores de más de 15 años para los dos escenarios, con la única diferencia que serán sustituidos por refrigeradores eficientes etiquetados como A++ y A+++ respectivamente. Los resultados obtenidos de la simulación con base en escenarios presentan fundamentalmente el ahorro de energía eléctrica conseguido y las toneladas de CO₂ evitadas por el ahorro.

Se puede observar que el hecho de adoptar refrigeradores eficientes etiquetados A++ y A+++ representan los mayores ahorros de energía eléctrica que se pueden conseguir con la incorporación de programas de renovación, acompañados de normas y sistemas de etiquetado con base en índices de eficiencia energética más exigentes utilizados en países desarrollados. Esta realidad a más de representar ahorros significativos de energía eléctrica para los países, sería una oportunidad de crecimiento para la industria de la fabricación de refrigeradores domésticos, ya que tendrían la posibilidad de abrir nuevos mercados internacionales.

El logro de cada uno de los objetivos específicos garantiza el cumplimiento del objetivo general propuesto para esta investigación: “Determinar el impacto tecnológico en la industria de refrigeración doméstica en Latinoamérica, por la implementación de políticas de eficiencia energética”

Divulgación de Resultados

Varios trabajos y contribuciones al tema central desarrollado en esta tesis, han sido difundidos mediante presentaciones en diferentes congresos de carácter nacional e internacional, además de publicaciones que se han conseguido principalmente en revistas clasificadas Latindex, los cuales se detallan en seguida:

1. E. Corte, C. Flores, N. Jara, y C. Isaza, «Sistemas de refrigeración doméstica-Estado del arte de las mejoras en la eficiencia energética», Revista de la Facultad de Ciencias Químicas, n.o 9, pp. 19-40, 2014.
2. H. Mejía, C. Isaza, S. del Rio, N. Jara, y J. Ospina, «Simulación del flujo de aire al interior de un refrigerador doméstico no-frost», presentado en VII Congreso Ibérico y V Congreso Iberoamericano de Ciencias y Técnicas del Frío-CYTEF 2014, Tarragona, España, 2014, vol. 1, pp. 522-528.
3. S. del Rio, C. Isaza, N. Jara, H. Mejia, y J. Ospina, «Estudio de la Carga Térmica en Refrigeradores Domésticos para Climas Tropicales», presentado en VII Congreso Ibérico y V Congreso Iberoamericano de Ciencias y Técnicas del Frío-CYTEF 2014, Tarragona, España, 2014, vol. 1, pp. 480-486.
4. F. Puente, B. Castillo, N. Jara, y C. Isaza, «Estudio termodinámico de un sistema de refrigeración no Frost con R600a», presentado en VIII Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica, Cuenca, Ecuador, 2014, vol. 1.
5. N. Jara y C. Isaza-Roldan, «Programas de Eficiencia Energética y Etiquetado en el Ecuador- Revisión del Estado Actual», presentado en II Encuentro De Tecnología e Ingeniería & X Simposio Internacional en Energías - Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia, 2014, vol. 1.
6. N. G. Jara, C. Isaza-Roldán, L. Gallón, y D. P. Giraldo, «Modelo dinámico para el estudio de la aplicación del plan de renovación de refrigeradores domésticos en Colombia», presentado en XIII Congreso Latinoamericano y Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, Cartagena, Colombia, 2015, vol. 1, pp. 263-279.
7. N. G. Jara, C. Isaza-Roldan, L. Gallón, y D. P. Giraldo, «Modelo dinámico para el estudio de la aplicación del plan de renovación de refrigeradores domésticos en el Ecuador», presentado en 5th Latin American Energy Economics Meeting, Medellín, Colombia, 2015, vol. 1.
8. N. G. Jara et al., «Laboratorio de pruebas para artefactos de refrigeración doméstica en el Ecuador», presentado en IEEE ARGENCON 2016, Buenos Aires - Argentina, 2016, vol. 1.
9. N. G. Jara, F. Z. Reinoso, y C. Isaza-Roldan, «Análisis del comportamiento del refrigerante R134a al combinarse porcentualmente con refrigerantes hidrocarburos R600a y R290.», presentado en Tercer Congreso Internacional sobre Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura (AMDM2016), Cali, Colombia, 2016, vol. 1.
10. N. G. Jara, I. Sánchez, H. Pérez, C. Isaza-Roldan, L. Gallón, y D. P. Giraldo, «Assessment of energy savings by use of domestic refrigerators in Mexico», presentado en XIV Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, Medellín, Colombia, 2016, vol. 1, pp. 8-15.
11. N. G. Jara y C. Isaza-Roldan, «Análisis comparativo de sistemas de refrigeración doméstica utilizando refrigerantes R600a y R134a», Revista I+T+C de la Dirección de Investigaciones de la Corporación Universitaria Comfacauca – Unicomfacauca, vol. 9, pp. 7-15, dic. 2015.
12. N. G. Jara, F. Z. Reinoso, C. Isaza-Roldan, y J. L. Espinoza Abad, «Impacts on the consumption of electric power by the use of efficient refrigerators-Ecuador case», Ingenius - Revista de Ciencia y Tecnología, n.o 18, pp. 53-63, 2017.

13. N. G. Jara et al., «Análisis de la influencia de las mejoras tecnológicas en el incremento de la eficiencia energética de refrigeradores domésticos en el Ecuador.», presentado en XV Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas, CLADS 2017, Santiago de Chile, Chile, 2017, vol. 1.
14. N. G. Jara et al., «Estudio del comportamiento del índice nacional de eficiencia energética para refrigeradores domésticos en el Ecuador.», presentado en XV Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas, CLADS 2017, Santiago de Chile, Chile, 2017, vol. 1.
15. N. G. Jara, F. Z. Reinoso, C. Isaza-Roldan, L. E. Jara, Á. Aguinaga, y T. Moreno, «Instrumentación de un Refrigerador Doméstico para el Análisis del Comportamiento de las Variables de Presión y Temperatura de Operación», Revista de la Facultad de Ciencias Químicas, n.o 18, pp. 1-17, 2017.
16. F. E. Narvaez, N. G. Jara, F. Z. Reinoso, P. A. Narvaez, L. E. Jara, y C. Isaza-Roldan, «Simulación numérica de flujo de aire y transferencia de calor en un enfriador vertical con puerta panorámica.», presentado en IX Congreso Ibérico | VII Congreso Iberoamericano de las Ciencias y Técnicas del Frío, Valencia, España, 2018, vol. 1.
17. Jara, J. Bermeo, N. G. Jara, F. Z. Reinoso, L. E. Jara, y C. Isaza-Roldan, «Propuestas de mejora del tubo capilar para incrementar la eficiencia energética de un refrigerador doméstico mediante software especializado.», presentado en IX Congreso Ibérico | VII Congreso Iberoamericano de las Ciencias y Técnicas del Frío, Valencia, España, 2018, vol. 1.

Trabajos Futuros

- Analizar el comportamiento del mercado de RD ante el incremento del costo de los equipos por las mejoras tecnológicas.
- Analizar el comportamiento del mercado de RD en Ecuador ante la utilización de R600a para los equipos de refrigeración.
- Determinar los parámetros que influyen variables blandas como la decisión de conversión de un RD por parte del usuario.
- Aportar a las acciones propuestas por los países en desarrollo, que conducen a reducir las emisiones de GEI (NAMA's - Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación).
- Analizar el comportamiento del mercado de la refrigeración comercial e industrial ante la necesidad de implementar políticas de eficiencia energética.
- Determinar el impacto económico, social e industrial de otros productos o electrodomésticos de uso masivo ante la necesidad de contar con equipos cada vez más eficientes energéticamente.

Anexo A

A. Sistemas de refrigeración por compresión de vapor

En la Figura A-1, se puede observar los principales componentes de un refrigerador Top-Mount.

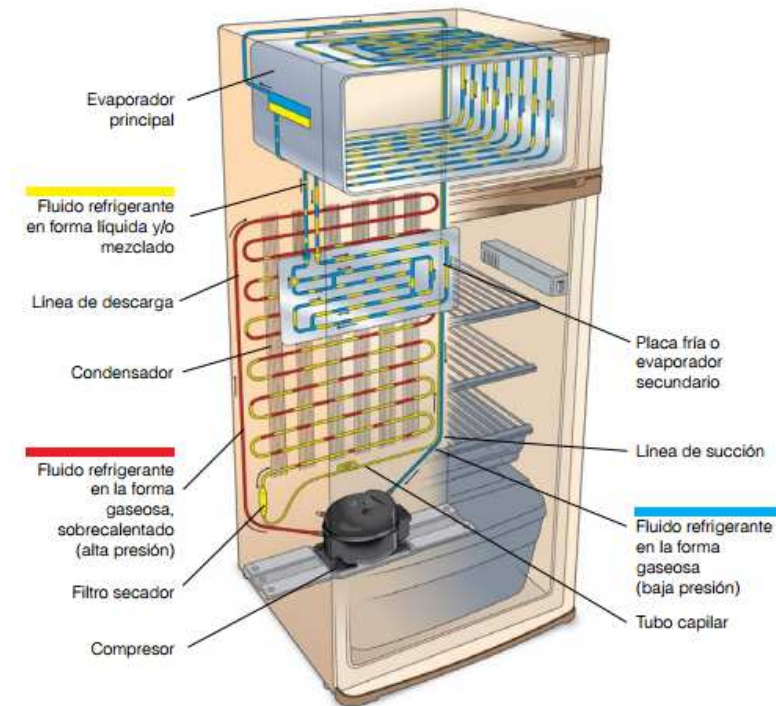


Figura A-1: Principales componentes para el funcionamiento de un ciclo de refrigeración. Tomado de [98]

El compresor frigorífico es el elemento principal del ciclo de enfriamiento y se encarga de incrementar la presión del fluido refrigerante para asegurar la circulación por todo el sistema durante el ciclo termodinámico, al ser el principal componente del equipo de refrigeración doméstica que consume energía eléctrica se convierte en el mayor consumidor energético del refrigerador.

El coeficiente de rendimiento (COP) de un refrigerador se define como el cociente entre calor útil y el trabajo requerido. El calor útil es la potencia extraída del ambiente frío y el trabajo requerido es la energía que se necesita para realizarlo.

El valor numérico de COP suele ser mayor que uno y mientras mayor sea este valor, mayor será el rendimiento y por ende el ahorro energético, sin embargo, este valor posee un límite que se encuentra definido por una relación entre las temperaturas, mismas que se definen como focos de temperatura, denominados foco frío y foco caliente. El proceso inicia con la extracción del calor desde el foco frío hasta el foco caliente, a través de un trabajo desarrollado por el compresor, como se puede observar en la Figura A-2; de esta manera se obtiene la ecuación para calcular el COP [100].

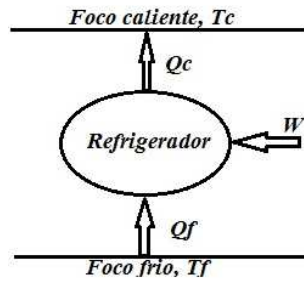


Figura A-2: Proceso de extracción de calor y trabajo de un refrigerador. Adaptado de [100].

$$COP = \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad (1)$$

$$COP = \frac{Q_f}{W_c} \quad (2)$$

Los componentes del sistema de compresión de vapor, mismo que está constituido principalmente por el compresor, el condensador, la válvula de expansión y el evaporador (ver Figura A-3).

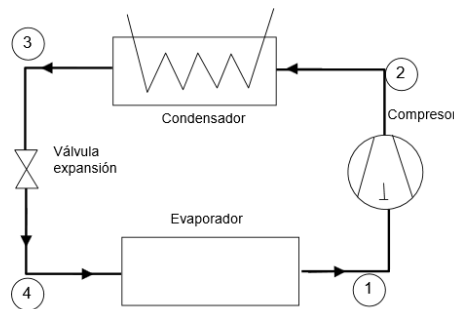


Figura A-3: Ciclo de compresión de vapor [155].

Además, el ciclo de refrigeración con el que opera el sistema por compresión de vapor, está conformado por 4 procesos, (ver Figura A-4), los cuales se explican a continuación:

- Proceso 1-2, el refrigerante entra al compresor como vapor saturado y se comprime isentrópicamente hasta la presión del condensador en el estado 1, la temperatura del refrigerante aumenta durante el proceso de compresión isentrópica, hasta un valor bastante superior a la temperatura del medio circundante, después el refrigerante entra en el condensador como vapor sobrecalentado en el estado 2.
- Proceso 2-3, el refrigerante en estado de vapor-sobrecalentado entra en el condensador en el proceso 2 y sale como líquido saturado en el estado 3, como resultado del rechazo de calor hacia los alrededores, la temperatura del refrigerante en este estado se mantendrá por encima de la temperatura de los alrededores.
- Proceso 3-4, el refrigerante líquido saturado en el estado 3 se estrangula hasta la presión del evaporador al pasarlo por una válvula de expansión o por un tubo capilar, la temperatura del refrigerante desciende por debajo de la temperatura del espacio refrigerado durante este proceso.
- Proceso 4-1, en el estado 4 el refrigerante entra al evaporador como un vapor húmedo de baja calidad, y se evapora por completo absorbiendo calor del espacio refrigerado, el refrigerante sale del evaporador como vapor saturado y vuelve a entrar al compresor, completando el ciclo [155].

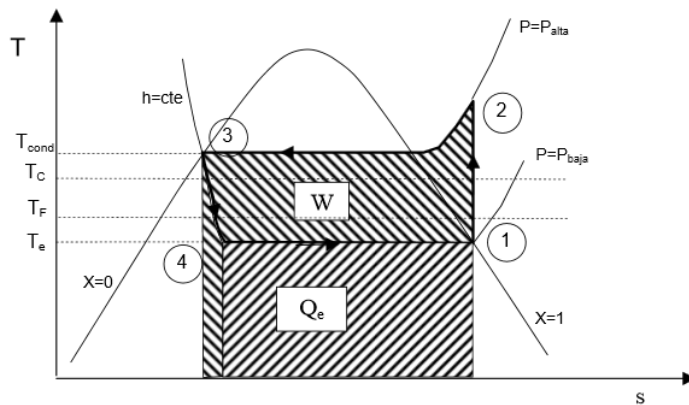


Figura A-4: Diagrama teórico T-s del ciclo de compresión de vapor [155].

El ciclo de compresión de vapor real presenta pérdidas de presión en el condensador y el evaporador, la entrada al compresor puede estar por encima de la temperatura de vapor saturado, la salida del condensador puede estar por debajo de la temperatura de líquido saturado, en la Figura A-5 se puede observar estas particularidades.

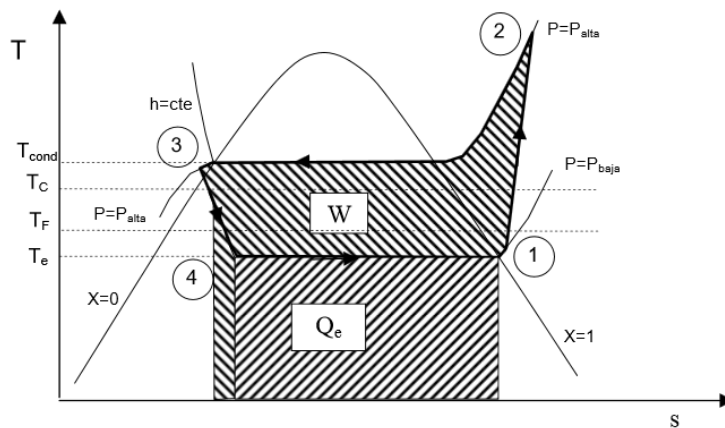


Figura A-5: Diagrama real T-s del ciclo de compresión de vapor [155].

Anexo B

B. Estado del arte de las mejoras tecnológicas en refrigeradores domésticos

B1. Sistema de refrigeración en general

Björk, Palm y Nordenberg [40] analizaron la distribución de la temperatura dentro del refrigerador utilizando una cámara termográfica (ver Figura B-1), encontraron fuentes causantes de pérdida significativa de energía. Observaron en imágenes captadas que "en los bordes del evaporador existen temperaturas más altas que la parte central, revelando la mala utilización de los bordes para la transferencia de calor, y recomiendan que los canales de refrigerante deben moverse más hacia los bordes". Indicaron que el evaporador es el causante de pérdida de energía, ya que, al encender el compresor, el evaporador tarda en activarse, por lo que sugieren que "las líneas de refrigerante sean reordenados con un flujo descendente ya que de esta manera se mejoraría la eficiencia energética.



Figura B-1: Posición de la cámara IR, para la grabación de las temperaturas del evaporador y condensador [40].

Hermes, Melo, Knabben y Gonçalves [41], en cambio indican reducir el área de sección transversal del canal de refrigerante interno en la parte corriente arriba del evaporador, debido a que en este lugar es baja la velocidad del vapor y no presenta pérdidas de calor al añadir más aletas, pero si llega a aumentar en un 2% al retirarle 10 aletas a la bobina del evaporador [41].

El compresor es uno de los parámetros claves dentro del sistema de refrigeración. Hermes y Melo [42] desarrollaron análisis para detectar posibles fallos que pueda tener el compresor en condiciones defectuosas, tales como el bloqueo del evaporador, ensuciamiento del condensador, envejecimiento del aislamiento y desgaste del compresor, analizaron todos estos fallos al mismo tiempo. Observaron que el consumo de energía aumenta en 0.274 kWh/día (+17%). Se verificó además que, por el envejecimiento del aislamiento del gabinete, el consumo de energía se incrementa en un 9%. Como el comportamiento del compresor es lineal, es muy importante considerar la cilindrada de este componente ya que estudios realizados por Hermes, Melo, Knabben y Gonçalves [41] afirmaron que el consumo de energía se redujo en un 13%, al reducir la cilindrada de 5,96 a 3,77 cm³.

Hoy en día promueven utilizar refrigerantes más eficientes y amigables con el medio ambiente, es por eso que muchos fabricantes suministran compresores compatibles con hidrocarburos, específicamente refrigerantes con mezclas de HC y R600a ya que tienen una mayor eficiencia del ciclo de Carnot, comparado con el R134a. Dado la peligrosidad de este tipo de refrigerantes por ser inflamables, realizaron estudios para superar estos inconvenientes y reducir de esta manera los riesgos para su aplicación. Wang, Eisele, Hwang y Radermacher [43] proponen el uso de sistemas de circuito

secundario (ver Figura B-2), intercambiadores de calor, instalación de sensores de refrigerantes inflamables y extractores de aire para minimizar los riesgos.

En Europa usan mucho este sistema de refrigeración de dos fases con refrigerante secundario, debido a los beneficios ambientales y características de ahorro de energía, no se implementa en todo el mundo por sus elevados costos, es considerada como inversión grande pero es una iniciativa muy importante. Este sistema presenta “un menor consumo de energía de la bomba, tamaños de tubos más pequeños, excelentes propiedades de transferencia de calor, y buenas compatibilidades en materiales” [43].

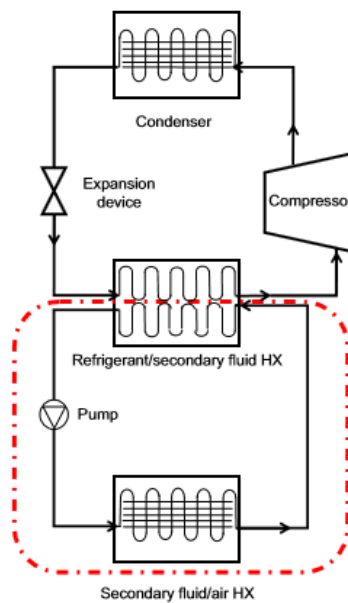


Figura B-2: Esquema del sistema de refrigeración de circuito secundario [43].

Los refrigerantes en el trabajo intermitente del compresor, en el proceso de arranque “deben lograr distribuir todo el líquido en el evaporador para que exista una temperatura alta de evaporación, dando por lo tanto una alta eficiencia”, pero Björk, Palm y Nordenberg [40] predicen que “la energía de refrigeración acumulada en la línea de succión de intercambio de calor (SLHX) es un factor importante para disminuir las pérdidas de energía cíclicas”, por lo que sugieren necesario un rediseño del SLHX, aportando mejoras al compresor ya que recibiría menos refrigerante líquido en el arranque, tomando en cuenta también que tal cambio de diseño no produzca un aumento en la caída de presión [44].

B2. Compresores

Para reducir el consumo de energía en los compresores se han realizado muchas investigaciones teniendo en cuenta principalmente la optimización del funcionamiento del compresor, para ello se ha variado la velocidad del compresor en función de la demanda de refrigeración y se lo ha mantenido funcionando casi de modo continuo, logrando ahorros de energía significativos en comparación con los de control termostático clásico (ciclos ON/OFF) [45], para lograr dicho fin se ha utilizado inversores como TRIAC, PWM (Modulación de Ancho de Pulso), y algoritmos de control para la regulación difusa de la velocidad del compresor [46], también se puede conseguir la capacidad de modulación sin utilizar controladores electrónicos (sin cambiar la frecuencia de funcionamiento) controlando el desplazamiento del pistón (volumen muerto) [47], además se ha desarrollado un

compresor lineal prototipo, que utilizando una combinación entre la inductancia y la capacitancia logró una auto modulación del 70-90%, con ello se lograría disminuir el consumo de energía y reducir costos ya que no existen controladores electrónicos [48].

Otro punto de investigación es utilizar compresores lineales y mejorar su eficiencia, para ello Bradshaw en el 2011 presentó un modelo de simulación integral de un compresor lineal a escala miniatura [49], el mismo que fue validado posteriormente con los resultados obtenidos en un prototipo de compresor lineal que fue construido para el efecto [50], el mismo modelo sirvió en el 2012 para estudiar la sensibilidad del compresor lineal a los cambios de algunos parámetros geométricos, que mostro que el compresor lineal es altamente sensible a los cambios en la separación de fugas entre el pistón y el cilindro, así como la excentricidad del resorte; los cuales deben reducirse al mínimo para un rendimiento óptimo [48], también se ha investigado la capacidad del compresor lineal para la recuperar la energía que generalmente se pierde en el proceso de re-expansión del gas, gracias a la presencia de resortes mecánicos, los mismos que permite usar el compresor lineal para el control de la capacidad eficiente a partir de más o menos 35 a 100%, con ello el compresor puede funcionar a una potencia de entrada más baja por lo menos en condiciones de carga parcial ahorrando energía [51], por su parte LGE creó un Compresor Lineal, que tiene mucha más alta eficiencia cuando la capacidad de refrigeración es pequeña, el mismo que puede reducir el consumo de energía hasta en un 25%, reduciendo las emisiones de CO₂ del compresor en aproximadamente 90 kg/año [47].

Por su parte Marcos G. [52] presentó una guía para optimizar el diseño de un sistema de refrigeración por compresión de vapor, utilizando compresores de capacidad variable, logrando conseguir hasta un 40% de ahorro de energía y una reducción del ruido de hasta 5 dB con este sistema [52], también se realizó una revisión literaria sobre los análisis exergéticos de sistemas de refrigeración por compresión de vapor, en la cual muchas investigaciones mostraron que la mayor pérdida de exergía se produce en el compresor, por lo tanto el uso de nano lubricantes y nano fluidos pueden reducir de forma indirecta dichas pérdidas [46].

B3. Condensadores y Evaporadores

Se realizaron estudios del intercambiador de calor en evaporadores de aletas y tubos en condiciones heladas, ya que presentan una acumulación de escarcha, y por ende disminuyen el coeficiente de transferencia de calor de manera significativa y aumenta la pérdida de carga rápida. Cui, Li, Liu y Zhao [53] analizaron el funcionamiento de un intercambiador de calor de aletas y tubos, indicaron que se forma escarcha con mayor rapidez en el período inicial, mientras que crece lentamente en el período totalmente desarrollado, dando lugar a la degradación de la transferencia de calor, caída de presión, mayor humedad relativa del aire, menor velocidad de flujo de aire y reduce la temperatura del refrigerante, lo que dará lugar a una gran cantidad de acumulación de escarcha.

El evaporador tiene la capacidad de proporcionar la cantidad de refrigeración necesaria para la preservación de los bienes almacenados en el refrigerador a la temperatura deseada [54]. Silva, Hermes y Melo [55] informaron que la escarcha acumulada en el serpentín del evaporador disminuye de forma significativa al rendimiento del intercambiador de calor, por el efecto combinado de la baja conductividad térmica de la capa de escarcha y la tasa de flujo de aire del ventilador suministrado [56], sugieren que bajo estas condiciones de escarcha, se debe diseñar como un sistema acoplado, a fin de conservar la capacidad de refrigeración para períodos más largos, aumentando el tiempo entre los procesos de descongelación sucesivos y por ende se mejorará el rendimiento térmico de todo el sistema [55]. Özkan y Özil [57] aseguraron que la formación de escarcha en el serpentín del

evaporador se da en forma de aguja no muy densa, ocasiona que la presión de aire disminuya en las aletas y en los extremos de las aletas aumenta el coeficiente de transferencia de calor. La velocidad del aire determinado en 5m/s, luego de 5h de período de prueba, la velocidad de evaporación es constante y la escarcha recogida en el evaporador muestra un aumento lineal con el tiempo.

Knabben, Hermes y Melo [56] observaron que el aumento repentino del número de aletas entre las filas 4 a 5 induce una obstrucción del evaporador local, de esta manera siguieron que para que haya una eficiente descongelación cerca de la unidad, deben colocarse de forma simultánea dos calentadores, uno de 175W en las seis primeras filas y 60W en las últimas cuatro filas. Barbosa, Melo, Hermes y Waltrich [58] evaluaron el efecto del número de filas de tubos en el rendimiento de los evaporadores térmicos hidráulicos sin escarcha, establecen que las últimas filas de tubos ayudan con menos eficacia a la transferencia de calor, mientras que todavía ejerce alguna influencia en la caída de presión. Indicaron que los costos pueden disminuir mediante el uso de evaporadores más ligeros, ya que en algunos casos han mejorado las características de rendimiento [58].

Una alternativa para un diseño de un evaporador sin escarcha de tubo de aleta se da con los de flujo acelerado (AFE) [43, 48], el cual hace que el coeficiente de transferencia de calor del lado de aire sea mejorado de forma local; su desventaja está en que la aceleración del flujo, aumenta la caída de presión del lado del aire, lo que exige más potencia de bombeo [59]. Waltrich, Barbosa, Hermes y Melo [54] indicaron que a bajas tasas de transferencia de calor, las actuaciones de la línea de base y muestras de AFE son muy similares debido a que requiere una potencia de bombeo pequeña para una tasa de transferencia de calor especificado. De manera que en tales condiciones el concepto AFE puede ser más ventajoso que los evaporadores rectos debido a sus bajos costos de los materiales.

Waltrich, Barbosa y Hermes [59] usaron una optimización geométrica basada en el COP de la AFE, demostraron que en cuanto al COP el sistema experimentó sólo una variación modesta con respecto a los parámetros geométricos, “que van desde 0,95 hasta 1,03 al cambiar la longitud del evaporador, y 1,02 a 1,03 al variar la altura de la salida del evaporador”. A pesar de los resultados los autores Waltrich, Barbosa, Hermes y Melo [54] siguieron más investigación para determinar el efecto de la formación de condensación y escarcha en el rendimiento térmico-hidráulico de AFE [54].

Björk y Palm [60] estudiaron el flujo de ebullición de transferencia de calor en un evaporador de un refrigerador doméstico con flujo horizontal, encontraron que el coeficiente de transferencia de calor baja al aumentar la calidad, por lo que pide no utilizar flujos de masa tan bajas como $21 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

El condensador es el componente principal en el sistema de refrigeración ya que rechaza el calor absorbido por el refrigerante en el evaporador hacia fuera del compartimiento del refrigerador [61]. Porkhial, Khastoo y Razavi [62] presentan la actuación transitoria de un condensador, en el que señalaron que el COP aumenta rápidamente cuando se prende y apaga el refrigerador, además este coeficiente al disminuir progresivamente, la diferencia de temperatura entre el aire y el refrigerante empieza a disminuir en el condensador. Afirmaron que la reducción en el consumo de energía puede lograrse mediante el uso de un compresor controlable. Bassiouny [61] realizó el estudio del efecto del espacio que rodea el condensador en el calor rechazado, demostró que al tener un espacio suficiente alrededor del condensador, aumenta la fuerza motriz de transferencia de calor del condensador y si la temperatura del aire de la habitación aumenta, la cantidad de calor rechazado disminuirá. Aseguró que a medida que el espacio que rodea el condensador es bloqueado, el aire que fluye es más caliente, de manera que el condensador sin duda degradará su rendimiento, el espacio en el que se coloca un refrigerador es importante, ya que afecta a la fuerza de conducción para disipar

el calor [61]. Hermes [63] concluyó que un intercambiador de calor de alta eficacia no proporciona el mejor diseño termo hidráulico necesariamente para bobinas del condensador y del evaporador.

B4. Dispositivo de expansión

El tubo capilar reduce la presión que ingresa al compresor desde el evaporador y regula el flujo. Un aspecto importante a tomar en cuenta es la carga de refrigerante a tener durante la labor transitoria. Esta carga depende del volumen interno de su equipo, como: tuberías, compresor, intercambiadores de calor, receptores de líquido y varios accesorios, depende de las características del refrigerante, sus estados y la presión de trabajo a nivel físico del sistema [64]. Varios autores estudiaron este fenómeno con el fin de reducir el consumo de energía "mediante la variación de la restricción de la expansión y la carga de refrigerante" [65]. Esta reducción de la carga no afecta aspectos energéticos y respeta limitaciones ambientales. Aporta a refrigerantes como HCFC y HFC o naturales como hidrocarburos y amoníaco para reducir sus emisiones a la atmósfera y por motivos de seguridad [64].

Björk y Palm [66] demostraron mediante la variación de distintos parámetros, pérdidas e inconvenientes en el trabajo del sistema, hallaron que a una carga muy baja, el sobrecalentamiento del evaporador aumenta, en cambio con una carga muy elevada la línea de aspiración se convierte en una región de carga térmica no aprovechada, conduciendo en los dos casos a un mayor consumo de energía [66]. Björk y Palm [67] encontraron dos pérdidas que se dan en el sistema, en condiciones transitorias, la primera en el desplazamiento de refrigerante después de un arranque y parada del compresor, la cual afecta al rendimiento general del sistema y la segunda se da cuando el compresor está activo, en el período de carga térmica de los intercambiadores de calor es más alta de lo que sería para un sistema controlado de forma continua, registrando en general pérdidas de eficiencia de 5-37% [67], consideradas pérdidas muy altas durante el trabajo del sistema.

Björk y Palm [66] determinaron la longitud del tubo capilar y cantidad de carga para un refrigerador doméstico, debido a que es muy limitado hallar un método más sofisticado para el posible ahorro de energía y para el procedimiento de optimización se necesitan correlaciones más rápidas y precisas. Björk y Palm [68] sugieren un tubo capilar estrangulado, con una temperatura de condensación flotante, puede operar grandes variaciones de carga sin llegar a desestabilizarlo, al igual que un sistema de control para el dispositivo de expansión termostática más sofisticado. Björk y Boeng y Melo [65] usaron una metodología que reduce al mínimo el consumo de energía, a través del método de métrica variable, predice el punto de trabajo óptimo correctamente, ya que correlaciona el diámetro del tubo y la carga de refrigerante, permitiendo determinar el diámetro y carga de refrigerante para un consumo de energía óptimo.

Poggia, Tejedaa, Leducqa, y Bontempsb [64] sugieren dos opciones, la primera reducir la carga, el volumen interno de todos los componentes (intercambiadores, receptores, la línea de líquido), ya que permiten un beneficio considerable sin disminuir su rendimiento. La segunda opción es utilizando una válvula de expansión electrónica (EEV). Choi y Kim [69] indicaron que el rendimiento del sistema de EEV es mucho más alto en comparación con el sistema de tubo capilar, sostuvieron que se puede optimizar el rendimiento de la bomba de calor en condiciones fuera de diseño, manteniendo un recalentamiento constante mediante el control de la apertura de la EEV. Manifiestan no generalizar estos resultados, debido a las diferencias en la configuración del sistema, ya que utilizaron un único sistema de bomba de calor [69].

B5. Distribución del flujo de aire al interior del refrigerador

Es importante determinar la temperatura y velocidad de aire idóneas, para que exista una buena conservación y buen control de calidad de los alimentos. Estudios realizados indican que un abuso acelerado de temperatura de al menos 5°C durante aproximadamente 10 min puede duplicar el crecimiento de ciertas bacterias [70].

En refrigeradores sin ventilación, observan a menudo una fuerte heterogeneidad de temperatura, en las zonas calientes (riesgo sanitario) y zonas frías (riesgo bajo cero) debido a la muy baja circulación de aire [71]. Para el estudio utilizan el refrigerador estático sin ventilación dada las ventajas que este representa por el mínimo consumo de energía, la razón principal se debe a que la transferencia de calor se da por convección natural.

Laguerre, Amara, Moureh y Flick [71] estudiaron los efectos de los obstáculos en los perfiles de velocidad, con el objetivo práctico de predecir las zonas calientes y frías, indicaron que estos influyen en la circulación de aire principal a lo largo de las paredes y la zona central, ya que fueron confirmados por los valores máximos de temperatura del aire de 8,2 °C para un refrigerador vacío y sin estantes y 9,1 °C para un refrigerador con estanterías y nevera cargados de productos [71]. Laguerre, Amara, Mojtabi, Lartigue y Flick [72] utilizaron un sistema de PIV (velocimetría de imágenes de partículas), para la medición de la velocidad del aire, aseguraron que el aire estancado en la parte superior de la cavidad tiene una velocidad de 0,04m/s y en la parte inferior de la pared fría es de 0,02m/s. Estableciendo otra configuración, observaron que existe altas temperaturas de aproximadamente 5°C más alta que la temperatura media del aire, por lo que es importante evitar colocar productos sensibles en esta posición.

En la parte inferior, observaron que el flujo de aire es no estacionario, la temperatura es baja y hay más fluctuaciones, cuanto menor sea la temperatura de la pared fría, mayor es la velocidad del aire a lo largo de esta pared. La velocidad del aire es más homogénea cuando el modelo de refrigerador está lleno de obstáculos [72]. La circulación de aire se induce cerca del evaporador y las paredes laterales. Sin embargo, en la región del núcleo, donde se almacena alimentos, hay velocidades bajas, que no aseguran marcada transferencia de calor por convección entre el aire y los productos [70]. Los productos alimenticios no deben perturbar la capa límite cerca de la pared del evaporador [72].

Laguerre y Flick [70] sugieren la continuación de los análisis presentados en su trabajo, indican que es interesante estudiar la transferencia de calor en el interior del refrigerador, tomando en cuenta los ciclos de encendido y apagado del compresor. Además, un modelo tridimensional más complejo podría ser desarrollado con el fin de predecir la distribución de la temperatura en el interior del compartimento de refrigeración [70].

B6. Gabinete y Aislamiento

En la construcción de los refrigeradores domésticos es importante el aislamiento térmico, para mantener por dentro un volumen interior técnicamente acondicionado [73].

Existen soluciones de materiales para el aislamiento térmico en un refrigerador de uso doméstico, uno de ellos se presentan con los aerogeles para la construcción de aplicaciones, así como también el progreso que han ido teniendo los VIPs (panel de aislamiento al vacío) en la tecnología de la construcción, mismos que han sido mejorados y hoy en día son una alternativa [74].

En general, los VIP obtienen una conductividad térmica mucho menor, y reducen fuertemente el espesor aplicado del material de aislamiento térmico, pero esta se incrementará a través del tiempo

debido a la penetración de O₂ y N₂. Tanto el aire y el vapor de agua dentro del núcleo contribuyen a la conductividad térmica [75].

Los aerogeles tienen una conductividad gaseosa baja y una transmisión infrarroja radiante baja TIR [76]. Los aerogeles de sílice son reflectores excepcionales de sonido audible, haciendo excelentes materiales de barrera, no son inflamables y no reactivos, en otras aplicaciones se utilizan como material protector contra el fuego [77].

El aerogel es uno de los materiales de aislamiento térmico más prometedor de las últimas décadas. Puede llegar a tener una conductividad térmica de 2 a 2,5 veces menor que la lana mineral convencional. El alto potencial de los aerogeles se puede encontrar sobre todo en su translucidez y transparencia posible, ya que los estos pueden proporcionar un gran ahorro energético [77].

Nuevos materiales para ser utilizados como aislamiento térmico se siguen estudiando, como los paneles llenos de gas verde (GFP) [78], mismo que representa otra alternativa de material de aislamiento térmico. Sin embargo en un estudio revisado se asevera que su eficacia puede ser cuestionada [77].

B7. Refrigerantes

Mao, Yu y Wen [79] en el 2005 realizaron un análisis experimental para establecer las características de transferencia de calor y caídas de presión de los refrigerantes HC (R-290, R600 y la mezcla R290/R600), en el cual demostraron que los coeficientes de transferencia de calor de los HC es mayor que la del R-134a, además la caída de presión en los HC fue menor [80]. Otro estudio realizado por B. Raja [81] demostró que el coeficiente de transferencia de calor por ebullición de una mezcla de HC (M09) en dos tubos horizontales lisos, es más alto que el R-134a, además utilizaron mapas Kattan, Thome y Favrat [81] para confirmar los patrones de flujo.

Por las razones antes expuestas, creció el interés de estudiar los HC como posible sustitutos, de esta manera M. Fatouh [82] evaluó al propano, butano y mezclas de HC (propano comercial/iso-butano/n-butano). Llegando a concluir que el propano puro no puede reemplazar al R134a debido a sus altas presiones de funcionamiento y bajo COP, el butano comercial presentó mejores características pero se debía cambiar el diseño del compresor. La mezcla de hidrocarburos con fracciones de masa de propano de 0.6 se aproximan a las características de funcionamiento del R134a, también se estableció que el COP del refrigerador utilizando una mezcla de HC ternario es mayor que la de R134a. Finalmente se determinó que la mezcla de propano/isobutano/n-butano con 60% de propano fue el refrigerante alternativo más adecuado [83]. También un estudio teórico de una mezcla de HC con diversos porcentajes en peso, determinó que la mezcla más aceptable como posibles reemplazos son HC290/HC600a (40/60% en peso) para el CFC12 y HC290/HC1270 (20/80% en peso) para el CFC22, por su parte la mezcla R290/R600 en la proporción de 60:40, por fracción de masa es una alternativa para el R134a, además la eficiencia de refrigeración y el COP pueden mejorar al aumentar la temperatura de evaporación y mantener una temperatura de condensación constante [84]. También Fatouh y Kafafy [83] experimentaron con GLP (60% de R290 y 40% de butano comercial) como alternativa del R134a.

Los resultados indicaron que el COP usando GLP fue mayor que la de R134a, además se redujo el consumo de energía y la relación de tiempo de encendido en alrededor de 10,8 y 14,3%, respectivamente [83]. Por su parte Mohanraj y Chandrasekar [84] presentaron un estudio experimental para evaluar el desempeño del isobutano puro y mezcla de HC (propano, butano e isobutano) de ello, el isobutano mostró un mejor desempeño y su rendimiento se aproxima al del

HFC134a, además de reducir la carga de refrigerante no se modificó ningún elemento del sistema [84].

Con el fin de mejorar la eficiencia de las mezclas de HC, se realizaron estudios variando el porcentaje de cada elemento en la mezcla y lo contrastaron con el R12 y el 134a, los resultados experimentales revelaron que dichas mezclas mejoraban el comportamiento de refrigeración, disminuía el tiempo de descenso en la temperatura, consiguiendo mayor velocidad de enfriamiento y reduciendo el tiempo de encendido, logrando así ahorros de energía significativos, reducción de la masa de refrigerante, y el valor del COP de dichas mezclas en algunos casos mejoraba y en otros variaba en mínimas proporciones con relación al R-12 y R-134a [10]. Finalmente la temperatura y presión de descarga de la mezcla de HC estaban muy cercanas con los otros refrigerantes en estudio y en otros casos se logró una menor temperatura de descarga (8,5 y 13,4°K menos que el R134a) [84], de esta manera los HC pueden mejorar la eficiencia en la refrigeración y así lo demostró M. Rasti [85] en un estudio realizado a una mezcla de HC R436A (R290/R600a, 56/44 % en peso) en la cual mejoró la eficiencia energética de un refrigerador doméstico ya que redujo la carga del refrigerante hasta un 48%, además de reducir el tiempo de encendido en un 13%, ahorrando así 5.3% en el consumo de energía por día, lo que permitió mejorar el índice de eficiencia energética del refrigerador de la etiqueta “E” a la “D” según la Norma Nacional Iraní No. 4853-2 [85].

También Won, Jae y Yon [86] utilizaron R-600a y mezclas de HC para mejorar el rendimiento del refrigerador usando doble bucle, de esta manera controla de forma independiente la temperatura de evaporación tanto de congelación como de refrigeración. Resultados experimentales logrados indicaron que se puede ahorrar 14,2% y 18,6% usando ciclos de doble bucle optimizados con R-600a y mezclas de HC respectivamente, en comparación con la de un ciclo bypass de dos circuitos usando R-600a en el misma plataforma de Refrigeración/Congelación [86].

Dado la posibilidad del uso masivo de HC como refrigerantes alternativos, J.U. Ahamed [87] realizó una revisión literaria del análisis de exergía a dichas mezclas, en la cual se determinó que estas, muestran un mejor rendimiento con respecto a otros refrigerantes [87]. Además Claudio Crincoli [88] realizó una revisión bibliográfica, enfatizando algunas características químicas y termodinámicas de los HC ya que también poseen excelentes características medio ambientales, buena miscibilidad con aceites minerales y compatibilidad con los materiales comúnmente usados en equipos de refrigeración, las mismas que permiten mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de energía [88].

Otras están enfocadas a determinar su desempeño y simular sus características de funcionamiento, para ello M.M. El-Awad [89] realizó un modelo termodinámico en un ordenador, que permite conocer el efecto de la refrigeración, el trabajo del compresor, y el coeficiente de rendimiento. El mismo que fue validado al comparar sus resultados con un análisis experimental realizado por Akash y Said [90] en el que evaluaron el rendimiento de GLP y lo compararon con el refrigerante R12 [49], los resultados obtenidos mediante el modelo estaban muy cercanos con las obtenidas en el experimento [89]. También A.S. Dalkilic [80] comparó y validó modelos de caída de presión por fricción del R600a y el R134a, concluyendo que el modelo de Cavallini y Chen [90] predicen los valores de caída de presión por fricción para el R134a de forma muy aproximada.

Por otro lado, la correlación de Chen predice bien los datos para el R600a [91], por su parte Viorel Ferioiu [90] realizó una investigación con las ecuaciones de estado cubico, utilizando; GEOS3C (ecuación cúbica general del Estado con 3 constantes), SRK (Soave-Redlich-Kwong), PR (Peng-

Robinson), SW (Schmidt-Wenzel) y C-1, y se comparó con datos teóricos y experimentales previamente realizados, de ello la ecuación GEOS3C predice mejor la presión de vapor y el volumen de líquido saturado, por su parte las propiedades termodinámicas son bien reproducidas por todos los modelos, además para los sistemas de refrigeración binarios y ternarios, la ecuación GEOS3C predice mejores valores de la densidad del líquido. Para la fase gaseosa, todas las ecuaciones conducen a buenas predicciones de las densidades [90].

Se han investigado otras alternativas de refrigerantes ambientalmente amigables, por ejemplo para el caso del CO₂, los resultados indicaron que puede trabajar de manera aceptable en condiciones cercanas al punto crítico y por debajo de este [92]. De la misma manera prestigiosas universidades y empresas en China mostraron avances principales en investigación de refrigerantes naturales, ya que dicho país representa el mercado más influyente en el mundo, obtuvieron excelentes logros usando dióxido de carbono, agua, amoníaco, aire e HC [93]. Otro estudio realizado por Bolaji, B.O. [94] analizó un proceso de selección de refrigerantes, centrándose en aquellos que se encuentran en los triángulos de la matriz de derivados del metano y del etano además se discutió los refrigerantes alternativos utilizados actualmente y varios grupos de refrigerantes basados en hidrocarburos halogenados y sus problemas ambientales [94].

Según el resultado de muchas investigaciones, indican que los HC son la alternativa más prometedora para el reemplazo de los refrigerantes tradicionales contaminantes [95], es por ello que algunos autores se han enfocado en la viabilidad de esta alternativa, considerando algunas desventajas como la seguridad y el peligro de inflamabilidad en caso de fugas, para ello Jose M. Corberán [96] llevó a cabo una revisión de las normas existentes en cuanto a refrigeración y aire acondicionado (A/C), y mencionó algunas enmiendas que se estaban realizando a dichas normas internacionales, las mismas que ya están disponibles y que proporciona medidas de seguridad y requisitos tanto para el diseño, reparación y servicio de equipos de refrigeración y A/C, con ello permitirá el desarrollar esta tecnología de forma masiva y segura [96]. También otros estudios demostraron que en caso de fugas, la concentración del HC en el aire (hasta 0,15kg) en una habitación estándar no es peligrosa por lo tanto tampoco lo es su uso como refrigerante, además que se han incorporado medidas de seguridad especiales [88],[90] es por ello algunas empresas especialmente en Europa y Asia ya usan hidrocarburos como refrigerantes [83].

Anexo C

C. Trabajos desarrollados a través de la Metodología de la Dinámica de Sistemas

Se ha realizado la revisión de distintos artículos publicados en revistas de alto impacto, esto con la intención de identificar trabajos de investigación desarrollado en los últimos 5 años en temáticas relacionadas con políticas energéticas, políticas en general, tecnología e innovación y desarrollo sostenible, que han contribuido con modelos de simulación que utilizan la metodología de la Dinámica de Sistemas para su análisis (ver Tabla C-1).

Cabe mencionar que no se han encontrado trabajos en los que se analice el impacto que tendrían el introducir en los hogares refrigeradores domésticos de última tecnología que obedezcan a índices de eficiencia energética más exigentes.

Tabla C-1: Distribución de artículos analizados por revista científica. Fuente: Autor

Revista	Número de artículos revisados
Energy Policy	5
Renewable and Sustainable Energy Reviews	2
Technological Forecasting & Social Change	2
Journal of Cleaner Production	2
Futures	2
Energy Procedia	2
European Journal of Operational Research	1
International Journal of Production Economics	1
Energy	1
Ecological Indicators	1
Science of the Total Environment	1
Resources, Conservation and Recycling	1
Simulation Modelling Practice and Theory	1
Procedia	1
Applied Energy	1
The Asian Journal of Shipping and Logistics	1
Environmental Science & Policy	1

C1. Evaluación de Políticas de Eficiencia Energética

En la tabla C-2 se presenta el enfoque y el aporte que cada uno de los trabajos revisados presenta en lo referente a la evaluación de políticas energéticas.

Tabla C-2: Aportes realizados por los autores en la evaluación de políticas energéticas. Fuente: Autor

Enfoque del modelo	Referencia	Año de publicación	Aporte
Políticas energéticas	Qudrat-Ullah, Seong [156]	2010	Desarrolló de una metodología que genera resultados confiables en la simulación de políticas energéticas
Políticas energéticas	Ahmad, Tahar, Muhammad-Sukki, Munir, Rahim [157]	2016	Revisión del estado del arte de estudios publicados 2000-2013; modelos de evaluación de políticas (12 artículos), expansión de capacidad de generación (9 artículos), instrumentos financieros (5 artículos), gestión de la demanda (4 artículos) entre otros.
Políticas energéticas	Hosseini, Shakouri [158]	2016	Formulación de acciones para la producción de petróleo convencional y no convencional, bajo diferentes escenarios de precios

Políticas energéticas	Liu, Ma, Tian, Jia, Li [159]	2015	Análisis de escenarios para el consumo de energía y emisiones de CO2 en el transporte urbano en Pekín. Los países en desarrollo se enfrentan a una creciente presión para conseguir ahorro de energía y reducciones de las emisiones de GDI.
Políticas energéticas	Tang, Rehme [160]	2017	Se realiza un análisis de la implementación de certificados renovables de electricidad como una política aplicada a la industria eléctrica Sueca
Políticas energéticas	Xiaodan Guo, Xiaopeng Guo [161]	2015	Se analiza el desarrollo de la energía fotovoltaica en China, considerando políticas de incentivos, que rompan la limitación del alto costo y estimulen la inversión en la industria fotovoltaica
Políticas energéticas	Wang, Ma, Song, Liu [162]	2017	Se construye un modelo para analizar la evolución de la economía de la industria química del carbón, se construye escenarios de respuesta a políticas y precios de energía
Políticas energéticas	Zhao, Zhou, Jin, Wang, Liu [163]	2017	Se modela el nivel de cumplimiento de las empresas de papel en China, de un instrumento de política gubernamental para un esquema combinado de: etiquetado de carbono, subsidios gubernamentales y sanciones económicas
Políticas energéticas	Zhao, Zhong [164]	2015	Se modela las respuestas de los consumidores de productos con etiquetas de carbono, se simula la preferencia de los consumidores hacia la leche etiquetada, la no etiquetada con carbono y la leche etiquetada pero con diferentes contenidos de grasa
Políticas energéticas	Q. Li, Zhanga, H. Li, He [165]	2017	Se estudia las tendencias en las emisiones de CO2 de la industria de aluminio primario en China para los próximos 15 años, para lo cual se plantean cinco subsistemas: desarrollo económico, producción de aluminio primario, producción de aluminio secundario, intensidad de emisiones de CO2 y políticas involucradas.
Políticas energéticas	Ercan, Onat, Tatari [166]	2016	Como parte de la planificación urbana sostenible, se ha estudiado el potencial de los modos de transporte público para reducir las emisiones de CO2 y el consumo de energía, además de aumentar la seguridad en las carreteras.
Políticas energéticas	Timma, Bariss, Blumberga, Blumberga [167]	2015	Se realiza una descripción de los procesos de difusión de la innovación para las soluciones de eficiencia energética en los hogares
Políticas energéticas	Sisodia, Sahay, Singh [168]	2016	La ejecución adecuada y eficiente de las políticas juega un papel vital en la implementación y adopción de innovaciones, motivó realizar el análisis del cumplimiento de la demanda de energía en India
Políticas energéticas	Jeon, Lee, Shin [169]	2015	Se propone un método para optimizar los subsidios financieros y las inversiones públicas en investigación y desarrollo para las tecnologías de energía renovable

C2. Evaluación de políticas en general

En la tabla C-3 se presenta el enfoque y el aporte que cada uno de los trabajos revisados presenta en lo referente a la evaluación de políticas en general.

Tabla C-3: Aportes realizados por los autores en la evaluación de políticas en general. Fuente: Autor

Enfoque del modelo	Referencia	Año de publicación	Aporte
Políticas en general	Saleh, Oliva, Kampmann, Davidsen [170]	2010	Evaluación del impacto global de una política sobre una variable, se explica por qué el impacto se produce en términos de cambios estructurales en el modelo

Políticas en general	Lu, Liu, Jie, Tao, Rong, Hsieh [171]	2017	Formulación de políticas, basadas en subsidios financieros para la industrialización de vehículos eléctricos en China
Políticas en general	Yunna, Kaifeng, Yisheng, Tiantian [172]	2015	Analiza las influencias de la tecnología, costo y políticas que afectan la competencia del mercado de gas de esquisto en China
Políticas en general	Jeon, Wang, Yeo [173]	2016	Se estableció un modelo de dinámica de sistemas que permitió plantear recomendaciones de políticas de seguridad para buques en Corea.
Políticas en general	Allington, Li, Brown [174]	2017	Para analizar este sistema de desarrolló una modelación socio-ambiental a fin de determinar los efectos de las políticas ambientales sobre la disponibilidad futura de los recursos de pastoreo existentes

C3. Tecnología e innovación

En la tabla C-4 se presenta el enfoque y el aporte que cada uno de los trabajos revisados presenta en lo referente a la evaluación de la tecnología e innovación.

Tabla C-4: Aportes realizados por los autores en la evaluación de políticas energéticas. Fuente: Autor

Enfoque del modelo	Referencia	Año de publicación	Aporte
Tecnología e innovación	L. Pretorius, J. Pretorius, Benade [175]	2015	La tecnología es considerada como resultado de la innovación, es un proceso dependiente de la tarifa que puede incluir varias no linealidades debido a la interacción con el entorno y el contexto social
Tecnología e innovación	Chen, Yu, Wakeland [176]	2016	Se desarrolla un modelo para establecer la difusión de la innovación para operacionalizar el vínculo entre previsión y planificación
Tecnología e innovación	Xue, Xu [177]	2017	Se desarrolla un modelo de dinámica de sistemas que establece un factor de influencia para el análisis de la capacidad de innovación empresarial
Tecnología e innovación	Aparicio, Urbano, Gómez [178]	2016	Se desarrolla un modelo que determina la validez del papel del emprendimiento innovador en los escenarios del ciclo económico colombiano, muestra cómo este tipo de emprendimientos contribuyen al crecimiento económico sostenible durante el período de simulación de 30 años

C4. Desarrollo sostenible

En la tabla C-5 se presenta el enfoque y el aporte que cada uno de los trabajos revisados presenta en lo referente a la evaluación del desarrollo sostenible.

Tabla C-5: Aportes realizados por los autores en la evaluación de políticas energéticas. Fuente: Autor

Enfoque del modelo	Referencia	Año de publicación	Aporte
Desarrollo sostenible	Dace, Muizniece, Blumberga, Kaczala [179]	2015	Se desarrolló un modelo que evalué la mitigación de gases de efecto invernadero mediante la implementación de una política agrícola
Desarrollo sostenible	C. Fan, S. Fan, Wang, Tsai [180]	2016	Se ha establecido el modelado del sistema de reciclaje de computadoras en Taiwán
Desarrollo sostenible	Golroudbary, Zahraee [181]	2015	Se desarrolló un modelo de dinámica de sistema para optimizar el reciclaje y la recolección de residuos en una cadena de suministro en circuito cerrado

Referencias

- [1] L. A. Horta, "Indicadores de políticas públicas en materia de eficiencia energética en América Latina y el Caribe," Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas, Santiago de Chile, May 2010.
- [2] C. Sheinbaum, M. Martinez, and L. Rodriguez, "Trends and prospects in Mexican residential energy use," *Energy*, vol. 21, no. 6, pp. 493–504, 1996.
- [3] C. J. L. Hermes and C. Melo, "A first-principles simulation model for the start-up and cycling transients of household refrigerators," *Int. J. Refrig.*, vol. 31, no. 8, pp. 1341–1357, Diciembre 2008.
- [4] PNUMA, *Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono*, Octava. Nairobi, Kenya: Secretaría del Ozono - Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2009.
- [5] R. L. de Tapia Martín, Á. M. Vicente, R. Fernández Alés, F. Román Ortega, M. Salvado Muñoz, and F. J. Espinoza Barro, *Manual sobre el Protocolo de Kioto*. España: Gráficas Europa, 2005.
- [6] E. Berger, M. Heimel, R. Almbauer, and W. Lang, "1D heat Exchanger Simulation to Capture the Cycling Transients of Domestic Refrigeration Appliances Working With R600a," *Int. Refrig. Air Cond. Conf.*, Jan. 2012.
- [7] M. A. Marcelino Neto and J. R. Barbosa Jr., "Absorption of isobutane (R-600a) in lubricant oil," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 66, no. 9, pp. 1906–1915, May 2011.
- [8] A. S. Dalkilic and S. Wongwises, "A performance comparison of vapour-compression refrigeration system using various alternative refrigerants," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 37, no. 9, pp. 1340–1349, Nov. 2010.
- [9] M. Fatouh and M. El Kafafy, "Assessment of propane/commercial butane mixtures as possible alternatives to R134a in domestic refrigerators," *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 15–16, pp. 2644–2658, Sep. 2006.
- [10] C.-S. Jwo, C.-C. Ting, and W.-R. Wang, "Efficiency analysis of home refrigerators by replacing hydrocarbon refrigerants," *Measurement*, vol. 42, no. 5, pp. 697–701, Jun. 2009.
- [11] M.-Y. Wen and C.-Y. Ho, "Evaporation heat transfer and pressure drop characteristics of R-290 (propane), R-600 (butane), and a mixture of R-290/R-600 in the three-lines serpentine small-tube bank," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 25, no. 17, pp. 2921–2936, 2005.
- [12] K. Mani and V. Selladurai, "Experimental analysis of a new refrigerant mixture as drop-in replacement for CFC12 and HFC134a," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 47, no. 11, pp. 1490–1495, Nov. 2008.
- [13] M. Mohanraj, S. Jayaraj, C. Muraleedharan, and P. Chandrasekar, "Experimental investigation of R290/R600a mixture as an alternative to R134a in a domestic refrigerator," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 48, no. 5, pp. 1036–1042, 2009.
- [14] Y. S. Lee and C. C. Su, "Experimental studies of isobutane (R600a) as the refrigerant in domestic refrigeration system," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 22, no. 5, pp. 507–519, Abril 2002.
- [15] B. O. Bolaji and Z. Huan, "Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant—a review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 49–54, 2013.
- [16] U. S. Wankhede and A. N. Ahmad Quraishi, "Use of Hydrocarbons and Other Blends as Refrigerant," *Int. J. Mod. Eng. Res. IJMER*, vol. 3, pp. 250–253, 2013.
- [17] E. Corte, C. Flores, N. Jara, and C. Isaza, "Sistemas de refrigeración doméstica-Estado del arte de las mejoras en la eficiencia energética," *Rev. Fac. Cienc. Quím.*, no. 9, 2014.

- [18] J. A. Manrique Henao, "El uso energético y la innovación en la industria colombiana a partir de encuestas oficiales," Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Medellín, Colombia, 2012.
- [19] UPME, "Programa Colombiano de Normalización, acreditación, certificación y etiquetado de equipos de uso final de energía-Programa CONOCE." Unidad de Planeación Minero Energética, 2006.
- [20] C. Narayan, *Guía de reconversión de la producción de refrigeradores domésticos: de refrigerantes halogenados a refrigerantes de hidrocarburo*. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2014.
- [21] D. M. Álvarez and N. G. Jara, "Evaluación de los impactos en el consumo de energía eléctrica asociados al uso de refrigeradores eficientes en el Ecuador: Programa Renova Refrigerador," B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2013.
- [22] F. G. Arroyo-Cabañas, J. E. Aguillón-Martínez, J. J. Ambríz-García, and G. Canizal, "Electric energy saving potential by substitution of domestic refrigerators in Mexico," *Energy Policy*, vol. 37, no. 11, pp. 4737–4742, Nov. 2009.
- [23] T. M. I. Mahlia and R. Saidur, "A review on test procedure, energy efficiency standards and energy labels for room air conditioners and refrigerator–freezers," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 7, pp. 1888–1900, Sep. 2010.
- [24] V. Letschert, M. A. McNeil, M. Pavon, and W. F. Lutz, "Design of Standards and Labeling programs in Chile: Techno-Economic Analysis for Refrigerators." Scholarly Publishing, 2014.
- [25] L. Harrington, "A New Global Test Procedure for Household Refrigerators," *Proc. EEDAL 2009*, 2009.
- [26] J. Geppert, "Modelling of domestic refrigerators' energy consumption under real life conditions in Europe," Universidad Rheinische Friedrich-Wilhelms, Bonn, Alemania, 2011.
- [27] Bain & Company and Ministerio de Industrias y Productividad, "Industrias de Transformación Intermedias y Finales Productos 10, 12 y 14," presented at the Línea Blanca, Quito, May-2015.
- [28] G. Zavala Aznar, "Industria electrodomésticos." ProMéxico, Nov-2014.
- [29] ProMéxico, "La Industria de Electrodomésticos en México." ProMéxico Inversión y Comercio, 2015.
- [30] Y. Romero and J. Bahamón, "Plan de mercadeo ABBA electrodomésticos 2013," Universidad EAN, Bogotá D.C., Colombia, 2013.
- [31] L. F. Gallego López, "Perspectivas para una estructura de gestión de mercadeo de electrodomésticos de línea blanca en el mercado colombiano para contrarrestar la incursión del mercado asiático," Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2009.
- [32] F. García, P. Garcés, and R. Atiaja, "Panorama General del Sector Eléctrico en América Latina y el Caribe," Quito - Ecuador, 2012.
- [33] R. Alexandri Rionda, L. Guerrero Gutiérrez, F. Rodríguez Bolaños, A. Ubaldo Higuera, and A. Ramos Bautista, "Prospectiva del sector eléctrico 2015-2029." Secretaría de Energía SENER, 2015.
- [34] S. Mendoza, S. Rodríguez, and P. Camacho, "Registro de emisiones de gases de efecto invernadero del Distrito Federal." Secretaría del Medio Ambiente - Gobierno del Distrito Federal, 2013.
- [35] Subdirección de Energía Eléctrica - Grupo de Generación, "Informe Mensual de Variables de Generación y del Mercado Eléctrico Colombiano – Diciembre de 2016," Unidad de Planeación Minero Energética UPME - Ministerio de Minas y Energía, Colombia, Diciembre de 2016.
- [36] H. H. Herrera Flórez, "Factores de Emisión del S.I.N. Sistema Interconectado Nacional Colombia 2014." UPME, 2014.

- [37] N. G. Jara, F. Z. Reinoso, C. Isaza-Roldan, and J. L. Espinoza, "Impacts on the consumption of electric power by the use of efficient refrigerators - Ecuador case," *Ingenius*, vol. 0, no. 18, pp. 53–63, Jul. 2017.
- [38] L. Haro and J. Oscullo, "Factor Anual de Emisión de CO₂ Producido por el Parque Generador del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, Mediante la Aplicación de la Metodología de la Convención Marco Sobre el Cambio Climático UNFCCC, para el Periodo 2009-2014," *Rev. Politécnica*, vol. 37, no. 1, p. 7, Mar. 2016.
- [39] C. J. L. Hermes and C. Melo, "A first-principles simulation model for the start-up and cycling transients of household refrigerators," *Int. J. Refrig.*, vol. 31, no. 8, pp. 1341–1357, Dec. 2008.
- [40] E. Björk, B. Palm, and J. Nordenberg, "A thermographic study of the on–off behavior of an all-refrigerator," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 14–15, pp. 1974–1984, Oct. 2010.
- [41] C. J. L. Hermes, C. Melo, F. T. Knabben, and J. M. Gonçalves, "Prediction of the energy consumption of household refrigerators and freezers via steady-state simulation," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 7–8, pp. 1311–1319, Jul. 2009.
- [42] C. J. L. Hermes and C. Melo, "Assessment of the energy performance of household refrigerators via dynamic simulation," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 5–6, pp. 1153–1165, Apr. 2009.
- [43] K. Wang, M. Eisele, Y. Hwang, and R. Radermacher, "Review of secondary loop refrigeration systems," *Int. J. Refrig.*, vol. 33, no. 2, pp. 212–234, Mar. 2010.
- [44] C. Lin, W. Cai, Y. Li, J. Yan, and Y. Hu, "Pressure recovery ratio in a variable cooling loads ejector-based multi-evaporator refrigeration system," *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 649–656, Aug. 2012.
- [45] P. Binneberg, E. Kraus, and H. Quack, "Reduction in power consumption of household refrigerators by using variable speed compressors," 2002.
- [46] C. Aprea, R. Mastrullo, and C. Renno, "Fuzzy control of the compressor speed in a refrigeration plant," *Int. J. Refrig.*, vol. 27, no. 6, pp. 639–648, Sep. 2004.
- [47] H. Lee, S. Ki, S. Jung, and W. Rhee, "The Innovative Green Technology for Refrigerators Development of Innovative Linear Compressor," 2008.
- [48] J. K. Kim, C. G. Roh, H. Kim, and J. H. Jeong, "An experimental and numerical study on an inherent capacity modulated linear compressor for home refrigerators," *Int. J. Refrig.*, vol. 34, no. 6, pp. 1415–1423, Sep. 2011.
- [49] C. R. Bradshaw, E. A. Groll, and S. V. Garimella, "A comprehensive model of a miniature-scale linear compressor for electronics cooling," *Int. J. Refrig.*, vol. 34, no. 1, pp. 63–73, 2011.
- [50] C. Bradshaw, E. A. Groll, and S. Garimella, "A Sensitivity Analysis of a Miniature-Scale Linear Compressor for Electronics Cooling using a Comprehensive Model," 2012.
- [51] C. R. Bradshaw, E. A. Groll, and S. V. Garimella, "Linear compressors for electronics cooling: Energy recovery and its benefits," *Int. J. Refrig.*, vol. 36, no. 7, pp. 2007–2013, Nov. 2013.
- [52] Marcos G. Schwarz, "Variable Capacity Compressors, a new dimension for refrigeration engineers to explore.pdf." .
- [53] J. Cui, W. Z. Li, Y. Liu, and Y. S. Zhao, "A new model for predicting performance of fin-and-tube heat exchanger under frost condition," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 32, no. 1, pp. 249–260, Feb. 2011.
- [54] P. J. Waltrich, J. R. Barbosa, C. J. L. Hermes, and C. Melo, "Air-side heat transfer and pressure drop characteristics of accelerated flow evaporators," *Int. J. Refrig.*, vol. 34, no. 2, pp. 484–497, Mar. 2011.
- [55] D. L. da Silva, C. J. L. Hermes, and C. Melo, "Experimental study of frost accumulation on fan-supplied tube-fin evaporators," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 6–7, pp. 1013–1020, May 2011.

- [56] F. T. Knabben, C. J. L. Hermes, and C. Melo, "In-situ study of frosting and defrosting processes in tube-fin evaporators of household refrigerating appliances," *Int. J. Refrig.*, vol. 34, no. 8, pp. 2031–2041, Dec. 2011.
- [57] D. B. Özkan and E. Özil, "Experimental study on the effect of frost parameters on domestic refrigerator finned tube evaporator coils," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 17–18, pp. 2490–2493, Dec. 2006.
- [58] J. R. Barbosa, C. Melo, C. J. L. Hermes, and P. J. Waltrich, "A study of the air-side heat transfer and pressure drop characteristics of tube-fin 'no-frost' evaporators," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1484–1491, Sep. 2009.
- [59] P. J. Waltrich, J. R. Barbosa, and C. J. L. Hermes, "COP-based optimization of accelerated flow evaporators for household refrigeration applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 1, pp. 129–135, Jan. 2011.
- [60] E. Björk and B. Palm, "Flow boiling heat transfer at low flux conditions in a domestic refrigerator evaporator," *Int. J. Refrig.*, vol. 31, no. 6, pp. 1021–1032, Sep. 2008.
- [61] R. Bassiouny, "Evaluating the effect of the space surrounding the condenser of a household refrigerator," *Int. J. Refrig.*, vol. 32, no. 7, pp. 1645–1656, Nov. 2009.
- [62] S. Porkhial, B. Khastoo, and M. R. Modarres Razavi, "Transient response of finned-tube condenser in household refrigerators," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 14–15, pp. 1725–1729, Oct. 2006.
- [63] C. J. L. Hermes, "Thermodynamic design of condensers and evaporators: Formulation and applications," *Int. J. Refrig.*, vol. 36, no. 2, pp. 633–640, Mar. 2013.
- [64] F. Poggi, H. Macchi-Tejeda, D. Leducq, and A. Bontemps, "Refrigerant charge in refrigerating systems and strategies of charge reduction," *Int. J. Refrig.*, vol. 31, no. 3, pp. 353–370, May 2008.
- [65] J. Boeng and C. Melo, "A Capillary Tube-Refrigerant Charge Design Methodology for Household Refrigerators-Part II: Equivalent Diameter and Test Procedure," 2012.
- [66] E. Björk and B. Palm, "Performance of a domestic refrigerator under influence of varied expansion device capacity, refrigerant charge and ambient temperature," *Int. J. Refrig.*, vol. 29, no. 5, pp. 789–798, Aug. 2006.
- [67] E. Björk and B. Palm, "Refrigerant mass charge distribution in a domestic refrigerator, Part I: Transient conditions," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 8–9, pp. 829–837, Jun. 2006.
- [68] E. Björk and B. Palm, "Refrigerant mass charge distribution in a domestic refrigerator. Part II: steady state conditions," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 8–9, pp. 866–871, Jun. 2006.
- [69] J. M. Choi and Y. C. Kim, "The effects of improper refrigerant charge on the performance of a heat pump with an electronic expansion valve and capillary tube," *Energy*, vol. 27, no. 4, pp. 391–404, 2002.
- [70] O. Laguerre and D. Flick, "Heat transfer by natural convection in domestic refrigerators," *J. Food Eng.*, vol. 62, no. 1, pp. 79–88, Mar. 2004.
- [71] O. Laguerre, S. Ben Amara, J. Moureh, and D. Flick, "Numerical simulation of air flow and heat transfer in domestic refrigerators," *J. Food Eng.*, vol. 81, no. 1, pp. 144–156, Jul. 2007.
- [72] O. Laguerre, S. Ben Amara, M.-C. Charrier-Mojtabi, B. Lartigue, and D. Flick, "Experimental study of air flow by natural convection in a closed cavity: Application in a domestic refrigerator," *J. Food Eng.*, vol. 85, no. 4, pp. 547–560, Apr. 2008.
- [73] B. Griffith and D. Arasteh, "Advanced insulations for refrigerator/freezers: the potential for new shell designs incorporating polymer barrier construction," *Energy Build.*, vol. 22, no. 3, pp. 219–231, 1995.

- [74] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. Gustavsen, "Aerogel insulation for building applications: a state of the art review," *Energy Build.*, vol. 43, no. 4, pp. 761–769, 2011.
- [75] R. Baetens *et al.*, "Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond," *Energy Build.*, vol. 42, no. 2, pp. 147–172, 2010.
- [76] K. Ramakrishnan, A. Krishnan, V. Shankar, I. Srivastava, A. Singh, and R. Radha, "Modern aerogels," *Date Last Accessed*, vol. 27, 2008.
- [77] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. Gustavsen, "Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review," *Energy Build.*, vol. 43, no. 4, pp. 761–769, Apr. 2011.
- [78] M. S. Söylemez and M. Ünsal, "Optimum insulation thickness for refrigeration applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 40, no. 1, pp. 13–21, 1999.
- [79] M.-Y. Wen and C.-Y. Ho, "Evaporation heat transfer and pressure drop characteristics of R-290 (propane), R-600 (butane), and a mixture of R-290/R-600 in the three-lines serpentine small-tube bank," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 25, no. 17–18, pp. 2921–2936, Dec. 2005.
- [80] A. S. Dalkilic and S. Wongwises, "A performance comparison of vapour-compression refrigeration system using various alternative refrigerants," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 37, no. 9, pp. 1340–1349, Nov. 2010.
- [81] B. Raja, D. Mohan Lal, and R. Saravanan, "Flow boiling heat transfer study of R-134a/R-290/R-600a mixture in 9.52 and 12.7mm smooth horizontal tubes: Experimental investigation," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 33, no. 3, pp. 542–550, Mar. 2009.
- [82] M. Fatouh, "Theoretical investigation of adiabatic capillary tubes working with propane/n-butane/iso-butane blends," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 4, pp. 1338–1348, Apr. 2007.
- [83] M. Fatouh and M. El Kafafy, "Assessment of propane/commercial butane mixtures as possible alternatives to R134a in domestic refrigerators," *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 15–16, pp. 2644–2658, Sep. 2006.
- [84] M. Mohanraj, S. Jayaraj, C. Muraleedharan, and P. Chandrasekar, "Experimental investigation of R290/R600a mixture as an alternative to R134a in a domestic refrigerator," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 48, no. 5, pp. 1036–1042, May 2009.
- [85] M. Rasti, M. S. Hatamipour, S. F. Aghamiri, and M. Tavakoli, "Enhancement of domestic refrigerator's energy efficiency index using a hydrocarbon mixture refrigerant," *Measurement*, vol. 45, no. 7, pp. 1807–1813, Aug. 2012.
- [86] W. J. Yoon, K. Seo, H. J. Chung, and Y. Kim, "Performance optimization of dual-loop cycles using R-600a and hydrocarbon mixtures designed for a domestic refrigerator-freezer," *Int. J. Refrig.*, vol. 35, no. 6, pp. 1657–1667, Sep. 2012.
- [87] J. U. Ahamed, R. Saidur, and H. H. Masjuki, "A review on exergy analysis of vapor compression refrigeration system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1593–1600, Apr. 2011.
- [88] Claudio Andrea Crincoli, "Refrigerantes hidrocarburos como alternativa para los sistemas de refrigeración."
- [89] M. M. El-Awad, "Validation of computerized analytical model for evaluating natural hydrocarbon mixtures as alternative refrigerants," *J. Sustain. Energy Environ.*, vol. 2, pp. 175–179, 2011.
- [90] V. F. Dan GEANĂ, "Properties of pure refrigerants and refrigerant mixtures." 12-Jul-2010.
- [91] A. S. Dalkilic, O. Agra, I. Teke, and S. Wongwises, "Comparison of frictional pressure drop models during annular flow condensation of R600a in a horizontal tube at low mass flux and of R134a in a vertical tube at high mass flux," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 53, no. 9–10, pp. 2052–2064, Apr. 2010.
- [92] M. Salazar Pereyra, R. Lugo Leyte, F. Méndez Levielle, and J. M. Zamora Mata, "Análisis Termodinámico de los Ciclos de Refrigeración con HF-134a y de una Etapa con CO2."

- [93] R. Z. Wang and Y. Li, "Perspectives for natural working fluids in China," *Int. J. Refrig.*, vol. 30, no. 4, pp. 568–581, Jun. 2007.
- [94] Bolaji, B.O., "Selection of environment-friendly refrigerants and the current alternatives in vapour." Aug-2011.
- [95] M. A. N. A. Quraishi and U. S. Wankhede, "Use of Hydrocarbons and Other Blends as Refrigerant."
- [96] J. M. Corberán, J. Segurado, D. Colbourne, and J. González, "Review of standards for the use of hydrocarbon refrigerants in A/C, heat pump and refrigeration equipment," *Int. J. Refrig.*, vol. 31, no. 4, pp. 748–756, Jun. 2008.
- [97] International Energy Agency, CEPAL, and Ministerio de Energía y Minas Perú, "Recomendaciones de Políticas de Eficiencia Energética Regionales." América Latina y el Caribe, 2015.
- [98] Embraco, "Manual de aplicación de compresores." Embraco, Sep-2009.
- [99] E. Arceno, "Investigação experimental da transferência de calor no filtro acústico de sucção de um compressor recíproco de velocidade variável," Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2014.
- [100] T. J. Ruiz and J. F. Coronel Toro, "Análisis Comparativo de Compresores Frigoríficos Para R-134a," Tesis, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2016.
- [101] C. J. Renedo, "Tecnología Frigorífica." Universidad de Cantabria, 2012.
- [102] F. P. Grando, "Modelo bifásico para a lubrificação do pistão em compressores herméticos alternativos," Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2017.
- [103] Tecumseh, "Bienvenidos a TECUMSEH: América del Sur," 2015. [Online]. Available: <http://www.tecumseh.com/es/south-america>. [Accessed: 14-Oct-2017].
- [104] M. J. de Oliveira, "Modelação térmica do compressor recíproco linear operando sem óleo lubrificante," Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2014.
- [105] H.-K. Lee, G. Y. Song, J. S. Park, E. P. Hong, W. H. Jung, and K. B. Park, "Development of the linear compressor for a household refrigerator," presented at the Fifteenth International Compressor Engineering Conference, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, 2000, pp. 31–38.
- [106] D. Kim, W. Im, S. Hwang, and J. Kim, "Compensation of Current Offset Error in Half-Bridge PWM Inverter for Linear Compressor," *J. Power Electron.*, vol. 15, pp. 1593–1600, Nov. 2015.
- [107] "¿Qué es el Inverter Linear Compressor de LG? -," Feb-2016. [Online]. Available: <http://www.vivirsmart.cl/tecnologia/que-es-el-inverter-linear-compressor-de-lg/>. [Accessed: 15-Oct-2017].
- [108] Embraco, "Embraco Wisemotion Compact Oilless Compressor," 2017. [Online]. Available: <http://www.embraco.com/wisemotion/Default.aspx>. [Accessed: 14-Sep-2017].
- [109] Turbo air - Refrigerator Manufacturer, "Self-cleaning Condenser," 2017. [Online]. Available: <http://www.turboairinc.com/index.php/self-cleaning-condenser>. [Accessed: 15-Oct-2017].
- [110] G. de Aguiar Senger, "Estudo e desenvolvimento de estratégias de controle para um sistema de refrigeração de duplo-evaporador," Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2014.
- [111] Samsung, "Samsung TMF RT7000, RT6000 y RT5000, frigoríficos inteligentes," *tusequijos.com*, 29-Jun-2016. .
- [112] TECNOPOLIS®, "Samsung presentó su nueva Refrigeradora con tecnología Twin Cooling Plus," *Tecnopolis*, 27-Apr-2016. [Online]. Available: <https://tecnopolismag.com/2016/04/27/samsung-presento-nueva-refrigeradora-tecnologia-twin-cooling-plus/>. [Accessed: 15-Oct-2017].

- [113] LG, "LG TOP MOUNT | 9 cu.ft | LG Electronics MX," 2017. [Online]. Available: <http://www.lg.com/mx/refrigeradores/lg-GT28BPPK>. [Accessed: 15-Oct-2017].
- [114] Whirlpool, "Whirlpool Ecuador | Refrigerador No Frost WRW32AKTWW," *Whirlpool*, 2017. .
- [115] "combinado_livre_instalacao_bsnf_8452_ox.pdf." .
- [116] Samsung, "Refrigerador Digital Inverter - ¿Cómo funciona la tecnología Digital Inverter en mi refrigerador?," 19-Oct-2016. [Online]. Available: <http://www.samsung.com/co/support/skp/faq/1111798>. [Accessed: 15-Oct-2017].
- [117] Danfoss, "Aplicación práctica del refrigerante R600a isobutano en sistemas refrigerados domésticos." Danfoss, Mar-2001.
- [118] N. G. Jara Cobos and C. A. Isaza-Roldan, "Influencia de las condiciones socioeconómicas y geográficas en la aplicación de políticas energéticas para la sustitución de refrigeradores domésticas," Tesis, Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Medellín, Colombia, 2015.
- [119] OLADE, "Acceso a la Energía Sostenible en América Latina y el Caribe." OLADE, Oct-2014.
- [120] A. Vieira de Carvalho, L. Rojas, and P. Méndez, "Guía E: Programas de normalización y etiquetado de eficiencia energética." Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2015.
- [121] M. Ellis, "Experience with energy efficiency regulations for electrical equipment." International Energy Agency, Aug-2007.
- [122] N. G. Jara and C. Isaza-Roldan, "Programas de Eficiencia Energética y Etiquetado en el Ecuador – Revisión del Estado Actual," in *Memorias Ponencias 2014*, Medellín, Colombia, 2014, pp. 1–12.
- [123] H. P. Morocho Campos, J. I. Ortiz González, and N. G. Jara Cobos, "Modelo dinámico para el estudio de la implementación de índices de eficiencia energética en refrigeración doméstica, caso Ecuador," B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2017.
- [124] Enerdata, "Energy Efficiency Indicators | Odyssee | Energy efficiency in Europe," Diciembre de-2017. [Online]. Available: <http://www.indicators.odyssee-mure.eu/>. [Accessed: 29-Dec-2017].
- [125] N. CEPAL, "Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de la República Argentina, 2014," Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago de Chile, Oct. 2014.
- [126] G. Rabinovich, "Rápida Evaluación y Análisis del Sector Energético de la República Argentina," PNUD Argentina - Banco Interamericano de Desarrollo, Buenos Aires - Argentina, Informe Final (borrador para discusión), de enero de 2013.
- [127] C. G. Tanides, "El Programa de N&E de Eficiencia Energética de Argentina." Jun-2009.
- [128] C. G. Tanides, "Primera evaluación del impacto de la etiqueta de eficiencia energética en los refrigeradores y congeladores de la Argentina.," *Av. En Energ. Renov. Medio Ambiente*, vol. 11, p. 7.23-7.29, 2007.
- [129] N. CEPAL, "Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética del Brasil," Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Naciones Unidas, Santiago de Chile, S.15-00636, Jul. 2015.
- [130] H. X. da Silva Júnior, "Aplicação das metodologias de análise estatística e de análise do custo do ciclo de vida (ACCV) para o estabelecimento de padrões de eficiência energética: refrigeradores brasileiros," Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo - Brasil, 2005.
- [131] C. Petersen, P. Benoit, and L. Alves, "Reporte del Foro de Eficiencia Energética y Acceso," Secretaría de Energía de México, Banco Mundial, Banco Interamericano de Desarrollo, México, Sep. 2010.

- [132] P. Baratella, "Eficiencia Energética en Brasil," presented at the V Seminario Latinoamericano y del Caribe de Eficiencia Energética, Quito - Ecuador, May-2013.
- [133] O. M. Guzmán, "Eficiencia energética: un panorama regional." Nueva Sociedad, 2009.
- [134] N. CEPAL, "Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de la República de Chile, 2014," Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago de Chile, Oct. 2014.
- [135] M. Padilla, "Etiquetado y Estándares Mínimos de EE en Chile," presented at the Reunión Ministerial Agencia Internacional de Energía Noviembre 2015, Chile, Abril-2016.
- [136] Comisión Ciudadana Técnico Parlamentaria, "La urgencia de un plan nacional de acción de eficiencia energética para Chile," Programa Chile Sustentable - Propuesta ciudadana para el cambio, Santiago de Chile, 2011.
- [137] Á. Cadena, O. González, and O. Báez, "Eficiencia energética en Colombia - Estrategias y metas," Bogotá D.C., Colombia, 25-Sep-2014.
- [138] ICONTEC, *Eficiencia Energética en Artefactos Refrigeradores, Refrigeradores - Congeladores y Congeladores para Uso Doméstico*. 2009, pp. 1–60.
- [139] CCNNPURRE, *Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2012 Eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos. Límites, métodos de prueba y etiquetado*. 2012, pp. 1–55.
- [140] V. Letschert, M. A. McNeil, and I. Sánchez, "Normas de Desempeño Energético Mínimo para Refrigeradores en México. Análisis de Impactos Financieros y Energéticos.," Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), México, Jul. 2011.
- [141] L. I. Hernández Becerril, "Eficiencia Energética en México," presented at the Soluciones globales disponibles localmente, México, Oct-2015.
- [142] Banco Mundial, "Acceso a la electricidad (% de población) | Data," 2017. [Online]. Available: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.ZS?end=2014&locations=EC-CO-MX&start=1990&view=chart>. [Accessed: 07-Sep-2017].
- [143] Energy Star, "Refrigerator Calculator," 2017. [Online]. Available: <https://www.energystar.gov/index.cfm?fuseaction=refrig.calculator>. [Accessed: 11-Sep-2017].
- [144] X. Fernández and F. Gómez, "Indicadores de Eficiencia Energética en México: 5 sectores, 5 retos," Secretaría de Energía de México (SENER) en colaboración con la Agencia Internacional de Energía (AIE), México, 2011.
- [145] N. G. Jara, I. Sánchez, H. Pérez, C. Isaza-Roldan, L. Gallón, and D. P. Giraldo, "Assessment of energy savings by use of domestic refrigerators in Mexico.," presented at the XIV Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, Medellín, Colombia, 2016, vol. 1, pp. 8–15.
- [146] N. G. Jara, C. Isaza-Roldan, L. Gallón, and D. P. Giraldo, "Modelo dinámico para el estudio de la aplicación del plan de renovación de refrigeradores domésticos en Colombia," Colombia, 2015.
- [147] Junta de Gobierno, "Informe sobre la Inflación Enero - Marzo 2012." Banco de México, May-2012.
- [148] M. Zapata, "Políticas para la autogestión de electricidad en el sector residencial urbano de Colombia," Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Medellín, Colombia, 2014.
- [149] E. Nakamura, "Electricity saving behavior of households by making efforts, replacing appliances, and renovations: empirical analysis using a multivariate ordered probit model," *Int. J. Consum. Stud.*, vol. 40, no. 6, pp. 675–684, 2016.

- [150] V. Gutiérrez, I. Ramírez, G. Aguilar, and A. Medina, "Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos." Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2012.
- [151] E. M. Dickson, "Red de recuperación, reciclaje y regeneración de gases refrigerantes Red R&R&R," Bogotá D.C., Colombia, Jun-2015.
- [152] J. A. Ordóñez Espinoza, "Modelo de dinámica de sistemas para determinar la influencia de la implementación de planes de renovación de refrigeradores domésticos en los procesos de oferta y demanda-caso Ecuador," B.S. thesis, 2016.
- [153] N. G. Jara, F. Z. Reinoso, C. A. Isaza-Roldan, and J. L. Espinoza Abad, "Impactos en el consumo de energía eléctrica por el uso de refrigeradores eficientes-caso Ecuador," *Ingenius*, no. 18, pp. 53–63, 2017.
- [154] INEN, *Eficiencia Energética en Artefactos de Refrigeración de uso Doméstico. Reporte de Consumo de Energía, Métodos de Prueba y Etiquetado*. 2010, pp. 1–39.
- [155] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Termodinámica*, Séptima Edición. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2012.
- [156] H. Qudrat-Ullah and B. S. Seong, "How to do structural validity of a system dynamics type simulation model: the case of an energy policy model," *Energy Policy*, vol. 38, no. 5, pp. 2216–2224, 2010.
- [157] S. Ahmad, R. M. Tahar, F. Muhammad-Sukki, A. B. Munir, and R. A. Rahim, "Application of system dynamics approach in electricity sector modelling: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 29–37, 2016.
- [158] S. H. Hosseini and H. Shakouri, "A study on the future of unconventional oil development under different oil price scenarios: A system dynamics approach," *Energy Policy*, vol. 91, pp. 64–74, 2016.
- [159] X. Liu, S. Ma, J. Tian, N. Jia, and G. Li, "A system dynamics approach to scenario analysis for urban passenger transport energy consumption and CO₂ emissions: a case study of Beijing," *Energy Policy*, vol. 85, pp. 253–270, 2015.
- [160] O. Tang and J. Rehme, "An investigation of renewable certificates policy in Swedish electricity industry using an integrated system dynamics model," *Int. J. Prod. Econ.*, 2017.
- [161] X. Guo and X. Guo, "China's photovoltaic power development under policy incentives: A system dynamics analysis," *Energy*, vol. 93, pp. 589–598, 2015.
- [162] D. Wang, G. Ma, X. Song, and Y. Liu, "Energy price slump and policy response in the coal-chemical industry district: A case study of Ordos with a system dynamics model," *Energy Policy*, vol. 104, pp. 325–339, 2017.
- [163] R. Zhao, X. Zhou, Q. Jin, Y. Wang, and C. Liu, "Enterprises' compliance with government carbon reduction labelling policy using a system dynamics approach," *J. Clean. Prod.*, vol. 163, pp. 303–319, 2017.
- [164] R. Zhao and S. Zhong, "Carbon labelling influences on consumers' behaviour: a system dynamics approach," *Ecol. Indic.*, vol. 51, pp. 98–106, 2015.
- [165] Q. Li, W. Zhang, H. Li, and P. He, "CO₂ emission trends of China's primary aluminum industry: A scenario analysis using system dynamics model," *Energy Policy*, vol. 105, pp. 225–235, 2017.
- [166] T. Ercan, N. C. Onat, and O. Tatari, "Investigating carbon footprint reduction potential of public transportation in United States: A system dynamics approach," *J. Clean. Prod.*, vol. 133, pp. 1260–1276, 2016.
- [167] L. Timma, U. Bariss, A. Blumberga, and D. Blumberga, "Outlining innovation diffusion processes in households using system dynamics. Case study: energy efficiency lighting," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 2859–2864, 2015.

- [168] G. S. Sisodia, M. Sahay, and P. Singh, "System dynamics methodology for the energy demand fulfillment in India: A preliminary study," *Energy Procedia*, vol. 95, pp. 429–434, 2016.
- [169] C. Jeon, J. Lee, and J. Shin, "Optimal subsidy estimation method using system dynamics and the real option model: Photovoltaic technology case," *Appl. Energy*, vol. 142, pp. 33–43, 2015.
- [170] M. Saleh, R. Oliva, C. E. Kampmann, and P. al I. Davidsen, "A comprehensive analytical approach for policy analysis of system dynamics models," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 203, no. 3, pp. 673–683, 2010.
- [171] C. Lu, H.-C. Liu, J. Tao, K. Rong, and Y.-C. Hsieh, "A key stakeholder-based financial subsidy stimulation for Chinese EV industrialization: A system dynamics simulation," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 118, pp. 1–14, 2017.
- [172] W. Yunna, C. Kaifeng, Y. Yisheng, and F. Tiantian, "A system dynamics analysis of technology, cost and policy that affect the market competition of shale gas in China," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 235–243, 2015.
- [173] J. W. Jeon, Y. Wang, and G. T. Yeo, "Ship Safety Policy Recommendations for Korea: Application of System Dynamics," *Asian J. Shipp. Logist.*, vol. 32, no. 2, pp. 73–79, 2016.
- [174] G. R. Allington, W. Li, and D. G. Brown, "Urbanization and environmental policy effects on the future availability of grazing resources on the Mongolian Plateau: Modeling socio-environmental system dynamics," *Environ. Sci. Policy*, vol. 68, pp. 35–46, 2017.
- [175] L. Pretorius, J. H. C. Pretorius, and S. J. Benade, "A system dynamics approach to technology interaction: From asymptotic to cyclic behaviour," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 97, pp. 223–240, 2015.
- [176] H. Chen, J. Yu, and W. Wakeland, "Generating technology development paths to the desired future through system dynamics modeling and simulation," *Futures*, vol. 81, pp. 81–97, 2016.
- [177] C. Xue and Y. Xu, "Influence Factor Analysis of Enterprise IT Innovation Capacity Based on System Dynamics," *Procedia Eng.*, vol. 174, pp. 232–239, 2017.
- [178] S. Aparicio, D. Urbano, and D. Gómez, "The role of innovative entrepreneurship within Colombian business cycle scenarios: A system dynamics approach," *Futures*, vol. 81, pp. 130–147, 2016.
- [179] E. Dace, I. Muizniece, A. Blumberga, and F. Kaczala, "Searching for solutions to mitigate greenhouse gas emissions by agricultural policy decisions—Application of system dynamics modeling for the case of Latvia," *Sci. Total Environ.*, vol. 527, pp. 80–90, 2015.
- [180] C. Fan, S.-K. S. Fan, C.-S. Wang, and W.-P. Tsai, "Modeling computer recycling in Taiwan using system dynamics," *Resour. Conserv. Recycl.*, 2016.
- [181] S. R. Golroudbary and S. M. Zahraee, "System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 53, pp. 88–102, 2015.