



Universidad Autónoma Metropolitana
Azcapotzalco, Iztapalapa y Xochimilco

Maestría en Ciencias Económicas
Idónea Comunicación de Resultados

**INNOVACIÓN, EFICIENCIA Y POBREZA ENERGÉTICA
EN MÉXICO**

Estudiante:
Gabriel Alberto Rosas Sánchez
Para optar al grado de
Maestro en Ciencias Económicas

Asesora: Georgina Alenka Guzmán Chávez (UAM-I)
Lector interno: Ignacio Llamas Huitrón (UAM-I)
Lector externo: José Iván Escalante Semerena (UNAM)

Ciudad de México, 19 de marzo del 2020

*A mi viejito Margarito,
por su luz y sabiduría eterna que dejó su pártida.*

*A mi madre Susana, mi padre Gabriel y mi hermana Guadalupe,
por construir las bases de quien soy con su infinito apoyo, amor y bondad.*

*A Nichte,
por darle sentido al cotidiano poético.*

Agradecimientos

El desarrollo de esta investigación ha sido el mayor reto de mi vida profesional. Me hizo darme cuenta que sólo habrá una constante en mi vida que me permitirá crecer en mis logros académicos y profesionales: mi familia. Agradezco a mis padres, Gabriel Rosas Zavala y Susana Sánchez Soyet por preocuparse a diario, sintiendo su amor y cariño como desde la infancia. Les agradezco su liento y evitar que la soledad dominara mi tiempo después de arduas y largas jornadas de trabajo. Agradezco a mi hermana Guadalupe Rosas Sánchez, por su particular forma de expresar su amor y por hacerme reír al permitirme entrar a su mundo. Agradezco a mi novia Nicté Tovar, por llegar en el momento correcto de mi vida y mostrarme que junto a ella sólo tengo la opción de vivir la eternidad del tiempo. Gracias por tu eterna inspiración y ser la expresión del dulce tiempo de la primavera. Dedico este trabajo a mi abuelito Margarito Rosas Miranda que hace pocos meses se aventuró en los caminos de la inmortalidad. Tu ausencia hecha de aurora nos hace recordar lo mucho que te amamos, tu recuerdo reviste de colores cimbrará eternamente nuestros pensamientos

Quiero agradecer el apoyo incondicional de mi asesora Dra. Georgina Alenka Guzmán Chávez por su apoyo en todo momento, así como la libertad de afrontar un tema nuevo para ambos. Sus sabios consejos tiñen el divan de mi carrera como investigador. Agradezco al Dr. Ignacio Llamas Huitrón y Dr. Roberto Iván Escalante Semerena por su amabilidad y disposición para colaborar en este trabajo, así como reconocer su extraordinario apoyo en las contribuciones críticas.

Agradezco a mi querida Universidad por brindarme todo lo necesario, en cuestión intelectual, para construirme cotidianamente y expandir mi persona. Una mención especial para el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme el apoyo financiero durante los dos últimos años.

Por último, agradezco a mis amigos de generación de maestría por acompañar mi camino durante nuestra formación y convertir esta etapa de mi vida en la mejor.

Resumen

En esta investigación se plantea debatir las inconsistencias analíticas que se derivan del análisis económico convencional al considerar el sistema económico, social y ambiental de manera aislada. Se propone una forma de integración de los tres sistemas considerándolos abiertos e interrelacionados bajo principios teóricos de Economía Evolucionista y Sistemas Complejos Adaptativos. Se justifica que la *innovación* es la mejor respuesta adaptativa de los agentes cuando interactúan en los tres sistemas frente a la actual crisis ambiental. Se considera al sistema económico subordinado a las leyes del ambiente, principalmente por la ley de entropía; así mismo se plantea al sistema económico en interacción con el sistema social. Por tanto, la innovación tendrá tres evaluaciones: en el sistema económico en términos de eficiencia energética, en el sistema social en términos de pobreza energética y en el sistema ambiental en términos de entropía. Si la innovación logra ser evaluada favorablemente en los tres sistemas, entonces los sistemas logran estabilidad en términos de *ecoeficiencia*. El análisis empírico se lleva a cabo a nivel del Sector Eléctrico de México (SEN) para el periodo 2002-2017.

Los resultados muestran que la eficiencia en la generación de energía eléctrica afecta favorablemente en la disminución de emisiones contaminantes, pero no logra disminuir el porcentaje de población en pobreza energética en términos de gasto corriente en servicio eléctrico. Se concluye que el análisis fragmentado de los fenómenos ambientales, económicos y sociales derivado de la teoría convencional para el diseño de política pública es de carácter excluyente, pues considera supremacía analítica de aspectos técnico-económicos y extrapola los beneficios a todo los sistemas, dejando de lado las interrelaciones con el resto de los actores. Los resultados muestran que una política que priorice de manera aislada la eficiencia energética en el SEN sería favorable para el sector, pero no necesariamente para la sociedad.

Clasificación JEL: Q57, B41, P28, Q4, B52.

Palabras clave: Economía Evolutiva, Sistemas Complejos Adaptativos, Economía Ecológica, Sistema Eléctrico de México.

Abstract

The objective of this thesis is to discuss the analytical inconsistencies that derive from conventional economic analysis when considering the economic, social and environmental system in isolated way. A way of integrating the three systems is proposed considering them open and interrelated under theoretical principles of Evolutionary Economics and Adaptive Complex Systems. It is justified that *innovation* is the best adaptive response of agents when they interact in all three systems in the face of the current environmental crisis. The economic system is considered to be subordinated to the laws of the environment, mainly for the entropy law; likewise, it is stated that the economic system interacts with the social system. Therefore, the innovation will have three evaluations: in the economic system in terms of energy efficiency; in the social system in terms of energy poverty, and in the environmental system in terms of entropy. If innovation manages to be favorably evaluated in all three systems, then the systems achieve stability in terms of *ecoefficiency*. The empirical analysis is carried out taking as object of study the Mexican Electricity Sector (SEN) for the period 2002-2017.

The results show that the efficiency in the generation of electric power favorably affects the decrease of pollutant emissions but fails to reduce the percentage of population in energy poverty in terms of current expenditure on electric service. It is concluded that the fragmented analysis of environmental, economic and social phenomena derived from the conventional theory for the design of public policy is of an exclusive nature, since it considers analytical supremacy of technical-economic aspects and extrapolates the benefits to all systems, leaving aside the interrelations with the rest of the actors. The results show that a policy that gives priority only to energy efficiency in the SEN would be favorable for the sector, but not necessarily for society.

JEL classification : Q57, B41, P28, Q4, B52.

Keywords: Evolutionary Economy, Adaptive Complex Systems, Ecological Economics, Electric System of Mexico.

Índice

Introducción	11
Justificación	13
Tres problemas de investigación vinculados	17
Pregunta de investigación	18
Objetivo general	19
Objetivos particulares	19
Hipótesis de trabajo	21
Contenido de la tesis	22
<i>Capítulo 1 Antecedentes y discusión teórica</i>	
1.1. Medio ambiente y economía	23
1.1.1. Capitalismo y cambios en los paradigmas energéticos	25
1.2. Economía neoclásica y medio ambiente	28
1.2.1. Economía neoclásica y leyes de termodinámica	31
1.3. Economía evolutiva: un enfoque alternativo	34
1.4. Optimización y Eficiencia: de economía neoclásica a sistemas complejos	36
1.4.1. La innovación como respuesta adaptativa	43
1.4.2. Sistemas económico, social y ambiental: Una propuesta de integración	48
1.5. Desarrollo Sostenible: un marco normativo de acción	51
1.5.1. Política ambiental como fuente creativa de innovación	54
1.5.2. Ecoinnovaciones	58
1.6. Eficiencia energética	60
1.6.1. ¿Ecoeficiencia es sinónimo de eficiencia energética?	65
1.6.2. Tipos de eficiencia energética	65
1.7. Pobreza energética	69
<i>Capítulo 2. El sector eléctrico de México</i>	
2.1. El sector eléctrico global	
2.1.1. El desarrollo del paradigma tecnológico de la electricidad	76
2.1.2. Difusión del nuevo paradigma eléctrico	78

2.2. Sector eléctrico de México	
2.2.1. Antecedentes de la evolución del sector eléctrico	80
2.2.2. Principales reformas al sector	84
2.2.3. Contribución dentro del sector energético nacional	87
2.2.4. Métodos y tecnologías	90
2.2.5. El transito del sector eléctrico hacia un desarrollo sustentable	93
Capítulo 3. Análisis empírico	
3.1 Evolucionismo e innovación: Justificación de la medición	96
3.2 Análisis de datos envolventes	98
3.3 Índice Malmquist	101
3.4 Naturaleza de los datos	103
3.5 Resultados	106
3.6. Evaluación pobreza energética y eficiencia	112
Conclusiones y recomendaciones	119
Agenda pendiente	121
Bibliografía	122
Anexo A	131
Anexo B	133
Anexo C	136

Índice de cuadros

Cuadro 1. Barreras de la eficiencia energética	62
Cuadro 2. Nueva estructura del sector eléctrico de México	87
Cuadro 3. Tecnología para la generación eléctrica (2002-2017)	92
Cuadro 4. Revisión de la bibliografía relacionada al uso de DEA en el sector eléctrico	103
Cuadro 5. Gasto de los hogares en electricidad respecto a su ingreso monetario	115
Cuadro 6. México. Resultados de regresión en dos etapas eficiencia y gasto de los hogares	118

Índice de figuras

Figura 1. Proceso económico y neoclásico	28
Figura 2. Comportamiento humano en ambiente interno y externo	35
Figura 3. Innovación desde una perspectiva neoclásica con aplicación al medio ambiente	47
Figura 4. Innovación desde una perspectiva evolucionista con aplicación al medio ambiente	47
Figura 5. Interacciones entre el sistema económico, social y ambiental: innovación, eficiencia y pobreza energética	50
Figura 6. Influencia económica sobre la eficiencia energética	62
Figura 7. Relación entre eficiencia energética y eficiencia económica	63
Figura 8. Dimensiones que influyen en la prestación de servicios energéticos al hogar y el surgimiento de la pobreza de energía doméstica.	71
Figura 9. Conceptualización de la pobreza energética como fenómeno dinámico	74
Figura 10. Frontera de eficiencia	100
Figura 11. Índice Malmquist	101

Índice de gráficas en texto

Gráfica 1. México. Producción de energía eléctrica por tipo de central (1965-2017)	88
Gráfica 2. México. Consumo de energía para la generación de electricidad por fuente (1965-2017)	89
Gráfica 3. México. Importancia relativa del consumo de energía eléctrica por sector (1965-2017)	90
Gráfica 4. México. Eficiencia por tipo de tecnología (2002)	108
Gráfica 5. México. Eficiencia por tipo de tecnología (2008)	108
Gráfica 6. México. Eficiencia por tipo de tecnología (2013)	109
Gráfica 7. México. Eficiencia por tipo de tecnología (2017)	109
Gráfica 8. México. Nacional. Evolución de la eficiencia (2003-2017)	111
Gráfica 9. México. Composición del gasto de los hogares	114

Índice de gráficas en anexo

Gráfica 10. México. Consumo de energía para la generación de eléctrica Centrales Pública (1965-2017)	131
Gráfica 11. México. Consumo de energía para la generación de eléctrica PIE (1965-2017)	131
Gráfica 12. México. Consumo de energía para la generación de eléctrica Centrales Autogeneración (1965-2017)	132
Gráfica 13. México. Termoeléctrica Evolución de la eficiencia (2003-2017)	133
Gráfica 14. México. Vapor. Evolución de la eficiencia (2003-2017)	133
Gráfica 15. México. Ciclo combinado Evolución de la eficiencia (2003-2017)	133
Gráfica 16. México. Turbogás. Evolución de la eficiencia (2003-2017)	133
Gráfica 17. México. Combustión interna. Evolución de la eficiencia (2003-2017)	134
Gráfica 18. México. Dual. Evolución de la eficiencia (2003-2017)	134

Gráfica 19. México. Carboeléctrica. Evolución de la eficiencia (2003-2017)	134
Gráfica 20. México. Nucleoeléctrica. Evolución de la eficiencia (2003-2017)	134
Gráfica 21. México. Geotérmica. Evolución de la eficiencia (2003-2017)	135
Gráfica 22. México. Eólica Evolución de la eficiencia (2003-2017)	135
Gráfica 23. México. Hidroeléctrica. Evolución de la eficiencia (2003-2017)	135
Gráfica 24. México. Fotovoltáica. Evolución de la eficiencia (2003-2017)	135

Introducción

El actual diseño de política pública para combatir el deterioro ambiental plantea un reto dual para los distintos sectores de la sociedad. Por un lado, contribuir a disminuir el ritmo de afectaciones ambientales y por otro la necesidad de realizar sus proyectos como sujetos sociales y satisfacer exigencias económicas inmediatas dentro de un espectro de sustentabilidad que garantice la sobrevivencia actual y de las próximas generaciones.

Los instrumentos de los gobiernos para lograr estos objetivos consisten en seguir las recomendaciones establecidas en los diferentes acuerdos ambientales firmados en materia ambiental como los establecidos en la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente celebrada en Estocolmo en 1972, en Rio de Janeiro en 1992, el Protocolo de Kioto de 1997 y el Acuerdo de París en 2015. Las metas planteadas en estas reuniones coinciden en la necesidad de transitar hacia esquemas de energías alternas para la producción de bienes que contribuya a la disminución de emisiones contaminantes, principalmente de dióxido de carbono.

La dinámica de cambio debe realizarse dentro un marco normativo establecido por el *Desarrollo Sustentable* que consiste en la creación de modelos energéticos sustentables¹ que tiene como ejes rectores la erradicación de la pobreza, seguridad energética, paz, contexto institucional y competencia económica. Alcanzar estas metas son las aspiraciones centrales de los *Objetivos del Milenio*. El lento desempeño institucional de los países ha postergado la fecha pactada para alcanzarlos proponiendo como nueva fecha límite el año 2030².

Las múltiples esferas de acción de los compromisos ambientales involucran interacciones complejas entre las necesidades del sistema social, sistema ambiental y sistema económico. En cambio, el diseño de política sugiere análisis fragmentados, en donde se le atribuye al sistema económico el rol principal para la transición energética y con ello la realización de metas económicas y beneficios sociales (Guellec y Dernis, 2008; Hašič, Silva y Johnstone, 2015), relegando al medio ambiente a términos mercantiles.

¹ Por modelo energético sostenible, siguiendo la definición expuesta en la Cumbre de Rio del año 2012, es aquel que contribuye a la erradicación de la pobreza y al crecimiento económico sostenible, aumentando la inclusión social, mejorando el bienestar humano y creando oportunidades de empleo y trabajo decente para todos, manteniendo al mismo tiempo el funcionamiento saludable de los ecosistemas.

² Informe de la Naciones Unidas (2019)

Sin embargo, esta forma de plantear los problemas medioambientales redundando en un determinismo económico, partiendo de un esquema analítico aislado, cerrado y estático, haciendo inconsistente, en términos metodológicos, elementos complejos de sistemas sociales y ambientales. Por lo cual, las políticas empleadas para alcanzar los objetivos normativos devienen de un sustento teórico inconsistente para los sistemas que pretenden abordar, haciendo las metas inalcanzables por dejar de lado aspectos esenciales en su análisis y considerar su eficacia en función de resultados estadísticos sin soporte teórico.

La preocupación internacional se plasma en una gran agenda de acciones, sin embargo, no se han conseguido los resultados deseados. Las principales dificultades que se plantean como hipótesis del lento desempeño desde una visión económica son: i) ausencia de un marco analítico que integre la dinámica de los distintos sectores y sus agentes, tratando a cada sistema como aislado y determinado por leyes particulares; ii) evaluación de las políticas ambientales únicamente en términos de costo-beneficio siendo el mercado el único evaluador; iii) consolidación de un marco energético que no considera las diferencias entre individuos y formas de utilización de la energía, por lo cual la política ambiental tiene efectos diferenciadores; iv) la innovación sólo es vista desde la perspectiva técnica sin que necesariamente logre reducir emisiones, tan sólo se considera la eficiencia técnica, es decir, en términos físicos sin considerar los vínculos y efectos sociales y ambientales; v) la política ambiental sigue considerando a la innovación y progreso tecnológico como el instrumento que permita preservar el patrón actual de consumo energético, considerando implícitamente que los recursos serían ilimitados tan sólo incrementando la intensidad de innovación en los procesos productivos. En este sentido, la tecnología en lugar de mejorar aspectos cualitativos únicamente está retrasando la crisis energética, conduciendo a la paradoja de Jevons³; vi) por último, el desempeño actual de la agenda medioambiental prioriza la innovación desde su expresión física sin considerar las tecnologías sociales.

³ Se refiere al efecto que produce una innovación tecnológica que incremente el número de bienes producidos. Como los agentes están convencidos que cada unidad de bienes utiliza una cantidad menor de insumos ambientales, consumen un mayor número de bienes a costa de un mayor nivel de utilización general de recursos ambientales.

Justificación

Metodológicamente existen inconvenientes para integrar los tres escenarios analíticos planteados de manera satisfactoria. Los sistemas *ambiental*, *económico* y *social* consideran una serie de leyes complejas a su interior que sobrepasan las técnicas convencionales de modelación lineal⁴ dejando de lado aspectos relevantes dentro del funcionamiento de cada sistema. Es imposible suponer que los efectos son unidireccionales y, sobre todo, que la supremacía económica garantice el adecuado funcionamiento en los demás sistemas alcanzando los objetivos sociales y ambientales pactados. Además, se necesita un marco teórico que vaya más allá del equilibrio, estático, y agentes representativos de la economía convencional⁵ y que no relegue los problemas medioambientales a situaciones de correlación estadística, o considerar los recursos naturales como mercancías a través de valorización monetaria sujeta a las leyes de oferta y demanda.

Por ello, el interés de plantear un esquema alternativo de interacciones entre los individuos analíticamente consistente, sin necesidad de recurrir a supuestos estrictos como la economía convencional y que dé cuenta de la mejor respuesta adaptativa de los sistemas en su interacción para lograr los objetivos planteados frente al deterioro ambiental más allá de un problema de maximización y cuestiones técnicas de producción. Esta visión replantea el papel del espectro económico dentro del diseño de política ambiental que reconoce su interacción con el sistema social y ambiental en lugar de suponer supremacía del primero sobre los dos restantes.

El esquema convencional de la economía al seguir con el método de la física clásica vive en un *mito económico*⁶, en el cual puede realizarse procesos económicos sin necesidad de energía. La economía construida bajo el principio de sistema cerrado consideró que no se puede crear masa ni energía, pero sí se puede tener beneficios moviendo y reordenando la materia en el sistema.

⁴ Véase Dopfer (2005).

⁵ Cuando se haga referencia a la economía convencional se hace énfasis principalmente a la economía neoclásica.

⁶ Concepto acuñado por Nicholas Georgescu-Roegen (1972) al referirse a la imposibilidad de la economía neoclásica para llevar a cabo su proceso económico en términos energéticos.

En esta visión, los flujos materiales que utilizan productores y consumidores con el fin de maximizar su utilidad dejan inalterado el equilibrio energético, es decir, se utilizan insumos en el proceso de producción y se obtiene la misma cantidad de energía expresada en producto, dejando neutral el balance de recursos ambientales. Es por esta razón que el cuadro analítico neoclásico abandona la preocupación por el medio ambiente por considerar incapaz de afectarlo, puesto que las cantidades de energía se conservan en calidad y cantidad. Este proceso sigue el principio mecánico de conservación de la energía (primera ley de la termodinámica⁷) presente en toda la construcción de la economía neoclásica con dos consecuencias analíticas: i) cantidad de recursos disponible siempre constante y de la misma calidad; ii) idea de producción infinita que no causa residuos ni contaminación.

Una de las dificultades del esquema económico tradicional es la ausencia de análisis sobre los balances energéticos. Como se expuso, se asume la existencia de una corriente material invariable y permanente, permitiendo que cualquier proceso tenga lugar. Sin embargo, la economía ha ignorado el concepto de *entropía*. Con base en la segunda ley de termodinámica, entropía se define como el índice de la cantidad de energía no disponible en cierto momento de su evolución (Georgescu-Roegen, 1972). Esta ley señala que en cualquier sistema la energía disponible se transforma en energía no disponible hasta desaparecer por completo, por lo cual, el sistema económico está sujeto al nivel de entropía, por lo cual es imposible contar con un flujo constante para realizar los planes de consumo y producción de los agentes, además los procesos económicos llevarían al colapso al sistema dado que la energía utilizada es imposible recuperarla.

La incongruencia metodológica y ausencia en la economía neoclásica respecto a la consideración del medio ambiente en su núcleo analítico ha generado una serie de trabajos y propuestas para aliviar la crisis ambiental de carácter ambiguo y sin impactos relevantes

⁷ Las experiencias de Joule permiten establecer la ley que dicta cualquier sistema aislado que no intercambie ni masa ni calor con sus alrededores, se le suministra una cierta cantidad de energía mecánica W , entonces sólo provoca un incremento de la energía interna del sistema en W . (García- Colín, 1986). En términos económicos, un sistema cerrado conserva el nivel de energía interna inalterado. Todo trabajo aplicado (cualquier choque exógeno) incrementará o disminuirá el nivel de energía en la misma cantidad. Piénsese en un nuevo yacimiento petrolero que se descubre aportará energía en cuanto la cantidad de trabajo que se aplique para obtenerlo. Véase un análisis detallado de las implicaciones de la primera ley de la termodinámica en Georgescu-Roegen (1971, 1972), Holland (2004), Arthur (2006), Beinhocker (2006), Kümmel (2011) y Page (2011)

en la política pública. Una teoría que nunca consideró al medio ambiente ahora trata de integrarlo en su agenda desde un marco analítico incompatible ¿qué resultados se pueden esperar? ¿en qué términos se plantea solucionar un problema si nunca lo han contemplado? ¿cómo analizar un fenómeno sin un marco analítico congruente? Dada la ausencia de un compromiso científico desde la economía tradicional, las principales aportaciones en materia ambiental buscan su validación en regresiones econométricas y dejando el problema a la suerte de las correlaciones y causalidades estadísticas dentro de un consenso científico que parece guiarse por el oportunismo académico.

La naturaleza del análisis conduce a buscar alternativas metodológicas para presentar de manera distinta y menos distante a la realidad los fenómenos planteados, reconociendo los límites de todo modelo. La visión de la sociedad y la naturaleza de los fenómenos económicos se harán a partir del enfoque de Economía Evolutiva⁸ (EEv). Esta corriente considera agentes económicos heterogéneos sujetos a reglas cognitivas, sociales, históricas y culturales, necesitando de los siguientes tres postulados: i) bimodalidad, ii) asociación, iii) procesos. Se reconoce la dinámica social como resultado de un entorno histórico determinado y su capacidad de adaptación, adaptación, aprendizaje y auto-organización frente a la crisis ambiental. Junto al soporte teórico, se utiliza la visión de *Sistemas Complejos Adaptativos (SCA)*⁹.

Esta metodología permite modelar el tipo de interacciones de una sociedad descrita por EEv cuyas características básicas son: 1) integración de los procesos ambientales y socioculturales, incluyendo procesos individuales, 2) dinámica no lineal e impredecible, 3) propiedades emergentes, 4) auto-organización, 5) flujo de retroalimentación entre procesos económicos, sociales y ambientales, 6) efectos de escala diferenciada entre los agentes, 7) consideración del tiempo, 8) imposibilidad de extrapolar información de un sistema a otro (Escalante-Semerena, 2015). Para la modelización se utiliza propiedades de SCA con base en

⁸ Economía evolutiva o evolucionista se entiende como una interpretación de los fenómenos económicos basada en la interacción de múltiples agentes heterogéneos, quienes mediante la repetición de un sistema de prueba y error intentan continuamente explorar nuevas estrategias de comportamiento, formas organizativas, tecnologías, etc. (Dosi, 2009).

⁹ De manera introductoria, el análisis de sistemas complejos refiere al análisis de fenómenos no lineales. Están formados por un conjunto grande de componentes individuales que interactúan entre sí y que pueden modificar sus estados internos como producto de tales interacciones (Miramontes, 2009).

Caselles¹⁰ (2015), expresado en un diagrama de flujo hidrodinámico de Forrester, considerando las aportaciones de Georgescu-Roegen (1971, 1972, 1994).

La propuesta de investigación en este trabajo parte de considerar tres sistemas abiertos e interrelacionados: económico, social y ambiental. Los agentes interactúan y el objetivo del sistema es la sobrevivencia frente a la crisis ambiental. La capacidad adaptativa frente a la crisis ambiental produce la habilidad general de resistir perturbaciones ante un contexto de cambio climático, considerándose como resiliencia. Siguiendo los axiomas de EEv y las propiedades de SCA, el conjunto de reglas de los individuos y su interacción hace que modifiquen su comportamiento y surjan emergencias. Los individuos miembros de los tres sistemas interactúan y el resultado emergente es la *innovación* pero no en términos tradicionales sino desde una perspectiva evolucionista. Esta innovación tendrá evaluación en los tres sistemas: en el sistema económico, social y ambiental en términos de *eficiencia energética, pobreza energética y entropía*. Los agentes aceptarán la innovación y eficiencia si tiene repercusiones sobre la condición de *pobreza energética*. Si la innovación es avalada por los agentes y evaluada favorablemente, entonces la respuesta adaptativa será considerada como *ecoinnovación*.

La evaluación social en estos términos es compatible con el tipo de agentes evolucionistas. Las reglas y rutinas vigentes son cambiantes resultado de una innovación. La existencia de *pobreza energética*¹¹ es resultado de un sistema energético excluyente donde cierto segmento de población no logra acceder a servicios energéticos para hacer

¹⁰ El autor plantea un proceso modelizador de métodos parciales para sistemas dinámicos, no lineales y complejos. Consiste en lo siguiente: El método para construir el análisis a lo largo de esta investigación se sigue el esquema de Caselles (2015). i) descripción del problema; ii) construcción de un modelo conceptual; ii.i) elección de los objetos, elementos o variables que tengan relación; ii.ii) identificación de relaciones causa-efecto entre los elementos seleccionados (diagrama de Forrester); ii.iii) asignación de una representación funcional a las relaciones detectadas; iii) programación del modelo de computadora a través de técnicas de simulación (Análisis de Datos Envolvente); iv) calibrado del modelo, asignando el valor más adecuado a los parámetros; v) análisis de sensibilidad frente a pequeñas variaciones (control del caos, o reacción/adaptación de los sistemas frente a cualquier contingencia. En este caso, suponemos la eficiencia es la mejor reacción de los sistemas integrados frente a las contingencias ambientales, económicas, técnicas y sociales); vi) evaluación de la validez o utilidad del modelo para lograr los objetivos propuestos (evitar contradicciones internas); vii) diseños de experimentos; viii) presentación de resultados; ix) toma de decisiones.

¹¹ Defínase inicialmente la incapacidad de los hogares para acceder a electricidad u otras fuentes de servicios energéticos y medios de satisfacción relativamente seguros y limpios que apoyen las actividades humanas y el desarrollo del ser humano (AIE, 2015)

frente a sus necesidades alimenticias y de salud. La incorporación de una innovación en estos términos es promisorio para energía de mejor calidad. También implica reivindicación social al integrar a excluidos. La innovación tendría que adaptarse a los patrones de cultura energética de cada sociedad y los agentes, dentro de un conjunto de reglas; es decir, adaptarse a la nueva situación.

En este esquema de interacciones, la política pública deberá incentivar el uso y creación de *ecoinnovaciones*, no en los términos tradicionales sino aquella innovación que logre ser eficiente en términos entrópicos reduzca los excluidos del patrón existente, se adapte y configure una nueva cultura energética y reduzca las emisiones contaminantes. Aquellas innovaciones que no logren sus respectivas evaluaciones se eliminan por no ser eficientes. Quienes no logren el objetivo, saldrán del proceso de competencia evolutiva (Yoguel y Robert, 2017). Este proceso adaptativo permitiría la intervención de los actores en la implementación y desarrollo de políticas públicas al contar con el conocimiento de la dinámica del sistema y con la finalidad de construir instituciones flexibles para la mejor gestión de los recursos ambientales (Escalante-Semerena y Basurto, 2014) y un patrón energético incluyente.

Tres temas de investigación vinculados

De la breve descripción de la temática alrededor de la innovación, eficiencia y pobreza, que se presenta en la sección anterior, se pueden distinguir al menos tres grandes temas vinculados entre sí, cuya separación para el entendimiento del papel y los efectos de la eficiencia energética en la pobreza energética es fundamental. Para tener un escenario analítico completo, se parte de la pregunta ***¿cuál es la mejor reacción de los agentes cuando interactúan en sistemas abiertos, como el ambiental, económico y social, para hacer frente a la crisis energética?*** Como hipótesis se plantea que la innovación es la mejor respuesta de los agentes como propiedad emergente. Esta se justificará en el apartado correspondiente.

a) El primero de los vínculos es entre **innovación y eficiencia energética**. Este es el tema original en esta larga polémica entre los estudiosos actualmente; un importante subtema de éste son los objetivos de la política de desarrollo sustentable y, en particular, la

posibilidad de concebir el desarrollo económico a través del incentivo a la **eficiencia energética**.

b) El segundo tema es el efecto indirecto de la eficiencia energética –a través del mejor uso de insumos ambientales disminuyendo los niveles de entropía- sobre los sectores de la economía, así como por sus efectos directos en la pobreza y en la desigualdad, -a través del mayor acceso de la comunidad a servicios energéticos, vía disminución del gasto corriente en este rubro, que reduzca a los excluidos del actual patrón energético y modifique, a través de las reglas, el patrón de consumo- esto es, **el efecto de la eficiencia energética en la pobreza energética**; c) si el encadenamiento anterior se logra y la innovación se válida en los tres sistemas, es posible hablar de *ecoeficiencia*¹² para el caso de la industria eléctrica de México.

Pregunta de investigación

La pregunta de investigación que se deriva del problema de investigación planteado en la sección anterior es pues la siguiente: **¿Existe un vínculo entre innovación ambiental y eficiencia energética que induzca la reducción de pobreza energética en el Sector Eléctrico de México?** Para llevar a cabo la verificación empírica, se desarrolla el análisis de un estudio de caso que permita ayudar a probar la (s) hipótesis específica (s) que se definirán más adelante.

Para elegir un caso concreto se consideraron varias posibilidades, sin embargo, con el objeto de poder medir de manera más concluyente este efecto, parece ideal seleccionar un país con segmentos de la población viviendo en pobreza y que simultáneamente haya experimentado algún proceso que pueda ser asociado a la eficiencia energética, además de contar con políticas públicas medioambientales relativamente laxas. Dentro de este planteamiento, se puede ser más específico, a nivel sectorial. En particular, se analiza el proceso de generación de energía eléctrica del Sector Eléctrico Nacional de México (SEN).

¹² En la literatura convencional se define *ecoeficiencia* como toda innovación que reduzca la utilización de insumos energéticos y contribuya a los objetivos sociales planteados en los principios del desarrollo sustentable. Con base en Park, 2010; Kemp y Andersen, 2004 se redefine el concepto. En este trabajo la *ecoeficiencia* se refiere a las innovaciones realizadas por los agentes que permite reducir las condiciones de pobreza energética a través del suministro de servicios energéticos eficientes procedentes de energías limpias que mitigan aspectos como el hambre y los problemas de salud a través de métodos innovadores, desarrollo de tecnologías y nuevo conocimiento que mitiguen el deterioro ambiental.

Se elige porque es posible vincular los temas de investigación. Se describe las motivaciones en los siguientes objetivos:

Objetivo general

Esta investigación busca analizar el papel de innovación ambiental medida sobre la eficiencia del Sector Eléctrico de México para el periodo 2002-2017 y distinguir sus determinantes. Después de obtener las mediciones, se calcula el impacto de la eficiencia energética sobre la pobreza energética. En caso de que la innovación tenga efectos sobre la eficiencia energética y ésta sobre la pobreza energética, entonces se afirma que la innovación induce *ecoeficiencia* en la economía a través de las evaluaciones sistemáticas. El análisis de la primera parte se realiza para el periodo de 2002-2017 haciendo uso de las técnicas DEA y Malmquist y para la segunda sección se hará uso de estimaciones estadísticas para evaluar el desempeño de la eficiencia sobre el gasto de los hogares en servicio de electricidad.

Objetivos particulares

i) El proceso de electrificación en este país ha pasado por diferentes etapas de expansión y reformas constitucionales que modificaron su régimen de producción, configuración tecnológica que orienta el tipo de insumos que se utilizan en la generación, condiciones de competencia y figura constitucional. El promedio de los últimos 30 años muestra que este sector consume el 20% del total de energía demandada en México¹³. En el año 1990, con la reforma constitucional impulsada por el gobierno federal, cambió la configuración del mercado eléctrico. Se transitó de un mercado constituido por centrales públicas, principalmente alimentadas por carbón y gas natural, a una estructura compartida, donde las figuras de centrales privadas y mixtas aparecieron. Del 100% de electricidad generada por centrales públicas hasta la década de los 90's pasó en 2016 a representar sólo el 60%. El restante fue cubierto por entidades privadas y centrales mixtas.

Si bien constitucionalmente el único comprador sigue siendo la empresa paraestatal, la reestructuración al interior del sector es objeto de interés para esta investigación. En efecto, se quiere comprobar si los niveles de eficiencia del sector se explican por la

¹³ Cálculo propio con base en información del Sistema de Información Energética (2019).

naturaleza tecnológica para generar electricidad o por las innovaciones de los agentes en el sector expresado en niveles de eficiencia. Los resultados indicarán si el cambio de régimen se explica por motivos de transición tecnológica y ambiental. Es decir, por mejoras en la utilización de insumos ambientales vía innovaciones o sólo por aumento bruto de la capacidad instalada. En otras palabras, un resultado favorable de la eficiencia del sector puede ser resultado del incremento en la capacidad de generación, pero no necesariamente reduce el impacto ambiental, reflejando en un principio de eficiencia productiva pura.

Además, este análisis permitiría explicar si el sector va transitando a un régimen de producción con menor daño ambiental y compatible con las exigencias sociales en términos de reducción de pobreza y niveles entrópicos. En efecto, si la eficiencia energética permite reducir las carencias energéticas de los hogares se transitaría hacia un esquema de *ecoeficiencia* sistémica, en caso contrario, la eficiencia sería únicamente en términos productivos.

ii) La demanda de energía eléctrica por parte de los hogares representa el 22 % del gasto corriente monetario del sector residencial en promedio de los últimos 30 años¹⁴. Esto refiere que cerca de una cuarta parte del ingreso familiar se dedica al pago de servicio eléctrico. Existen segmentos de la población que no logran cubrir sus necesidades en términos de electricidad (gente en condición de pobreza energética en términos de este servicio), al contar con ingresos bajos insuficientes para hacer frente a recibo eléctrico.

Las modificaciones en la estructura productiva de la paraestatal hacen variar el costo de la electricidad¹⁵, redirigiendo la composición del gasto familiar, así como su demanda final de dicho servicio. Es por este hecho que surge un segundo tema interés en la investigación. Se quiere saber, después de comprobarse la existencia (o no) de eficiencia (identificando a qué naturaleza corresponde, si por incremento de la capacidad instalada o innovación) si este cambio en la producción puede tener algún impacto en la reducción de la población en condición de pobreza energética.

¹⁴ Con base en la Encuesta Nacional Ingreso Gasto 2018, INEGI.

¹⁵ Al hablar en términos de eficiencia, es indispensable hablar de cantidades y precios.

El mecanismo planteado es el siguiente: al incrementar la eficiencia en la generación de electricidad, es posible incrementar el suministro de servicio eléctrico, por lo cual, un mayor número de individuos y familias salen de la exclusión el patrón energético al incrementar la cantidad de energía disponible. Si la disminución de la pobreza energética se debe por incrementos de la capacidad instalada, la economía estaría instalada en una senda de consumo energético insostenible pues se hace uso intensivo de insumos contaminantes como instrumento de competitividad e incremento de la producción a costa del deterioro ambiental y de la entropía. Esto generaría un efecto circular e irreversible sobre el bienestar de las familias. Es decir, niveles de eficiencia productiva que reduzcan la pobreza energética en el periodo inicial haciendo uso de insumos ambientales de alta contaminación tendrá implicaciones futuras sobre la calidad de vida de las familias.

En el caso que la eficiencia sea del tipo energética y que incida sobre la reducción de la pobreza energética a través de la evaluación de la innovación en los tres sistemas, se propone la existencia de una política pública que estimule la *ecoeficiencia* en la economía, garantizando un esquema de *Desarrollo Sustentable* de cohesión social compatible con las exigencias sociales, económicas y ambientales.

Las características que tiene el SEN ofrecen un buen caso para la investigación. Se caracteriza por ser primordial en el proceso de industrialización de México y elemento clave en la vida cotidiana. Ha sido objeto de cambios reglamentarios, históricos, tecnológicos; cuenta además con extensa bibliografía en cuanto su evolución en el tiempo y un acervo estadístico que permite informar de los cambios estructurales en el sector.

Hipótesis de trabajo

Con base en el sustento teórico considerado sostenemos que:

Se espera que las innovaciones en el sector energía eléctrica de México desde la perspectiva evolucionista es la mejor respuesta de los agentes en sistemas abiertos para enfrentar problemas u obstáculos. Tienen un efecto positivo en la eficiencia, disminuye el nivel de entropía en términos de costos de agotamiento y degradación ambiental pero no reducen el número de familias en la condición de pobreza energética relativa en términos de gasto monetario en servicios eléctrico por lo cual no existen procesos de ecoinnovación.

Contenido de la tesis

El trabajo se divide en tres capítulos. En el primero se debate el aspecto teórico de la eficiencia, innovación y pobreza energética, así como mostrar el aporte de integración de los sistemas social, ambiental y social. El segundo capítulo aborda el caso de estudio, el SEN de México, desde un apartado histórico, reformas y desempeño actual. Por último, el tercer capítulo introduce las cuestiones metodológicas, así como presenta los resultados empírico y evaluación de la propuesta de integración presentada.

Capítulo 1. Antecedentes y debate teórico

1.1. Medio ambiente y economía

Las primeras consideraciones sobre la economía de la naturaleza fueron los nombrados economistas fisiócratas en el siglo XVIII (Naredo, 2004). Además, la idea sobre *sistema económico* fue desarrollada por esta escuela de pensamiento. En efecto, fueron los economistas franceses que incorporaron la producción, el consumo y el crecimiento en una idea constitutiva de sistema económico. Distinguieron rasgos entre clases productivas: los terratenientes eran los encargados de crear el excedente nacional mientras los industriales y comerciantes constituían clases estériles. La noción de riqueza asociada a la productividad de la tierra determinaba la distribución del excedente entre clases productivas.

La riqueza vinculada a los recursos naturales despliega una noción distinta a la economía mercantil. Al tratarse de recursos finitos y de común utilización para todos los seres humanos, el crecimiento dentro del sistema económico implica un enriquecimiento a costa del otro. La Economía Política se afianzó asumiendo como objetivo general la tarea de promover el crecimiento de los recursos generados por la naturaleza.

Los principales autores de la denominada *economía de la naturaleza* fueron François Quesnay, Linneo y William Petty. Era tal el grado de reconocimiento de este último que consideraba <<el trabajo era el padre y la naturaleza la madre>>. El pasaje de la concepción de la riqueza de algo que se “apropia” a algo que se “produce” surge poco antes de los economistas clásicos con los fisiócratas.

Los fisiócratas, surgidos en la Francia del siglo XVIII, son los primeros que constituyen una escuela que respeta determinados principios - como la fe en el orden natural - y que ven a la economía como un sistema, y lo más importante, sujeto a leyes naturales y eternas. Este es el principal aporte de uno de sus mejores exponentes, el mencionado François Quesnay. Este pensador desarrollaría una serie de conceptos que luego serían de fundamental importancia para la disciplina de la Economía Política. El primero de ellos es el concepto de Producto Neto, esto es, el resultado de restar a lo producido en términos de trigo lo consumido en el proceso de producción, lo que constituye una primera aproximación a la idea de excedente. Aunque sólo sea el sector agrícola el que produce valor, la riqueza ya no se apropia. El restar a lo producido los insumos necesarios

para la producción es un avance decisivo, aunque la riqueza se sigue concibiendo en términos físicos, en términos de granos. El problema radicaba en que su predilección por la agricultura los llevaba a confundir la naturaleza física con la naturaleza humana, y los llevaba a sostener que sólo la tierra era productiva.

Asimismo, los fisiócratas fueron los primeros en dividir a la sociedad en clases siguiendo un criterio estrictamente económico. Analizaban cómo se producía y cómo circulaba el Producto Neto entre las tres clases sociales que se esquematizan en la *Tableau economique*: la clase productiva (aquellas vinculadas a la agricultura), la clase propietaria (Estado, iglesia, terratenientes) y la denominada “clase estéril” (las ligadas a actividades manufactureras). De aquí concluyeron que sólo la clase productiva generaba valor, mientras las restantes clases sólo transformaban valores existentes, creados por la primera.

Posterior a la escuela fisiócrata, la economía abandonó cualquier apoyo de disciplinas auxiliar tras consolidar su visión en un escenario analítico autosuficiente de los valores de cambio. El límite en los economistas clásicos fue considerar que los principios establecidos en el sistema llevarían al estado estacionario¹⁶. Las fuerzas de la naturaleza ambiental llevarían a un cierto límite el crecimiento si la tierra no expandía su dimensión.

La noción de los economistas clásicos era distinta. En palabras de John Stuart Mill, sólo en los países atrasados del mundo el aumento de la producción puede ser un asunto importante; en los más adelantados, lo que se necesita desde el punto de vista económico es una mejor distribución (Mill, 1848).

La teoría del valor-trabajo formulada por Adam Smith (1776) fue el instrumento analítico que permitió reconfigurar el pensamiento económico. En efecto, la riqueza generada por las naciones ya no dependía de las condiciones climáticas favorables para la agricultura, como planteó la escuela fisiócrata, sino del excedente generado en la esfera industrial. A partir de esta consideración, el estudio de la economía dejó de lado la importancia de los recursos ambientales como espacio vital de la actividad económica.

Serían los economistas neoclásicos quienes a finales del siglo XIX e inicios del siglo XX, terminaron con la noción riqueza física de la producción, transitando a un esquema

¹⁶ Aquella situación donde la economía llega al punto máximo en el uso de recursos, de tal forma que el crecimiento es nulo.

donde las relaciones entre lo económico y ambiental se modificaron. Economistas como Walras (1874) se refería a los fisiócratas como malas hierbas y alimañas al ir en contra de la utilidad directa. La economía consideró como objeto de estudio a los objetos directamente útiles para los seres humanos e industrias.

Esta idea se reforzó con la demostración de la existencia del equilibrio general competitivo desarrollada por Arrow y Debreu (1954) al considerar a la economía como un núcleo, es decir, sólo los fenómenos relacionados a la producción son los relevantes: el medio ambiente y la pobreza son fenómenos ajenos. Tal consideración demuestra que tanto los sistema ambiental, social y económico están aislados, se determinan independientemente y no existe interacción entre ellos.

La realidad demuestra todo lo contrario. La problemática ambiental exige una tendencia multidimensional de análisis. La interrelación entre los ecosistemas y la economía expresa una serie de complejos procesos dinámicos donde se intercambian energía y materia. Toda actividad humana que modifique algún componente del ecosistema repercutirá en las actividades de los elementos involucrados.

Bajo esta concepción, la economía como disciplina comenzó a desarrollar análisis teóricos para integrar al medio ambiente (aunque bastante limitados al considerar, en su mayoría, un análisis estático bajo el criterio de optimización en términos de Pareto) como sistema interrelacionado con el ámbito económico y el sistema social. Esta consideración implica reconocer procesos multidireccionales, flujos de energía positivos y negativos, causalidad multivariada, entre otros aspectos. Por lo cual, considerar la esferas económica, social y ambiental como sistemas relacionados entre sí, requiere de criterios de evaluación pública distintos a criterios convencionales de costo-beneficio.

1.1.1. Capitalismo y cambios en los paradigmas energéticos

La historia del hombre es la historia de la búsqueda permanente de fuentes de energía (Giannuzzo, 2010). Cada estadio de la humanidad trajo consigo un proceso singular frente al medio ambiente. Su transformación y asimilación cambió radicalmente las cantidades de energía disponible en las sociedades. El metabolismo social era reflejo del traslado sistemático que cada sociedad configuró en torno a su principal fuente de energía (Landes,

1999). Según lo expuesto por White (1954), la historia de la civilización corresponde al dominio de las fuerzas de la naturaleza por medios culturales, de tal forma que la cultura evoluciona conforme aumenta la energía aprovechada por los individuos en un periodo histórico particular y la eficiencia de los medios instrumentales para servirse de ella.

Cunningham (2012) identifica 5 estadios por los cuales ha transitado la humanidad: i) preagrícola, ii) agrícola, iii) preindustrial, iv) industrial, y v) industrial avanzado. Cada periodo se caracteriza por ciertas fuentes de energía y niveles de consumo. Transitar del estadio agrícola al industrial no hubiese sido posible sin la utilización intensiva de las energías fósiles (Sieferle, 2004).

La preocupación por la crisis ambiental y la polarización social ha marcado el final del siglo XX, poniendo en cuestión la fe en la senda de *progreso* indefinido que había propuesto la civilización industrial. Las grandes revoluciones que dieron origen a la humanidad: la revolución agrícola del neolítico y la revolución industrial en Gran Bretaña del siglo XVIII, fueron básicamente energéticas (Folchi y Rubio, 2003). En particular, la revolución industrial planteó dos objetivos primordiales: en términos sociales y ambientales (Mantoux, 1995; Marquardt, 2009). El nacimiento del sistema capitalista de producción condujo un cambio sustancial en la manera en que las sociedades modificaron los flujos de energía.

El remplazo de sistema de energía agro-solar por el sistema fósil-energético del carbón mineral, a lo largo del siglo XVIII y XIX, produjo una nueva experiencia de un enorme potencial de crecimiento de las cantidades de energía disponibles en el núcleo social (Burke *et al*, 2009). En palabras de Joachim Radkau (2002), <<empezó un modelo económico muy diferente a toda la historia conocida, que quemó hasta la atmósfera terrestre en un año aquellos portadores de energía fósil que habían crecido en millones de años, sin comprender las consecuencias ni mucho menos controlarlas>>, mientras Perkin (1969) comenta <<una revolución en el acceso de los hombres a los medios de vida, en el control de su entorno ecológico, en su capacidad de escapar de la tiranía y de la mezquindad de la naturaleza; abrió el camino a los hombres para completar el dominio de su entorno ambiental, sin la ineludible necesidad de explotarse unos a otros.>>

La industrialización condujo una sucesión de cambios tecnológicos que acrecentaron el consumo de energía. La ruptura con el pasado detonó un proceso acumulativo de repercusiones en la vida económica y explotación energética caracterizada por el uso de leña, carbón, hierro, vapor y maquinaria. Chaves Palacios (2004) identifican distintos estadios de industrialización. En la primera Revolución Industrial (1770 a 1850) el desarrollo tecnológico giró en torno a inventos garantes de mayor productividad. La primera etapa encontró en la hidroelectricidad (con base en leña, insumo principal de la naciente industria) el impulsó a las industrias textiles y del cuero y los talleres de construcción de máquinas, aunque la dificultad para la extracción de los insumos condujo a otro tipo de innovaciones que posteriormente, a finales del siglo XIX (1870 a 1930), dieron paso de la energía hidráulica a la máquina de vapor (el carbón desplaza a la leña) constituyendo la Segunda Revolución Industrial. Este tránsito dio solución a un problema energético para el capitalismo al posibilitar el incremento exponencial de la producción.

En efecto, según Castellano (1982) el boom ferrocarrilero de 1830-1840 significó el despegue económico y del comercio exterior, sin embargo, provocado por aumento de producción agrícola. Por otro lado, Rostow (1953) identifica que sector industrial de finales del siglo XIX el motor, como el sector más dinámico que acaba por prevalecer, hacia el tránsito a la modernidad de la sociedad inglesa. En este contexto, los recursos ambientales jugaron un papel crucial. Para Mokyr (1987) el sistema ambiental no sólo suministraba combustible y materias primas baratas, sino que afectaron a otras actividades que no dependían de la localización.

La segunda etapa de industrialización se instaura a finales de la primera guerra mundial con un patrón fósil-energético distinto basado en el petróleo y el gas difundándose en los centros de industrialización. El carbón fue dominante a finales del siglo XIX por alrededor de 80 años antes de ser alcanzado por los derivados del petróleo (Guadani, 1984). Las tasas de crecimiento en el país cuna de la industrialización reflejaron los cambios en el paradigma energético. El periodo de 1801-1851, el PIB per cápita promedio anual creció al 1.3 % mientras que de 1870 a 1913 el crecimiento fue de 2.2 % promedio anual, por lo cual Gran Bretaña dejaba de ser la nación en su mayor parte rural de Jane Austen y se convertía en la nación urbano-industrial de Charles Dickens (Krugman, 1999). Hacia 1960 el petróleo se ubicó como la principal fuente de energía.

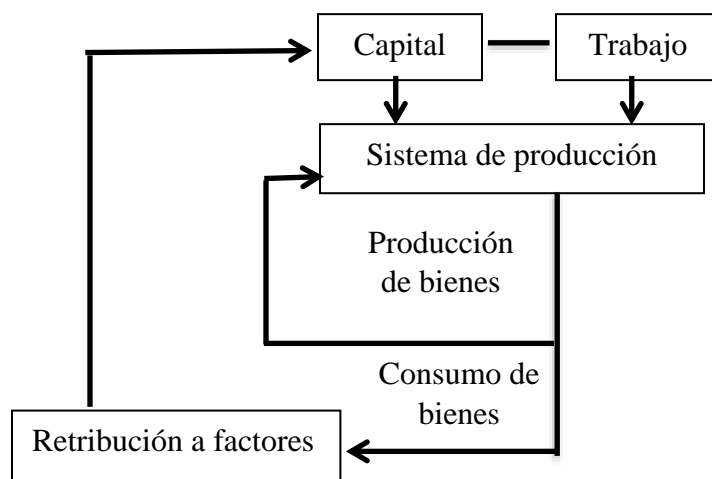
El tránsito energético de las sociedades desde sus inicios ha tenido efectos graves sobre los elementos del medio ambiente. Actividades como la minería, agricultura, industria, así como el desarrollo de tecnologías con fuentes de energía hidroeléctrica, y nuclear han modificado los flujos al interior de los ecosistemas y las relaciones en el núcleo social. La conformación de las sociedades exige un equilibrio entre las políticas de promoción de industrialización y la protección de la población contra exceso de estas (Mayer, 1924). En este sentido, los distintos organismos supranacionales y los estados concentran su preocupación por el deterioro de ambos sistemas.

1.2. Economía neoclásica y medio ambiente

Como se ha mencionado, la forma en que la economía tradicional incorpora el medio ambiente al núcleo de su análisis carece de fundamentos consistentes dentro de su espacio analítico, donde el esquema de reproducción de la economía es ilimitado pues los insumos están disponibles en todo momento y la oferta se ajusta resultado del problema de maximización de los productores y no por la disponibilidad de recursos. La interacción es de carácter lineal, unidireccional y ninguna actividad económica genera desechos. Tal parece que el consumo de bienes ambientales se realizara sin dejar rastro alguno y de manera infinita. Considerar los recursos ambientales como una mercancía sujeta al principio de escasez presupone el dominio de las leyes económicas sobre las ambientales, erigiéndose como la ciencia omnipresente en todas las esferas de interacción del ser humano.

El proceso económico tradicional puede observarse en la figura 1.

Figura 1. Proceso económico neoclásico



En un esquema tradicional, la producción económica depende únicamente de la combinación de factores productivos, capital y trabajo, a través de la mejor técnica de producción, caracterizada por rendimientos constantes a escala y decrecientes en los factores. El producto fabricado es consumido por los agentes y el valor de la producción se agota en el pago a factores en forma de ganancias al capital y salarios para el trabajo. A cada factor se le retribuye acorde su participación en el producto global. De esta forma, el proceso se restablece con el gasto productivo. El equilibrio del sistema es el punto de la producción donde los consumidores maximicen su función de utilidad y los productores maximicen su ganancia, dado el nivel de precios y la técnica.

Cuando se introduce el medio ambiente en el análisis económico, la expresión más utilizada en el consenso científico es la función agregada de producción cuyos determinantes son el capital, trabajo y como expresión de variables medioambientales se utiliza: extensión de tierra, costos ambientales, emisiones de carbono, intensidad de utilización por unidad de producto generada, valorización de recursos ambientales y participación de países en acuerdos internacionales en materia internacional.¹⁷

Esta forma tradicional de incorporar la problemática ambiental supone individuos racionales e idénticos de tal manera que se puede abstraer del resto para inferir en términos de un solo individuo, es decir, de un agente representativo. Basta con modelar el comportamiento de un agente para lograr generalidades sobre los demás; la suma agregada de los individuos representa a la economía en su conjunto. El vínculo entre los agentes es lineal, determinando causalidades unidireccionales. Son modelos abstractos sin determinaciones históricas y donde una vez alcanzado el equilibrio, cualquier situación llevará al sistema a ese punto, expresando la reversibilidad de los procesos. El espacio económico es un sistema cerrado, sin embargo, la determinación y la fuerza de las leyes económicas son de tal magnitud que el equilibrio óptimo del sistema económico lo será también para el sistema ambiental y social. Por último, el marco teórico para incorporar cuestiones medioambientales es inconsistente, pues se sustenta en el escenario analítico de

¹⁷ Véase por ejemplo: Bishop y Heberlein, 1990; Suárez y Guerra, 2000; Freeman, 2003; Rutz, 2001; Viscusi, Huber y Bell, 2008; Youssef y Lahmandi-Ayed, 2008; Barrett and Carter, 2013; Weikard, Wangler y Freytag, 2015; Barbier y Hochard, 2019; Bouché y de Miguel, 2019.

la economía neoclásica, como se explicó, incompatible con la naturaleza de los fenómenos ambientales.

La mayoría de los estudios empíricos con las características descritas, basan sus inferencias, determinan causalidades o comprueban sus hipótesis haciendo uso de econometría. Sin embargo, existe una confusión generalizada entre causalidad y correlación. En efecto, como plantea Anwar Shaikh (2008) los modelos econométricos plantean una identidad definida en el orden de causación, de tal manera que la mayoría de las regresiones muestran un valor alto de correlación entre las variables dependientes e independientes.

La clasificación modelos de crecimiento endógenos, modelos de teoría de juegos con incertidumbre, contabilidad ambiental en el sistema de cuentas nacionales, valorización de recursos ambientales, contabilización de costos ambientales y medición de las emisiones de carbono generadas por las industrias. Principalmente los modelos de crecimiento económico y comercio internacional han canalizado el problema del medio ambiente. Por ejemplo, una hipótesis clásica del impacto del comercio internacional sobre el medio ambiente menciona que el libre comercio y la inversión contribuyen a promocionar la producción mundial de bienes y servicios, pero en contra-parte incrementa la demanda de energéticos. El modelo ampliado Heckscher-Ohlin (1919, 1933) plantea que los países industrializados incrementan su demanda local mientras que los países emergentes incrementan su oferta de energía, incluyendo carbón, petróleo, cemento, cobre, acero, entre otros. Esta balanza en términos de intercambio acelera los efectos adversos y el daño sobre el medio ambiente.

En adición, aquellos países abundantes en capital que producen bienes intensivos de capital que emiten mayor contaminación al aire, agua, se benefician más que los países que son abundantes en mano de obra. Esto se llama *dotación de factores de contaminación*. Refiere que el comercio internacional provoca un impacto en el medio ambiente que puede ser reducido (en los países industrializados) por la existencia de protección comercial, pues traslada el daño al incrementar la producción de bienes importables intensivos en capital en países en vías de desarrollo. Las empresas al incrementar los costos de producción (por regulación ambiental) relocalizan su producción en países con normas laxas de regulación.

De tal manera, la especialización en bienes intensivos de capital termina por ser especializada en contaminación. Este es un ejemplo en la economía neoclásica para considerar al medio ambiente desde el análisis de equilibrio parcial, sin embargo, sigue considerando un espectro cerrado donde las consecuencias sólo se miden en términos de ingreso. Además, estos modelos siguen planteando la existencia de un punto óptimo de asignación de factores, de tal manera, el escenario analítico traslada sus resultados al plano social y ambiental, pero sin dar cuenta exacta de los sucesos en cada uno de ellos, pues sólo se trata de un ejercicio de generalización analítica.

1.2.1. Economía neoclásica y leyes de termodinámica

Siguiendo a Georgescu-Roegen (1996) los orígenes de la economía neoclásica se remontan a las ideas de equilibrio fundamentadas en la génesis de la mecánica clásica en la física, sujeta a leyes elementales, principalmente a la termodinámica clásica. En palabras de García-Colín (1970) la termodinámica clásica tiene como objetivo estudiar las propiedades de la materia cuando son afectadas por un cambio de temperatura, definiéndola como una ciencia fenomenológica.

Esta disciplina surge de los estudios pioneros de Sadi Carnot (1796-1832) quien en sus *Reflexiones sobre la potencia motriz del calor y sobre las maquinas apropiadas para desarrollar esas potencias* quien buscaba establecer los principios que regían el funcionamiento de las máquinas de calor.

El objetivo de la termodinámica fue establecer una serie de postulados con los cuales es posible deducir las relaciones entre las propiedades de las sustancias, acompañado de la elegancia formal que ninguna otra ciencia natural poseía (Goldstein, 1987). Del tratamiento lógico de la disciplina se derivaron una serie de conceptos básicos que los fundadores de la economía tradicional tomaron. Por ejemplo, la noción de *sistema y equilibrio*.

El primero, hace referencia a una porción del universo físico que se considera en el estudio, mientras el segundo concepto se refiere a la situación cuando los valores asignados a las variables no varían frente a una perturbación y regresan al equilibrio. Como menciona García-Colín (1970), la reproducibilidad de un estado de equilibrio es importante en el

análisis, de tal manera que la termodinámica clásica solamente trata sistemas en equilibrio. Las relaciones entre las propiedades de los sistemas y los cambios que sufre sólo hacen referencia a condiciones de equilibrio. Por último, un aspecto relevante para el análisis tradicional es la propiedad de *aislamiento* del sistema, de tal manera que el equilibrio es aislado e independiente de sus alrededores.

Las leyes principales son:

1) Ley cero de termodinámica. Sean tres elementos, A, B y C en equilibrio conjunto, entonces dos elementos tomados cualquiera estará en equilibrio uno a uno. El equilibrio únicamente se altera cuando una fuerza externa actúa sobre él, es decir cierta cantidad de trabajo aplicado.

2) Primera ley de termodinámica: *Conservación de la energía*. Frente al reto de sistemas cerrados, se planteó la necesidad de estudiar la interacción del sistema con fuerzas externa. Con los trabajos de James Joule (1850) se deduce que la cantidad de calor es proporcional al trabajo aplicado, igualando fuerza y trabajo. Las experiencias de Joule permiten establecer la ley que dicta cualquier sistema aislado que no intercambie ni masa ni calor con sus alrededores, se le suministra una cierta cantidad de energía mecánica W , entonces sólo provoca un incremento de la energía interna del sistema en W . (García-Colín, 1986).

3) Segunda ley de termodinámica. *Ley de Entropía*. Clausius, en su trabajo de 1865, plantea que la entropía de un cuerpo compuesta por todo el universo y su energía, entonces, las leyes del universo se reducen a dos leyes de la teoría mecánica del calor: a) la energía del universo es constante, ii) la entropía del universo tiende a un máximo.

Al ser términos poco claros, la divulgación científica señala que la entropía es: i) una medida de la disposición de convertir calor en trabajo; ii) una medida del desorden; iii) una medida de la dirección de los procesos naturales.

La economía como disciplina se desarrolló dentro de un marco tradicional de fenómenos aislados y estáticos, de tal manera que la ley cero y primera de la termodinámica se adaptó al objetivo específico. La determinación de un sistema de precios de equilibrio que compatibilice las decisiones de compra y venta de los agentes a través del intercambio.

Sin embargo, al ser aislado, únicamente centró su análisis en las variables del sistema, precios y cantidades de los factores de producción y bienes. Lo único que podía predecir el método económico era la relación de las variables en equilibrio, por lo cual atribuyó posteriormente contenido social con el óptimo de Pareto (1983)

Con la aparición de la Ley de Entropía, como se explicó, (y reafirma Georgescu-Roegen, p. 349) es una convención oral, muestra la debilidad del análisis económico tradicional. No es posible concebir la economía como un proceso económico en equilibrio porque deja fuera aspectos esenciales como el medio ambiente sin el cual el ciclo de producción no podría realizarse.

El proceso económico convencional es inviable dado que se concentra en un espacio de conservación de energía (primera ley de termodinámica) donde cualquier choque externo provoca que el sistema siga reproduciendo a través de energía interna. Sin embargo, esto se contradice con la segunda ley, pues al existir una cantidad constante de energía en el espacio, el proceso de maximización tendría límites naturales llegando al punto donde la teoría del valor subjetiva (promovida en un espectro atemporal, cerrado e infinito en energía) tenga límites en el nivel de entropía.

Ante esta situación, el sistema se ubica en desequilibrio (al no contar con los recursos/energía necesaria para su reproducción ni asignar las dotaciones vía proceso de maximización de consumo y beneficios). Por lo tanto, al estar en desequilibrio, por la definición de sistema termodinámico, no logra conjeturar nada sobre la relación de las variables económicas.

Por último, el proceso circular de la economía supone la existencia de recursos ilimitados para la realización de mercancías, sin embargo, el principio de entropía señala que no es posible utilizar dos veces la misma energía con la misma intensidad, con lo cual el ciclo del siguiente periodo disminuiría hasta llegar a su inviabilidad. Esto contradice el principio de conservación de energía (primera ley) que justifica la presencia de energía interna siempre disponible. Una fuerza externa en un sistema cerrado (economía tradicional), como la existencia de entropía, impacta al sistema y no lo permite regresar al equilibrio, como supone la ley cero de termodinámica

1.3.Economía evolutiva: un enfoque alternativo

El objetivo de la economía evolucionista es el análisis de coordinación y cambio. Permite representar a la economía como un sistema abierto, no lineal, cuasi-entrópico, no en equilibrio y no coordinado. Dos principios básicos lo fundan: i) Autoorganización de la economía, ii) estructura y contenido del sistema económico en constante cambio.

Para entender la naturaleza de su construcción, se necesita partir de su fundamentación ontológica. Parte de realismo evolucionista, cuyos principales pilares son: Autotransformación y autoorganización**.

En cuanto a los agentes, se define pocos supuestos pero necesarios y suficientes para una realidad de la economía evolutiva:

- i) Bimodalidad
- ii) Asociación
- iii) Procesos¹⁸

La sociedad se desenvuelve bajo el hecho que la economía está compuesta de ideas de los agentes. Cada idea tiene actualizaciones, por lo cual se refiere a la actualización de las ideas existentes en términos de materia y energía (axioma 1), asociación de nuevas ideas (axioma 2) y proceso de estas ideas en construcción de estructuras (axioma 3).

La ontología evolutiva reconoce a la economía como un sistema abierto, compuesta de personas, recursos, materia, energía conocimientos e interacciones, que combinadas crean una estructura emergente. Estos axiomas en conjunto representan la observación de la evolución en el sistema económico que permite continuidad de algunas entidades, aparición de nuevas entidades y desaparición de otras. Cada proceso causará aparición de nuevas poblaciones que interactúan de manera distinta.

El proceso económico se conecta por caminos específicos, localizado en cierto periodo de tiempo y cuya existencia temporal está determinada. Cada estructura incluye las contingencias históricas y cambios en las estructuras sociales, considerando el tiempo histórico como proceso irreversible en los procesos económicos.

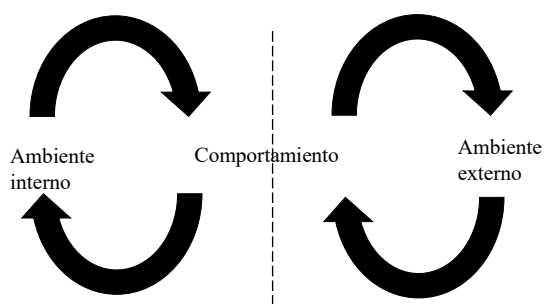
¹⁸ Con base en Dopfer (2005) y Dopfer y Potts (2008)

Cada individuo está sujeto a reglas. Esta se refiere a ideas que se organizan, acciones o recursos dentro de un conjunto de operaciones. Toda acción económica son resultado de reglas. Dopfer y Potts (2008) reconocen dos tipos de ideas: Reglas genéricas: subjetivas y objetivas

Reglas genéricas			
Subjetivas		Objetivas	
Cognitiva	Comportamiento	Social	Técnica

Estas reglas describen el comportamiento de los individuos dentro de un contexto específico. Las reglas subjetivas se refieren al pensamiento y comportamiento microeconómico, mientras que las reglas objetivas hacen referencia a la organización material y estructura macroeconómica. El siguiente esquema muestra la interacción de las reglas en los individuos.

Figura 2. Comportamiento humano en ambiente interno y externo



Fuente: Dopfer y Potts (2008)

1.4.Optimización y Eficiencia: de economía neoclásica a sistemas complejos

La dinámica capitalista de producción produce presiones severas al medio ambiente, de tal forma que sus integrantes ven perjudicadas sus condiciones de reproducción material, social e integral, volviendo complicado hacer pronósticos certeros. Las propuestas teóricas deben reconocer la hegemonía de este modo de producción y la dificultad para transitar, en el mediano plazo, a otro. Esta investigación tiene la limitante práctica de no plantear otro escenario de satisfacción de necesidades distinto al capitalismo dentro de un contexto global, sin embargo, reconoce la posibilidad de encontrar elementos clave para lograr estabilidad entre los distintos sistemas.

En particular, la eficiencia energética no es simplemente un problema de desarrollo relacionado con lo ciencias naturales, ingeniería y aspectos económicos, sociales y ambientales; también plantea problemas integrales, dinámicos y sistémicos en análisis de sistemas complejos (Wei y Liao, 2016), por ello el interés de plantear el problema no en términos lineales de causalidad.

Tal y como menciona Ruth (1993) las principales características del enfoque predominante es concentrar su interés en los mecanismos de mercado, en la microeconomía en lugar de la macroeconomía, el análisis estático (obviando la historia en la conformación de los procesos), el efecto lineal de causalidad y la consideración del medio ambiente como una restricción física dada. Esto significa que en la metodología desarrollada por la economía neoclásica, la teoría del equilibrio general garantiza una solución en la asignación de recursos escasos (Faber *et al.* 1996) en donde todos los procesos son reversibles, sus ecuaciones y modelos son “temporalmente simétricos”, donde el tiempo es tan solo una magnitud cardinal que puede ser sumada o restada (Beard y Lozada ,1999) o en su caso el tiempo no existe (Barquín, 2019).

El estudio de ecosistemas naturales que han sufrido la acción del hombre, ya sea por medio de la explotación de sus recursos renovables y no renovables (por ejemplo los agrosistemas e industrias extractivas), o bien por la instalación de asentamientos humanos de diversos tipos, incluyendo las grandes urbanizaciones y las obras de infraestructura, supone la consideración del conjunto de los elementos que intervienen en tales procesos (y de los procesos sociales, económicos y políticos a ellos asociados), de sus partes o factores

constitutivos, sus interrelaciones y sus interacciones con otros fenómenos o procesos. Es decir, supone concebir el objeto de estudio como un *sistema complejo* (García, 2006).

La teoría neoclásica desarrolla un campo axiomático, cerrado y formal. Cada vez más refinado, pero cada vez más alejado del conocimiento científico (Lara Rivero, 2008). La teoría convencional se construye sobre el supuesto metodológico de que los actores, toman decisiones como si su objetivo exclusivo fuera maximizar el beneficio o la utilidad; así elimina la necesidad de explicar la complejidad de la racionalidad humana (Bowles, 2004) y su interacción en los distintos niveles de la sociedad. El análisis econométrico tradicional toma un punto de vista determinista y predictivo, que fomenta la búsqueda de políticas predictivas para “corregir” los problemas ambientales (Ramos-Martín, 2002). Los sistemas complejos demuestran que la economía son procesos complejos y adaptables (Castaings, 2015).

Considerar sistemas abiertos a interacciones es reconocer la interacción con otros a través de balances energéticos. La economía neoclásica ha reconocido la complejidad del medio ambiente de tal forma que incorpora al equilibrio parcial el concepto de *equilibrio termodinámico*¹⁹ sin embargo esta noción es incompatible. El equilibrio económico, con su énfasis en la asignación en los mercados, no puede tratar con el tema de la escala de la economía con respecto al medioambiente (Daly, 1992). Además, al referirse a un equilibrio completo (asignación de factores + termodinámico en el medio ambiente) precisa la interacción entre dos sistemas. Sin embargo, un sistema termodinámico (el único espacio donde es posible este análisis) está delimitado por paredes aislantes²⁰ de tal manera que el equilibrio termodinámico²¹ es posible únicamente si el sistema no tiene interacción con ningún otro. Este análisis es deficiente al suponer que interactúan dos sistemas bajo un equilibrio completo. La única manera en que sería posible es explicar su comportamiento independientemente sin interacción de sus elementos.

La anterior justificación hace pensar que la teoría ortodoxa, al hablar de intercambios energéticos, es más compatible con la termodinámica clásica. En efecto, trata

¹⁹ Véase ejemplo: Beker, 1992; Chóliz, 1999; Montoya, 2008; Díaz, 2018.

²⁰ Son aquellas que no permiten ninguna interacción entre el sistema y sus alrededores. Estas paredes no permiten intercambios de energía, eléctrica, magnética, térmica, etc. (García-Colín, 1976)

²¹ Situación del sistema cuando los valores numéricos asignados a variables termodinámicas no varían en el tiempo (*Ibidem*).

solamente con sistemas que se encuentran en estado de equilibrio, de tal forma las relaciones entre las propiedades y los cambios a su alrededor se refiere exclusivamente a condiciones de equilibrio. Este análisis es más compatible con los métodos desarrollados como: (i) optimización para el caso de la gestión de recursos naturales (tanto renovables como agotables), y (ii) asignación de derechos de propiedad sobre la contaminación (o más generalmente sobre las externalidades) para incorporarlas en el sistema de precios, y así, en el proceso de toma de decisiones dentro del mecanismo de mercado (Lara-Rivero, 2008).

Dado los diversos enfoques para analizar la interacción entre los sistemas económicos, sociales y ambientales, se muestra la siguiente lista de Espinosa y Walker (2011) donde especifican la visión de cada enfoque respecto al medio ambiente. El papel, comportamiento e interacción entre los distintos sistemas difiere respecto al enfoque. Los únicos que proponen situaciones de equilibrio son los enfoques teóricos-económicos, mientras los demás sólo manifiestan situaciones ideales que deben alcanzar los distintos actores.

- *Equilibrio neoclásico*: Bienestar no decreciente (antropocéntrico²²); crecimiento sostenible basado en tecnología y sustitución; optimizar las externalidades ambientales; mantener el stock agregado de capital natural y económico; Los objetivos individuales prevalecen sobre los objetivos sociales; política necesaria cuando los objetivos individuales entran en conflicto; Política de larga duración basada en soluciones de mercado.
- *Equilibrio temporal de la Escuela Austriaca*: Secuencia teleológica de adaptación consciente y orientada a objetivos; prevenir patrones irreversibles; mantener el nivel de organización en el sistema económico; Optimizando procesos dinámicos de extracción, producción, consumo, reciclaje y tratamiento de residuos.
- *Físico-económico*: Restricciones en los materiales y flujos de energía dentro / fuera de la economía; Metabolismo industrial basado en la política de materiales y cadena de productos. Tratamiento integral de residuos, eliminación, reciclaje y desarrollo de productos.

- *Energía Biofísica*: Un estado estable con materiales mínimos y rendimiento de energía; mantener las reservas físicas y biológicas y la biodiversidad; Transición a sistemas energéticos con mínimos efectos contaminantes.
- *Ingeniería ecológica*: Integración de beneficios humanos y calidad ambiental y funciones por manipulación de ecosistemas; diseño y mejora de soluciones de ingeniería en el límite de la economía, la tecnología y los ecosistemas; Utilizando la resiliencia, la autoorganización, la autorregulación y las funciones de los sistemas naturales con fines humanos.
- *Histórica/Institucional*: Igual atención a los intereses de la naturaleza, sectores y generaciones futuras; integración de arreglos institucionales para la política económica y ambiental; Creando apoyo institucional de largo plazo para los intereses de la naturaleza.
- *Ecológica/evolutiva*: Manteniendo la resiliencia de los sistemas naturales, permitiendo o fluctuando y los ciclos (destrucción regular); aprender de la incertidumbre en los procesos naturales; No hay dominación en las cadenas alimenticias por los humanos; fomento de la diversidad genética / biótica / ecosistema; Equilibrar los flujos de nutrientes en los ecosistemas.
- *Evolutiva/tecnológica*: Mantener la capacidad de adaptación co-evolutiva en términos de conocimiento y tecnología para reaccionar ante las incertidumbres; Fomento de la diversidad económica de actores, sectores y tecnologías.
- *Sistemas/Ecológico*: Controlar los efectos humanos directos e indirectos en los ecosistemas; Factores mínimos de estrés sobre los ecosistemas, tanto locales como globales.
- *Ética/utópico*: Nuevos sistemas de valores individuales (respeto por la naturaleza y las generaciones futuras, cumplimiento de necesidades básicas) y nuevos objetivos sociales (estado estable); equilibrar la atención por la eficiencia, la distribución y la escala; luchar por las actividades a pequeña escala y el control de los "efectos secundarios" ("lo pequeño es hermoso"); Política de larga duración con base en valores cambiantes y fomento del comportamiento ciudadano (altruista) en contraposición a la conducta individual (egoísta).

- *Ecología humana:* Permanecer dentro de la capacidad natural (crecimiento logístico); escala limitada de la economía y la población; consumo orientado a las necesidades básicas; ocupar un lugar modesto dentro de la red alimentaria y la biosfera del ecosistema; Considerar los efectos multiplicadores de las acciones humanas, en el espacio y en el tiempo.
- *Sociobiológico:* Mantener el sistema cultural y social de interacciones con los ecosistemas; Respeto por la naturaleza integrada en la cultura, supervivencia del grupo importante.

Como se observa en el anterior listado, la interacción entre los elementos en los enfoques distintos a los teóricos-económico incorpora relaciones complejas y diversas con respecto al medio ambiente, desde aspectos culturales, sociales, institucionales y tecnológicos. Esta razón que el enfoque de Sistema Complejos Adaptativos es factible para explicar el fenómeno de innovación, eficiencia y pobreza energética debido su naturaleza dinámica que involucren la esfera social, económica, política, científica y ambiental. Las interacciones son complejas y no lineales (véase a detalle en el siguiente apartado). Esta investigación no sigue como resultado la asignación de factores óptima en el punto de equilibrio en la Cruz De Marshall (1890) compatible y extendido a todos los niveles de la sociedad sino se parte de una situación dada la asignación (no interesa determinar la formación de asignaciones) donde el sistema económico logre su máxima eficiencia (no necesariamente óptima en sentido de Pareto) de tal manera que se exprese en la distribución y oferta de energía.

Entonces, defino el término eficiencia energética como el uso de insumos ambientales compatible con cualquier nivel de dotación de factores que minimiza el daño ambiental a través de procesos tecnológicos y nuevas combinaciones que reducen el nivel de entropía global. Además, al reducir el gasto de los hogares en términos monetarios beneficiará a los hogares al extender la provisión de energía, reduciendo la pobreza energética. El uso energético será acorde a los patrones de uso culturales de cada sociedad, de tal manera que esté disponible en cualquier momento sin interferir en su estructura social. El consumo eficiente de insumos energéticos garantiza ser sostenible en el tiempo, sin comprometer a las generaciones futuras y permitiendo reestablecer la tasa

de regeneración del ambiente. Las innovaciones, al ser respuesta adaptativa, serán una elección constante y dinámica de los agentes al depurar aquellas que no sean compatibles con los objetivos del sistema, impulsando al sector productivo a incrementar la eficiencia, permitiendo las condiciones para el tránsito energético y aliviar las necesidades sociales en material de ingreso evaluado en cada sistema

Hablar del término *eficiencia* permite trasladarnos del campo económico al plano de SCA. En este enfoque, la eficiencia y el cambio tecnológico son características adaptativas del sistema. En efecto, los actores son capaces de adaptarse a choques externos (por ejemplo, el cambio climático, modificaciones en el proceso productivo o exigencias de innovación) de tal forma que el nivel de eficiencia será indicativo de su habilidad o no habilidad de adaptación (Castaingts, 2015), además puede considerarse la innovación tecnológica como un fenómeno de viabilidad del sistema frente a condiciones de vulnerabilidad.

Frente a un escenario donde los agentes afrontan los índices de contaminación a través de procesos eficientes, los agentes productores tendrán que adaptarse al nuevo marco normativo. Los agentes tienen dos opciones: i) incrementar su eficiencia a través de insumos fósiles y promover un logro ambiental en términos de mayor producción, pero incrementando las presiones contra el ambiente y limitando la viabilidad del sistema en su conjunto; ii) A causa de la exigencia social, los productores optan por un proceso adaptativo que reestructure gradualmente la forma de generación de energía con base en la innovación que la reduzca. Esta herramienta se convierte en la mejor respuesta adaptativa (para los agentes más eficientes habrá recompensas y para los menos habrá castigos).

Los premios o recompensas afectarán, no sólo a los agentes participantes, sino que sus repercusiones se extenderán sobre los demás miembros del sistema. El castigo por bajos niveles de eficiencia repercutirá sobre el productor, poniendo en dilema su permanencia en el mercado, a los consumidores (en término de ingreso y bienes, aunado a la calidad de servicios energéticos domésticos) y al medio ambiente pues no se logra reducir las emisiones antropogénicas, persiguen los altos niveles de utilización y deterioro ambiental para todas las especies existentes. Además, al suponer interacciones irreversibles, una situación de este tipo modifica todos los flujos de comunicación entre los elementos, excluyendo a grupos sociales de los beneficios.

Este último caso se refiere a la pobreza energética, pues las barreras a servicios energéticos ambientales pueden explicarse por la exclusión de ciertos segmentos sociales de los beneficios (premios) de la eficiencia. En este caso, el modelo de producción sustentable implica una configuración de objetivos ambientales para los agentes.

Siguiendo las definiciones anteriores, las relaciones de causalidad son de la siguiente manera:

1) La evaluación económica en el sector energético que motiva combatir los deterioros ambientales penalizando los altos índices de contaminación, además busca reducir la entropía.

2) Los agentes de la economía no buscan maximizar su utilidad (beneficios) de los bienes escasos sino aprovechar de manera eficiente los que tienen (respetan sus dotaciones iniciales, aunque no sean asignaciones óptimas), por lo cual la innovación juega un papel clave para alcanzar ese objetivo.

3) los criterios de bienestar social no se determinan en principios de optimización de Pareto, sino en términos de eficiencia. Al interactuar sistemas complejos, los agentes buscan obtener el mayor nivel de eficiencia posible de los recursos naturales y económicos disponibles (reitero, aunque no sean asignaciones de equilibrio); iii) La utilización de tecnologías deben cumplir no sólo con las normas técnicas de producción que reduzcan el daño ambiental, sino además mejorar las condiciones sociales en términos de ingreso monetario y bienestar. Si esta tecnología logra reducir la pobreza energética en términos de mayor nivel de acceso a servicios energéticos compatible con los requisitos mencionados, entonces se considera un proceso de *ecoeficiencia*. En este sentido, las innovaciones toman un rol crucial; iv) Con la aplicación de nuevas combinaciones tecnológicas, los ecosistemas tenderían hacia su tasa de regeneración natural dado que se cubrirían las demandas energéticas, pero con menores tasas de utilización de insumos ambientales y emisiones. Las eco-innovaciones serían las innovaciones que cubran los tres criterios de evaluación. *En este sentido la tecnología social tiene un determinante endógeno motivado por la sobrevivencia y viabilidad de los sistemas.*

Estas premisas no buscan perpetuar al capitalismo como sistema final de producción, pero brinda tiempo para repensar en el sistema adecuado que garantice verdaderamente el desarrollo sustentable.

1.4.1. La innovación como respuesta adaptativa

Como se ha insistido, la innovación aparece como emergencia en un sistema abierto de interacción. Esta se refiere a una propiedad que no estaba presente en ninguno de los elementos y que emana de su interacción. Dado la *función objetivo* de los agentes que es la sobrevivencia y viabilidad del sistema ante la contingencia ambiental, los individuos deciden que la innovación es la mejor respuesta frente a su objetivo cuando son actores de los tres sistemas.

En la figura 3 muestra la innovación desde un esquema neoclásico, en donde el proceso únicamente sucede en la esfera económica suponiendo un sistema cerrado. Este únicamente es resultado de acumulación de habilidades inherentes a la acumulación de capital, a la presencia de *spillovers* que generan las actividades económicas e inversiones de investigaciones de innovación y desarrollo. Esta innovación se valida en términos de mercado, de tal forma que se expresa en términos de eficiencia técnica.

Se espera que los nuevos procesos tecnológicos optimicen el uso de insumos de capital, mano de obra y energéticos y maximice el nivel de producto obtenido. El sistema supone un flujo de energía constante y siempre disponible. Bajo una idea “ambientalista” se supone el mínimo impacto ambiental, sin embargo, esto no se garantiza. Dado que sólo existe un criterio de mercado para evaluarlo en términos de eficiencia, puede que la innovación mejore la eficiencia productiva pero no necesariamente reduzca el impacto ambiental.

En efecto, es posible que una tecnología reduzca el nivel de entropía local, es decir, incremente la cantidad de energía disponible en el sistema económico, pero reduzca la cantidad de energía disponible para los demás sistemas. Lo que parece favorable para el sistema en su conjunto al extenderse deterministamente el beneficio al resto de espacios, como el ambiental y social, no necesariamente se cumple.

Suponga una tecnología que haga uso mínimo de petróleo y maximice el producto final. Se valida que la entropía local se reduzca pues mantiene el flujo energético sufre mínimas variaciones, sin embargo, este acto retira energía disponible para los demás sistemas y no se preocupa de los residuos generados, normalmente expresados en emisiones y contaminantes físicos. Dado que el sistema tradicional sólo se preocupa por la conservación del flujo existente de energía para el desempeño económico y realización de los planes de producción, generaliza sus aportes al resto de sistemas, sin tener parámetros que realmente se validen.

Por otro lado, se corre el riesgo de caer en la *paradoja de Jevons*, como se mencionó anteriormente, la idea de menor uso de insumos ambientales y mayor número de bienes disponibles manda una señal positiva a los consumidores dentro de una cultura energética existente incrementando los incentivos para elevar su consumo de los bienes procedentes de procesos eficientes “ambientalmente” generando presiones sobre los recursos ambientales utilizados en el proceso. Retomando el ejemplo del petróleo, incrementaría la demanda del bien para cubrir el creciente aumento de consumo. Dado que el proceso es eficiente en términos técnicos, la entropía se mantiene baja en el sistema económico pues se sigue utilizando el mínimo de petróleo por unidad de producto, en cambio la entropía global, por la segunda ley de termodinámica, incrementa dado que el resto de los sistemas tienen menos cantidad de energía disponible y el nivel de emisiones y residuos aumenta.

Por tanto, un esquema neoclásico de producción “ambientalmente amigable” únicamente garantiza la viabilidad del sistema económico a costa del resto de sistemas, provocando crisis en el resto y llevando a inviabilidad global de los sistemas. Una innovación expresada en términos de eficiencia técnica únicamente validada por el mercado pone entre dicho la existencia del sistema en conjunto por sus limitantes analíticas de flujos energéticos y cerradura.

En el caso de una economía evolutiva como muestra la figura 4 la innovación es una propiedad emergente del sistema que favorecerá el objetivo de sobrevivencia. La innovación es resultado de un contexto histórico particular donde los agentes frente a la crisis energética utilizan su experiencia para generar nuevos procesos productivos. Dado

que los agentes tienen reglas adaptativas de comportamiento con base en ideas, las utilizarán para crear tecnologías acordes a la exigencia histórica. El resultado se reflejará en términos de eficiencia. Al ser actores de sistemas abiertos, sus innovaciones tendrán tres evaluaciones: en el sistema económico en términos de eficiencia, en la sociedad en reducción de pobreza energética e inclusión al paradigma energético que se está creando y en el ambiente al reducir las emisiones y residuos contaminantes.

Al estar sujeto el sistema económico a las leyes de la termodinámica, las innovaciones tendrán que reducir la entropía global. La sociedad validará la decisión siempre y cuando estas innovaciones generen servicios y productos accesibles a los miembros del sistema social. La manera de medirlo será a través de la reducción de la pobreza energética. Al existir este fenómeno, los agentes consideran que el nuevo patrón energético debe ser incluyente con aquellos miembros que, bajo su cultura energética, no accedieron a bienes o flujos energéticos necesarios para su reproducción.

La señal que transmite el sistema económico reconfigura el patrón de consumo que ha deteriorado las condiciones ambientales. Los agentes, al ser beneficiados y reducir la pobreza energética sabrán que respetar las normas de producción y consumo eficiente les permitirá viabilidad en el sistema, por lo cual el conjunto de reglas genéricas se adapta al nuevo patrón energético creando una “conciencia” sobre el cuidado ambiental.

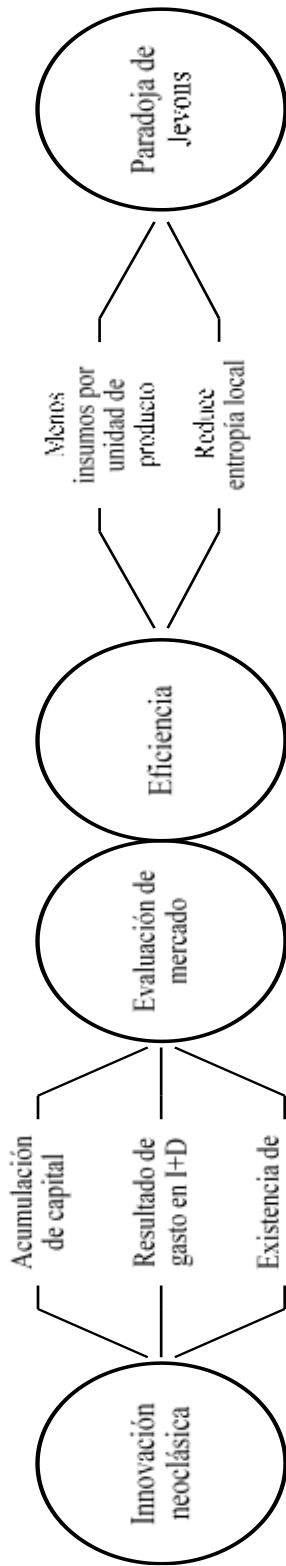
La evaluación de la innovación pasa por otro parámetro que impone el sistema ambiental. Si el nuevo patrón energético además del desempeño descrito también logra reducir la cantidad de residuos y emisiones antropogénicas de tal forma que permita sincronía entre los procesos naturales de regeneración y procesos económicos y sociales, entonces la innovación logra la categoría de *ecoinnovación*. Esta garantiza que las innovaciones no sólo sean en términos técnicos, sino que cumplan con criterios sociales y ambientales compatibles con las leyes termodinámicas inherentes a cualquier sistema abierto. Ahora los agentes únicamente aceptarán las innovaciones que logren convertirse en *ecoinnovación* y el nuevo patrón energético logra su función objetivo inicial que es dotar de viabilidad al sistema.

En este punto, la reflexión que se deriva es el diseño de política pública que incentive el tránsito de la economía hacia procesos de *ecoinnovación*. Dentro de un sistema

de reglas adaptativas, la estructura que se necesita procede de la *tecnología social*²³. Este es el conjunto de reglas y acciones gubernamentales que promuevan el diseño de política compatible con las exigencias de los individuos. Estas deberán tener en cuenta las reglas genéricas, objetivas y subjetivas de los agentes para lograr el objetivo del sistema general.

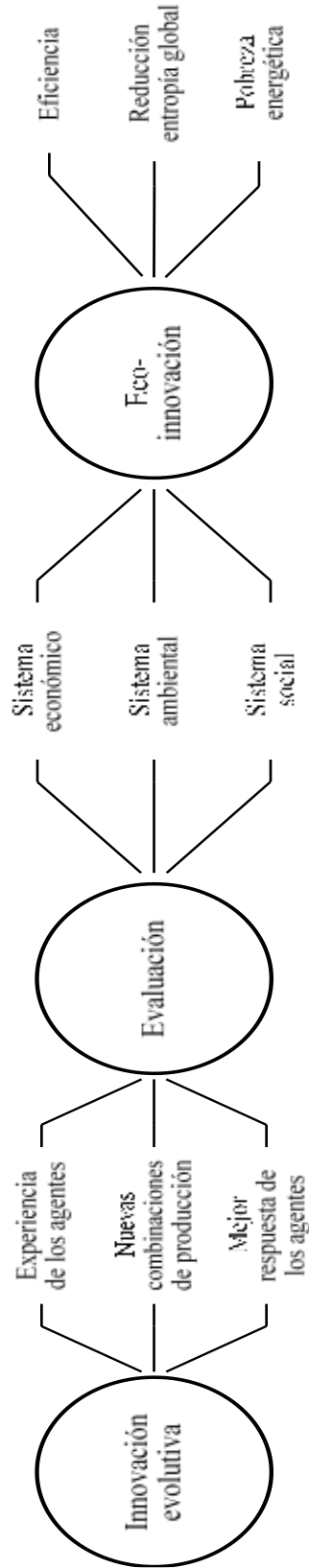
²³ Este término es introducido por Beinhocker (2006), con base en Nelson y Winter (1982), al referirse a todos los aspectos no técnicos o físicos que permiten la viabilidad de cualquier innovación o cambio tecnológico, por ejemplo, conocimiento individual, habilidades innatas de las personas, etc.

Figura 3. Innovación desde una perspectiva neoclásica con aplicación al medio ambiente



Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Innovación desde una perspectiva evolutiva con aplicación al medio ambiente



Fuente: Elaboración propia

1.4.2. Sistemas económico, social y ambiental: Una propuesta de integración

Como se ha mencionado, la lógica descrita no centra sus resultados únicamente en términos económicos ni su interacción en sistemas aislados sino como un proceso causal entre sus elementos. El siguiente cuadro muestra la forma en que interactúan los flujos de energía entre los conjuntos, de tal forma que su causalidad no es lineal, además considera la particularidad de la unidad de análisis, sea macroeconómico, sector, o comunidad.

Se toma como referencia los aportes de Caselles (2015) y Forrester (1975) a la modelación de dinámicas de sistemas y complejidad. El diagrama de Forrester es el diagrama característico de la Dinámica de Sistemas. Es una traducción del Diagrama Causal a una terminología que permite la escritura de las ecuaciones en el ordenador para así poder validar el modelo, observar la evolución temporal de las variables y hacer análisis de sensibilidad (Martín García, 2003). El esquema identifica variables de niveles, de flujo, auxiliares, canales materiales de transmisión y retardos de información y materiales entre los sistemas.

La propuesta de integración expresa los tres sistemas en interrelación. Existen flujos de materiales, residuos, energéticos, emisiones, servicios del capital y de trabajo, distinguiendo entre flujos, stocks y procesos. Se parte de la supremacía del sistema ambiental sobre los sistemas económicos y sociales, por lo cual ambos están sujetos a sus leyes, en particular la *Ley de Entropía*. La segunda ley de termodinámica condiciona a los dos sistemas restantes, pues toda acción económica, social e individual utiliza energía que nunca podrá utilizarse nuevamente en la misma forma ni en la misma cantidad, limitando las decisiones futuras en cada sistema.

El universo está constituido por dos tipos de entropía: i) *Baja entropía*, se refiere a los recursos ambientales que se encuentran a fácil alcance de los individuos para su uso. Su utilidad para las necesidades ha provocado un excesivo uso de los recursos a una tasa mayor que su regeneración. Las actividades humanas han provocado que la baja entropía disminuya haciendo más difícil su búsqueda²⁴. Dada la retroalimentación del sistema, la

²⁴ Un ejemplo de baja entropía es el petróleo de baja profundidad. El uso excesivo de este recurso ha provocado que su búsqueda requiera mayor esfuerzo social y elementos tecnológicos más sofisticados. Por un lado, disminuye la baja entropía, es decir la energía en forma práctica para el uso de los individuos, pero

disminución de baja entropía genera efectos al sistema; ii) *Alta entropía* es el resultado del uso excesivo de materia ambiental del sistema. Esta se refiere a la cantidad de energía dispersa en el ambiente sin una forma específica²⁵.

Los agentes se enfrentan a un escenario donde continuar con los patrones de consumo y producción con base en recursos ambientales de pronta localización atenta contra la subsistencia del sistema e incrementa el nivel de caos. El sistema productivo se convierte en el principal consumidor de baja entropía.

El sistema económico interactúa con el resto, sin embargo, se rompe la idea neoclásica de sólo considerar los elementos capital y trabajo. En la figura se muestra que la innovación, discutida en la sección anterior, debe considerar los tratamientos de residuos y disminución de emisiones. El sistema social se caracteriza por criterios de pobreza y cultura energéticas. Los individuos a su vez están sujetos a reglas genéricas de comportamiento e interacción.

Como se observa, los círculos remarcados señalan los procesos de validación de cada sistema, siendo la ecoinnovación la validación más importante por incorporar las validaciones restantes. Toda innovación será un proceso evolutivo y de retroalimentación positiva en el espacio y contexto histórico sobre los instrumentos del ser humano provocando transformaciones en artefactos, instituciones y formas organizativas.

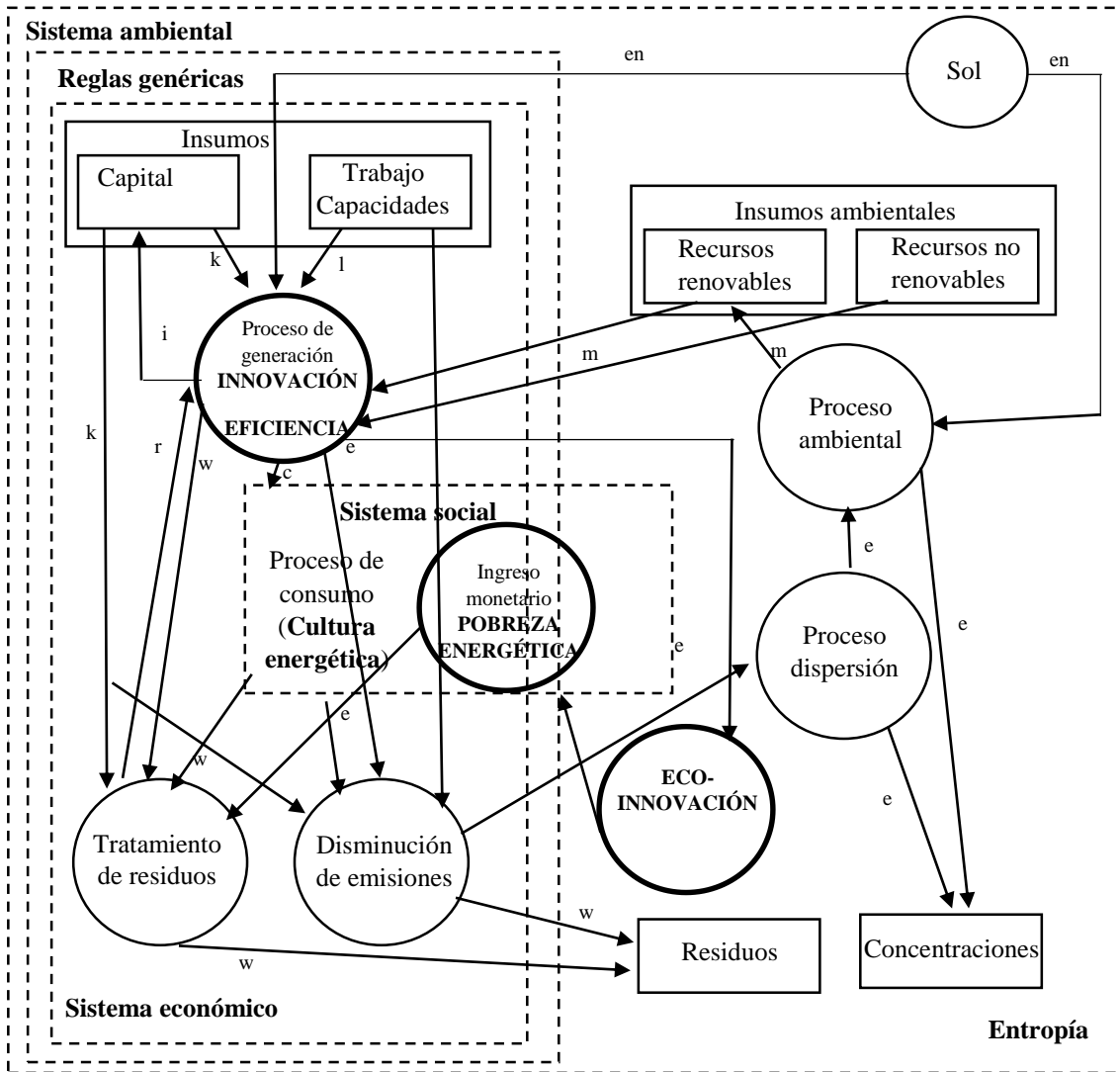
Hasta este punto, se ha intentado ofrecer una metodología con un soporte teórico distinto para presentar de manera menos restrictiva el fenómeno expresando la necesidad de

incrementa la entropía del sistema, es decir incrementa el nivel de caos. Para el lector surge la pregunta ¿cómo aumenta la entropía del sistema si disminuye la baja entropía? La respuesta es que la pérdida se transforma en alta entropía. La materia pasa de un estado a otro, perdiendo sus cualidades físicas originales propicias para el uso inmediato de los seres humanos y se pierde en el ambiente después de ser utilizado. Sigue presente en el sistema, pero perdió sus atributos, por ejemplo, convirtiéndose en residuos, bienes manufacturados y contaminación. Esta nueva “apariencia” de los recursos se conoce como *alta entropía* concepto que se explica en la nota siguiente.

²⁵ Al agotarse las fuentes primarias de energía con ciertas características que facilitaban su consumo por parte de los agentes, la materia pierde sus atributos, pero no desaparece del sistema. El nivel de caos incrementa en el sistema porque las fuentes tradicionales de recursos ambientales expresados en sus atributos físicos desaparecen a grandes velocidades y la cantidad de energía que libera su transformación ronda los circuitos del sistema, principalmente en forma de bienes y contaminación. Frente a esta situación, los agentes tienen dos posibilidades: incrementar los esfuerzos para encontrar baja entropía para cumplir las exigencias productivas a costa de incrementar el caos del sistema y poner en riesgo su viabilidad o diseñar un mecanismo que reconfigure la percepción de los individuos frente a la crisis ecológica que existe, disminuir su consumo de baja entropía y reducir los niveles de alta entropía a través de la captación y reutilización de esa expresión de energía y reintegrarla al circuito productivo

una política pública a través de la tecnología social para orientar el conjunto de reglas de los agentes hacia la viabilidad del sistema.

Figura 5. Interacciones entre el sistema económico, social y ambiental: innovación, eficiencia y pobreza energética.



Nota: Círculos indican procesos, cuadros indican stocks, flechas indican flujo
k servicios de capital *c* consumo *w* residuos
l servicios de trabajo *i* inversión
en energía *r* reciclaje de materiales
m materiales *e* emisiones
w residuos

Fuente: Elaboración propia con base en Van Ierland (1993)

1.5. *Desarrollo Sustentable: un marco normativo de acción*

La preocupación internacional conduce hacia la conformación de acuerdos y planes de acción que hagan posible las metas en materia de transición energética que permita compatibilizar las exigencias sociales, económicas y productivas, así como impulsar los retos tecnológicos de los países en desarrollo. Dos de las Cumbres Internacionales más significativas en la historia ambiental para hacer frente al cambio climático plantean lo anterior. Se tratan de la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente celebrada en Estocolmo en 1972 y la Conferencia de las Naciones Unidas Sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, efectuada en Rio de Janeiro en 1992.

Los principios derivados de estos acuerdos se manifiestan en la urgencia de disminuir las emisiones antropogénicas (causadas por las actividades humanas) que provocan las variaciones en el clima. Los impactos se manifiestan en diversos niveles: i) hídricos, ii) biológicos sobre el medio ambiente, iii) sobre la salud humana, iv) sociales (IPCC, 2007). Sin embargo, al ver pocos avances en el corto plazo para disminuir los ejes de la problemática, se volvió a reconsiderar el papel de las naciones, principalmente desarrolladas, frente a su compromiso ambiental. Es por esto por lo que, el año de 1997, se aprobó el Protocolo de Kioto, que introdujo objetivos jurídicamente vinculantes de reducción de emisiones. En 2015 se llevaron a cabo las reuniones frente a un nuevo acuerdo climático para reducir la temperatura mundial en 2 °C plasmado en el Acuerdo de París. A la fecha, este acuerdo ha sido ratificado por 195 países.

La conclusión principal de las reuniones contingentes es la obligación de los países a conducirse hacia un nuevo paradigma productivo que consolide las nuevas perspectivas del *Desarrollo Sustentable*. Este objetivo es crucial para la consolidación de necesidades inmediatas y de las generaciones futuras. Los principales aspectos que los modelos energéticos sustentables²⁶ deben tener en cuenta son aspectos básicos como:

- *Erradicación de la pobreza*, cambiando patrones de producción y consumo base de recursos de desarrollo económico y social.

²⁶ Por modelo energético sostenible, siguiendo la definición expuesta en la Cumbre de Rio del año 2012, es aquel que contribuye a la erradicación de la pobreza y al crecimiento económico sostenible, aumentando la inclusión social, mejorando el bienestar humano y creando oportunidades de empleo y trabajo decente para todos, manteniendo al mismo tiempo el funcionamiento saludable de los ecosistemas.

- *Seguridad energética*: manteniendo el suministro de comida, agua, energía, servicios de salud, cultura a precios razonables para la comunidad.
- *Paz*: Estabilidad y respeto a los derechos humanos y libertades fundamentales, políticas, económicas y sociales.
- *Contexto institucional*: Responsabilidad de las instituciones democráticas necesarias para la gente, respecto a la diversidad cultural, el derecho al desarrollo, igualdad de género en las prácticas ambientales.
- *Sustentabilidad ambiental y competitividad económica*: Niveles de producción y extracción de energía compatibles con los niveles naturales de reposición y que eviten choques de demanda energética.

En particular, la forma de combatir el cambio ambiental, el deterioro ecológico y los retos sociales se logrará por la vía de incrementar la contribución de energías renovables en el suministro global de energías (Lacomelli, 2005). Para ello, el director Ejecutivo Adjunto de la Agencia Internacional de la Energía (AIE²⁷), Paul Simons afirmó, en un seminario organizado en Barcelona el mes de marzo del 2019, que la estructura productiva en los países debe potenciar la apuesta por las energías renovables y la eficiencia energética para impulsar la transición que permita cumplir los objetivos del Acuerdo de París, fundamentalmente en la rebaja de emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Además, afirma que cada nación deberá diseñar políticas ambientales acorde a sus características particulares y preocupaciones en materia de seguridad energética, sustentabilidad y crecimiento económico.

El proceso de transición energética considera relevante la posibilidad de un desarrollo inclusivo frente a las necesidades sociales y ambientales, promoviendo la participación de los distintos actores sociales en el desarrollo y utilización de energías renovables. En este sentido, la noción de *Desarrollo Sustentable* no solamente retoma aspectos técnicos para afrontar la crisis energética, sino además es una agenda internacional

²⁷ La Agencia Internacional de Energía es el organismo que integra a los siguientes países: Australia, Austria, Bélgica, Canadá, Corea del Sur, Dinamarca, España, Estados Unidos, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Japón, Luxemburgo, México, Nueva Zelanda, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, República Checa, República de Eslovenia, Suecia, Suiza, Turquía y Reino Unido. Los requisitos para integrarse son los siguientes: Contar con reservas de petróleo crudo y / o productos equivalentes a 90 días, un programa de restricción de la demanda para reducir el consumo nacional de petróleo hasta en un 10%; legislación y organización para operar las Medidas de Respuesta a Emergencias Coordinadas Energéticas y medidas establecidas para garantizar la capacidad de contribuir con su parte de una acción colectiva de la organización.

que considera participación de diferentes actores y sectores en favor de revertir las afectaciones cualitativas que el deterioro ambiental causa en los individuos. Una de ellas es la erradicación de la pobreza a través de los siguientes propósitos económicos del modelo sustentable:

- Mejorar el acceso a servicios y recursos energéticos confiables²⁸, asequibles²⁹, económicamente viables, socialmente aceptables y ambientalmente sustentables³⁰.
- Mejorar electrificación rural y sistemas energéticos descentralizados.
- Mayor uso de las energías renovables;
- Líquidos más limpios y combustibles gaseosos.
- Mejorar la eficiencia energética
- Creación de capacidad física;
- Mecanismos innovadores de financiamiento;
- Asistencia tecnológica;
- Mejorar el acceso a las modernas tecnologías de biomasa y leña. fuentes y suministros;
- Apoyar la transición al uso de líquidos y gaseosos más limpios, combustibles fósiles, cuando se consideran más ambientalmente sanos, socialmente aceptable y rentable;
- Desarrollar políticas energéticas nacionales y marcos regulatorios;
- Promover asociaciones público-privadas;
- Promover incremento de investigación y desarrollo en el campo de los nuevos servicios energéticos, incluyendo energía renovable, eficiencia energética y avances en la tecnología de energía sustentable
- Diversificar la oferta energética y desarrollo de energías limpias y eficientes.

Esta agenda no sólo involucra a los países desarrollados sino también a los emergentes. La asamblea general de las Naciones Unidas en su resolución del año 2010,

²⁸ Respecto a electricidad: i) aprovechar el enorme potencial de generación solar y eólica; ii) evitar interrupciones por falta de flexibilidad operativa, privilegiando la infraestructura de transmisión y generación. En cuanto a gas: i) aprovechar las reservas de gas no convencional; ii) evitar interrupciones por falta de infraestructura (incremento de gasoductos, capacidad de compresión y almacenamiento subterráneo. Referente al petróleo: i) explorar reservas en aguas profundas; ii) evitar subinversión en proyectos convencionales; iii) preparar transición de mercado de combustibles a parque vehicular eléctrico (AIE, 2018).

²⁹ Por ejemplo: i) utilizar la competitividad de los costos de energías renovables en México; ii) valer la competitividad de precios regionales de gas en México; iii) evitar subsidios regresivos que beneficien a la población de más altos ingresos (AIE, 2018).

³⁰ i) Hacer uso de los organismos reguladores autónomos de energía para la reducción de metano y quema de gas; ii) explotar el enorme potencial de renovable para reducir la huella de carbono de la matriz energética; iii) evitar retrasos en proyectos de captura de CO₂ en plantas de ciclo combinado para generación de energía eléctrica; iv) Sustituir inversiones en carboeléctricas (AIE, 2018).

fundamentada en reuniones del consejo relativa a la *Declaración del Milenio*, plantea una preocupación puntual en los países en desarrollo: más de 3,000 millones de personas dependen de la biomasa³¹ para cocinar y para calefacción, mientras que 1,500 millones de personas carecen de electricidad por no poder pagar estos servicios energéticos. El informe reconoce que el acceso a los servicios energéticos modernos es esencial para lograr los objetivos de *Desarrollo del Milenio* y el *Desarrollo Sustentable*; lo cual ayudaría a reducir la pobreza y mejorar las condiciones y el nivel de vida de la mayoría de la población.

En 2015, la comunidad internacional adoptó un nuevo pacto global de desarrollo. Este acuerdo, que se conoce como la *Agenda 2030* y los *Objetivos de Desarrollo Sostenible* (ODS), propone poner fin a la pobreza y al hambre, en todas sus formas y dimensiones, asimismo determina proteger el planeta mediante el consumo y la producción sostenible, la gestión sostenible de sus recursos naturales y la adopción de medidas urgentes sobre el cambio climático, garantizando que todos los seres humanos puedan disfrutar del progreso económico, social y tecnológico (PNUMA, 2018).

Existen esfuerzos tanto a nivel gubernamental y por parte de las empresas con el fin de mejorar la eficiencia y productividad de los recursos ambientales, ampliando el horizonte multifactorial encausado únicamente al factor trabajo y capital. Cumplir con las expectativas de consumo y sustentabilidad ambiental sólo es posible a través de la política ambiental y política de innovación orientada hacia la creación de capacidades tecnológicas que incrementen la productividad de los recursos ambientales y reduzcan el daño ambiental (Scooll, 2009).

1.5.1. Política ambiental como fuente creativa de innovación

Ante el reto que los aparatos productivos enfrentan para transitar a un proyecto ambientalmente viable, la tecnología es un factor primordial dentro de la agenda ambiental con el que cuentan las sociedades, desde el aspecto técnico de producción, para reducir las emisiones contaminantes y el nivel de residuos en aire, ríos, mares y bosques, así como elemento dinámico dentro del aparato productivo. Su definición dentro de los distintos enfoques de la economía toma ciertos matices. Carabias (2003) propone el siguiente:

³¹ Se considera como biomasa a toda la materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los procedentes de su transformación natural o artificial, que pueden ser aprovechados como materias primas energéticas. Por ejemplo, los residuos vegetales, forestales, industriales y urbanos (Mujal, 2000).

- i) La *economía convencional* (neoclásica) considera artificialización máxima de los ecosistemas por medio de tecnologías no contaminantes, aplicación de técnicas de control exclusivas para dispersar contaminantes, y especialización máxima. El criterio de evaluación de la tecnología es estrictamente económico, y la eficiencia tiene que ver con la productividad.
- ii) La *economía ambiental* introduce incentivos y restricciones a los empresarios con el fin de inducir cambios tecnológicos para paliar los efectos adversos de la actividad económica sobre el ambiente, aunque con un enfoque correctivo. Se privilegian técnicas de control al final de los procesos, aunque también se promueven adaptaciones para elevar la eficiencia energética en el uso de los materiales, el reciclamiento y otras técnicas.
- iii) La *economía ecológica* tiene una perspectiva diferente de la tecnología y de su gestión. Se trata de introducir de manera orgánica otros criterios en la eficiencia y racionalidad económica. El énfasis pasa de ser la prevención, no sólo la corrección del deterioro ambiental; se admite un mayor grado de incertidumbre tecnológica, y se acepta que otro tipo de tecnologías no modernas, pueden ser muy adecuadas en el nuevo concepto de eficiencia económico-ambiental; la gestión productiva tiende a verse no tanto como un ciclo.

La integración de aspectos ambientales a la esfera económica introduce dificultades adicionales, por un lado, aspectos cualitativos en cuanto a la conservación de los recursos ambientales, por otro se refiere a la esfera de consumo, producción y bienestar social.

La posibilidad de que existan mejoras tecnológicas con orientación ambiental requiere de un entorno institucional que provea incentivos para inducirlas. Porter y Van der Linde (1995) argumentan que la contingencia ambiental se debe al uso inadecuado de recursos ambientales a causa de baja eficiencia en el uso de los insumos energéticos. Una política con regulaciones medioambientales tendrá un impacto en la política de innovación y adopción tecnológica impulsando el gasto en innovaciones ambientales como medida de sobrevivencia en el mercado y restablecer sus condiciones de competencia.

Se debe considerar que los avances tecnológicos que podrían permitir esa convergencia se caracterizan por lo siguiente:

- Minimizar la generación de desechos;
- Reducir la utilización de energía y recursos ambientales;
- Permitir usar los recursos renovables favoreciendo la recuperación de estos;
- Favorecer el reciclamiento y reutilización de la mayor proporción posible de los desechos y productos;
- Hacer uso eficiente de los recursos naturales utilizados como insumos (Quirk, 2001).

Depende del patrón de especialización local y de la política de innovación elegir el rumbo tecnológico que la economía en su conjunto decida.

Los efectos de la tecnología por sí solo no puede ser una solución al problema de sostenibilidad del ambiente. Si bien se caracterizó de distinta manera en los enfoques del listado anterior, debemos considerar un tipo particular de tecnología, no sólo en términos técnicos sino ambientales (entre tecnología ambiental y ecológica). Además, se requiere de la participación de los distintos actores de la sociedad y el impulso institucional a través de políticas de innovación³², industrial³³ y científica³⁴. El actuar conjunto de los agentes privados y el sector público puede generar las condiciones propicias para que las innovaciones tecnológicas sean posibles³⁵ e impulsen a la política ambiental hacia el desarrollo³⁶ sustentable.

³² Se basa principalmente en tres aspectos. i) 'dinamo' de la innovación, factores dinámicos clave que crean y dan forma a la innovación en las empresas, ii) Factores de transferencia: factores humanos, sociales y culturales que influyen en la transmisión de información, iii) Condiciones marco: condiciones generales e instituciones que establecen el rango de oportunidades para la innovación (Manual de Oslo, 1997), además de compatibilidad con las reglas genéricas de los agentes.

³³ Por política industrial se entenderán las acciones de gobierno que deliberadamente favorecen a ciertos sectores sobre otros, no necesariamente manufactureros. Tal intervención, que supone un desafío a las señales del mercado, se realiza en aras de mejorar la productividad y las posibilidades de desarrollo de largo plazo de una economía, aunque también involucra otros objetivos, como la preservación del empleo, la igualdad regional y la seguridad nacional (Schneider, 2015; Chang, 1993; Foreman-Peck, 2014).

³⁴ Por política científico-tecnológica se entenderá las distintas medidas que toma el sector público para desarrollar nuevos conocimientos científicos (investigación básica) y aplicarlos a la solución de problemas concretos (investigación aplicada), entre los que se incluyen los productivos en sentido amplio (es decir, mejoras en los procesos, en los productos o en lo organizacional).

³⁵ Además, autores como Nelson y Winter (1977), Patel y Pavitt (1995), Lundvall (1992) y Dosi *et al* (1989), entre muchos otros, han agregado que las empresas no innovan aisladas, sino en un entorno en el que influyen la dinámica del mercado, los factores políticos-institucionales y los elementos financieros, entre otros. El objetivo del trabajo es mostrar que la innovación también se incorpora en un plano medio ambiental.

³⁶ Desde mediados de la década del 60's emergió un enfoque que tendió a privilegiar el rol de la innovación tecnológica en los procesos de desarrollo económico, así como en la determinación de las corrientes comerciales y la división internacional del trabajo, (Schteingart, 2017) posteriormente retomado dentro de la discusión del cambio climático (por ejemplo, véase Rosas y Hernández Laos, 2017).

Miedzinski (2013) denomina política *de innovación sostenible* a la formulación de política que ayude a las empresas a mejorar su competitividad, evitando los daños secundarios al ambiente. Ésta debe incluir cambios en la dimensión social y ambiental de corto plazo y de largo plazo hacia la meta del Desarrollo Sustentable:

- Establecimiento de fronteras conceptuales (definición y medición);
- Identificar los desafíos políticos clave;
- Establecer objetivos y metas de política a largo plazo;
- Obtener la combinación de políticas adecuada para la innovación;
- Coherencia de políticas: coordinación multinivel y sinergias entre políticas;
- Aprendizaje de políticas: evaluación continua y retroalimentación de política

Mientras el estado tiene la responsabilidad de utilizar los siguientes instrumentos:

- Esquemas orientados al mercado;
- Contratación pública;
- Marcos regulatorios y normativos;
- Incentivos para el proceso de negocios de eco-innovación;
- Medidas de sensibilización y demostración;
- Planificación estratégica y previsión.

Desde otro punto de vista, Delgado-Moreno y Escalante-Semerena (2018) plantean que la capacidad de adaptación y auto-organización de las comunidades frente a la emergencia ambiental permite construir un tipo de gobernanza distinta, cuya principal característica es la participación de los actores de manera directa en el diseño de políticas y creación de instituciones, configurando un proceso de auto gestión innovador, flexible y adaptativo de los recursos naturales con base en los conocimientos de las personas. Por tanto, las políticas de sustentabilidad e innovación se crean desde abajo a través de objetivos viables fuera de la rigidez y centralización de las instituciones gubernamentales, lo que representa el origen de un Sistema Socio-Ecológico.

En este contexto, surge como respuesta de la estructura productiva, estatal y social ante el desafío ambiental la definición *ecoinnovaciones*.

1.5.2. Ecoinnovaciones

La idea sobre tecnología ambiental, como se dejó claro, no bajo la definición neoclásica sino desde un punto de vista ecológico y evolucionista, modifica el concepto de eficiencia. Este pasa a depender no sólo de las implicaciones económicas sino también de sus repercusiones ambientales. En la actualidad a este tipo de tecnologías se les considera *ecoinnovaciones*. Éstas reducen el daño ambiental (Carrillo-Hermosilla *et al.* 2010, Kemp 2010, Mossalanejad 2011) a través del uso eficiente de los recursos ambientales (Lotti y Marin, 2015). Existe un vínculo entre política de innovación y medio ambiente (Andersen, 2006) de tal manera que este indicador refiere al grado de penetración de las innovaciones ambientales en el mercado (Horbach *et al.*, 2012).

La ecoinnovación es considerada un apoyo importante para cumplir con los objetivos del Desarrollo Sustentable. La producción, asimilación o explotación de una novedad en productos, procesos de producción, servicios o en métodos de gestión y de negocios, cuyo objetivo, a lo largo de su ciclo de vida, es prevenir o reducir sustancialmente el riesgo ambiental, la contaminación y otros impactos negativos del uso de recursos (incluida la energía), aunado a las tecnologías ambientales sin comprometer el crecimiento económico (Machiba, 2010; Horbach, 2012; Kemp y Pearson, 2008, OCDE, 2015). Así como producir cambios en diferentes esferas; en lo económico, ahorro de materiales y energía, nuevos productos y servicios, nuevos mercados, nuevos modelos de negocios, en la administración sustentable de los recursos ambientales, enfrentar el cambio climático, mejora de biodiversidad y ecosistemas, en lo social mejoras en la calidad de vida y creación de nuevos empleos sostenibles y en la política de seguridad energética y de materiales y justicia de recursos (Miedzinski, 2013).

Kemp y Pearson (2007) indican que las tecnologías procedentes de las ecoinnovaciones se caracterizan por los siguientes rasgos:

- Control de la contaminación, incluyendo reducción de residuos, así como su respectivo tratamiento;
- Tecnología limpia que reduce el daño ambiental;
- Produce nuevos productos de mayor eficiencia respecto a otras alternativas;
- Equipamiento para tratamiento de residuos;
- Monitoreo del medioambiente;

- Uso de energía “verde”.

Mientras que Clark (2007) propone una clasificación para diferenciar el tipo de ecoinnovación:

- *Nivel 1 (incremental)*: Mejoras progresivas pequeñas o incrementales a productos existentes.
- *Nivel 2 (rediseño)*: Rediseño importante de productos existentes (pero limitó el nivel de mejora que es técnicamente viable).
- *Nivel 3 (funcional o ‘alternativas de productos’)*: Nuevos conceptos de productos o servicios para satisfacer la misma necesidad funcional, por ejemplo, teleconferencias como alternativa a los viajes.
- *Nivel 4 (sistemas)*: Diseño para una sociedad sostenible.

La dificultad de su medición hace que los índices de penetración y creación de ecoinnovaciones en la industria y sociedad se exprese de distintas formas. Oltra (2008) propone que las patentes pueden usarse para estudiar innovaciones ecológicas con el fin de evaluar las competencias tecnológicas nacionales en el campo ambiental. Esta herramienta se ha utilizado en diferentes ámbitos, por ejemplo medir el impacto y trayectoria de las innovaciones ambientales en el flujo de conocimiento entre inventores y países (Jaffe *et al.* 1996 y 1998; Johnson y Popp, 2003 y Popp 2002), transferencia de patentes ambientales extranjeras (Lanjouw y Mody, 1996), impactos sobre tecnologías de energía alternativa (Marinova y McAleer, 2003), competencia tecnológica convencional y tecnológica-ambiental (Frenken *et al.*, 2004), en el campo de energías renovables (Johnstone, 2005; dinámica de sectores específicos en cuanto a la incorporación de eco-innovaciones (Oltra y Saint Jean, 2006) y reducción de emisiones de CO₂ (Horbach *et al.*, 2012).

Con el ímpetu reciente de las ecoinnovaciones, se ha realizado una serie de estudios para conocer su impacto sobre la eficiencia. Los resultados son diversos. Lotti y Marín (2015) señalan que los procesos de innovación, en especial las ecoinnovaciones, tienen tasas de retorno en términos de productividad menores, Lanoie *et al.* (2011) argumenta que la regulación gubernamental estimula innovación ambiental pero el efecto positivo no compensa los costos de implementarlos. Dechezlepretre *et al.* (2013) ha investigado si las tecnologías en los campos "verdes" difieren de las tecnologías en otros campos en términos de generación de efectos secundarios de conocimiento y eficiencia,

concluyendo que los *spillovers* de conocimiento generados por innovaciones ambientales son sustancialmente mayores.

El proceso de innovación, que reduce el daño ambiental, debe incidir sobre la eficiencia en la utilización de los insumos ambientales que se requieren para la fabricación de los distintos bienes. De tal forma, las ecoinnovaciones incidirán sobre la *eficiencia energética*. Inicialmente se define como la forma de utilizar menos energía para proporcionar el mismo nivel de producto. Ésta permite expandir la frontera de producción más allá de los límites del crecimiento impuestos por el capital (Ansuategi, Delgado y Galarraga, 2015) de tal forma es posible reducir la tasa de utilización de insumos ambientales y disminuir la brecha respecto a la tasa natural de regeneración, causando un efecto dual: por un lado, incrementando el valor de los bienes producidos, utilizando el mínimo de insumos ambientales y aprovechando el máximo de su composición orgánica y disminuir la velocidad de consumo. A través de este principio, se puede contar con un análisis dinámico que permita la mejor integración entre los sistemas ambiental, social y económico. Estos aspectos serán discutidos en las siguientes secciones.

1.6. Eficiencia energética

La idea del desarrollo sustentable no solamente refiere a la correspondencia entre las actividades productivas y el ambiente, sino además implica un incremento en las condiciones de bienestar en los hogares. Wheeler y Martin (2001) mencionan que la idea del progreso alternativo con base en el respeto al medio ambiente debe producir incrementos en el ingreso de las familias compatible con la tasa de regeneración del ambiente. De tal forma, una estructura productiva bajo el principio de *eficiencia energética*, puede crear condiciones tales que: i) reduzcan los costos referidos a servicios proporcionados por el sector eléctrico y petrolero, por lo cual, *ceteris paribus* incrementaría la demanda de energía del resto de los sectores y las familias, ii) los hogares se verían beneficiados por dos vías: a) reducción de los precios de los bienes de consumo, al disminuir su costo de producción (por un servicio de energía a menor importe, por tanto un incremento inmediato en su ingreso real), b) reducción de las tarifas de energía eléctrica y gas natural para consumo doméstico.

El concepto de eficiencia energética aparece al promover un desarrollo sustentable frente al reto del cambio climático (Wei y Liao, 2016). Debe considerarse que es un proceso multifactorial y escala diferenciada de medición. La eficiencia energética se vislumbra en toda la cadena de valor de la energía, incluyendo extracción, procesamiento, conversión, almacenamiento, demanda final, y reciclaje. En relación con variables económicas, se vincula con producción, distribución, comercio y consumo (Feidt, 2009).

La eficiencia se entiende como el uso racional de los recursos energéticos disponibles y es una herramienta fundamental para el uso de estos recursos de manera sustentable. Usar la energía de manera sustentable implica no sólo minimizar los impactos al medioambiente, sino al mismo tiempo asegurar el acceso a todos los actores de la sociedad, manteniendo una viabilidad económica de los procesos energéticos. Es este segundo punto, el acceso a la energía, el más importante cuando se relaciona entre pobreza y energía, pues las personas más vulnerables de la sociedad son las que tienen más barreras para acceder a la energía.

Los indicadores de eficiencia energética pueden ser muy generales (el consumo total de los electrodomésticos) o desagregados (el consumo energético³⁷ promedio de gas natural para la calefacción de una unidad de construcción en los hogares particulares). Por tanto, la política ambiental debe orientar la demanda con un potencial considerable para la eficiencia energética y la rentabilidad de las tecnologías disponibles y uso racional de la energía.

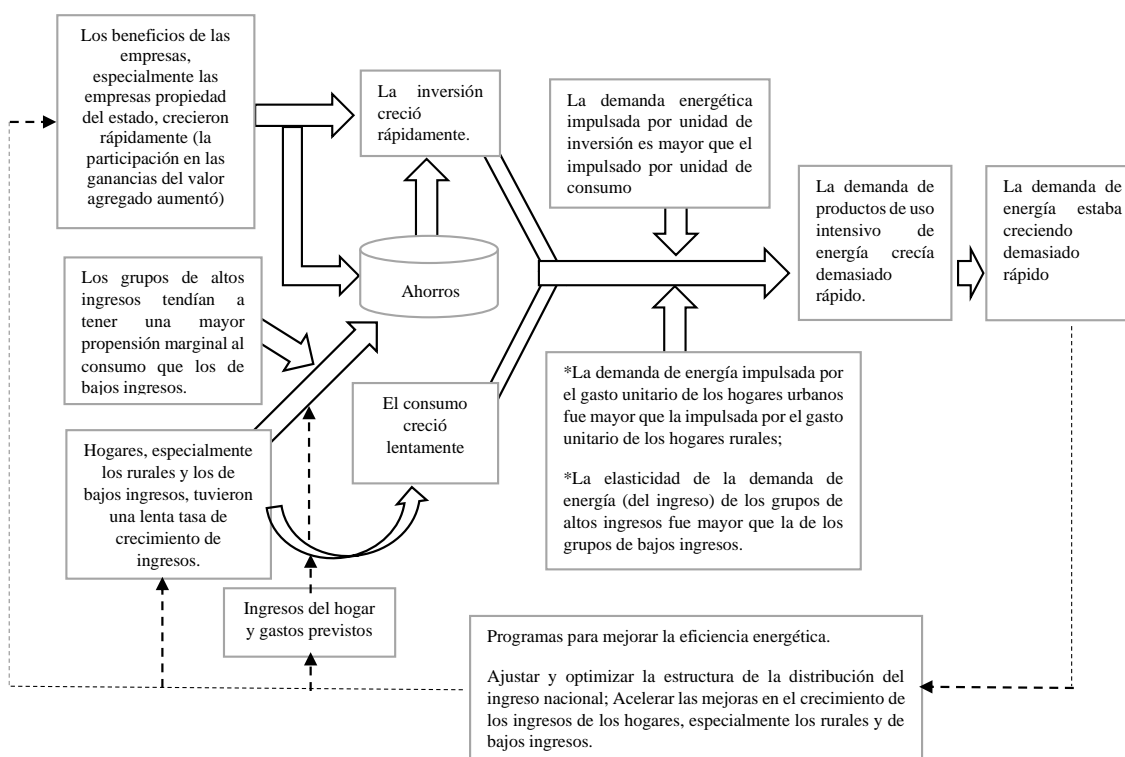
El aumento de la eficiencia de los usos finales de la energía, es decir, la prestación de más servicios por unidad de energía consumida es, en general, la forma más abundante, menos costosa e inofensiva, el más rápido de implementar, el menos visible, el menos comprendido y el más descuidado para proporcionar servicios de energía (Lovins, 2005).

Además, a medida que las tecnologías continúan evolucionando, el potencial para aumentar la eficiencia también continúa aumentando y constantemente surgen nuevas oportunidades para mejorar el rendimiento.

³⁷ El consumo energético puede expresarse en diversas unidades (kWh, julios, toneladas equivalentes al petróleo, etc.), mientras que los datos por actividad abarcan una amplia gama de actividades: producción de cemento, unidad de construcción, kilómetros-pasajero, empleados, etc., expresados en tantas unidades como actividades (toneladas, metros cuadrados, kilómetros, número de empleados, etc.) (AIE, 2005).

Desde una perspectiva económica tradicional, se deben adoptar medidas para aumentar la eficiencia energética hasta el punto en que los costos de los esfuerzos adicionales para mejorarla sean iguales a los beneficios (Ansuategi, Delgado y Galarraga, 2015). Distintos son los mecanismos de influencia de la eficiencia energética. Partiendo únicamente del aspecto económico tradicional, Yamng y Yu (2015) ofrecen el siguiente esquema de interacción.

Figura 6. Influencia económica sobre la eficiencia energética

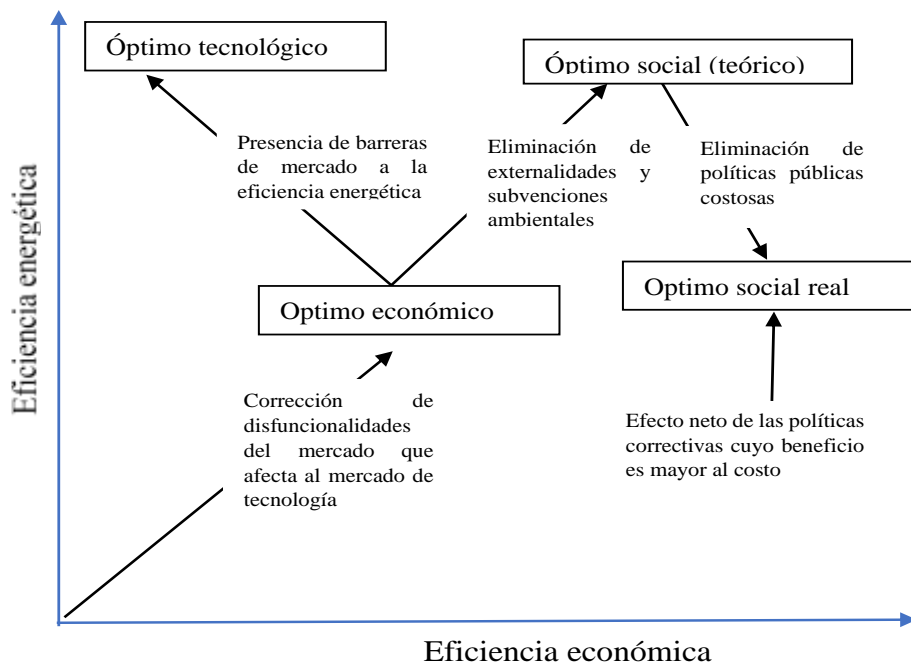


Fuente: Yamng y Yu (2015)

La figura 6 muestra el impacto de una política de eficiencia precedida de la mejora en el ingreso nacional. Es destacable como la posibilidad de incrementar el ingreso tiene un efecto positivo sobre la demanda de bienes intensivos en procesos energéticos eficientes, aunque sólo por parte de los hogares de altos ingresos y no los rurales. En esta investigación la relación causal de la hipótesis es inversa, la eficiencia incidirá sobre el gasto de los hogares al incrementar la oferta de servicios energéticos básicos y disminuir el impacto ambiental.

La concepción tradicional sólo concibe la eficiencia como resultado de la eficiencia económica. La figura 7 muestra este comportamiento.

Figura 7. Relación entre la eficiencia energética y eficiencia económica



Fuente: Jaffe, Newell y Stavins (1999)

Se observa que el desafío de eficiencia está condicionado por dos aspectos: la presencia de barreras al interior de los mercados y costosas políticas. El problema de las barreras encuentra su origen en el contraste aparente entre las posibilidades de reducción de los consumos de energía (y en consecuencia, de los costos) resaltados por el análisis técnico-económico y las inversiones realmente realizadas por las empresas, hogares y administraciones para aprovechar estas oportunidades (Baolanger, 2007), así como la preferencia del inversor por el gasto futuro, al creer que el costo de la inversión ecológica sea menor que en el periodo actual (Gillingham, 2006). Estos aspectos constituyen límites a los proyectos de inversión, sin embargo, en ningún punto se refiere a las condiciones sociales y ambientales.

El cuadro 1 resume las posibles barreras a la inversión de proyectos en eficiencia energética que enfrenta toda sociedad.

Cuadro 1. Barreras de la eficiencia energética

Tipo	Barrera	Ejemplos
Barreras económicas	Costos ocultos	Gastos generales, detenida de producción, capacitación del personal (empresas) pérdida de confort durante el trabajo (hogares), costos de recopilación de información (todos).
	Acceso al capital	Problema para las administraciones públicas (contribución a la deuda del Estado), el sector no de mercado y el sector asociativo (riesgo alto para los bancos), los hogares de bajos ingresos o sin garantía. Acceso diferencial de diferentes actores a recursos financieros dentro de grandes empresas
	Riesgos	Aversión específica al riesgo según la naturaleza de la empresa, el hogar, etc.
	Heterogeneidad	Casos específicos (naturaleza de la actividad, entorno, etc.).
Mal funcionamiento del mercado	Información imperfecta	Falta de información relacionada con la buena naturaleza pública de la información, mayores costos de información sobre cómo ahorrar energía que cómo consumirla
	Asimetría en la información	Los vendedores o los inquilinos de un edificio tienen información superior a la del inquilino o del comprador potencial sobre los costos del uso de energía. El inversor externo conoce mejor que su cliente los ahorros posibles.
	Incentivos divergentes	No se recomienda al propietario que realice inversiones en eficiencia energética, ya que es el inquilino el que recibirá los dividendos. El inquilino tampoco tiene interés en hacer una inversión ya que no tiene el principal
Organizacional y conductual	Racionalidad limitada	Las rutinas y procedimientos organizacionales pueden descuidar los problemas de energía.
	Cultura	El interés y las competencias tecnológicas (especialmente energéticas) y / o ambientales varían según la cultura de la empresa y entre los hogares.
	Poder	El sistema de incentivos implementado en la empresa (rotación rápida de ejecutivos, incentivos a beneficios inmediatos) puede favorecer una visión de los gerentes a muy corto plazo (tiempos de recuperación muy cortos). La naturaleza de las relaciones jerárquicas puede inhibir el acceso a los medios financieros o al poder de decisión de los departamentos y / o gerentes a cargo de la energía.

Fuente: Science and Technology Policy Research, (2000)

Como se observa en el cuadro, la difusión de la eficiencia energética requiere de condiciones no sólo económicas sino culturales, sociales y políticas. Esto permite reafirmar la metodología de investigación, la cual contrapone el análisis convencional de la economía neoclásica considerando los fenómenos económicos aislados de los demás sistemas.

Ante la ausencia de aspectos distintos a los económicos para explicar la eficiencia energética, la política ambiental considera el término *ecoeficiencia*. Las decisiones de inversión deben contemplar una serie de criterios más allá del económico.

1.6.1. ¿Ecoeficiencia es sinónimo de eficiencia energética?

La eficiencia energética reduce la pobreza a través de métodos innovadores, desarrollo de tecnologías, y nuevo conocimiento. El término *eficiencia energética* se enunció por primera vez por el sector privado el año de 1992, en la cumbre de Rio de Janeiro. La noción de *eficiencia energética* puede proporcionar una base sólida para desarrollar una comprensión conceptual del uso racional y efectivo de los recursos para avanzar hacia estos objetivos del Desarrollo Sustentable. Este concepto surge desde una perspectiva de experiencias y lecciones sobre el uso de recursos, la investigación para el desarrollo, la adaptación y mitigación del cambio climático, las políticas e incentivos y la equidad social y el género (PNUMA, 2019; CEPAL,2009).

Autores como Park (2010) incluye explícitamente los criterios sociales, así como los criterios económicos y ambientales para mejorar las tasas de utilización de tecnologías de eficiencia energética, promover prácticas que mejoren la eficacia de los esfuerzos de reducción de la pobreza y minimizar la degradación ambiental.

Si bien la idea de *eficiencia energética* es compatible con los procesos tecnológicos, económicos y de innovación descritos hasta el momento, esta se validará hasta contrastarla con las mediciones de pobreza energética. Recordando, definimos *eficiencia energética* como el proceso de interacción que vincula las innovaciones sobre la eficiencia con la finalidad de reducir la tasa de utilización de los recursos ambientales e incrementar el acceso a servicios ambientales de calidad a la población abatiendo la pobreza. Si los niveles obtenidos de eficiencia traen consigo una reducción de la pobreza, entonces se afirmará que la política de innovación y ambiental mejoran las condiciones del sistema en su conjunto a procesos *eficientes*. **Por el momento, se mantiene el interés de investigación en términos de la primera, pues hasta este punto no es posible determinar que el comportamiento del sector de análisis sea eficiente.**

1.6.2. Tipos de eficiencia energética

Existen diferentes tipos de eficiencia energética. La siguiente clasificación se construye con base en el trabajo de Wei y Liao (2016), Guillingam (2009) y Yu (2013).

- *Macro-eficiencia energética*

Se refiere al consumo energético por unidad del Producto Interno Bruto (PIB). Normalmente se utiliza el índice “intensidad energética³⁸” para mediciones por país, regiones o nivel eficiencia a nivel industrial, de tal manera que una reducción en el consumo energético implica un incremento en la macro-eficiencia energética. Esta clasificación distingue entre un *output* resultado de las actividades económicas y el insumo expresado como energía primaria.

El incremento del valor por unidad de consumo está relacionado con el estado de desarrollo, estructura económica, nivel técnico, precio de energía, cultura, localización geográfica, condiciones climáticas, recursos, etc. Este índice es una medición parcial, pues no considera la sustitución de energías y alternativas. Se confunde con eficiencia económica, sin embargo, sólo se incorpora la energía utilizada en la producción; ésta puede considerarse una función lineal homogénea. El objetivo es reducir la intensidad de energía en las industrias e incrementar el gasto de nuevas tecnologías (por ejemplo, sirve para saber cuántas toneladas de dióxido de carbono se emiten por cada mil dólares en valor de producción).

- *Eficiencia energética física*

Se define como el consumo de energía por unidad de producto y el consumo de energía en el proceso de productivo. Es una medida relativa de eficiencia, al comparar el gasto energético de producir un bien respecto a otro. Por ejemplo, el consumo total de energía por tonelada de hierro producido, en comparación con otros productos.

La eficiencia física energética es una medida de comparación entre diferentes estructuras de producción a nivel de administración, equipamiento, calidad de insumos, y estructura de consumo energético. Tiene inconvenientes en la medición por la variación de utilización relativa de los insumos energéticos³⁹, por lo cual se obtienen resultados distintos entre métodos.

³⁸ Usualmente es resultado del consumo energético de los hogares expresado en alguna variable calórica entre el valor del PIB nacional.

³⁹ Puede ser que la elaboración de cierto producto cambie su composición, de tal forma que, al momento de compararlo con otro, haya saltos estadísticos en la medición.

- *Eficiencia energética termodinámica*

Se calcula con base en la teoría de termodinámica clásica⁴⁰. Se utiliza para diferenciar entre explotación energética, procesamiento, almacenamiento, transporte y eficiencia en la utilidad terminal. La eficiencia energética física puede clasificarse en la primera ley de eficiencia termodinámica y segunda ley de eficiencia termodinámica.

Según el Teorema de Carnot, un ciclo consta de dos procesos isotérmicos (donde un gas ideal no cambia de temperatura) y dos procesos adiabáticos (temperatura del gas cambiante) conocidos por la eficiencia del ciclo de Carnot: $g_c = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1}$, donde T1 es la expansión isotérmica (un gas absorbe calor a una temperatura constante) y T2 la compresión isotérmica (el gas cede temperatura de manera constante). Es decir, si T1 y T2 fueran iguales significaría todo el calor de la fuente emisora se convierte en trabajo.

La ecuación expresa el diferencial de temperaturas tal forma que el total del calor no se convierte en trabajo mecánico, cuando la eficiencia térmica de uno de los ciclos es menor, es decir, existe un proceso adiabáticos.

Este desarrollo permitió el desarrollo de la segunda ley de la termodinámica. Es decir, el diferencial de temperaturas en los ciclos implica una pérdida de energía que no se convierte en trabajo, considerándose como entropía.

- *Valor de eficiencia energética*

Debido a la heterogeneidad de los diversos tipos de energía o diferencias de calidad, los efectos serán diferentes. En algunas áreas o empresas, aunque su consumo de energía es bajo, consumen principalmente energía de alta calidad (como el gas natural, transferencia neta de electricidad), cuyo costo es alto. Para calcular el número total, se puede usar el coeficiente térmico equivalente como el peso de los distintos tipos de energía y también calcular el total en términos de precios ponderados. De esta manera, se puede calcular el *valor de la eficiencia energética*. Su principal función es identificar las diferencias entre los precios de la energía y las estructuras energéticas. Obtener este índice monetario permite comparar, por ejemplo, la diferencia de costos entre la eficiencia y eficiencia física de diferentes países.

⁴⁰ Para un análisis sencillo véase el trabajo Feidt (2009) Efficacité énergétique: Quels critères?

Desde el punto de vista dinámico, el valor de la eficiencia energética también puede ser definido como la relación entre el producto resultante del servicio durante un ciclo de vida completo del equipo y los costos de energía

Respecto al cálculo, se obtiene la magnitud del consumo de energía (en diferentes países o regiones) en términos de valor. Debe considerarse si el valor de producción incluye conceptos que distorsionen el valor puro (por ejemplo, impuestos al consumo impuestos sobre la producción, costos de transporte, etc.). Para evitar las variaciones de precios de la energía, es recomendable utilizar los valores ajustado por Paridad de Poder Adquisitivo.

- *Asignación de eficiencia energética*

El índice de asignación mencionado anteriormente se basa principalmente en el conocimiento estadístico o conocimiento termodinámico. El índice se basa poco en conocimiento de la economía. Se utiliza la teoría económica matemática para determinarlo. La asignación de recursos, que es un problema del sistema económico y del mecanismo de precios⁴¹, tiene una estrecha relación con la capacidad de motivar a los usuarios en términos de la importancia de reducir el consumo de energía.

La eficiencia de la asignación de energía refleja las formas de reducir el costo de producción al cambiar su combinación, bajo un cierto sistema de precios relativos. Considérese dos insumos con tecnología de rendimientos constantes a escala, bajo la condición de racionalidad por parte del empresario, siendo los principios de minimización de costos y maximización de beneficios.

- *Eficiencia en el uso de energía*

La energía como factor de producción generalmente se incluye con los otros elementos de capital, mano de obra y materias primas involucradas en el proceso de producción. La eficiencia energética de la asignación de factores se basa en varias combinaciones de los elementos y se utiliza para calcular la combinación óptima de varios elementos, sea de insumo o productos. La metodología tradicionalmente utilizada es el DEA. La idea conceptual parte del estudio de Farrell (1957) y Färe *et al.* (1985). Dado las características de esta técnica, al no ser paramétrica, es decir, restrictiva en cuanto a los

⁴¹ Este tipo de análisis es el origen de la economía como rama independiente de las demás. El mecanismo en una sociedad descentralizada que compatibiliza las decisiones de intercambio es el mecanismo de precios (Benetti, 1990; Klimosvky, 2003).

rendimientos de la producción, será utilizada para el estudio de caso en esta investigación. Los detalles de esta metodología serán expuestos en el capítulo tres.

1.7. Pobreza energética

Hasta el momento se ha expuesto la urgencia de transitar hacia un modelo ecológico-social compatible con las necesidades económicas, sociales y ambientales. Si bien la cuestión primordial es la reducción del daño ambiental, un incentivo para esta práctica debe ser el impacto social, en especial reducir la pobreza energética.

El acceso a la energía por parte de los individuos es fundamental. Si una persona no satisface las necesidades humanas relacionadas con los usos de energía, no ejerce entonces sus derechos, lo cual implica una situación de pobreza (García-Ochoa y Graizbord, 2016). Thomson, Petrova y Bouzarovsky (2018), Bouzarovski, (2018) se refieren a la incapacidad de los miembros del hogar a contar con niveles sociales y materiales de servicios de energía en el hogar. Además, advierten que la pobreza energética es inherentemente un fenómeno espacial, incluyendo estructuras socio-étnicas de los hogares. Esto permite evidenciar un vínculo entre aspectos económicos ambientales y sociales. El papel de la tecnología sobre la innovación y eficiencia energética requiere caracterizar este fenómeno no sólo en términos técnicos y ambientales sino también en aspectos sociales. García (2011) considera que la tecnología debe detonar procesos económicos de la siguiente índole:

- Lograr condiciones de vida que permitan la superación de la pobreza;
- Alcanzar grados de equidad, en términos de ingreso, oportunidades de vida, participación política y social compatibles con la superación de la pobreza

Al mejorar las condiciones de producción por parte de los empresarios, al acceder mayores niveles de oferta de energía (petrolera y eléctrica), por ende, reducir los costos por unidad de producción, y por parte de las familias reducción de las tarifas en los servicios de energía doméstica, sería posible disminuir la pobreza energética. Boardman (1991) define a un hogar en situación de pobreza energética cuando no puede tener los servicios adecuados de energía con el 10% de sus ingresos. García (2011) encontró que los principales factores que inciden sobre la pobreza energética son el nivel de ingreso, el tamaño de la localidad, el nivel de educación y el sexo del jefe del hogar, así como el tamaño de la vivienda. Por tanto, existen elementos suficientes para el propósito de la investigación, el cual es verificar

si la eficiencia energética es factor explicativo de la pobreza energética. Si es así, este término sería compatible con el propósito de ecoeficiencia.

El acceso a la energía es uno de los objetivos planteado en las metas ODS (PNUMA, 2018). Requiere no sólo de movilización social y financiamiento interno, sino desarrollo e implementación de política de innovación (Painuly, 2001). Es necesario entender el concepto de biomasa en los hogares, principales fuentes de servicios energéticos, el proceso de transición hacia otros insumos y lo más importante las características de los hogares. Partamos nuevamente de la definición convencional; al respecto señala la ausencia de elección adecuada, confortable realizable, segura y principio medio ambiental en su utilización de seguridad al interior del hogar. Considerando la seguridad, confortable, cuidado, y servicios medio ambientales que apoyen las actividades humanas y desarrollo del ser humano. Según la AIE (2017), basado en su metodología de medición de gasto en energías, el 15% total de la población sufre de pobreza energética. El trabajo de Koszulj (2009) analiza la importancia de los servicios energéticos para lograr los ODS:

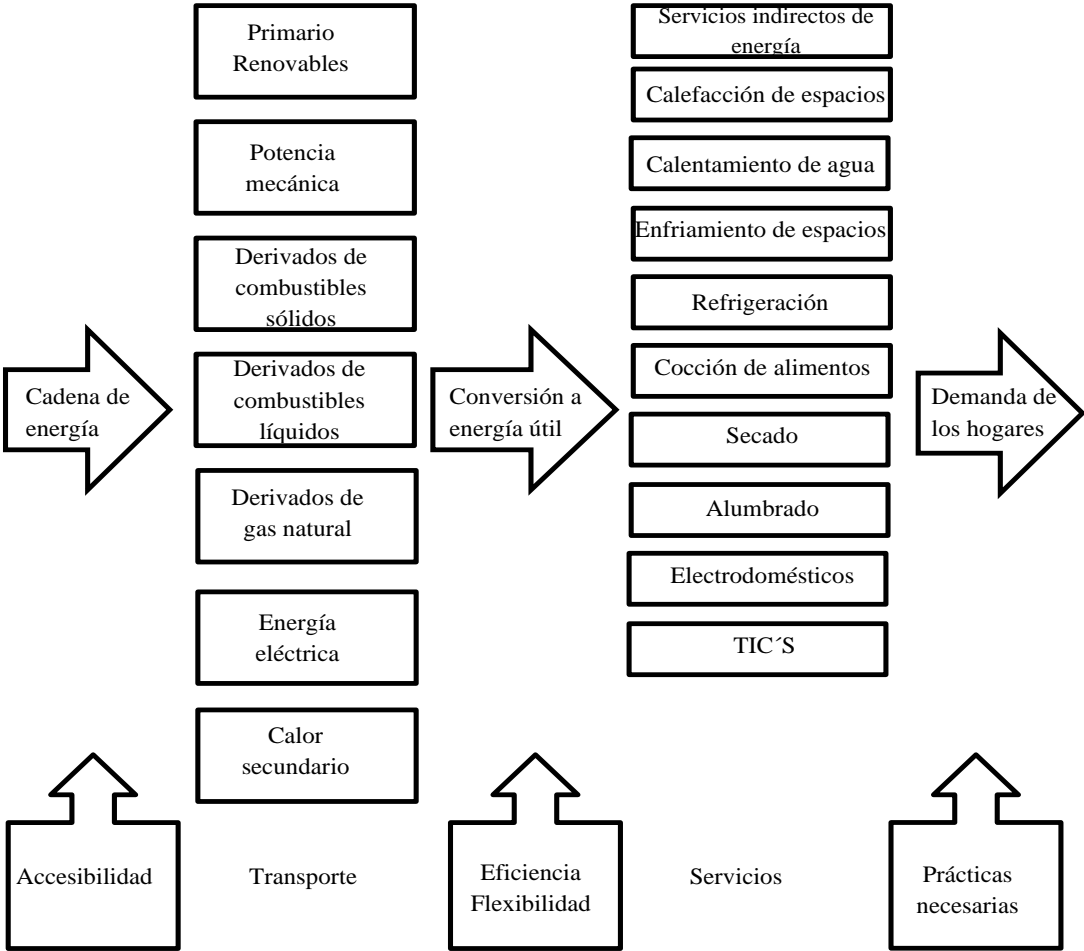
- El acceso de los pobres a la energía no es un eje prioritario de política pública, situación que evidencia la necesidad de incluir este tema de manera explícita en los Marcos Nacionales de Planificación;
- Los pobres gastan una mayor proporción de sus ingresos en servicios de energía que las clases medias y altas;
- Hay una disminución a nivel país en el consumo total de leña, pero un aumento del consumo de leña per cápita en localidades urbanas.

Junto a la noción de pobreza energética, existen otros términos que no precisamente son sinónimos como precariedad energética, privación energética, pobreza de combustible y otros para referirse a fenómenos particulares “hogares fríos”, “impago de energía” y “desconexión energética” (Bouzarovski, 2014; Petrova, 2017; Wilhite *et al.* 2000). El de mayor interés para la comunidad científica es el término de pobreza energética que, como ya se mencionó, explora los factores que determinan la cantidad y calidad de los servicios energéticos recibidos por los hogares y la dificultad de acceder a servicios modernos de energía y su impacto sobre el bienestar físico de los miembros del hogar dentro de una visión integral para reducir la pobreza y mejorar el desarrollo humano y mitigar los efectos del cambio climático dentro de un contexto económico, político y social que se configura

en el grado de intervención de la acción estatal dentro de los proyectos de desarrollo sostenible.

El siguiente esquema muestra las vertientes de oferta de servicios energéticos que requieren los hogares y el punto donde se produce la exclusión de ciertos hogares al acceso de energía.

Figura 8. Dimensiones que influyen en la prestación de servicios energéticos al hogar y el surgimiento de la pobreza de energía doméstica.



Fuente: Fine (1993)

Los bloques inferiores indican las posibles causas para limitar a los hogares al acceso de energía. La cadena de energía hace viable la accesibilidad, la eficiencia y flexibilidad de los métodos de generación de energía, y las prácticas sociales de consumo determinan su demanda.

Tradicionalmente, la investigación de la pobreza energética en los países subdesarrollados se ha centrado principalmente en cuestiones relacionadas con la oferta de servicios energéticos, destacando la necesidad de ampliación de las redes al considerarse como sector clave del proceso de industrialización, innovación y desarrollo en los países desarrollados (Lee, Anas, y Oh, 1999; Munasinghe, 1990; Rahul y Chan, 2016), así como centrar su atención en los aspectos históricos que causan la pobreza energética como los altos precios de los energéticos, baja eficiencia energética y bajos ingresos. La literatura dominante en eficiencia energética se ha centrado en la estructura física de viviendas y calidad de los electrodomésticos, el gasto del hogar en energía y aspectos epidemiológicos de la vivienda en condiciones de frío para la salud (Hills, 2012; Clinch y Healy 2001; Harrington *et al.* 2005). Sin embargo, el desarrollo de categorías dentro de la noción de pobreza energética ha permitido diversificar los enfoques de análisis.

Uno de los grandes desafíos de la pobreza energética es que tienen diversas causas que no se capturan en un sólo indicador (Stephenson *et al.* 2010; Wilson and Dowlatabadi 2007; Verhallen and Van Raaij 1981; Black *et al.* 1985; Nussbaumer *et al.* 2012, McKague *et al.* 2018). Ampliar las dimensiones del problema permite mayor comprensión del fenómeno.

En este sentido, Boardman (1991) señala que no precisamente los hogares pobres son vulnerables a las contingencias energéticas, sino son factores como la edad y la salud los que determinan la respuesta. Por otro lado, existe una relación entre la pobreza y las causas de muerte por incremento en las necesidades y en el consumo a consecuencia de la privación energética⁴². La población que requiere tratamientos médicos requiere un mayor número de horas para su salud (es necesario un mayor número de horas del servicio eléctrico) (Anderson *et al.*, 2012, Lawson *et al.*, 2015). Grobmann y Kahlheber (2015) señalan que el estado de salud, etnia nativa y el rol en la constitución de los factores que explican el fenómeno.

Si bien los enfoques económico y técnicos son útiles, no representan adecuadamente las amplias variables implicadas en la aparición del tiempo y espacio (Harrington *et al.* 2005; Liddell, 2012; Stern 2014; Pachauri y Spreng, 2004). Para ello, el marco de *Las Culturas Energéticas* plantea los espacios sociales, culturales y de comportamiento de los

⁴² Se entiende por privación energética la exclusión de grupos sociales por no contar con ingresos suficientes para adquirirlos (Tews, 2013).

individuos. Allí se determina cómo interactúan los individuos con sus dimensiones materiales y técnicas. Esta conceptualización puede proveer nueva información sobre cómo la vulnerabilidad de la energía en los hogares cambia con el tiempo. El valor de la cultura energética ofrece un marco matizado y holístico a través entender los impulsores de la pobreza energética (Lawson *et al.* 2016; Hopkins y McCarthy 2016; Hoica, 2012; Bell *et al.* 2013; Sweeney *et al.* 2013; Stephenson *et al.* 2010). Este marco analítico ofrece múltiples elementos para conceptualizar el comportamiento y los componentes sociales que interactúan con la estructura de consumo energético.

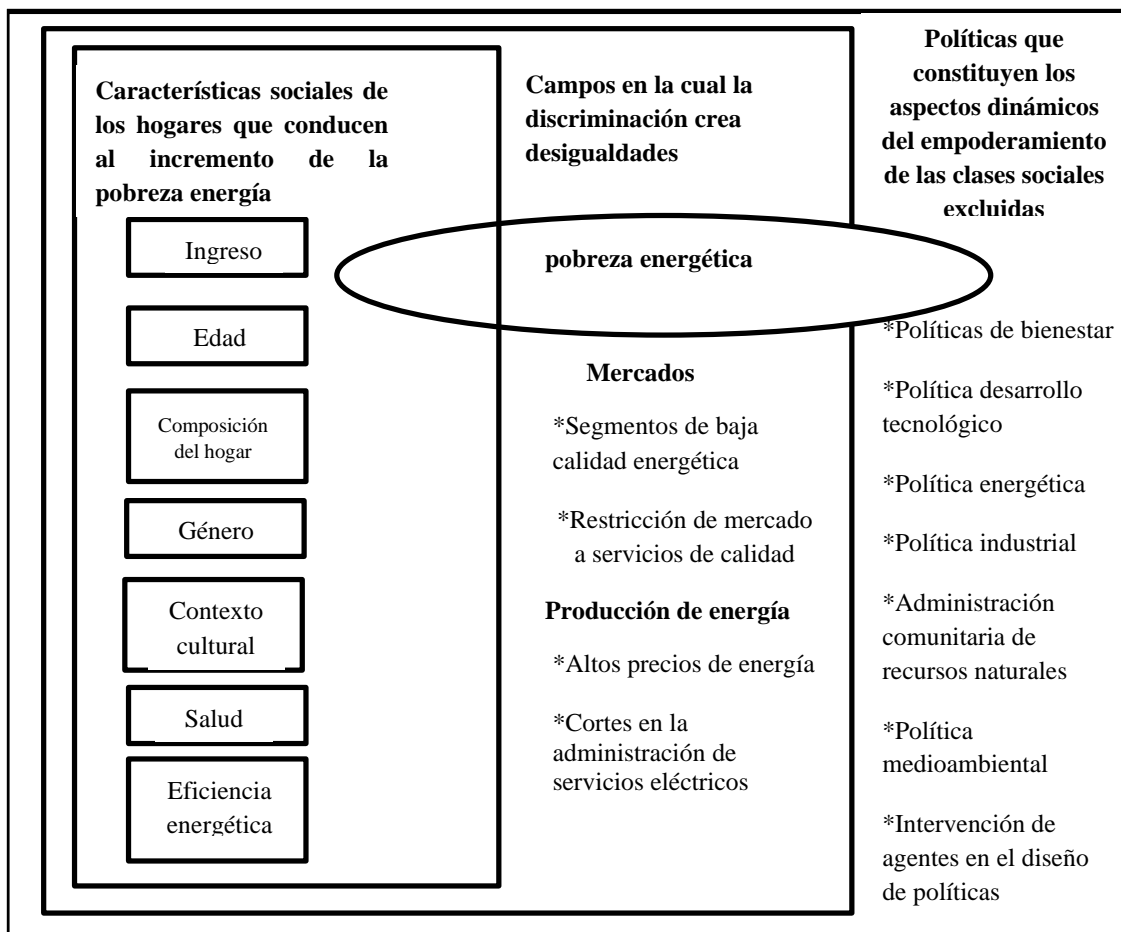
Diversos expertos en el campo de la energía llaman a una visión multidisciplinaria que abarque los sistemas más grandes que influyen en el consumo de energía (Osbaldeston 1984; Stern 1986; Hards 2013; Sovacool, 2014; Lutzenhiser, 1993; Patterson 1996; Stephenson *et al.* 2010). Una combinación de factores económicos, construcción del entorno social y ambiental y factores del bienestar deben estar presentes en el análisis para entender más adecuadamente la dinámica del consumo en los hogares.

Otros autores como Crenshaw (1991) plantean que la pobreza energética es resultado de un proceso excluyente. Examina las relaciones de poder y las estructuras de discriminación. La falta de eficiencia adecuada en los hogares es un factor relativamente estático, mientras que los mecanismos discriminatorios de los mercados de vivienda, que tienden a segregar a los hogares de bajos ingresos en viviendas de baja calidad, permanecen ocultos. El hogar es identificado como un lugar de discriminación. Las restricciones no son sólo de ingreso sino son resultado del mercado. Se distingue sectores vulnerables, como inmigrantes, niños, y gente pobre. No sólo el bajo nivel de eficiencia es causa de pobreza energética sino también el problema del mercado.

Adaptando el modelo propuesto por Crenshaw (1991) se plantea que la eficiencia energética es un factor dinámico que explica la pobreza energética. Se ha justificado a lo largo del texto que las metas del ODS requieren de la colaboración de agentes privados y política gubernamental, además, dentro del planteamiento de sistemas complejos, la serie de relaciones entre los sistemas ambiental, social y económico es dinámica y multidireccional. En este sentido, la eficiencia es resultado del proceso adaptativo de los agentes, de tal manera que la estabilidad del sistema podrá explicarse por los niveles

eficientes del sistema productivo y sus repercusiones sobre los hogares serán las recompensas (o castigos) de los individuos por transitar a un escenario sostenible, más allá de la consideración clásica de fenómeno: bajos ingresos, pobre eficiencia energética y altos precios de energía.

Figura 9. Conceptualización de la pobreza energética como fenómeno dinámico



Fuente: Adaptación propia con base en Crenshaw (1991)

El cuadro muestra una serie de determinantes dinámicos que explican la pobreza energética. Es importante mencionar que se considera este proceso como resultado de un esquema energético excluyente por motivos de ingresos, edad, estructura del hogar, género, contexto social, motivos de salud y por ausencia de procesos eficientes en términos de energía que provean servicios energéticos de calidad.

Otro aspecto relevante del cuadro son las políticas con las cuales se revierte la exclusión de los grupos sociales de los beneficios energéticos. Estos coinciden con las políticas que permiten la transición energética, de tal manera que se valida que los objetivos

del Desarrollo Sostenible son compatibles con las políticas de innovación, industrial, ambiental y energética, y a su vez, son vías para revertir el problema de pobreza energética y de exclusión cuando nos referimos inevitablemente a la interacción de sistemas complejos como son el ambiental, social y ambiental.

Continuando con la importancia de la eficiencia energética, Poortinga *et al.* (2018) menciona que vivir en condiciones frías representa un riesgo para la salud, en particular para los hogares de bajos ingresos y pobres en combustible. La mejora de la eficiencia energética del stock de viviendas puede traer múltiples beneficios positivos para la salud a través de la mejora de las temperaturas interiores y la reducción del consumo de combustible (Thomson y Thomas, 2015). La evidencia sugiere que los beneficios de tales intervenciones de eficiencia energética son mayores cuando se dirigen a personas con un calor inadecuado y con mala salud existente (Thomson, Sellstrom y Petticrew, 2013).

Capítulo 2. El sector eléctrico

2.1. El sistema eléctrico global

2.1.1. El desarrollo del paradigma tecnológico de la electricidad

Alrededor de 600 años antes de Jesucristo, Tales de Mileto observó que al frotar un trozo de ámbar con la piel de un gato, creaba un fenómeno de atracción de cuerpos de luz por el ámbar. Llamó a este fenómeno "elektron", que en griego significa ámbar amarillo. Este descubrimiento no tuvo aplicación práctica hasta principios del siglo XVII, cuando Otto de Guericke lo completó utilizando varios elementos como el rubí, el zafiro. Fue durante el mismo período en que se descubrió que frotando el vidrio, era posible obtener mayores efectos eléctricos que el azufre o el ámbar. Estos experimentos fueron precursores a lo que posteriormente se denominarían dos formas de electricidad: electricidad positiva y negativa. La primera se obtiene por la fricción de cuerpos transparentes como el vidrio o el cristal y la segunda que viene de cuerpos bituminosos o resinosos como el ámbar (Sabonnadière y Hadjsaïd, 2015).

El estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos sólo interesó a unos cuantos científicos, entre otros: Gilbert, De Coulomb, Galvani, Von Guericke y Volta. En ese momento no existía interés dentro del círculo científico para abordar este campo y la población no sabía de sus posibles aplicaciones. Entre los científicos del siglo XVIII interesados en la electricidad se encontraba Benjamin Franklin, quien estableció la convención de carga positiva y negativa y el supuesto flujo direccional de electricidad.

El conocimiento de la electricidad avanzó paso a paso durante el siglo XIX. Charles Coulomb descubrió que una carga de electricidad se debilitaba con la misma ley en inversa que Newton había descubierto para la gravedad. Para esto, su nombre se adjuntó a una medida de carga eléctrica, el colombio. Luigi Galvani, mientras diseccionaba una rana, notó que sus patas comenzaron a temblar. El físico italiano pensó que podría haber habido un rayo en las cercanías. Teniendo este experimento como preludio, Alessandro Volta, después de algunas repeticiones de lo realizado por Galvani, detectó que dos metales diferentes, el cuchillo y la bandeja que sostenía la rana, eran la causa real de las sacudidas. A partir de esto, desarrolló la pila voltaica, el precursor de la batería hecha de discos de dos metales diferentes, como zinc y cobre o plata, separados por papel empapado en agua salada.

Durante este mismo periodo ocurrieron impresionantes avances en la comprensión de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Humphrey Davy, André Ampere, G. Ohm y Karl Gauss realizaron importantes descubrimientos. Esta revolución en el seno científico se volvió fundamental para elevar el concepto de la electricidad como un fenómeno científico interesante a una gran tecnología con implicaciones sociales de grandes alcances.

Realizando una revisión de los grandes descubrimientos e inventos relacionados a fenómenos eléctricos se consideran los siguientes. Investigadores como Carl Siemens, Wheatstone, Varley, Gramme, aplicaron los principios de inducción en la construcción de primitivos generadores eléctricos en el periodo comprendido entre 1840 a 1870. El invento de la lámpara de Thomas Alva Edison en 1878 provocó que el uso de la electricidad se universalizara.

Edison inventó la bombilla eléctrica en 1878 por ensayo y error. Fue el resultado final de innumerables intentos de encontrar un material de filamento que pudiera conducir la corriente eléctrica hasta el punto de incandescencia sin quemarse. Edison también era un hombre de negocios astuto y fundó la primera empresa de servicios públicos en 1882.

La corriente continua (DC) de Alva Edison predominó el consenso científico. Sin embargo, existía un problema asociado a la incapacidad de distribuir electricidad en un área amplia sin pérdidas de línea significativas haciendo que las bombillas tuvieran intermitencias. En este esquema, la electricidad de corriente continua sería de naturaleza distributiva, necesitando de muchas plantas, cada una de ellas en un área pequeña.

Frente a los problemas de la corriente continua, en la década de 1890, la compañía Westinghouse, recién constituida, experimentó una nueva forma de electricidad, denominada corriente alterna (AC), inspirada en el hecho de que la corriente invierte alternativamente el sentido del flujo. Esta novedad tenía muchas ventajas; por ejemplo, se eliminaron los problemas de conmutación, propios de los generadores de DC, lo que dio lugar a controversias entre Edison, de la nueva compañía General Electric, y la Westinghouse, para definir si la industria debiese establecer normas sobre AC o DC. Finalmente triunfó la corriente alterna, por las siguientes razones:

- El transformador de AC podía satisfacer el requerimiento necesario de cambiar fácilmente los niveles de voltaje y corriente.

- El generador de AC era más sencillo y barato

2.1.2. Difusión del nuevo paradigma eléctrico

Fue a partir del siglo XIX, la sociedad humana vivía principalmente de economía agrícola cuya base energética fue diversificándose a otras fuentes de energía. La sustitución de combustibles de origen orgánico hacia el carbón mineral se debió en gran medida a la competencia por espacios cultivables entre la producción de alimentos y la producción de energía (Wrigley, 2011) sin dejar de lado la transición tecnológica y la revolución de la máquina de vapor.

En el siglo mencionado, las familias de la época iluminaban sus hogares con velas, lámparas alimentadas con aceite de ballena y petróleo; la energía motriz se suministraba generalmente por personas o animales de arrastre. Esto posteriormente cambiaría con la consolidación de los conocimientos sobre fenómenos eléctricos aplicados a las necesidades humanas.

Desde 1880, fecha entró en funcionamiento en Londres la primera central eléctrica destinada a iluminar la ciudad, las aplicaciones de esta energía se han extendido progresivamente. En 1882 se instaló el primer sistema para la venta de energía eléctrica para el alumbrado incandescente en Estados Unidos. El sistema era de corriente continua. En Buenos Aires, la primera ciudad de América Latina en contar con servicio eléctrico, la Compañía General Eléctrica inicio operaciones en 1887.

Entre 1800 y 1810 se fundaron compañías comerciales de alumbrado con gas, primero en Europa y poco después en Estados Unidos. Hubo oposición al alumbrado de gas por su potencia explosiva. Sin embargo, ofrecían ventajas en términos de costo por lo que se acabó desarrollando la industria durante el siglo XIX, teniendo su punto culminante alrededor de 1885.

El proceso de consolidación de las centrales eléctricas pasó por diversas etapas de innovación frente a los retos de una recién creada estructura de servicio. En 1895 Westinghouse construyó la primera planta comercial de generación de electricidad de corriente alterna en las Cataratas del Niágara, el padre de todas las futuras plantas generadoras de electricidad. Aunque las Cataratas del Niágara utilizaron la energía hidroeléctrica para encender los generadores, Westinghouse también encabezó el desarrollo de la turbina de vapor.

Las antiguas compañías eléctricas se autodenominaban “compañías de iluminación”, el servicio de alumbrado era su única función. Sin embargo, muy pronto se encontró un problema técnico a las plantas comerciales: la mayor cobertura que las compañías tenían que satisfacer comenzaba al anochecer, se mantenía casi constante en las primeras horas de la noche, y después caía de forma precipitada al llegar media noche. Para hacer frente a la demanda de los hogares de manera constante, las compañías generadoras debían innovar en sus procesos y expandir el ciclo de generación hacia procedimientos de almacenaje y distribución de energía eléctrica. A causa de su diversificación en varias etapas del proceso las compañías comenzaron a nombrarse “compañías de luz y fuerza”.

Otro problema técnico que el sector enfrentó fue las caídas en la tensión y potencia debido a la lejanía entre las centrales de generación y los sitios de carga y almacenaje. Se sabía que la potencia eléctrica era proporcional al producto del voltaje y la corriente. Es decir, se obtendría menor corriente a mayor voltaje.

Frente a la tradicional manera de transmisión de electricidad por corriente continua propuesta por Alva Edison, se buscó una manera de transformar niveles de corriente y voltaje de forma confiable y eficiente. Las ideas Westinghouse aparecieron como la solución a los problemas técnicos. Fue tal éxito de la corriente alterna que acaparó la industria desapareciendo el problema de las cargas lejanas y las bombillas titilantes.

Este tipo de compañías, tuvieron cada vez mayor número de clientes, ya que la mayor parte del incremento de carga se podía manejar sin que hubiera necesidad de incrementar la inversión del capital; se abarató el costo por unidad de energía, lo que atrajo aún más usuarios.

El incremento de la producción en cada empresa a través de incrementar su eficiencia produjo que las empresas eléctricas locales se extendieron en tal forma de satisfacer las condiciones de carga pico con la generación de potencia interconectando los generadores y compartiendo cargas. Este paso sería una extensión lógica para ofrecer mayor cobertura y mejorar la utilización del equipo.

Con la puesta en marcha de operaciones de diversas compañías simultáneamente surgió un problema técnico al inicio del siglo XX; en esa época se contaba con el uso de muchas frecuencias diferentes de corrientes DC, y AC (en 1900). Como los sistemas interconectados debían operar a la misma frecuencia, se requerían equipos de conversión de frecuencia

demasiado costosos. Eventualmente en la industria se adoptó una frecuencia mayor, de 60 Hz, como norma en Estados Unidos, al poseer características eléctricas aceptables y porque las turbinas de vapor trabajaban satisfactoriamente a las correspondientes velocidades mecánicas de 3600 y 1800 revoluciones por minuto.

El progreso tecnológico en el diseño de aparatos continuó: Se desarrollaron mejores lámparas eléctricas, proporcionando al usuario más luz por unidad de energía. Con la constante baja en el costo de la energía, la selección de motores eléctricos como propulsores mecánicos llegó a ser muy popular para toda clase de aplicaciones industriales y domésticas.

Por todo lo expuesto la electricidad constituye, hoy por hoy, una de las manifestaciones energéticas más difundidas, tanto por su facilidad de generación, transporte y consumo, como por sus numerosas aplicaciones y conversión en otras formas de energía (mecánica y térmica, principalmente).

2.2 Sector eléctrico de México

2.2.1 Antecedentes de la evolución del sector eléctrico

El proceso de industrialización en la historia de las naciones encontró en una serie de industria los pilares rectores de la actividad económica futura, al tiempo que cubra satisfactores básicos en términos de ingreso, mercancías y servicios para su población. En el caso de México a partir de la década de 1870 la consolidación de los liberales en el poder marcó la pauta que habría que seguir el país en los siguientes 40 años (Kuntz Ficker, 2007) que incluía la creación de una esfera de acción para el individuo y la empresa privada, la ampliación de las libertades económicas, una mejor definición de los derechos de propiedad, entre otras.

En el transcurso del último tercio del siglo XIX, México poseía una economía pequeña, cerrada y atrasada, consecuencia de la fragilidad de la independencia y guerras internas caracterizada por una severa fragmentación territorial, pobreza y escasos vínculos comerciales con el exterior. La característica de las últimas décadas fue comenzar a liberalizarla actividad económica y ampliar la esfera de actuar de la empresa privada de origen nacional y extranjero.

Tras unos años de estabilidad, la derrama fiscal de las importaciones (Finker, 2007; Moreno Brid y Ros, 2004) provocó que el Estado emprendiera un ambicioso programa de

expansión ferroviaria, representó la apertura de la economía mexicana a la gran inversión extranjera. Los ferrocarriles contribuyeron a integrar el mercado interno y valorizar zonas que contaban con recursos nunca explotados. La integración del país detonó un proceso de exportaciones en ciertas zonas. Con los ingresos de las exportaciones, pudo estimular otros sectores y regiones del país, coadyuvando con las actividades económicas heredadas de la Colonia como la agricultura, minería y comercio, al tiempo que se intensificaban los flujos comerciales con el exterior y robustecía y solidificaba el lugar de honor de las clases capitalista.

El inicio de un proyecto económico liberal en favor de la actividad privada, el arranque de la dinámica económica en nuevas áreas geográficas y la diversificación de actividades productivas por parte de la burguesía económica nacional ocasionó que la demanda de servicios energéticos por parte de la población y de industrias nacientes como la cementera, siderúrgicas asimismo de la producción de papel, azúcar, cerveza, jabones y pólvora fuese incrementando.

Fue en la naciente industria textil de León, Guanajuato en donde, en el año de 1876 dentro de las instalaciones de la empresa Hayser, se instala la primera planta termoeléctrica del país. Así transcurrió los años finales del siglo XIX donde las aplicaciones de la industria textil y minera, así como la demanda de la población hizo que de 1887 a 1911 se construyeran más de 100 empresas de luz y fuerza motriz de capital nacional, mientras que empresas extranjeras Mexican Light and Power, Puebla Light and Power Company, Chapala Hydroelectric and Irrigation Company, la Guanajuato Power Company and Electric Company y la Río Conchos Electric Power and Irrigation Company aprovechaban su brecha tecnológica para apoderarse del servicio en los grandes centros urbanos (Rodríguez, 1994).

Con el dominio de empresas privadas transitó el inicio de la industria eléctrica del país, utilizando a su favor los vacíos legales dentro del recién marco normativo para extender su participación más allá de los años establecidos inicialmente en las concesiones y expendiendo los beneficios de los concesionarios.

La Revolución Mexicana no sólo implicó un cambio en los equilibrios sociales, fuentes de legitimidad y poder político, sino que impuso una ruptura sobre el orden liberal que se había consolidado en el periodo precedentes (Finker, 2007). En el terreno económico

tuvo efectos notables: trastocó el sistema de transporte ferroviario y liquidó temporalmente el sistema monetario nacional, cambiando los canales de distribución y circulación de las mercancías, confiscaciones de bancos y ferrocarriles, imposición de préstamos forzosos. Además, la creación de la constitución de 1917 sentó los cimientos para el futuro del país, al otorgarle al Estado un papel central en la regulación de actividades económicas, laborales y reivindicar los derechos inalienables de la nación sobre los recursos del subsuelo, acotando el campo de acción del capital extranjero y la iniciativa privada.

En un contexto político e ideológico distinto donde la participación de los actores cambió y el Estado toma la batuta de las principales actividades económicas, surge la primera obra legislativa en materia eléctrica. El Código Nacional Eléctrico de 1926 otorgó al Congreso la facultad de legislar en materia de energía eléctrica y brindarle al Estado las riendas del marco legal y operativo de la generación de electricidad.

A partir de los años 30 el país logró reconstruir el aparato productivo que fue devastado durante la Revolución. La consolidación de una clase política dominante provoca una estrategia económica que permite un crecimiento industrial significativo vía el proceso sustitutivo de importaciones, sin embargo, en el sector eléctrico, la industria es dominada principalmente por capital privado a pesar de los esfuerzos del Estado por apropiarse de la dirección.

El 10 de septiembre de 1902 se funda la Mexican Light and Power Company, compañía de origen canadiense, que desde su origen se apropia de sitios estratégicos para instalar plantas hidroeléctricas, concentrando el servicio en la Ciudad de México, Puebla, Estado de México y Michoacán, gracias a la adquisición de concesiones a través de sus empresas filiales.

La expansión de la empresa fue consolidándose gracias a la adquisición de pequeñas empresas regionales, así como la negociación para extender la duración de las concesiones, de 10 a 20 años. El gran poderío se gesta con la fusión de la generadora con Impulsora de Empresas Eléctricas, concentrando la generación y distribución de más de 30 empresas en todo el territorio nacional hasta la década de los 50's. En contraparte, la respuesta del Estado ante el dominio del capital extranjero, se fundaron dos empresas totalmente públicas: la Compañía de Chapala en 1926 y la Comisión Federal de Electricidad en 1937, fusionándose en 1940 como medida de control en el sector. La táctica empleada por el

gobierno funcionó. Según Rodríguez (1994) a partir de esa década hasta los años 60's el aporte de ambas compañías fue incrementando a tasas de 10% anual, llegando a proveer el 66% del total de energía eléctrica del sector público.

De 1940 a 1970 se consolidaron medidas de carácter sectorial para impulsar la industria nacional. La piedra angular fue la intervención del Estado en la construcción de obras e infraestructura como las vías carreteras, la expansión del sistema eléctrico, redes para transporte de hidrocarburos, sistema de riego y telecomunicaciones. En materia de leyes las más importantes fueron: la Ley de Industrias Nuevas y Necesarias de 1941, las comisiones de Cuenca Hidrológicas de 1946 y el inicio de los parques industriales (acordados en 1953), intensificándose a partir de 1970 a 1976 con la implementación de distintos acuerdos, en los que destacan la Plan Nacional de Población Ejidal (1971), Programa de promoción de ciudades industriales y centros comerciales de Nacional Financiera (1971) creación de puertos industriales (1979) y el Plan Nacional de Desarrollo Industrial. Como menciona Gustavo Garza (1992), esta amplia agenda permitió al país una planeación institucionalizada de la localización industrial en el territorio nacional.

Es durante el periodo señalado donde la rectoría estatal del servicio eléctrico consuma su consolidación. En efecto, el primero de septiembre de 1960, el presidente Adolfo López Mateos decreta la nacionalización del sector con la finalidad de garantizar a la población mexicana los servicios públicos de generación, transformación y abastecimiento de electricidad. El nuevo marco legal que proveía el artículo 27 de la constitución atribuyó a la Nación estas actividades sin otorgar concesiones a los particulares. Ese mismo año se llevaron a cabo los convenios de compra de activos los dos grandes consorcios del país. De esa manera la integración del sector se culminó, quedando a la cabeza la Comisión Federal de Electricidad y se consolidó con la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica de 1975.

El transcurrir de la Comisión durante los años siguientes no fue el deseado. Desde la nacionalización hasta los años 70's se le impuso absorber los subsidios que aplicó el Gobierno Federal al resto de las industrias, manteniendo fijo la estructura de precios y cobros en contra parte a los gastos que necesitaba ejercer para afrontar la creciente demanda, por ejemplo, mayor personal, renovación y actualización de su maquinaria.

El ajustado transitar de la compañía hizo de sus deudas el mayor de sus problemas, a tal punto que en 1985 la Comisión tuvo que solicitar al gobierno absorber parte de su deuda equivalente a 8578 millones de dólares. La falta de planes financieros y logísticos para dotar viabilidad a la empresa hizo de un sector fundamental en uno de los mayores lastres de las finanzas públicas y el deterioro en la calidad del servicio ofrecido.

A raíz de la crisis de 1982 provoca que el Estado comience a reducir su intervención en las cuestiones urbanas e industriales. El sector eléctrico comenzó a ser objeto de reformas sustanciales para darle viabilidad económica a través de la participación privada en actividades cruciales como la producción. En la siguiente sección se revisa las implicaciones de la liberalización del sector.

2.2.2 Principales reformas al sector

Como se ha expuesto, en México, el Estado ha tomado la rectoría sobre las dos principales fuentes de energía: el petróleo, a través de Petróleos Mexicanos (PEMEX), y electricidad, a través de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). En el transcurso del tiempo ambas empresas paraestatales han sido objeto de diversas modificaciones en sus estructuras internas orientándose principalmente a ejes rectores de producción eficiente de energía, aumento en la capacidad instalada, precios competitivos, mayor cobertura de usuarios, mejoras en la calidad del producto y/o servicio, y en últimos años, procesos productivos que reduzcan el impacto al medio ambiente.

La década de los 90's implicó un cambio sustancial en las reformas adoptadas por los gobiernos en el sector eléctrico principalmente por 4 motivos Bacon y Besant-Jones (2002): i) el pobre desempeño del sector con altos costos, inadecuada expansión en el acceso del servicio eléctrico para la población; b) la incapacidad del Estado para financiar nuevas inversiones; c) la necesidad de remover subsidios en el sector para redireccionar esos recursos en otro tipo de gasto; d) el deseo de recaudar ingresos inmediatos para el gobierno a través de la venta de activos del sector.

En los años previos a la liberalización, la estructura de las empresas energéticas estuvo bajo la batuta de los estados y tuvo como consecuencias costos excesivos, baja calidad del servicios, malas decisiones de inversión y falta de innovación por la respuesta

demasiado lenta de las empresas a procesos innovadores provocando, como se mencionó, altos niveles de endeudamiento.

A la luz del desempeño del sector, se llevaron a cabo una serie de reformas en la industria con la finalidad de cumplir con los estatutos constitucionales. Las modificaciones principalmente se reflejaron en la Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica, siendo el marco que establece las normas con las cuales se presta el servicio público a la nación con la finalidad de satisfacer las necesidades de la población. Fue aprobado el 22 de diciembre de 1975 y sufrió sustanciales en 1992 y 1993.

La reforma de 1992 fue la conformación del marco jurídico frente al nuevo escenario que implicó la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte. La idea sobre la globalización y apertura de los servicios públicos a la iniciativa privada con la finalidad de mejorar y optimizar los procesos productivos fue la dominante para los países latinoamericanos, volviéndose dominante en los mandatos de las últimas décadas del siglo XX en México donde a través del libre mercado se logra la mejor situación posible.

Los nuevos lineamientos para el sector plantearon que la CFE siga siendo el organismo responsable de la prestación del servicio público. La Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal fue la instancia federal encargada de la planificación del sistema eléctrico nacional, asignando al sector privado actividades que no pertenecen al servicio público siempre y cuando sea factible y económicamente viable, por ejemplo: autoabastecimiento de energía eléctrica de personas físicas y morales, siempre y cuando no perjudicara a la nación (siendo subjetiva la consideración); la generación de energía eléctrica en conjunto con vapor u otro tipo de energía térmica; la producción independiente de particulares debía ser destinada en su totalidad a la CFE; producción de energía eléctrica no mayor a 30 MW principalmente orientados a la utilización de recursos renovables; exportación de energía eléctrica (al no considerarse de interés nacional); importación de electricidad para uso propio; la generación de electricidad al sistema nacional en casos de emergencias; y la creación de una comisión reguladora siendo un organismo desconcentrado de la Secretaría que dirija y controle la prestación de servicios a cargo de los particulares. Esta reforma implicó un nuevo camino para el sector en su conjunto y para la población en términos de acceso y servicio eléctrico.

Respecto a las reformas que ha sufrido el sector, la Reforma Energética del 2013 en México estableció que Petróleos Mexicanos y Comisión Federal de Electricidad se convertirían en empresas productivas del Estado, permitir a la Nación ejercer de manera exclusiva la planeación y control del sistema eléctrico en favor de un sistema competitivo que reduzca los precios de los servicios de electricidad; reducir la exposición del país a los riesgos financieros, geológicos y ambientales de la exploración y extracción de petróleo y gas; atraer mayor inversión al sector energético mexicano para impulsar el desarrollo del país; contar con mayor abasto energético a mayores precios; garantizar estándares de eficiencia, calidad y confiabilidad en el suministro, transparencia y rendición de cuentas.

Esta reforma se justificó por parte del gobierno para combatir los altos precios de la electricidad que lo vuelve no competitivo a nivel internacional, volviéndose en freno para la economía nacional al ser insumo esencial para la actividad industrial, comercial y de servicios. El esquema de prestación del servicio eléctrico sufrió una serie de modificaciones cuyas repercusiones serán evidentes en el actual esquema de producción, distribución, almacenamiento y transmisión de energía eléctrica.

El nuevo modelo de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica plantea reformas a nivel constitucional. El Artículo 27 dicta la rectoría en la planeación y control del sistema eléctrico nacional al Estado. Se mantiene la prohibición expresa de otorgar concesiones, sin embargo, es posible celebrar contrato con particulares para llevar a cabo el financiamiento, mantenimiento, gestión, operación y ampliación de la infraestructura necesaria para prestar el servicio público de transmisión y distribución de energía.

Se reforma el artículo 28 que mantiene las actividades de transmisión y distribución de energía en manos del Estado, sin embargo, las actividades de generación y comercialización permitiendo la apertura a la inversión privada. Se argumenta la participación de particulares en la generación de energía eléctrica permite que la instalación de nuevas centrales sea más flexible en el tránsito hacia energías renovables y mayor cobertura. El nuevo marco jurídico prevé modalidades de contratación entre el Estado y los particulares para que éstos contribuyan con su tecnología y experiencia a la expansión y mejoramiento de las redes de transmisión y distribución. La comercialización quedará abierta a la participación del sector privado.

Los usuarios calificados podrán participar directamente en un mercado mayorista de energía eléctrica, mientras que los usuarios de suministro básico serán atendidos por la CFE, La creación de este mercado permite realizar transacciones de energía que reflejen los costos en que incurren el sistema para proveer esta energía. El mercado spot establece los términos de compra y venta para los productores de energía eléctrica. El siguiente esquema muestra la conformación del sector después del cambio estructural del que fue objeto.

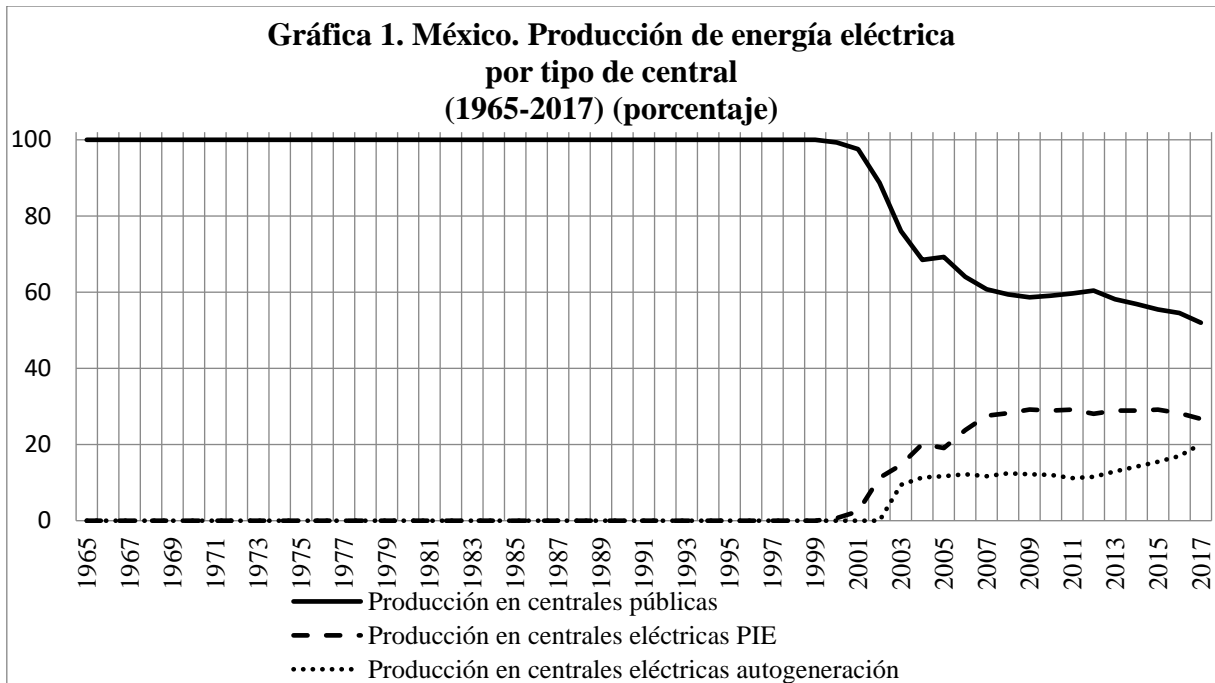
Cuadro 2. Nueva estructura del sector eléctrico de México

Generación	Organismo independiente	Transmisión y distribución	Venta al menudeo	Consumidores
<ul style="list-style-type: none"> •CFE •PEMEX •Compañías privadas <ul style="list-style-type: none"> •Apertura a competencia •Generador Energía eléctrica 	<ul style="list-style-type: none"> •Centro Nacional de Control de Energía <ul style="list-style-type: none"> •Organo descentralizado del Estado encargado de supervisar la operación del mercado eléctrico. 	<ul style="list-style-type: none"> •CFE <ul style="list-style-type: none"> •Bajo el control del Estado pero con acuerdos bilaterales con el sector privado. 	<ul style="list-style-type: none"> •CFE •Compañías privadas <ul style="list-style-type: none"> •Abierta a la competencia •Oferta básica reservado para CFE 	<ul style="list-style-type: none"> •Usuarios calificados •Usuarios básicos

Fuente: Chanona (2016)

2.2.3 Contribución dentro del sector energético nacional

El sector eléctrico nacional está conformado por dos sectores, el público y el privado. El servicio público se integra por la CFE y las centrales construidas por los Productores Independientes de Energía (PIE), éstos últimos entregan la totalidad de su energía a CFE para el servicio público de energía eléctrica. Por otro lado, el sector privado agrupa las modalidades de cogeneración, autoabastecimiento, usos propios y exportación.

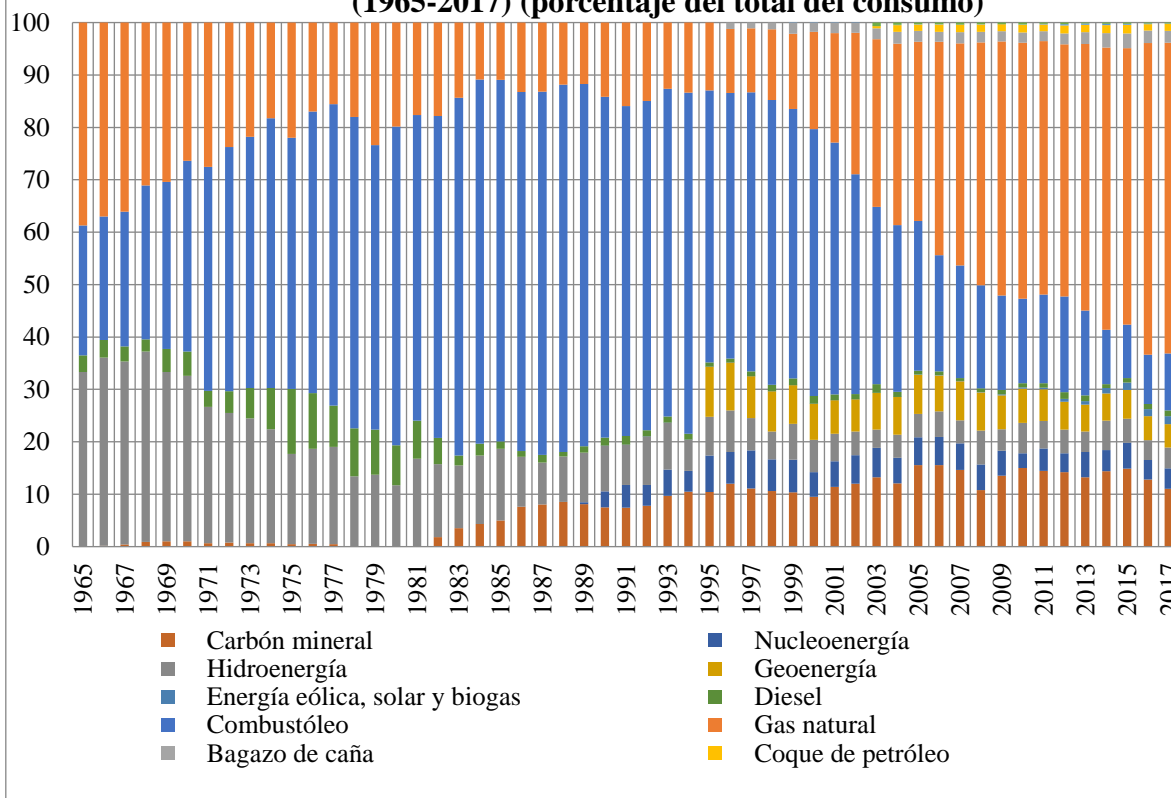


Fuente: Elaboración propia con base en Sistema de Información Estadística 2020

En la gráfica 1 se muestra la evolución en la contribución de energía eléctrica. Desde 1965 hasta el 2000 la producción ha sido controlada por centrales eléctricas, mientras que después del inicio de la década las reformas al sector permitieron la entrada de las centrales de producción privada. Para sólo el 52% de electricidad es generada por centrales públicas y el resto por agentes privados. La modificación del sector ha sufrido un tránsito veloz.

En cuanto al consumo de energético del SEN, en la siguiente gráfica se observa los insumos principales utilizados en la generación eléctrica. El combustóleo predominó como fuente energética hasta el año 2000, representando el 70% en 1988. En cambio, el gas natural se convirtió en el insumo sustituto representando el 12% en 1995 al 59% en 2017. El uso de carbón se ha mantenido constante en los últimos 15 años equivalentes al 11% en el último año reportado. En materia de fuentes de energía renovable es muy baja su participación. Geoenergía, hidroenergía y nucleenergía representan el 10% para 2017.

Gráfica 2. México. Consumo de energía para la generación de electricidad por fuente. (1965-2017) (porcentaje del total del consumo)

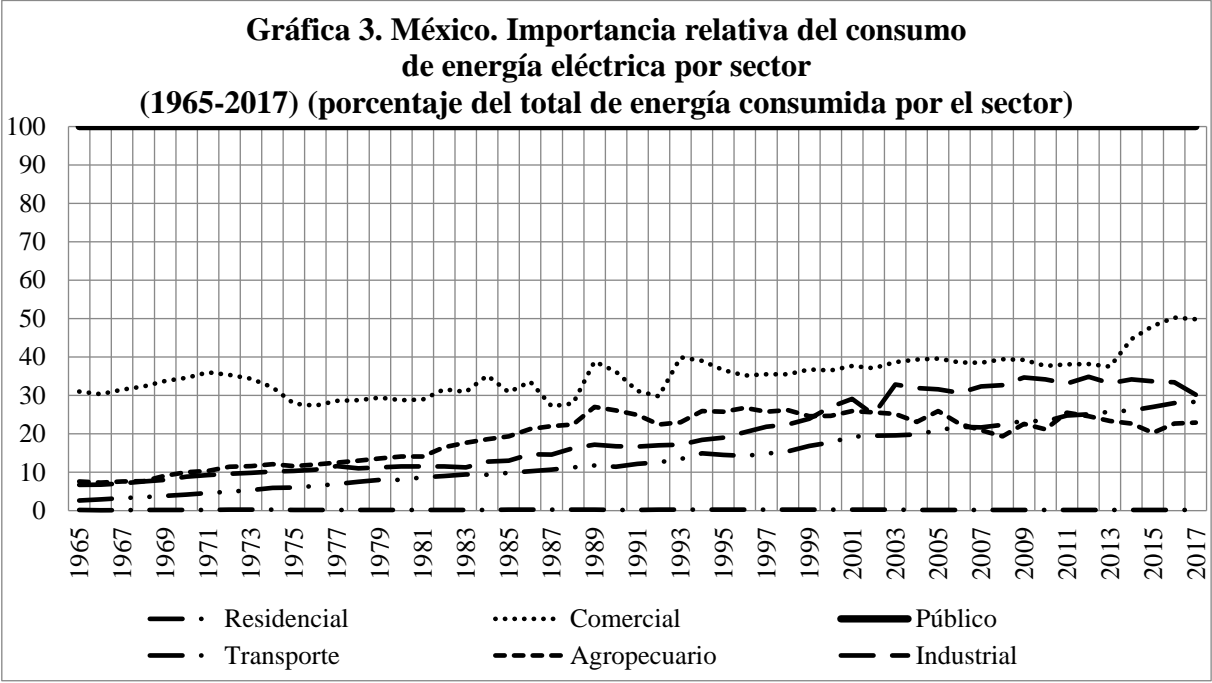


Fuente: Elaboración propia con base en Sistema de Información Estadística 2020

En 2017, como muestra la gráfica 2, las centrales públicas utilizan gas natural (36%), carbón (21%), combustóleo (20%), geoenergía (8%), nucleoenergía (7%), hidroenergía (7%). Las centrales PIE utilizan el 98% de gas natural y las centrales de autogeneración hacen uso principalmente de gas natural (75%), bagazo de caña (9%) coque de petróleo (5%) y energía eólica (4.5%). La serie completa de consumo energético por tipo de central se muestra en el anexo A del trabajo.

Respecto al consumo por sector, la gráfica 3 refleja la importancia de la electricidad. Para el último año reportado, la electricidad representó el 100% de su consumo energético total., seguido del sector comercial en 50%, el industrial y residencial en 30%, agropecuario el 23%, mientras el sector transporte tan sólo representa el 0.17 % de su consumo energético. El consumo relativo del 2017 representa la tendencia de los últimos 55 años. Es importante destacar el incremento de la electricidad en el consumo total del sector comercial y el ligero declive del sector industrial. En particular, el rubro en que se concentra esta investigación

es el sector residencial al ser el sector donde se evalúa la pertinencia de la innovación que se desarrolla en el capítulo 3.



Fuente: Elaboración propia con base en Sistema de Información Estadística 2020

2.2.4 Métodos y tecnologías

Un sistema eléctrico, es un sistema capaz de generar, transportar y consumir energía eléctrica. Un ejemplo sencillo y cotidiano es una linterna: cuenta con batería (generador), hilos (transporte), y bombilla (carga). Un sistema eléctrico de potencia es un sistema con generación, transporte y consumo de energía eléctrica, pero en grandes cantidades (millones de vatios), a grandes distancias (cientos de km), y con grandes consumos (millones de vatios). Actualmente los grandes sistemas eléctricos son las redes de interconexión de energía eléctrica a nivel global.

Para producir energía eléctrica y tenerla disponible para su distribución, se han construido una serie de dispositivos que transforman, a través de la tecnología, recursos energéticos primarios en energía aprovechable para el ser humano. Tradicionalmente los insumos básicos son derivados del carbón y el petróleo provocando altos niveles de emisiones contaminantes. Frente a la crisis ambiental que se vive, debe transitar hacia la modernización tecnológica y energética.

En México y en el mundo, dichas tecnologías han cambiado con el tiempo, sin embargo, se conservan los principios elementales en la generación. Sin la finalidad de mostrar un estudio detallado que redunde en un análisis técnico riguroso y confuso de las técnicas utilizadas en la generación de electricidad, se presentan los elementos claves de cada proceso comenzando de lo más general, conceptos claves y modelos generales hasta los métodos tecnológicos particulares.

La energía más empleada para producir electricidad en grandes cantidades es la magnética. Su producción se basa en el hecho de que, al mover un conductor (material con gran movilidad de electrones) en presencia de un imán (campo magnético), en el conductor se produce un movimiento ordenado de electrones, como consecuencia de las fuerzas de atracción y repulsión originadas por el campo magnético. En esta forma de producción de electricidad se basa el funcionamiento de los alternadores, motores y dinamos.

- Alternador: Dispositivo capaz de transformar el movimiento rotativo en electricidad. (Produce Corriente Alterna).
- Motor: Dispositivo capaz de transformar la electricidad en movimiento rotatorio
- Dinamo: Dispositivo capaz de transformar el movimiento rotativo en electricidad (genera Corriente Continua)
- Turbina: Dispositivo mecánico que transforma, la energía cinética de un fluido, en movimiento rotativo y viceversa.

Cualquier central eléctrica, basa su producción de electricidad en el giro de turbinas unidas a ejes de alternadores. Este giro se producirá por la caída de agua o por el empuje de vapor de agua a presión. En función del origen energético del calor es posible clarificarlas.

En el caso del sector eléctrico de México, se constituye de 8 tipos de centrales eléctricas, es decir, 9 procesos tecnológicos distintos para la conversión de energía. Sin embargo, la tecnología termoeléctrica contiene 4 procesos particulares. A continuación, se muestra un cuadro que resume las fuentes energéticas de cada proceso.

Cuadro 3. Tecnologías para generación eléctrica de México 2002 y 2017			2002		2017	
<i>Tipo de central</i>	<i>Insumo energético primario</i>	<i>Descripción del proceso</i>	<i>a*</i>	<i>b</i>	<i>a*</i>	<i>b</i>
Termoeléctricas*	Combustóleo/gas natural	Conversión poder calórico del combustible en energía térmica.	59,32	65,04	52.82	69,07
Turbogás*	Gas natural	Compresión en turbina de gases de combustión a elevadas temperaturas	6,66/ 11,23	3,19/ 4,91	6,19/ 11,71	2,33/ 3,37
Vapor*	Gas natural	Utilización de emisiones de otros procesos químicos	35,18/ 59,30	39,58/ 60,85	26,53/ 50,23	16,14/ 23,37
Ciclo combinado*	Gas natural y vapor de agua	Combinación de unidades de turbogás y vapor aprovechando residuos para generar vapor de agua.	17,13/ 28,87	21,99/ 33,82	19,26/ 36,47	49,88/ 72,22
Combustión interna*	Diesel	Principios de motores de combustión interna para generar	0,35/ 0,60	0,27/ 0,43	0,84/ 1,59	0,72/ 1,07
Hidroeléctrica	Energía potencial de las masas de agua y lagos	Convierte energía potencial en mecánica a través de turbinas o ruedas hidroeléctricas	23,67	12,41	28,47	11,68
Carboeléctricas	Combustóleo, gas natural o carbón	Conversión del poder calórico del combustible en energía térmica.	6,40	8,06	12,65	11,94
Nucleoeléctricas	Energía nuclear	Conversión energía calorífica en mecánica	3,36	4,86	3,78	4,22
Geotérmica	Proveniente del núcleo de la tierra	Extracción del vapor del suelo para convertirlo en energía mecánica	2,07	2,69	2,05	2,30
Eólica	Viento	Conversión de la energía del viento mediante aeroturbina	0,005	0,003	0,20	0,77
Fotovoltaico	Radiación solar	Conducción de la energía solar a través de semiconductores	0	0	0,014	0,004
Cogeneración	Energía calorífica	Utilización de calor de actividades industriales	5,17	6,93	0	0
Total			100	100	100	100

Fuente: Elaboración propia con base en Valdés (1999) y con datos del SIE (2020)
a: Capacidad instalada
b: Generación bruta
*En el caso de turbogás, vapor, ciclo combinado y combustión interna, los primeros valores corresponde al porcentaje respecto al total nacional, mientras el segundo hace referencia al porcentaje respecto al total de termoeléctricas. Se hace esta distinción porque son procesos independientes, pero están contenidos en el conjunto de termoeléctricas.

En el cuadro 3 se muestra de manera esquemática la forma en que se produce energía eléctrica. Es importante mencionar las desventajas de los métodos tradicionales. En el caso de las carboeléctricas y combustión interna, el mayor problema son los residuos

generados, en contra parte, en ciclo combinado y cogeneración los residuos se aprovechan para la producción de energía potencial. Para la CFE las únicas fuentes de energías menos contaminantes son la hidroeléctrica, geotérmica, eólica y fotovoltaica, representando el 35% de la capacidad instalada y cerca del 15% de la generación bruta.

La estructura de las centrales generadores ha sufrido cambios en el transcurso de los 15 años examinados. La supremacía de la producción termoeléctrica ha incrementado al pasar del de 65% al 69%, aunque reduciendo su capacidad instalada es menor, disminuyendo en más de 6%, pudiéndose considerar como incremento en la intensidad energética. La generación de vapor ha sido sustituida por el ciclo combinado dentro de la termoelectricidad al incrementar de 33% al 72%. En cuanto a las carboeléctricas han visto crecer su participación tanto en capacidad instalada y generación, al representar en 2017 en más del 10% en ambos. Mientras el proceso de cogeneración, de métodos existentes menos contaminantes en la literatura, aunque no por CFE representaba cerca del 7% de la generación total y su participación se anuló hacia el presente.

2.2.5 El tránsito del sector eléctrico hacia un crecimiento sustentable

Como se mostró, si el nivel de generación eléctrica a través de procesos menos contaminantes no es despreciable, la capacidad instalada es muy superior a la cantidad de energía generada, por lo que existe un gran potencial no utilizado en favor de un incremento de los métodos convencionales. La participación de tecnologías alternas como el sistema fotovoltaico, eólico y geotérmico no son representativas en la totalidad del sistema (apenas supera el 2% de la capacidad total y cerca del 3% de generación).

El proceso de transición energética necesita acelerar. Las exigencias señalan al sector eléctrico como clave en los próximos para lograr este objetivo. El informe de la AIE (2018) señala que para el año 2040, las economías del mundo asociarán sus patrones de consumo domésticos e industriales hacia la electricidad, por lo que se requiere promover un sector de vanguardia que contribuya a la reducción de emisiones de CO₂. Por tanto, el reto del mundo se concentra en el desarrollo e impulso de tecnologías limpias y eficientes en este sector.

En las últimas décadas, el cuidado al medio ambiente, la sustitución de fuentes fósiles primarias por fuentes alternativas, reducción de emisión de gases contaminantes, así como atender las exigencias de eficiencia y productividad para proveer un servicio eficaz y calidad, son promotores claves en el proceso de modernización del sector. Principalmente, la eficiencia en la producción de energía eléctrica es referente importante en la evolución del sector y en relación con el desempeño económico de un país (Xi y Lovell, 2016).

La problemática ambiental es un campo relativamente recién incorporado en los planes de gestión de los estados nacionales. El primer esfuerzo en México fue en 2012 con la publicación de la Ley General de Cambio Climático. En ella se adoptó como objetivo del país alcanzar una reducción del 30% de emisiones de gases de efecto invernadero al año 2020 sobre una línea base tendencial; y el 50% al 2050⁴³ sobre las emisiones del año 2000. Con esta iniciativa, México sentó un precedente mundial de compromiso frente al cambio climático, en un momento de alta incertidumbre en alcanzar un acuerdo global efectivo para reducir las emisiones en la escala necesaria. Para 2015, Tres años después, en el marco de la vigésima primera Conferencia de las Partes (COP), México se integró al Acuerdo de París⁴⁴, el cual establece el compromiso de los países firmantes para limitar el aumento de la temperatura promedio global por debajo de los 2 °C respecto a niveles preindustriales, así como de acrecentar los esfuerzos para restringir tal aumento a 1.5 °C. (WWF, 2018).

En el caso del sector eléctrico se plantea un intento hacia esos objetivos con la Reforma de 2013. El nuevo modelo de transición energética no sólo busca promover la producción y consumo de energía más limpia y de menor costo, sino también la modificación del papel del consumidor pasivo de energía hacia un consumidor responsable y conocedor del ahorro, la eficiencia y el uso de energías limpias.

Dentro de los estatutos se planteó la creación del Sistema de Generación Limpia Distribuida en México que constituye dos fuentes de energía: solar y biogás. Además, se constituyó el Programa Especial de la Transición Energética establece que transitar hacia energías renovables representaría un ahorro en el consumo final de energía del 40% en los

⁴³ En general, tres sectores (electricidad, transporte e industria) contribuirían con casi dos tercios de la reducción de emisiones lograda. Los sectores con la mayor disminución relativa de emisiones son el de suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (63 por ciento), gestión de residuos (52 por ciento) y generación de electricidad (50 por ciento) (World Resources Institute, 2019)

⁴⁴ Siendo el segundo país en enviar la ratificación.

próximos 35 años, mientras que en el sector residencial podrían alcanzar hasta el 53.4%, sin embargo, todavía se encuentra demasiado lejos de la meta.

El nuevo plan energético busca incrementar la Eficiencia Energética, definida como “Todas las acciones que conlleven a una reducción, económicamente viable, de la cantidad de energía que requiere para satisfacer las necesidades energéticas de los servicios y bienes que demanda la sociedad, asegurando un nivel de calidad igual o superior”. Los proyectos de inversión se realizarán a través de mecanismo de estímulos fiscales y financieros que permitan promover inversiones económicamente viables en materia en el rubro o integración de sistemas de generación distribuida de electricidad cuando estos impliquen: a) economías para el Estado, b) ahorros en el pago de electricidad de usuarios que se consideren exentos; c) reducciones en la huella de carbono en el sector de energía.

Las modificaciones promueven el uso de energías limpias al incluir un esquema de Certificados de Energías Limpias que la Secretaría de Energía determinará el porcentaje de energía que debe generarse cada año a partir de fuentes limpias. Para el año 2024 se establece como meta una participación máxima de 65% de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica para el año 2024, el 60% en el 2035 y el 50% en 2050%. Se espera la participación de energías renovables y tecnologías limpias en capacidad instalada de generación de energía eléctrica en el Sistema Eléctrico 34.6% en 2018.

Los ahorros por el tránsito a energías renovables pueden ser amplios. Un estudio de pionero en los sistemas fotovoltaicos (2017) demuestra que si el sistema eléctrico nacional estuviese constituido por el 1% de este tipo de generadores implicaría ahorros por 1500 millones de pesos en reducción de subsidios, 1.9 toneladas de dióxido de carbono en emisiones y beneficiaría a 860 mil hogares. Para 2017 representó el 0.0014% de la capacidad instalada y el 0.0042% de la generación bruta de electricidad del país.

Las nuevas tecnologías y fuentes energéticas alternas cumplen con la evaluación de los sistemas, económico, ecológica y social, sin embargo, los retos de la reforma del 2013 no parecen ser suficientes para lograr los objetivos a la luz de los datos mostrados. No existe aún evidencia de que el plan de transición vislumbre mejoras, al contrario, el anuncio de la compra de 30 mil millones de toneladas de carbón para incentivar el uso de tecnología carboeléctrica por parte del gobierno actual.

Capítulo 3. Análisis empírico

3.1 Evolucionismo e innovación: Justificación de la medición DEA y Malmquist

En el transcurso del capítulo 1 se hizo énfasis en la innovación como la mejor respuesta de los agentes. Como el análisis es a nivel meso-macro, no se distinguen procesos a nivel individual sino de interacción sistemática reconociendo únicamente *heterogeneidad de agentes*. Este principio analítico es clave para el desarrollo de este capítulo en justificar la metodología de medición y explicar las implicaciones que conlleva.

La innovación definida como *nuevas combinaciones de esfuerzos humanos tecnologías sociales y tecnologías físicas en la realización de un proceso* implica que las nuevas combinaciones surgen de la interacción de distintos agentes diferentes entre sí. Solamente cuando poseen cualidades distintas logran generar procesos diferenciados y con grados divergentes de procesos de innovación. Esta definición difiere de la más popular en el consenso acuñada en los modelos de crecimiento económico I+D de la economía neoclásica. Este término únicamente considera los aspectos técnicos y científicos de la innovación sin tomar en cuenta los conocimientos que la estructura social los agentes poseen. Otra diferencia radica en la valoración de los procesos innovadores.

En efecto, mientras en la visión tradicional las innovaciones son valorizadas en términos de mercado bajo las mismas condiciones que una mercancía, cuya utilización dependerá de los costos marginales y el precio de mercado, en la definición propuesta, los procesos de innovación son resultado de las capacidades de los agentes en cierto marco de normas sociales, estructural y con las tecnologías físicas que cuentan, además de tener un objetivo determinado por el conjunto de sistemas. Cada acción de innovación será valorada no en términos de mercado sino por su capacidad de cumplir con la función objetivo del sistema, en este caso la sobrevivencia de los agentes frente a la contingencia ambiental, por lo cual, dado que los agentes se encuentran en un conjunto de reglas adaptativas, utilizarán los procesos de innovación que sean validados por los tres sistemas: económico, social y ambiental.

En términos del sistema económico se plantea que la evaluación se realizará en términos de eficiencia como medida dinámica de las decisiones de innovación. La finalidad de encontrar un esquema de medición apropiado implica comparar distintas metodologías

que se adapten lo mejor posible a las conjeturas planteadas en el diseño teórico. Los requerimientos de medición se plantean a continuación:

- El tipo de relaciones expuestas en esta investigación reconoce que los métodos apropiados de medición son de tipo computacional. Los más utilizados en la literatura recientemente son los Modelos Basados en Agentes (MBA). Dado que los planteamientos desarrollados no han sido analizados anteriormente, se optó por ver su desempeño en metodologías menos complejas para observar la significancia de los resultados con lo expuesto.
- Se requiere una medida que reconozca la heterogeneidad de agentes que sea capaz de medir su nivel de eficiencia en términos estáticos y dinámicos.
- Las mediciones convencionales de eficiencia se remiten a considerarla como productividad total de los factores, calculada a través de la contabilidad del crecimiento, separando la contribución del capital y el trabajo al producto nacional, mientras que el residuo se considera medida de la pertinencia en la utilización de los insumos productivos (véase Solow, 1956) mientras otros la consideran medida de la ignorancia o caja negra (Abramovitz, 1962). Estas mediciones tienen una serie de supuestos restrictivos como homogenización de distintos tipos de trabajo, así como suponer funciones de producción con rendimientos constantes a escala⁴⁵, es decir se busca métodos no paramétricos que sean lo menos restrictivo posibles
- Medición de eficiencia a nivel individual y en conjunto, mostrando el mejor y peor desempeño de eficiencia con el fin de comparar entre los agentes.
- Dado que los agentes no están aislados del resto del sistema, no tiene sentido contar con una medida de la eficiencia individual en términos de sus propias condiciones, se requiere de una medida que compare el desempeño del agente respecto a las decisiones y comportamiento del resto. Este requerimiento es necesario por el principio de interrelación y retroalimentaciones entre los agentes.

⁴⁵ En la economía neoclásica se hace uso de la función tipo Cobb-Douglas que supone el producto nacional (es decir, todos los bienes producidos) expresado en términos monetarios es resultado únicamente de dos factores: trabajo y capital. La forma en que se combinan supone una tecnología particular que corresponde a un incremento proporcional del producto respecto a incrementos en los insumos.

3.2 Análisis de Datos Envolvente

En la revisión de distintas metodologías que hicieran frente a los requerimientos propuestos, se concluye que la metodología de Análisis de Datos Envolventes (DEA) cumple con los requisitos planteados. Este cálculo permite medir el nivel de eficiencia de los agentes respecto a los insumos que utilizan y productos elaborados, no supone ningún tipo de función de producción (por tanto, no supone ningún tipo de rendimientos, estableciendo a libre criterio rendimientos constantes o variables a escala), además ofrece una medición conjunta e individual de su desempeño por año y entre agentes.

El procedimiento se expresa en distintas etapas. La primera consiste en construir un índice de productividad. Se tiene para n observaciones, la siguiente forma:

$$h_j = \frac{u^T Y_j}{v^T X_j}$$

Donde Y_j es un vector s de productos (de dimensiones $r=1, \dots, s$) y X_j es un vector m de insumos (de dimensión $i=1, \dots, m$) para la observación j . Los vectores s y m contienen a los vectores u y v que expresan los pesos ponderados de cada insumo y producto en el total de la función.

Posteriormente, para poder interpretar el índice como medida de eficiencia, la segunda etapa consiste en convertirlo en un problema de optimización. De esta manera, el índice de productividad se convierte a un índice de eficiencia que implica la posibilidad de comparar el desempeño de cada observación con el desempeño de la mejor observación, creando índice de eficiencia relativas, es decir, el comportamiento de cada unidad respecto no a ella misma sino respecto al desempeño de la mejor. Como se mencionó líneas arriba, no tiene sentido comparar una unidad en términos de ella misma (como el primer índice) sino respecto al resto, en este caso, respecto a la de mejor desempeño.

El problema se expresa matemáticamente:

$$\begin{aligned} \max h_l &= \frac{u^T Y_l}{v^T X_l} \\ \text{s. a } \frac{u^T Y_j}{v^T X_j} &\leq 1; j = 1, \dots, n; \quad (1) \end{aligned}$$

$$u, v > 0$$

La solución de este sistema permite obtener el nivel de eficiencia de cada unidad l , $l \in \{1 \dots n\}$ respecto a la de mejor desempeño, como medida de su pertinencia en el sistema. La ecuación (1) determina h_l de la observación l contrastando con h_j de todas las observaciones.

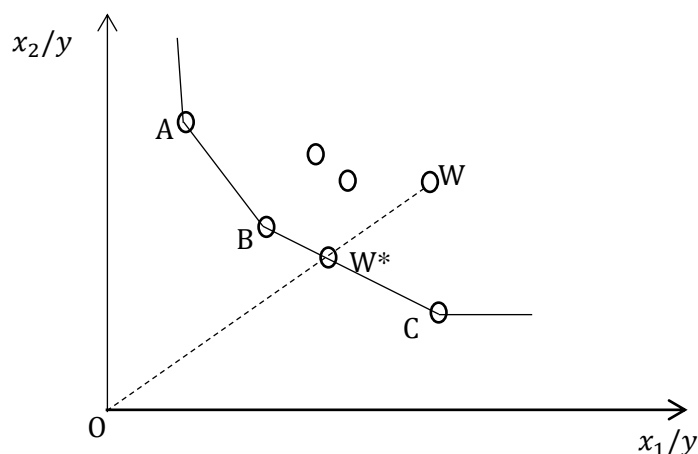
Como se observa, la condición (1) implica un sistema de programación lineal. Para resolverlo, existen diversos métodos, el mejor es el ofrecido por Charnes-Cooper-Rhodes (1978) conocido como CCR que sugieren resolver (1), en lugar de un problema de maximización, resolverlo como un algoritmo, convirtiendo el problema primal en un problema dual:

$$\begin{aligned} \min \theta_l \\ \text{s.a} \\ y\lambda_l \geq Y_l \text{ (2)} \\ \theta_l - X\lambda_l \geq 0 \\ \lambda_l \geq 0 \end{aligned}$$

Donde y_l y X_l son los vectores r y s de insumos y productos relativos a la observación l , Y es la matriz $s \times n$ de productos y X la matriz $m \times n$ de insumos para todas las observaciones. El parámetro θ_l al ser minimizado expresa el porcentaje el cual todos los insumos de la observación l tienen que reducir proporcionalmente para lograr el nivel de producción de la unidad que tiene la mejor práctica de innovación. El vector λ_l expresa el peso ponderado de todas las observaciones sobre la unidad l . En el caso que $\theta_l = 1$ se obtiene $\lambda_l = 1$ para el elemento l -ésimo y 0 para el resto de los elementos.

Geométricamente, la figura 10 muestra la mejor práctica de innovación se expresa como una curva envolvente, de tal forma que el índice θ_l expresa la calificación de cada unidad respecto a esta frontera.

Figura 10. Frontera de eficiencia



Fuente: Coll y Blasco (2006)

Sea la frontera construida de los segmentos correspondientes a los agentes ACB, las mejores técnicas, donde solamente se produce un producto con dos insumos. El desempeño en términos de eficiencia de la unidad W es la distancia relativa respecto a la frontera, por lo que θ_w geométricamente es la diferencia entre OW^* a OW . Como el valor deseable para la unidad W se construye a partir de la referencia de la unidad B y C , los valores de θ_B y θ_C son distintos de cero. Por lo cual, si W logra W^* , θ_C también será distinto de cero. Esto refiere al valor de θ_l como similaridad estructural.

Hasta el momento se ha considerado el modelo CCR para expresar el diseño del programa para entender las implicaciones de los parámetros, sin embargo, este planteamiento tiene detrás la idea de rendimientos constantes a escala, por lo que asume que todas las unidades trabajan en su escala óptima. Una modificación a este programa es la propuesta por Banker, Charnes y Cooper (1984) dividiendo la eficiencia en técnica y escala.

$$\min \theta_l^v$$

s.a

$$y\lambda_l \geq Y_l \quad (3)$$

$$\theta_l^v - X\lambda_l \geq 0$$

$$e^T \lambda_l = 1$$

Donde los elementos λ_l es un vector cuyos elementos suman 1 y e^t es un vector que contiene sólo 1 en todas sus entradas. Con este procedimiento se obtiene la eficiencia técnica pura (θ_l^p). Para conocer la eficiencia de escala es necesaria la relación entre los valores θ_l^p y θ_l , la cual indica el grado en que los agentes no operan en su escala máxima de producción.

$$\sigma_1 = \theta_l / \theta_l^p$$

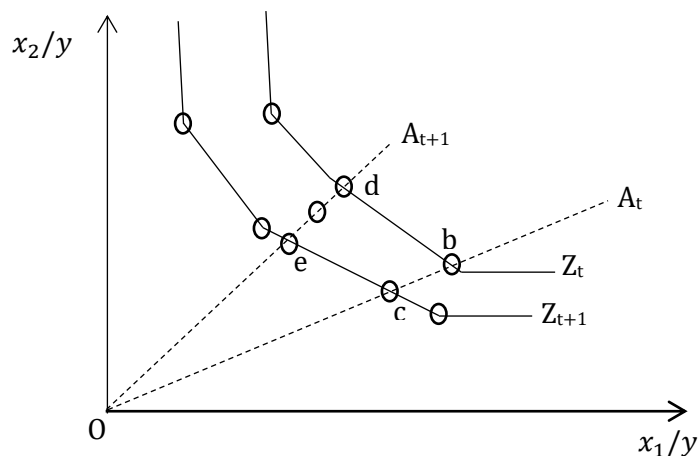
Un agente logra eficiencia global (técnica + escala) cuando θ_l^p y σ_1 es igual a cero.

La metodología expuesta arroja mediciones compatibles con los términos propuestos, identificando heterogeneidad de los agentes, evaluación de sus acciones respecto a las mejores prácticas, es decir, interrelaciones, además de no suponer formas específicas a las funciones ni rendimientos restrictivos respecto a insumos y productivo. Sin embargo, este análisis se realiza periodo por periodo de análisis, por lo cual es necesario un análisis dinámico para observar la evolución en el desempeño de los agentes y las mejores prácticas de eficiencia.

3.3 Índice Malmquist

Examinar los cambios de eficiencia del periodo t hacia adelante en el tiempo permite obtener un análisis consecutivo de los cambios de eficiencia de los agentes y no sólo contar con observaciones puntuales. Para lograr este objetivo se recurre al índice Malmquist.

Figura 11. Índice Malmquist



Fuente: Coll y Blasco (2006)

Este índice, en esta presentación, sirve para medir productividad. Utiliza dos fronteras de eficiencia, Z_t y Z_{t+1} para medir los cambios de cada agente de A_t a A_{t+1} . El cálculo se realiza en dos etapas. La primera consiste en evaluar A_t y A_{t+1} hacia la frontera Z_t . Se obtienen las proporciones Ob/OA_t dividido por Ob/OA_{t+1} . Análogamente la segunda etapa, pero considerando la frontera Z_{t+1} , obteniendo las proporciones Ob/OA_t y Ob/OA_{t+1} .

Finalmente, se obtiene el promedio geométrico de ambas proporciones. El índice queda de la siguiente forma

$$M_A^{t+1} = \left(\frac{Ob/OA_t}{Od/OA_{t+1}} \frac{Oc/OA_t}{Oe/OA_{t+1}} \right)^{0.5}$$

La forma descrita sirve para calcular el cambio en la eficiencia de un periodo a otro. Para definir el cambio de una unidad en particular, por ejemplo, l , se define el índice como sigue:

$$M_l^{t+1} = \left(\frac{\theta_l^{t,t}}{\theta_l^{t+1,t}} \frac{\theta_l^{t+1}}{\theta_l^{t+1,t+1}} \right)^{0.5} \quad (4)$$

donde θ_l es la eficiencia de la observación l respecto a periodo t en relación con la frontera que sirva como referencia.

Realizando modificaciones a (4) y suponiendo rendimientos variables, es posible descomponer el índice de productividad Malmquist en 2 elementos: cambio técnico y cambio en eficiencia. En concordancia con lo planteado hasta el momento, se busca estimar la dinámica de la eficiencia de los agentes. Para obtener ambos componentes se realiza lo siguiente:

$$M_l^{t+1} = \left(\frac{\theta_l^{t,t}}{\theta_l^{t+1,t}} \frac{\theta_l^{t+1}}{\theta_l^{t+1,t+1}} \right)^{0.5}$$

$$M_l^{t+1} = \frac{\theta_l^{t,t}}{\theta_l^{t+1,t+1}} \left(\frac{\theta_l^{t,t+1,t+1}}{\theta_l^{t+1,t}} \frac{\theta_l^{t,t+1}}{\theta_l^{t,t}} \right)^{0.5}$$

Donde $\frac{\theta_l^{t,t}}{\theta_l^{t+1,t+1}}$ corresponde al cambio en la eficiencia y $\left(\frac{\theta_l^{t,t+1,t+1}}{\theta_l^{t+1,t}} \frac{\theta_l^{t,t+1}}{\theta_l^{t,t}}\right)^{0.5}$ es el cambio técnico. Con esta especificación es posible obtener un análisis dinámico y sobre los elementos que interesan del índice.

Teniendo claro el aspecto teórico de las mediciones y justificado su uso de acuerdo con una serie de requerimientos planteados en capítulos anteriores, en las secciones siguientes se muestra los resultados empíricos para el caso de estudio seleccionado, el Sector Eléctrico de México.

3.4 Naturaleza de los datos

Para la selección de las variables, se buscó no caer en la homogenización que normalmente se realiza en la estimación de funciones de producción como en la economía neoclásica y ser lo menos restrictivo posible. Por eso se eligieron variables bajo dos 3 criterios: i) con base a trabajos previos referidos a la metodología y el sector; ii) disponibilidad en los centros de estadísticas de acceso público.; iii) variables que fueran posibles expresar en una unidad de medición resultado de su propia naturaleza.

Siguiendo los elementos para la selección de variables, se presenta a continuación un cuadro con los trabajos referidos al sector eléctrico empleando DEA.

Cuadro 4. Revisión de la bibliografía relacionada al uso de DEA en el sector eléctrico

<i>Año</i>	<i>Autor</i>	<i>Título</i>	<i>Inputs</i>	<i>Outputs</i>
1997	Mohd y Hawdon	The efficiency of the National Electricity Board in Malasya: An intercountry comparison using DEA	-Capacidad instalada -Trabajo -Capacidad de generación pública	-Electricidad producida
1998	Goto y Tsutsui	Comparison of Productive and Cost Efficiencies Among Japanese and US Electric Utilities	-Capacidad de generación -Combustible utilizado -Número de empleados -Energía adquirida	-Ventas a residenciales -Ventas a clientes no residenciales
2003	Edvardsen y Forsund	Methodological Advances in DEA: A survey and	-Costos de operación	-Distribución de energía

		application for the Dutch electricity sector	-Valor de reposición	-Número de transformadores -Número de consumidores -Número de clientes
2005	Delmas y Tokat	Deregulation Process, Governance Structures and Efficiency: The U.S. Electric Utility Sector	-Costo laboral -Valor de las plantas -Gastos de producción -Gastos transmisión -Gastos de distribución -Gastos de ventas -Gastos administrativos -Gastos generales -Electricidad comprada de otras fuentes	-Ventas totales de bajo voltaje (residenciales y comerciales) -Ventas de alta tensión (industriales y de intercambio)
2005	Navarro	La Eficiencia del Sector Eléctrico en México	-Líneas de distribución -Capacidad de las subestaciones -Capacidad de los transformadores fuerza de trabajo	-Número de usuarios Ventas de energía eléctrica
2007	Wang <i>et al.</i>	Performance Based Regulation of the Electricity Supply industry in Hong Kong: An Empirical Efficiency Analysis Approach	-Gastos de Capital de trabajo	-Total de las ventas de electricidad suministrada -Número total de clientes
2007	Pereira	Integrating the Regulatory and Utility Firm Perspectives, when Measuring the Efficiency of Electricity Distribution	-Costo operacional -Número de empleados -Pérdidas -Interrupción promedio del sistema -Índice de duración -Tamaño de la red	-Número de consumidores -Energía entregada -Área de servicio
2008	Vaninsky	Environmental Efficiency of Electric Power Industry of the United States: A Data Envelopment Analysis Approach	-Tasa de emisiones de CO2 -Pérdidas de energía eléctrica	-Utilización de combustibles fósiles.

2009	Azadeh, Ghaderi y Omrani	An Integrated DEA Algorithm for Optimization and Policy Making of Electricity Distribution Units	-Longitud de la red (km) -Capacidad de los transformadores -Número de empleados	-Número de clientes -Venta total de Electricidad
2009	Azadeh, Ghaderi y Omrani	An Integrated DEA Algorithm for Optimization and Policy Making of Electricity Distribution Units	-Longitud de la red (km) -Capacidad de los transformadores -Número de empleados	-Número de clientes -Venta total de electricidad
2011	Kumar y Gupta	Performance Evaluation and Improvement Directions for an Indian Electric Utility	-Número de empleados	-Energía vendida -Número de clientes -Tiempo de interrupción
2012	Damonte, De Santis y Berg	The efficiency of Brazilian electricity distributors during 2004 – 2009. An application using DEA corrected by environmental and stochastic factors	-Costo de capital -Gasto de operación	-Tipo de consumidores -Total de energía entregada
2014	Li, Li y Zheng	Unified Efficiency Measurement of Electric Power Supply Companies in China	-Longitud de la red por encima de 35 kV -Capacidad transformadores por encima de 35 kV -Número de empleados -Costo de la actividad principal	-Cantidad de suministro de energía eléctrica -Fiabilidad del suministro de energía -Calidad de la tensión -Falta de red
2015	Dogan y Tugcu	Energy efficiency in electricity production: A Data Envelopment Analysis (DEA) approach for the G-20 countries	-Fuentes de carbón, fuentes hidroeléctricas, fuentes de gas natural, fuentes de petróleo, y fuentes de energía renovables	-Electricidad generada
2016	Meher y Sahu	Efficiency of electricity distribution utilities in India: a Data Envelopment Analysis	-Líneas de distribución	-Energía vendida
2019	Navarro, Defín y Díaz	La eficiencia del sector eléctrico en México 2008-2015	-Capacidad de la planta -Líneas de transmisión -Número de subestaciones	-Energía eléctrica generada -Energía eléctrica distribuida

Fuente: Elaboración propia con base en Navarro (2019)

Después de revisar las variables utilizadas en los trabajos revisados, se realizó la selección en función de su disponibilidad y acceso respecto a las unidades de observación considerados como agentes.

Cuadro 4. Unidades de análisis

<i>Tecnología</i>	
Termoeléctrica	Carboeléctrica
Vapor	Nucleoeléctrica
Ciclo combinado	Geotérmica
Turbogás	Eólica
Combustión interna	Hidroeléctrica
Dual	Fotovoltaica

La elección sobre estas unidades fue obedeciendo a las pruebas formales y a la obtención de series de tiempo consistentes. Según Vilchis (2018) para obtener resultados confiables, la cantidad de unidades debe ser al menos igual a la multiplicación de insumos y productos.

Respecto a las variables, se utilizaron aquellas que fueran posibles construir series de tiempo más largas posibles con base al Sistema de Información Energética, además de poder construir el término discutido en el capítulo 1, sobre eficiencia energética (i) y (iii) está expresada en términos de megawatts mientras que (ii) en términos de petajoules. Expresarla en términos de energía evita no incurrir en el problema de agregación y poder sumar los elementos sin homogenizar sus características físicas. Finalmente, el periodo de análisis es 2002-2017.

Insumos: i) Capacidad efectiva instalada por tecnologías, ii) Consumo energéticos.

Productos: i) Generación bruta de energía eléctrica por tecnología.

3.5 Resultados

Para comprender los resultados de eficiencia energética que arroja el análisis DEA y Malmquist es necesario recordar lo siguiente:

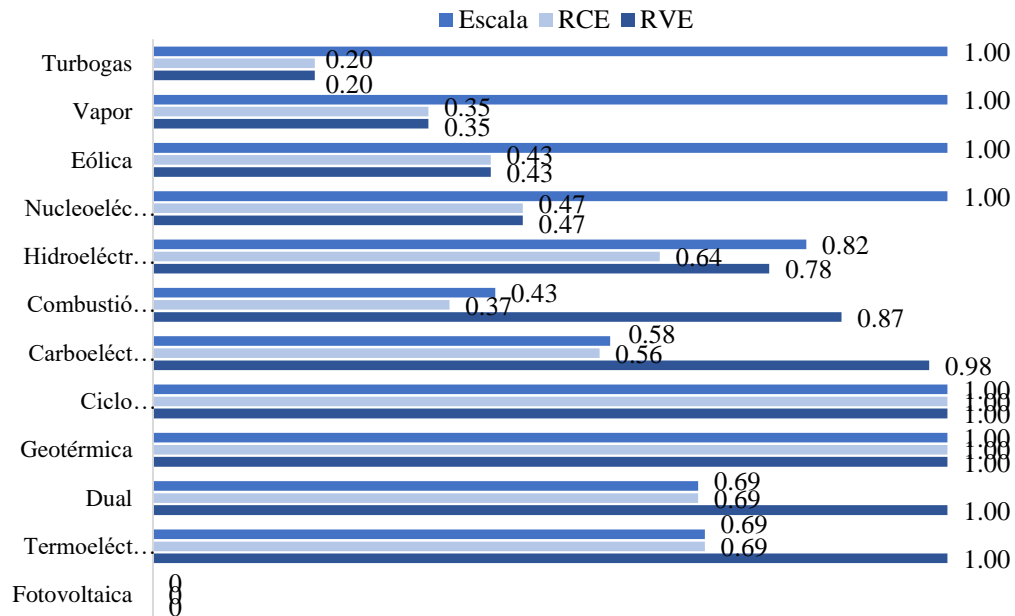
- i) Los modelos se realizaron orientación insumo, es decir, buscan, dado el nivel de producto, la máxima reducción proporcional de los insumos. En este

caso, una tecnología para la generación de energía eléctrica es eficiente si no es posible disminuir las cantidades de insumos empleadas sin alterar el nivel de producto, de otro modo, es ineficiente si es posible disminuir la cantidad de insumos y mantener el mismo nivel de producto. Además, permite hablar en términos de eficiencia energética. En efecto, si hubiese sido orientación producto, se haría referencia a insumos constantes y producción variable, mientras que dirección insumos (como se trabajará con el nivel de consumo energético) permite referirse en términos de eficiencia en el uso de insumos energéticos, eficiencia energética.

- ii) Considerar el nivel de producto constante no implica alguna forma particular sobre la función de producción ni sobre los rendimientos. En efecto, como se mencionó en apartados previos, ambas metodologías retiran supuestos restrictivos sobre ambos aspectos, por lo cual se decidió trabajar con rendimientos variables a escala (RVE), aunque también se hacen uso de las estimaciones con rendimientos constantes a escala (RCE) aunque sólo para fines comparativos y para construir otro estadístico importante que se mencionó que es la escala técnica, que permite identificar de manera general si la tecnología opera con el óptimo de capacidad instalada o está subutilizada.

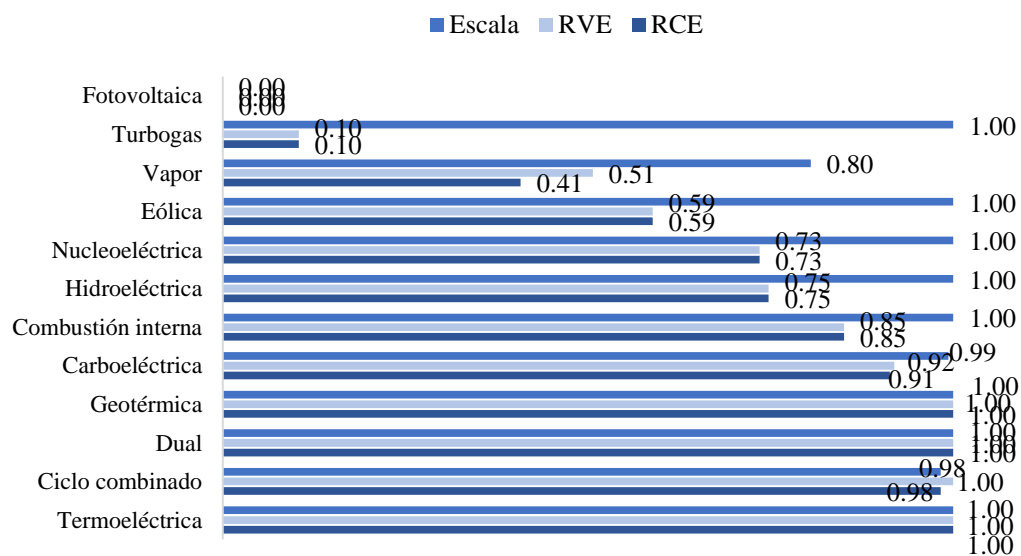
Los resultados obtenidos del DEA corresponden a periodos seleccionados, en particular se eligieron los años 2002, 2008, 2013 y 2017, al ser años previos a reformas dentro del SEN. Contrastar su desempeño sirve para evaluar parcialmente los resultados a las modificaciones operativas y productivas del sector. En las siguientes gráficas se muestran los respectivos niveles de eficiencia.

Gráfica 4. México . Eficiencia por tipo de tecnología (2002) (índices)



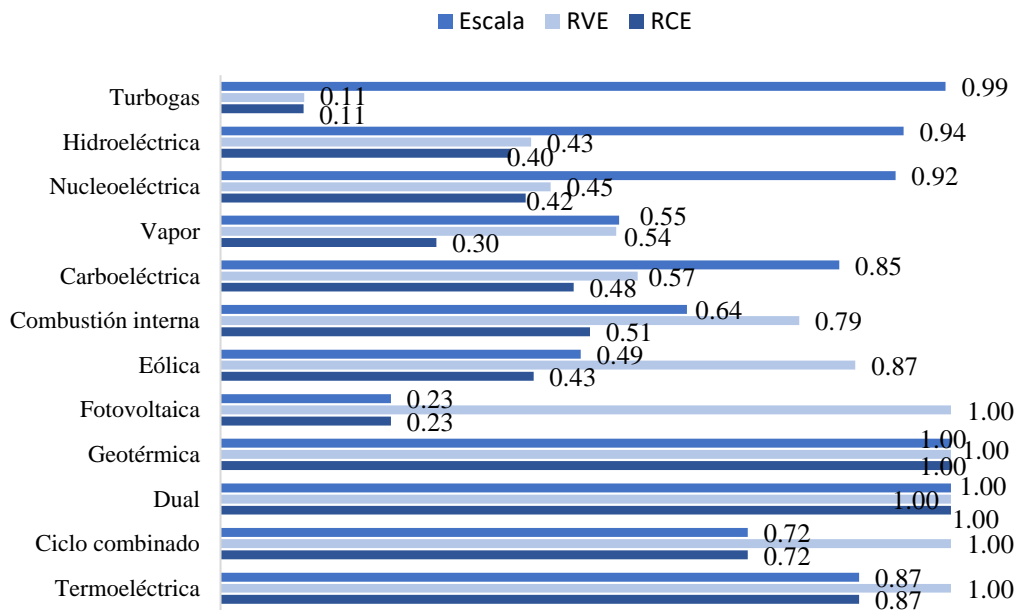
Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Gráfica 5. México . Eficiencia por tipo de tecnología (2008) (índices)



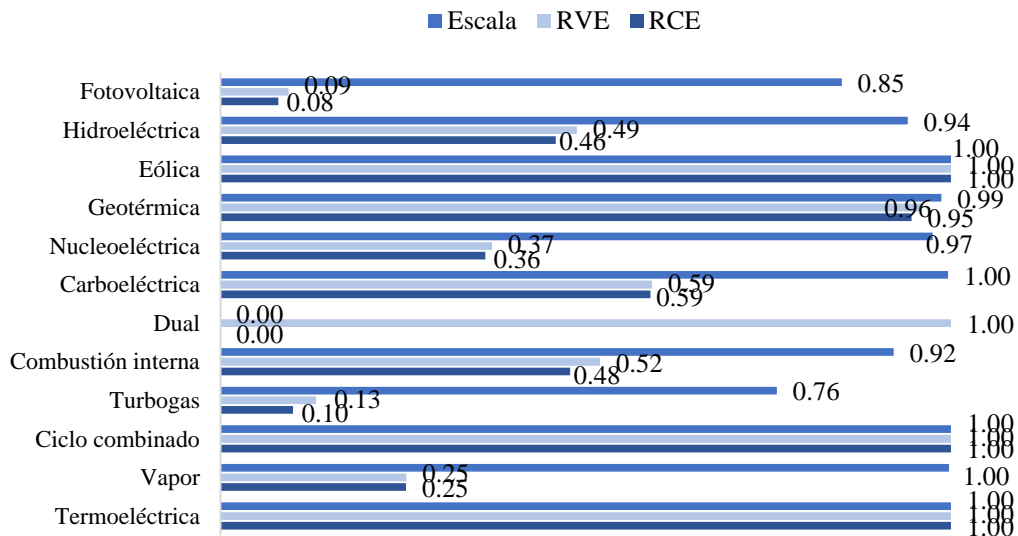
Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Gráfica 6. México . Eficiencia por tipo de tecnología (2013) (índices)



Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Gráfica 7. México . Eficiencia por tipo de tecnología (2017) (índices)



Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Respecto a los niveles de eficiencia se observa que no hay diferencias sustanciales respecto a los tipos de rendimientos, siendo valores similares cuando se utilizan rendimientos constantes y variables a escala. Para el año 2002, las tecnologías termoeléctrica, dual, geotérmica, ciclo combinado, y carboeléctrica fueron las que reportaron las mejores calificaciones, aunque, según el término de escala, las dos últimas trabajan a nivel eficiente de planta. En el caso de las tecnologías de fuentes renovables reportaron los menores niveles de eficiencia respecto a las señaladas, en cambio, fueron las mejores calificadas respecto a la utilización de su capacidad instalada. Las tecnologías que utilizan fuentes contaminantes de energía resultaron eficientes en el uso, pero las tecnologías de insumos menos contaminantes son eficientes en el uso de su planta instalada. La única que cumple con ambas propiedades es la tecnología geotérmica, es decir, baja contaminación y altos niveles de eficiencia relativa.

Para el 2008, la mayoría de las tecnologías fueron eficientes en el uso de los insumos. La termoeléctrica, ciclo combinado, dual, geotérmica lograron el mayor puntajes, seguida cerca de carboeléctrica y combustión interna. Respecto a la eficiencia en uso óptimo de planta se mantiene la misma tendencia. Las plantas menos contaminantes lograron ser eficientes en ese rubro.

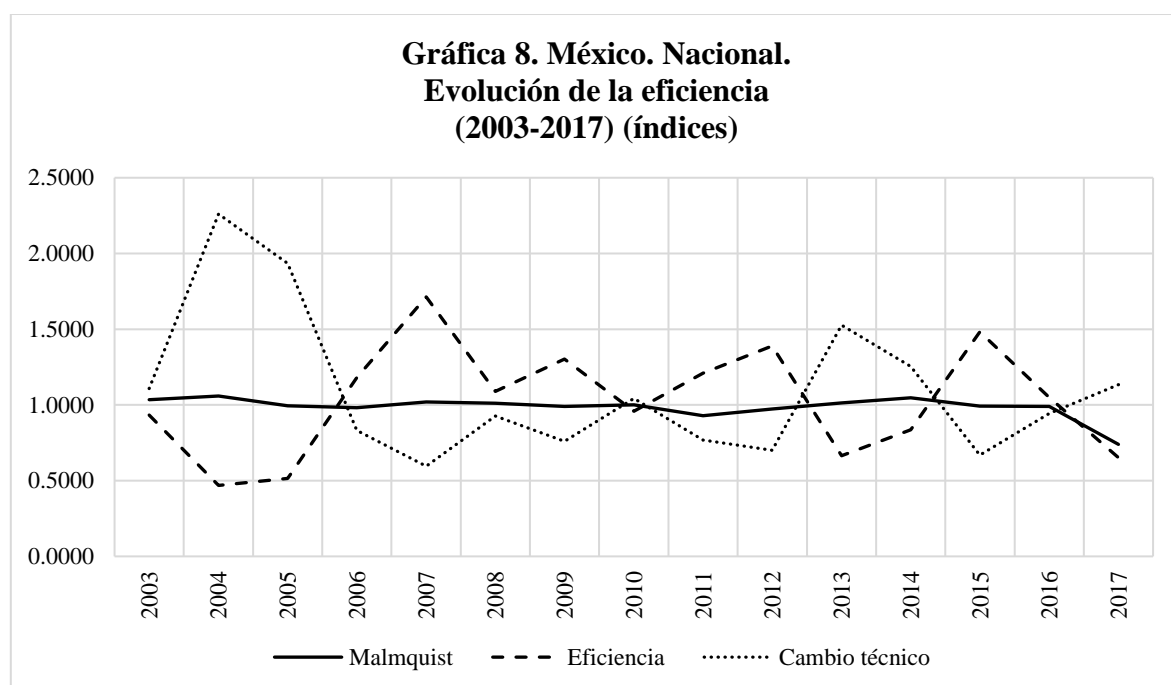
Con las modificaciones de ley para el sector tuvo cambios en la eficiencia y en la participación de nuevas tecnologías. En 2013 se cuenta con la participación de la tecnología fotovoltaica, cuya calificación fue la más alta cuando se mide por rendimientos variables. Las que mantienen la misma tendencia son la termoeléctrica, ciclo combinado, dual geotérmica. Respecto a las tecnologías alternas de energía, mejoraron su eficiencia relativa respecto a periodos previos, liderada por la mencionada fotovoltaica, seguida de la eólica y nucleoeeléctrica. La tecnología que tuvo declive pronunciado fue el turbogás. En cuanto al uso óptimo de planta, geotérmica, dual y turbogás resultaron las más eficientes.

Después de 4 años de la aprobación de reformas estructurales al sector energético, el sector ha tenido cambios relativamente sustanciales. Para el último año que se tiene estadísticas, 2017, la eficiencia en el uso de insumos sigue siendo liderada por la termoeléctrica, ciclo combinado, eólica y geotérmica. Mientras que combustión interna y carboeléctrica han perdido terreno. En cuanto a las tecnologías alternativas, la tendencia se

mantiene, al ser eficientes respecto al tamaño de planta. Es importante mencionar que la participación de energías renovables ha incrementado pero liderado por la forma tradicional termoeléctrica. Esta decisión será evaluada más adelante por el resto de los sistemas.

El análisis presentado permite observar el cambio de eficiencia por año, sin embargo, es necesario examinar la evolución dinámica. Para ello, como se justificó, se presenta los resultados del índice Malmquist. Esta medición separa el efecto sobre la eficiencia y el cambio técnico.

A nivel nacional el desempeño del SEN fue liderado por la eficiencia principalmente de 2006 a 2012 repuntando en 2014 hasta 2016. El resto del periodo fue el cambio técnico el principal componente.



Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Las gráficas del resto de sectores están disponibles en el anexo B de este trabajo. Es importante destacar que el comportamiento nacional está fuertemente vinculado a la dinámica de la termoeléctrica (como pudo verse en el análisis por año a través de DEA). Todos los tipos de tecnologías presentaron al inicio del periodo altos niveles de cambio técnico, revirtiéndose entre 2005 y 2006. La tecnología fotovoltaica tuvo resultados hasta el año 2010.

Para la tecnología de vapor, ciclo combinado, combustión interna, carboeléctricas y nucleoelectrica conservan un patrón particular, entre 2005 a 2012 el dinamismo fue comandado por la eficiencia, repuntando nuevamente de 2014 a 2016. La tecnología con mayores variaciones fue la dual, siendo ambos componentes alternantes durante todo el periodo.

El análisis de eficiencia de ambas metodologías muestra el impacto favorable en el uso de insumos para la generación eléctrica, a su vez, reflejan el impacto y dinámica de la incorporación de las tecnologías alternas en el sector. Debido a su reciente integración son ineficientes respecto a las tradicionales, pero muestran los mejores resultados en la utilización de la capacidad instalada. El análisis de largo plazo permite validar los resultados en términos dinámicos, así como obtener datos relevantes para la evaluación de la respuesta de los agentes cuando interactúan con el resto de los sistemas.

A manera de conclusión, las tecnologías tradicionales siguen siendo importante en la generación de electricidad de SEN en cambio las nuevas tecnologías reflejan buen desempeño. Con el transcurso del tiempo han tomado relevancia e incrementan su eficiencia relativa. Esto sugiere que debe seguir impulsando la transición energética en el sector. Las decisiones de políticas en el sector deben considerar el papel creciente de las fuentes alternas, sin embargo, no debe ser el criterio técnico el único en considerarse. Si se toma en cuenta sólo la cuestión económica-técnica, se continuaría el apoyo a las formas contaminantes a costa de afectaciones al resto de los sistemas que interrelaciones, en especial, la sociedad y el medio ambiente. En los siguientes apartados se muestra que una evaluación conjunta en referencia con el resto de los sistemas debe ser la indicada para el diseño de política pública con el fin de evitar políticas generalizadoras y excluyentes.

3.6 Evaluación de pobreza energética y eficiencia

Este apartado corresponde al último paso de la evaluación a la propuesta teórica presentada en esta investigación. Como se mostró en el apartado anterior, el nivel de productividad de las tecnologías productoras de energía eléctrica principalmente se determina por el componente el cambio en la eficiencia, sin embargo, son los métodos más contaminantes los que utilizan de mejor manera los insumos productivos. Para la visión tradicional, debería incentivarse la generación de electricidad con las tecnologías más eficientes sin

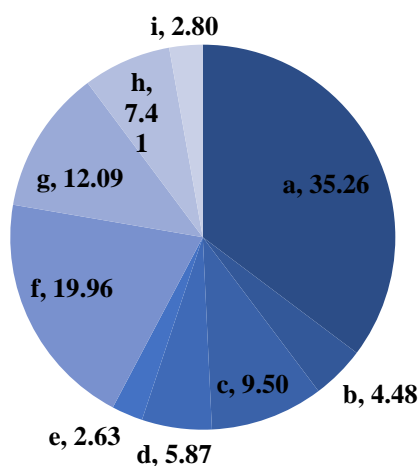
considerar las repercusiones al ambiente y sociedad. Si el análisis se quedará en ese plano, la eficiencia técnica en el plano productivo se afianzaría sobre el resto de los sistemas, redundando en una decisión de política aislada y determinista.

En congruencia con el análisis desarrollado en el capítulo 1, los sistemas ambiental, social y económico se encuentran en constante interacción, siendo las leyes de la naturaleza las que rigen sobre todo tipo de organización biológica en el planeta. En este sentido, la mejor acción de los agentes para la sobrevivencia del sistema, innovación, se expresa en el plano económico-productivo del SEN a través de la heterogeneidad de agentes (diversidad de tecnologías para la generación de electricidad) cuyo resultado será la eficiencia. A su vez, los niveles de eficiencia serán evaluados por los sistemas social y ambiental. En este apartado se desarrolla la última evaluación.

Como se justificó en el capítulo 1, la variable que se eligió para evaluar el desempeño de la innovación en el sistema social es la pobreza energética dado que expresa la capacidad de los hogares para acceder a los servicios energéticos básicos para su reproducción biológica y cultural. En el caso de México se hará referencia a los datos reportados en el Censo Económico de 2018 realizado por el INEGI.

En México existen 34 millones 744 mil 818 hogares que representan a 125 millones 91 mil 790 de personas en el territorio nacional, cuyo ingreso corriente total por trimestre es de 49 mil 610 pesos de los cuales 67.3% proviene del trabajo, 15.4% de transferencias, 11.4% de ingresos por alquiler de vivienda y 5.4% por renta de la propiedad (INEGI, 2019). En cuanto al gasto, en promedio los hogares tienen gastos por 31 mil 935 pesos por trimestre, cuya composición se muestra en la gráfica 9.

Gráfica 9. México. Composición del gasto de los hogares (porcentaje)



Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Donde: *a* Alimento, bebidas y tabaco ; *b* Vestido y calzado; *c* Vivienda y servicios de conservación, energía eléctrica y combustibles; *d* Artículos y servicios para la limpieza, cuidados de la casa, enseres domésticos y muebles, cristalería, utensilios domésticos y blancos; *e* Cuidados de la salud; *f* Transporte; adquisición, mantenimiento, accesorios y servicios para vehículos; comunicaciones; *g* Servicios de educación, artículos educativos, artículos de esparcimiento y otros gastos de esparcimiento; *h* Cuidados personales, accesorios y efectos personales y otros gastos diversos; *i* Transferencias de gasto. Como se observa, el mayor componente del gasto de los hogares es relacionado con alimentos y bebidas, seguido de servicios educativos, servicios de conservación del hogar, energía eléctrica y combustibles.

Respecto al gasto de electricidad, el cuadro 5 muestra la composición del gasto de los hogares en servicio de electricidad. Se muestran dos años, 2002 y 2017, con la finalidad de observar la dinámica, sin embargo, en ambos periodos la tendencia es similar. Los dos primeros deciles concentran el mayor gasto, cercano al doble del promedio nacional. En cuanto al último decil fue el único que no aumentó su participación de gasto respecto a los ingresos, en cambio, decreció para 2017. Para el año 2002, la estructura era bastante homogénea entre deciles mientras en 2017, los primeros 6 deciles de la población aumentó su gasto y el resto se mantuvo relativamente constante respecto al 2002. Este cambio puede

obedecer por aumentos en los precios de electricidad, disminución de subsidios o decremento del ingreso total de los hogares.

Cuadro 5. Gasto de los hogares en electricidad respecto a su ingreso monetario				
Años seleccionados (porcentaje)				
	2002		2017	
	Trimestral	Acumulado anual	Trimestral	Acumulado anual
Nacional	2,77	11,09	2,80	11,19
I	4,72	18,88	6,15	24,60
II	4,38	17,52	5,05	20,20
III	4,09	16,37	4,40	17,59
IV	3,79	15,15	4,12	16,48
V	3,33	13,30	3,73	14,92
VI	3,24	12,98	3,50	14,02
VII	2,94	11,74	3,13	12,54
VIII	2,75	11,00	2,82	11,29
IX	2,50	10,01	2,55	10,19
X	2,25	9,02	1,65	6,60

Fuente: Elaboración propia

Es necesario aclarar que esta formulación no es precisa para calcular la pobreza energética, dado que sólo se hace uso de un componente, el gasto en servicios eléctricos, dentro de una gama ampliada de indicadores, además que se toman en cuenta los ingresos corrientes totales en lugar de ingresos totales debido a la disponibilidad de datos. Según García Ochoa (2016) la medición tradicional de pobreza energética se remonta a los años 70's en Inglaterra, donde se acuñó el término, asociando un gasto superior al 10% del ingreso total de las familias. Siguiendo esta definición, explicada con mayor profundidad en el capítulo 1, el acumulado anual del gasto en electricidad supera en ambos años el porcentaje que establece la definición tradicional en 8 deciles, mientras que 5 deciles lo hacen por más del 3% para 2002 y 6% para 2017. Los deciles más alarmantes son los primeros 4 para ambos años al superar el 5% en el acumulado anual el porcentaje límite para considerarse al hogar en pobreza energética.

Los anteriores resultados no pueden considerarse como una metodología precisa para medir el porcentaje de población en pobreza energética, como sí lo son los planteamientos de García-Ochoa (2011, 2016) para el caso de México, Bouzarovsky (2012, 2018) para Estados Unidos, entre otros, sin embargo, resulta útil para analizar la dimensión del problema y establecer los límites en que se aborda la pobreza energética en este trabajo,

únicamente en términos de gasto en servicios eléctricos. De tal forma, se supondrá que aumentos en el gasto en electricidad aumenta la pobreza energética de los hogares y análogamente, disminuciones de este gasto, mejora la condición para los hogares.

Tras definir los límites y alcances para abordar la pobreza energética, se presenta la última evaluación del planteamiento presentado. El gasto de los hogares en servicios de electricidad será la variable en el sistema social para evaluar el desempeño del sector económico. En efecto, como se ha insistido, la innovación como mejor respuesta adaptativa de los agentes se evaluó en el sistema económico en términos de eficiencia, dado los sistemas en cada decisión de los agentes se evalúa en cada sistema; ahora en el sistema social evaluará la innovación del sistema en términos de eficiencia productiva del SEN. La innovación será válida y adoptada si la eficiencia reduce la pobreza energética, es decir, reduce el gasto de los hogares en electricidad y, por último, dicha innovación reduce la entropía del sistema ambiental. Primero se mencionará la primera parte, el sistema social.

Para realizar la estimación se realizó un modelo de Mínimos Cuadrados en 2 etapas con la finalidad de encontrar el impacto e interrelación de las decisiones económicas en el sistema social y ambiental⁴⁶. En la primera etapa del modelo se buscaron los determinantes de la eficiencia del SEN en su conjunto a nivel nacional⁴⁷, cuya tendencia es extremadamente similar a la eficiencia obtenida de la tecnología termoeléctrica. Como variable dependiente, $dlnc$ (primera diferencia de logaritmo natural⁴⁸ de la eficiencia del SEN). Como variables explicativas disponibles, las estadísticamente significativas fueron: pid (número de proyectos de innovación y desarrollo en el SEN), $lngast_id$ (logaritmo natural de gasto en proyectos de innovación y desarrollo), $dlncad$ (primera diferencial de logaritmo natural de los costos por agotamiento y degradación al de las actividades de generación de electricidad). La especificación del modelo queda de la siguiente manera:

$$dlnc_e_t = \beta_0 + B_1 pid_t + \beta_2 lngast_id_t + \beta_3 dlncad_t + u_t$$

⁴⁶ Ambas estimaciones pasaron favorablemente las pruebas de heterocedasticidad, autocorrelación y normalidad. Los resultados disponibles en el anexo B.

⁴⁷ Por disponibilidad de información ya no se realizaron mediciones por tipo de tecnología, como DEA y Malmquist, sólo siendo posible a nivel nacional.

⁴⁸ Siendo las variables en primeras diferencias expresión de su carácter dinámico al explicar su comportamiento en términos de su rezago, así como el logaritmo natural una especificación que facilita la interpretación de los parámetros.

La última variable mencionada, costos ambientales, fue incorporada porque será la variable que determinará el desempeño de la innovación en el sistema ambiental. Dado la falta de información respecto al daño ambiental de las actividades de generación de electricidad, es la única que se reporta en el Sistema de Cuentas Nacionales. El mecanismo de evaluación es el siguiente: innovación como mejor resultado de los agentes frente a la función objetivo del sistema. En el sistema económico se evalúa en términos de eficiencia, dado la interacción y retroalimentaciones, ésta será evaluada en el sistema social en términos del gasto de los hogares en servicios de electricidad y en el sistema ambiental en términos de entropía, reducción del caos en el medio ambiente. Dado la no disponibilidad de esta variable, se evalúa su pertinencia a través de los costos ambientales de agotamiento y degradación. Si la innovación quiere transitar hacia la ecoeficiencia, tendrá que incrementar la eficiencia del SEN en términos de mejor utilización de sus insumos⁴⁹, en el sistema social reduciendo el nivel de pobreza energética en término de gasto de los hogares y en el sistema ambiental en reducir los niveles de entropía en términos de menos deterioro y degradación ecológicos.

Como se muestra en el cuadro 6 las variables señaladas son significativas a nivel individual y conjunta, además de explicar el 52% de las variaciones de la eficiencia del SEN. La mayor importancia radica en los signos asociados a los parámetros estimados. Las variables asociadas a gasto y número de proyectos en investigación y desarrollo tienen impactos positivos sobre la eficiencia del sector, mientras que los costos ambientales son en orden inverso. Un incremento de los costos ambientales tiene repercusiones negativas sobre la eficiencia del sector, modo contrario, disminución de los costos ambientales, incrementa la eficiencia.

Esta evaluación en el sistema ambiental puede significar aspectos diversos. Por un lado, el nivel de eficiencia en la utilización actual de los insumos para la generación de

⁴⁹ Otra justificación, además de la pertinencia metodológica, de la eficiencia en términos de la utilización eficiente de los insumos y no el sentido contrario, incrementar el nivel de producto, es que en el sistema planteado, en su conjunto, tienen el objetivo de reducir la entropía global y para ello revertir la idea tradicional del desarrollo sustentable donde se incita a seguir los niveles de consumo tan sólo por el origen ecológico de los productos, sin renunciar a disminuir el consumo de bienes. En el esquema desarrollado una de las contribuciones es mostrar la necesidad de cambiar los objetivos que tenemos como sociedades occidentales donde es posible seguir consumiendo lo mismo y ser ambientalistas, idea irrealizable debido a la entropía del sistema. En cambio, se propone ir disminuyendo el consumo en favor de mejores condiciones sociales y metas económicas realizables

electricidad es apropiado dado que no incrementa los costos ambientales, al contrario, si incrementan los costos ambientales en 1%, la eficiencia disminuiría en 2% y al ser menos eficiente, la entropía incrementaría. Esta deducción sólo es válida al SEN en su conjunto dado que no se tienen los datos suficientes para replicarlo a nivel de tecnologías.

En la segunda etapa de la regresión se estima el impacto de la eficiencia sobre los gastos en electricidad de los hogares, con lo cual se evalúa en el sistema social el desempeño de la innovación. La especificación queda de la siguiente forma:

$$\ln gh_t = \beta_0 + \beta_1 dl nec_t + u_t$$

La variable dependiente es $\ln gh$ (logaritmo natural del gasto de los hogares en servicios eléctricos) y como variable explicativa $dl nec$. Esta variable explica sólo el 12% de las variaciones del ingreso. Es justificable cuando se trata de un índice, además que cuando se tiene un marco evolucionista, lo más relevante de las estimaciones son los signos asociados a los parámetros (véase Canther y Hanusch, 2001).

Cuadro 6. México. Resultados de regresión en dos etapas eficiencia y gasto de los hogares				
<i>Primera etapa (variable dependiente: dl nec)</i>				
	<i>constante</i>	<i>pid</i>	<i>lngast_id</i>	<i>dl nctad</i>
Signo	-	+	+	-
Coefficiente	7.974898	.13368	.9901269	2.289727
Valor-p	(0.052)*	(0.000)*	(0.091)**	(0.010)*
R2 ajustada	0.5542	F	0.004*	
<i>Segunda etapa (variable dependiente: ln gh)</i>				
	<i>constante</i>	<i>dl nec</i>		
Signo	+	+		
Coefficiente	10.51433	.2000414		
Valor-p	(0.000)*	(0.098)*		
R2 ajustada	0.1236	F	0.083**	
*significancia estadística al 5%				
** significancia estadística al 10%				

Fuente: Elaboración propia

Se observa la significancia conjunta e individual de las variables, así como los signos de los parámetros estimados. En este caso tiene un signo positivo, de tal forma, incrementos de la eficiencia genera incremento en el gasto de los hogares para servicios

eléctricos. Es decir, el desempeño de la innovación fue excluyente. Dicho comportamiento puede deberse a varios factores, por ejemplo, mecanismos de asignación de precios desvinculados al sector real de la producción, encarecimiento del servicio en otras etapas de la distribución de energía eléctrica. De esta manera, los resultados muestran que el desempeño de la innovación en el sector social no propició mejoras en cuanto a la disminución del gasto en servicio eléctrico, dejando este campo para discusión en las conclusiones.

Conclusiones y recomendaciones de política

Este trabajo tuvo como objeto plantear un escenario alternativo para el desarrollo, no sólo teórico, sino práctico de la problemática ambiental que actualmente sociedades y gobiernos enfrentan. Por un lado, se ofrece una propuesta teórica para la integración del medio ambiente, sistema económico y social partiendo de elementos menos restrictivos que fuesen metodológicamente consistentes y cercanos a la realidad. Los retos de la economía son grandes pues sigue pérdida en un camino innovador para el siglo XIX, pero superado en los años recientes. En esta investigación se ofrecen alternativas teóricas desde Sistemas Complejos Adaptativos y Economía Evolutiva, lejos de ser perfectas y acabadas, ofrecen herramientas analíticas de mayor congruencia teórica y en la realidad.

El problema de la economía neoclásica no es tanto su formulación, sino que se vuelve un peligro cuando el quien cree en ella llega al poder y al diseño de política pública. Se conserva la tradición de superponer al sistema económico sobre el resto de los sistemas, llevando a discursos políticos donde el desarrollo sustentable es la vía. Como se mostró, los planes que se promueven por parte de las organizaciones transnacionales tienen un sesgo hacia el determinismo metodológico, planteando escenarios irrealizables simplemente por el destierro de cuestiones elementales como las leyes de la naturaleza como la entropía y la irreversibilidad de los procesos, además de grupos sociales excluidos.

La propuesta planteada intenta ser un marco distinto de análisis para el hacedor de políticas o simplemente a quien intenta adentrarse a la problemática ambiental desde la economía. Si bien es imposible cubrir la totalidad, se ofrece un espectro de interacciones que brinda elementos no solamente conceptuales sino de evaluación. Se reconoce agentes dentro de un conjunto de reglas (individuales y estructurales) culturales y sociales, con

objetivos históricamente determinados y reconocen heterogeneidad entre ellos, así como interrelaciones complejas (no lineales) entre sus partes sin el afán de buscar un valor óptimo sino encontrar estabilidad al sistema.

El sistema de evaluación estimado plantea que la mejor respuesta adaptativa de los agentes, dado los elementos anteriores, es la innovación. Su desempeño será aceptado por el sistema económico, ambiental y social. Si logra la validación en los tres sistemas, la innovación se denomina ecoinnovación, en caso contrario, el sistema, al ser adaptativo, busca otra innovación y desecha la práctica vigente.

En el caso del SEN, la innovación tiene efectos favorables en la eficiencia en el uso de los insumos de las tecnologías generadoras de electricidad, así como en la disminución de la entropía, medido en términos de costos ambientales, sin embargo, no fue así en el sistema social, pues no mejoró la situación de pobreza energética en función del gasto de los hogares en servicio eléctrico. Dado esta secuencia de hechos, la innovación de los agentes adaptativos se desecharía en busca de otra que logre contemplar positivamente a los tres sistemas.

Las implicaciones de política ambiental de lo anterior radican en el diseño de leyes que realmente consideren a los tres elementos clave de toda sociedad. El actual desempeño del sector en los tres ámbitos implica leyes y prácticas excluyentes al quedar integrantes que no son beneficiarios de la acción colectiva. Normalmente se le atribuye el protagonismo al sector económico-productivo y se habla del medio ambiente y de la sociedad como extensión y bajo los mismos criterios. En el ejercicio planteado, si se hubiese considerado al sistema económico y ambiental para determinar el desempeño de la innovación, hubiese sido favorable y se extendería dichos beneficios hacia el sistema social a pesar de que no se validó en ese espacio.

En términos de la hipótesis, se cumplió respecto a lo planteado. Los resultados muestran que la evaluación de la propuesta teórica fue positiva en el sistema ecológico, pero no en el sistema social. Por lo cual, en el caso de México no puede hablarse de un proceso sistemático de ecoinnovaciones sino de relaciones causales aisladas. Es decir, con base en la evidencia empírica, no existen retroalimentaciones entre el funcionamiento del sector real de energía y el sistema social, volviéndose contradictorio con los objetivos de

responsabilidad social del sector en los múltiples documentos de trabajo (véase los trabajos de investigación del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias).

Por último, la formulación planteada deja lugar no solamente al hacedor de política para la consideración de los distintos agentes y sistemas con el fin de realizar planes no excluyentes sino también el esquema planteado es buena aproximación al rol que ejecutan las comunidades excluidas de las políticas tradicionales. La resiliencia es la capacidad de adaptación de los agentes frente a la incertidumbre, por lo cual, frente a un escenario de exclusión de la política de Estado ciertas sociedades han logrado encontrar procesos que logren armonía entre lo económico, social y ambiental con respeto a su cultura. Pero este último caso es tema de otra investigación.

Agenda pendiente

En el desarrollo de toda investigación existen límites sobre las propuestas realizadas. Las principales consideraciones de este trabajo para desarrollo posterior (doctorado) son: i) Ampliar la propuesta de integración de los tres sistemas, de tal manera de encontrar un marco más refinado para plantear las retroalimentaciones de manera formal dentro de los principios evolucionistas y de sistemas complejos, de tal forma que se aspira a un desarrollo teórico propio, consistente y novedoso. ii) Desarrollar una metodología pertinente de medición con mayor compatibilidad con el soporte teórico.

Como se mencionó en el texto, el uso de DEA no permite capturar la mayoría de las interrelaciones planteadas en la teoría. Por lo cual, ante la falta en la literatura actual de metodologías adecuadas para la medición de los fenómenos sociales, ambientales y económicos de manera conjunta, se pretende hacer un aporte en este campo. iii) Como se expuso, la falta de variables ambientales se vuelve limitante al momento del análisis empírico, a lo cual se pretende la construcción de indicadores en términos de energía y entropía de las actividades económicas, evitando los problemas de valorización económica y agregación de las variables. iv) Consolidar los aportes anteriores en una teoría sobre la interacción de los fenómenos planteados para el diseño de política económica, ambiental y social que cuente con un fundamento teórico consistente.

Bibliografía

Abramovitz, M. (1957). Resource and output trends in United States since 1870, en *American Economic Review*, núm 46.

Aghion, P., & Howitt, P. (1992). A Model of Growth through. *The American Economic Review*.

Allenby, B. (2006). The ontologies of industrial ecology? *Progress in Industrial Ecology, An International Journal*, No. 3.

Andersen, E. (2009). *Schumpeter's evolutionary economics: a theoretical, historical and statistical analysis of the engine of capitalism*. Anthem Press.

Ansuategi, A., Delgado, J., Galarraga, I. (2014). *Green energy and efficiency: an economic perspective*. Springer.

Antonietti, R., Bronzini, R., Cainelli, G. (2015). Inward greenfield FDI and innovation, en *Economia e Politica Industriale*, núm. 42.

Arrow, K. (1971). *General competitive analysis*, Harvard Press.

Arrow, K. y Debreu, G. (1954). Existence of an equilibrium for a competitive economy. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*.

Arthur, W. (2006). Out-of-equilibrium economics and agent-based modeling. *Handbook of computational economics*, núm. 2.

Azadeh, A., Ghaderi, S., Omrani, H., Eivazy, H. (2009). An integrated DEA–COLS–SFA algorithm for optimization and policy making of electricity distribution units, en *Energy Policy*, núm. 37.

Banker, R. D., Charnes, A., Cooper, W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis, en *Management science*, núm. 30.

Barrett, C., Carter, M. (2013). The economics of poverty traps and persistent poverty: empirical and policy implications, en *The Journal of Development Studies*, núm. 49.

Barbier, E., Hochard, J. (2019). Geographical poverty traps in rural areas: a growing global problem, en *Land Use Policy*, núm. 10.

Beard, T., Lozada, G., (1999). Economics, Entropy and the Environment. *Books*.

Becerra, K., Gómez, G., y Reyes, R. (2011) ¿Cómo calcular los costos medioambientales?, en *Visión de Futuro*, Cienfuegos, vol. 15, julio-diciembre.

Beinhocker, E. D. (2006). *The origin of wealth: Evolution, complexity, and the radical remaking of economics*. Harvard Business Press.

- Benetti, C. (1990). *Moneda y teoría del valor*. Fondo de Cultura Económica.
- Besant-Jones, J., Bacon, R. (2002). Global Electric Reform, Privatisation and Liberalisation of the Electric Power Industry in Developing Countries, en *Energy and Mining Board Discussion Paper Series*.
- Bouché, S., De Miguel, C. (2019). Optimal fiscal policy in a model with inherited aspirations and habit formation en *Journal of Public Economic Theory*, núm. 21.
- Boulanger, P. (2007). Les barrières à l'efficacité énergétique, en *Reflets et perspectives de la vie économique*, núm. 46.
- Bouzarovski, S., Petrova, S., Sarlamanov, R. (2012). Energy poverty policies in the EU: A critical perspective, en *Energy Policy*, núm. 49.
- Bowles, S., Gintis, H. (2004). The evolution of strong reciprocity: cooperation in heterogeneous populations, en *Theoretical population biology*, núm. 65.
- Carabias, J., (2003). *Capacidades necesarias para el manejo de áreas protegidas: América Latina y el Caribe*. Nature Conservancy.
- Carrillo-Hermosilla, J., Del Río, P., Könnölä, T. (2010). Diversity of eco-innovations: Reflections from selected case studies, en *Journal of cleaner production*, núm. 18.
- Caselles, A. (2015). *Modelización y simulación de sistemas complejos*. Publicaciones de la Universitat de València.
- Castaingts, J. (2015). *Dinero, trabajo y poder*. Editorial Antrophos.
- Chang, H. (1993). The political economy of industrial policy in Korea, en *Cambridge Journal of Economics*, núm. 17.
- Chanona, A. (2016). *Tracking the progress of Mexico's power sector reform*. Wilson Center.
- Charnes, A., Cooper, W., Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units, en *European journal of operational research*, núm. 2
- Chenailler, H. (2012). *L'efficacité d'usage énergétique: pour une meilleure gestion de l'énergie électrique intégrant les occupants dans les bâtiments* Doctoral dissertation, Université de Grenoble, Francia.
- Clausius, R. (1865). On different forms of the fundamental equations of the mechanical theory of heat and their convenience for application, en *Annalen der Physik und Chemie*, núm.124.
- Costanza, R., Daly, H. E. (1992). Natural capital and sustainable development., en *Conservation biology*, núm. 6.
- Cunningham, R. (2012). *Sustainability: a cultural history*. Devon, Reino Unido.

- Damonte, F., De Santis, M., Berg, S. (2012). The efficiency of Brazilian electricity distributors during 2004–2009. An application using DEA corrected by environmental and stochastic factors, en *Data Envelopment Analysis: Theory and Applications*, núm. 297.
- Dechezleprêtre, A., Glachant, M., Ménière, Y. (2013). What drives the international transfer of climate change mitigation technologies? Empirical evidence from patent data, en *Environmental and Resource Economics*, núm. 54.
- Delgado-Moreno, M., Escalante Semerena, R. (2018). Gender and cross-scale differences in the perception of social-ecological systems, en *Journal of Sustainability*, núm. 10.
- Delmas, M., Tokat, Y. (2005). Deregulation, governance structures, and efficiency: the US electric utility sector, en *Strategic Management Journal*, núm. 26.
- Dogan, N. O., Tugcu, C. (2015). Energy efficiency in electricity production: a data envelopment analysis (DEA) approach for the G-20 countries, en *International Journal of Energy Economics and Policy*, núm. 5.
- Dopfer, K. (2005). *The evolutionary foundations of economics*. Cambridge University Press.
- Dopfer, K. y Potts, J. (2009). On the theory of economic evolution, en *Evolutionary and Institutional Economics Review*, núm. 6.
- Dopfer, K. y Potts, J. (2015). *The general theory of economic evolution*. Routledge.
- Dosi, G., Tyson, L., Zysman, J. (1989). Trade, technologies, and development: a framework for discussing Japan, en *Politics and productivity: how Japan's development strategy works*. New York: Harper Business.
- Edvardsen, D., Førsund, F., (2003). International benchmarking of electricity distribution utilities, en *Resource and energy Economics*, núm. 25.
- Escalante-Semerena, R. y Basurto, S. (2014). Resiliencia de un Sistema Socio-Ecológico, en *Revista Virtual*, vol.7, núm. 25.
- Escalante-Semerena, R. (2015). Can scenario-planning support community-based natural resource management? Experiences from three countries in Latin America, en *Ecology and Society*, núm. 20.
- Espinosa, A., Walker, J. (2011). *A complexity approach to sustainability: theory and application* (Vol. 1). World Scientific.
- Farrell, M. (1957). The measurement of productive efficiency, en *Journal of the Royal Statistical Society*, núm. 120.
- Färe, R., Grosskopf, S. (1985). A nonparametric cost approach to scale efficiency, en *The Scandinavian Journal of Economics*, núm. 5.
- Feidt (2009) Efficacité énergétique: Quels critères? en *Termotechnica*, núm. 2

Folchi, M., Rubio, M. (2003). *El consumo aparente de energía fósil en los países latinoamericanos hacia 1925: una propuesta metodológica a partir de las estadísticas de comercio exterior*. CEPAL.

Foreman-Peck, J., Wang, Y. (2014). The costs to the UK of language deficiencies as a barrier to UK engagement in exporting: A report to UK trade & investment. *Cardiff Business School*.

Forrester, J. W. (1971). *World dynamics*. Wright-Allen Press.

Foster, J., Metcalfe, J. (2003). *Frontiers of evolutionary economics: competition, self-organization, and innovation policy*. Edward Elgar Publishing.

Frenken, K., Nuvolari, A. (2004). The early development of the steam engine: an evolutionary interpretation using complexity theory, en *Industrial and Corporate Change*, núm. 13.

García-Colín Scherer, L. (1970). *Introducción a la termodinámica clásica*. Editorial Trillas.

García-Colín Scherer, L. (2000). *De la máquina de vapor al cero absoluto*. Fondo de Cultura Económica.

García-Ochoa, R., Bracamonte Sierra García, R. (2014). Pobreza energética en América Latina. *Serie Documentos de proyecto Comisión Económica para América Latina y el Caribe-CEPAL*.

García-Ochoa, R., Graizbord, B. (2016). Privation of energy services in Mexican households: An alternative measure of energy poverty, en *Energy Research & Social Science*, núm. 8.

García-Ochoa, R., Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional, en *Economía, sociedad y territorio*, núm. 16.

Georgescu-Roegen, N. G. (1971). *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press.

Georgescu-Roegen, N. (1972). Economics and entropy. *The Ecologist*, pp. 13-18.

Georgescu-Roegen, N. (1975). Energía y mitos económicos. *El trimestre económico*, No.42.

Georgescu-Roegen, N. (1979). *La décroissance: entropie, écologie, économie*. Éditions Sang de la Terre.

Georgescu-Roegen, N. (1986). The entropy law and the economic process in retrospect, en *Eastern Economic Journal*, No. 12.

Georgescu-Roegen, N. (1993). The entropy law and the economic problem, en *Valuing the Earth: Economics, ecology*.

Georgescu-Roegen, N. (1996). *La ley de la entropía y el proceso económico*. Madrid: Fundación Argentaria.

Giannuzzo, A. (2010). Los estudios sobre el ambiente y la ciencia ambiental, en *Scientiae Studia*, núm. 8.

Gillingham, K., Newell, R., Palmer, K. (2006). Energy efficiency policies: a retrospective examination, en *Environmental Resources*, núm. 31.

Goldstein, H. (1987). *Mecánica clásica*. Reverté.

Goto, M., & Tsutsui, M. (1998). Comparison of productive and cost efficiencies among Japanese and US electric utilities, en *Omega*, núm. 26.

Grobmann, K., Kahlheber, A. (2017). Energy poverty in an intersectional perspective: On multiple deprivation, discriminatory systems, and the effects of policies, en *Energy Poverty and Vulnerability* núm. 12

Guadagni, A. (1984). La revolución energética: el rol de la sustitución del petróleo y la conservación de energía, en Revista *Desarrollo económico*.

Hašič, I., Silva, J., & Johnstone, N. (2015). The use of patent statistics for international comparisons and analysis of narrow technological fields. OCDE library

Heckscher, E. (1919). The effect of foreign trade on the distribution of income en *Ekonomisk Tidskrift*, núm. 2.

Heberlein, T., Bishop, R. (1986). Assessing the validity of contingent valuation: Three field experiments, en *Science of the Total Environment*, núm. 56.

Holland, J. H. (2004). *El Orden Oculto: De cómo la adaptación crea la complejidad*. Fondo de Cultura Económica.

Horbach, J., Rammer, C., Rennings, K. (2012). Determinants of eco-innovations by type of environmental impact—The role of regulatory push/pull, technology push and market pull, en *Ecological economics*, núm. 78.

Horbach, J. (2014). Do eco-innovations need specific regional characteristics? An econometric analysis for Germany, en *Review of Regional Research*, núm. 34.

Jaffe, A. B. (1996). *Bounding the effects of R&D: An investigation using matched establishment-firm data*. National bureau of economic research

Jaffe, A., Newell, R., Stavins, R., (2001). Energy-efficient technologies and climate change policies, en *Climate Change Economics and Policy*, núm. 171.

Jevons, W. (1871). 1970. *The Theory of Political Economy*. London, Mac-Millan.

Joule, J. (1850). On the mechanical equivalent of heat, en *Philosophical Transactions of the royal Society of London*, núm. 140.

Kemp, R., & Pearson, P. (2007). *Final report MEI project about measuring eco-innovation*. Project UM Merit, Maastricht.

Kemp, R., Andersen, M. (2004). Strategies for eco-efficiency innovation, en *Strategy paper for the EU Informal Environmental Council Meeting*.

Klimovsky, E. (1999). Modelos básicos de las teorías de los precios. *Problemas del Desarrollo*.

Krugman (1999). *De vuelta a la economía de la Gran Depresión*. Editorial Norma.

Kümmel, R. (2011). *The second law of economics: energy, entropy, and the origins of wealth*. Springer Science & Business Media.

Lacomelli, A. (2005). Renewable Energy (RE), Energy Efficiency (EE) & Energy Services: The Energy Market Transformation. In *Renewable Energies for Central Asia Countries: Economic, Environmental and Social Impacts*. Springer, Dordrecht.

Lacomelli, A. (2006). *Renewable energies for Central Asia countries: economic, environmental and social impacts*. Springer Science & Business Media.

Lane, D. (2011). Complexity and innovation dynamics. *Handbook on the economic complexity of technological change*.

Lane, D. y Maxfield (2006). Hierarchy, complexity, society. In *Hierarchy in natural and social sciences*, pp. 81-119.

Lanjouw, J. O., & Mody, A. (1996). Innovation and the international diffusion of environmentally responsive technology, en *Research Policy*, núm. 25

Lanoie, P. (2011). Environmental policy, innovation and performance: new insights on the Porter hypothesis, en *Journal of Economics & Management Strategy*, núm. 20.

Linares, P., Labandeira, X. (2010). Energy efficiency: economics and policy. *Journal of Economic Surveys*, núm. 24.

Lotti, F., Marin, G., (2013). Drivers and Effects of Eco-innovations Using Data on Eco-patents, DRUID Celebration Conference.

Lundvall, B. A. (1992). National systems of innovation: towards a theory of innovation and interactive learning.

Mashall, A. Principles of economics. London McMillan.

Marinova, D., & McAleer, M. (2003). Modelling trends and volatility in ecological patents in the USA, en *Environmental Modelling & Software*, núm. 18.

Martínez Alier, J. (1997). Deuda ecológica y deuda externa”, en *Ecología política*, vol. 14.

Martínez Alier, J. (1998). *La ecología y la economía*, México, Fondo de Cultura Económica.

Marquardt, B. (2009). La cuestión ecológica de la revolución industrial y la habilidad para el futuro de la civilización industrial, en revista *Pensamiento Jurídico*, núm. 25.

Menger, K. (1871). *Principles of economics*. Institute for Humane Studies.

Miedzinski, M., Ravetz, J., Reynolds, J. (2013). *Green Jobs and Occupational Safety and Health: Foresight on New and Emerging Risks Associated with New Technologies by 2020: Report*. Publications Office of the European Union.

Mill, J. (1848). *The principles of political economy*.

Mokyr, J. (1987). Has the Industrial Revolution been crowded out? Some reflections on Crafts and Williamson, en *Explorations in Economic History*, núm. 24.

Moreno-Brid, J., & Bosch, J. (2018). *Desarrollo y crecimiento en la economía mexicana: Una perspectiva histórica*. Fondo de Cultura Económica.

Nadal, A., *Economía ambiental y cambio climático en México*, México, El Colegio de México, 1992.

Navarro, J., Delfin, O, Díaz, A. (2019). La Eficiencia del Sector Eléctrico en México 2008-2015, en *Análisis económico*, núm34(85).

Nelson, C. Winter, S. (1977). In search of a useful theory of innovation, en *Innovation, economic change and technology policie*.

Nelson, C. y Winter, S. (1982). *Organizational capabilities and behavior: An evolutionary theory of economic change*. Harvard Business Press.

Nelson, R.,y Phelps, E. (1984). Aggregate production functions and medium-range growth projections” , en *American Economic Review*, vol 54.

Naredo, J. (2004). Sobre el origen, el uso y el contenido del término sostenible. *Cuadernos de investigación urbanística*, núm. 41.

Ohlin, B. (1933). *Interregional and International Trade*. Cambridge University Press.

Oltra, V, Kemp, R. y Vries (2008). *Patents as a measure for eco-innovation*. The European Environment Agency press

- Osorio, M., y Correa, F. (2004). Valoración Económica de costos ambientales: Marco conceptual y métodos de estimación”, en *Semestre Económico*, vol. 13, enero-junio.
- Palacios, J. (2004). Desarrollo tecnológico en la primera revolución industrial en *Revista de historia*, núm. 17.
- Patel, P., Pavitt, K. (1995). *Technological competencies in the world's largest firms: Characteristics, constraints and scope for managerial choice*. Harvard Press
- Perkin, H. (1969). *The Origins of Modern Society, 1780-1880*. University of Toronto Press.
- Pigou, A. (1999). *La economía del bienestar*, México, Editorial Aguilar.
- Popp, D., Johnson, D. (2003). *Time in purgatory: Determinants of the grant lag for US patent applications*. National Bureau of Economic Research.
- Porter, M., Van der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship, en *Journal of economic perspectives*, núm. 9.
- Quesnay, F. (1758). *Tableau économique des physiocrates*. Mcmillan
- Quirk, P. (2001). *The politics of deregulation*. Brookings Institution Press.
- Radkau, J. (2002). *Nature and power: a global history of the environment*. Cambridge University Press.
- Reséndiz, D., ica, F. (1994). *El sector eléctrico de México*. Fondo de Cultura Económica.
- Robert, V., Yoguel, G. (2016). Complexity paths in neo-Schumpeterian evolutionary economics, structural change and development policies. *Journal Structural Change and Economic Dynamics*.
- Robert, V., Yoguel, G., y Lerena, O. (2017). The ontology of complexity and the neo-Schumpeterian evolutionary theory of economic change. *Journal of Evolutionary Economics*.
- Romer, P. M. (1987). *Capital accumulation in the theory of long run growth*. University of Rochester-Center for Economic Research.
- Rosas, G., y Hernández, E., (2017). Costos ambientales y cambio tecnológico en México: 1990-2013, en *Revista Denarius*, núm. 32.
- Rostow, W. (1982). *Europe after Stalin*. University of Texas.
- Science and Technology Policy Research (2000). *Reducing Barriers to Energy Efficiency in Public and Private Organizations*. Brighton.

Schteingart, D. (2017). *Especialización productiva, capacidades tecnológicas y desarrollo económico: trayectorias nacionales comparadas y análisis del caso noruego desde mediados del siglo XX*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de General San Martín.

Serrano, V. Blasco, O. (2006). *Evaluación de la eficiencia mediante el análisis envolvente de datos: introducción a los modelos básicos*. Universidad de Valencia

Shaikh, A. (2008). *Measuring the wealth of nations: The political economy of national accounts*. Cambridge: Cambridge University Press

Suárez, M., Guerra, S. (2000). La teoría económica neoclásica y los instrumentos de política ambiental, en *Interciencia*, núm. 25.

Sieferle, R. P. (2004). Sostenibilidad: ¿una utopía? *GAIA*, vol. 13, num.1.

Smith, A. (1776). *Investigación de la naturaleza y causas de la riqueza de las naciones*. Fondo de Cultura Económica, México.

Solow, R. (1957). Technical change and the aggregate production function”, en *Review of Economics and Statistics*, núm. 42.

Viscusi, K., Huber, J., Bell, J. (2008). The economic value of water quality, en *Environmental and Resource Economics*, núm. 41

Walras, L. (1874). *Eléments d’Economie Politique Pure*. Homewood.

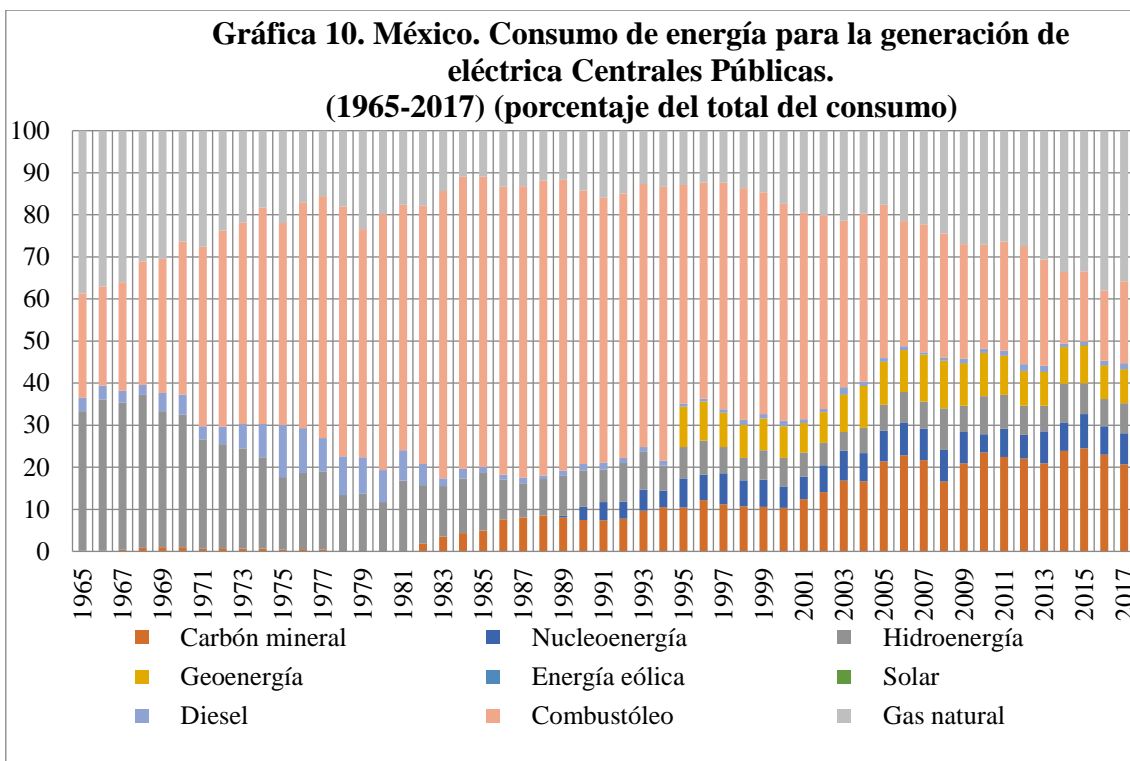
Wei, Y., & Liao, H. (2016). *Energy economics: energy efficiency in China*. Springer International Publishing.

Weikard, P., Wangler, L., Freytag, A. (2015). Minimum participation rules with heterogeneous countries, en *Environmental and Resource Economics*, núm. 62.

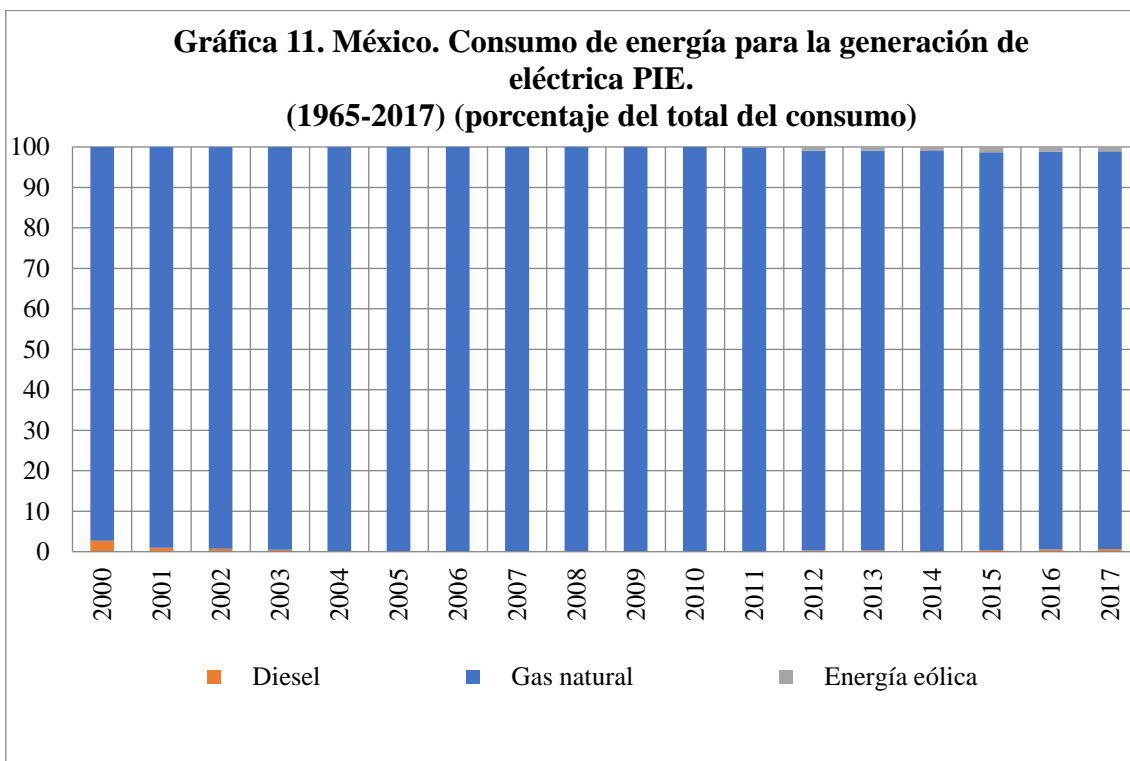
Youssef, A., Lahmandi-Ayed, R. (2008). Eco-labelling, competition and environment: Endogenization of labelling criteria, en *Environmental and Resource Economics*, núm. 41.

Yunos, J. M., Hawdon, D. (1997). The efficiency of the national electricity board in Malaysia: An intercountry comparison using DEA, en *Energy economics*, núm. 19.

Anexo A. Consumo energético por tipo de central

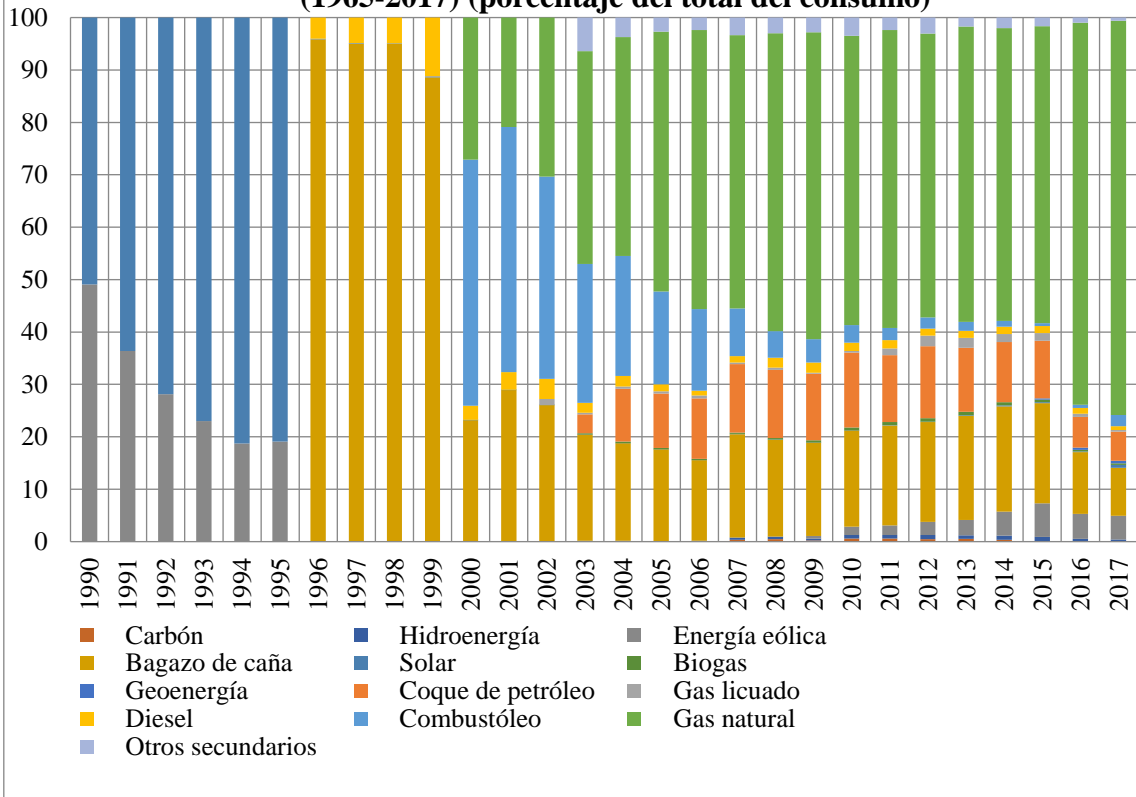


Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)



Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

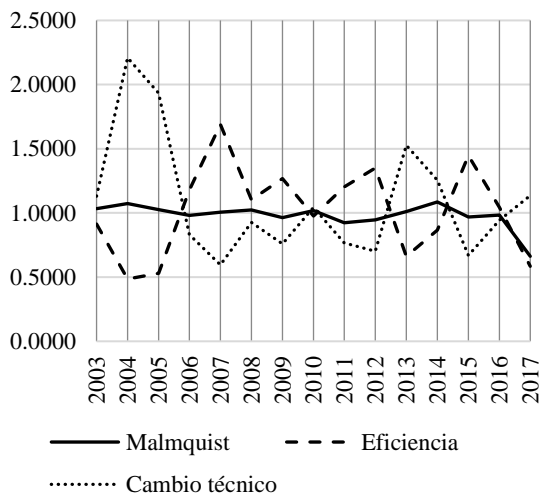
Gráfica 12. México. Consumo de energía para la generación de eléctrica Centrales Autogeneración (1965-2017) (porcentaje del total del consumo)



Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

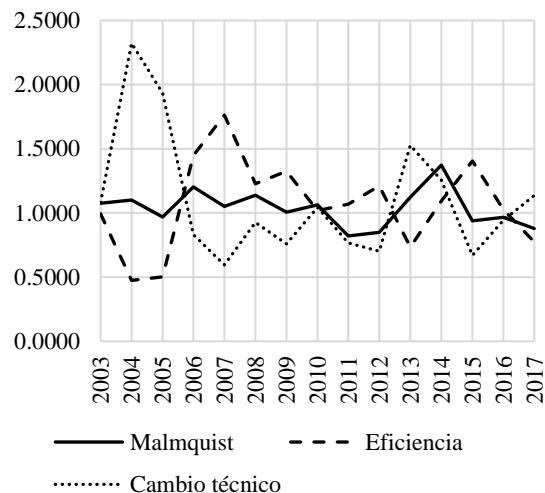
Anexo B. Eficiencia del SEN por tipo de tecnología

Gráfica 13. México. Termoeléctrica
Evolución de la eficiencia
(2003-2017) (índices)



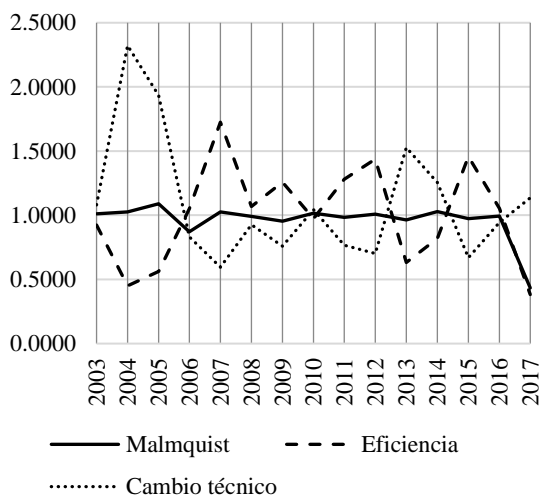
Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Gráfica 14. México. Vapor
Evolución de la eficiencia
(2003-2017) (índices)



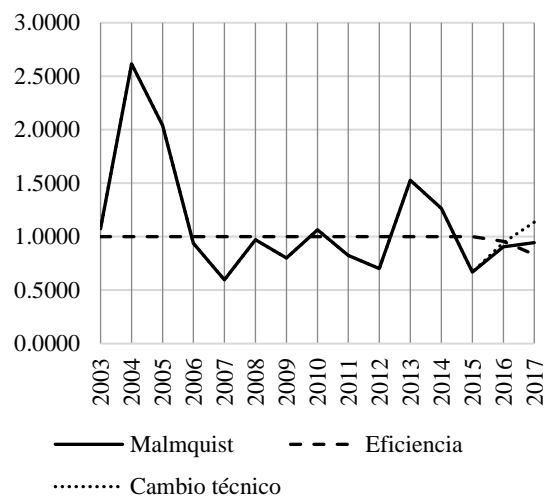
Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Gráfica 15. México. Ciclo combinado
Evolución de la eficiencia
(2003-2017) (índices)



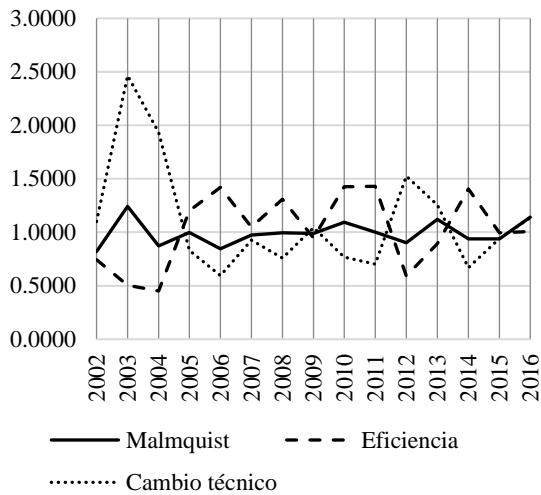
Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Gráfica 16. México. Turbogás
Evolución de la eficiencia
(2003-2017) (índices)



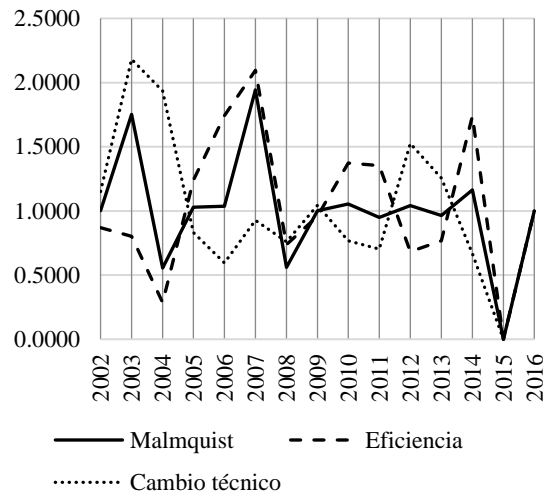
Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Gráfica 17. México. Combustión interna Evolución de la eficiencia (2003-2017) (índices)



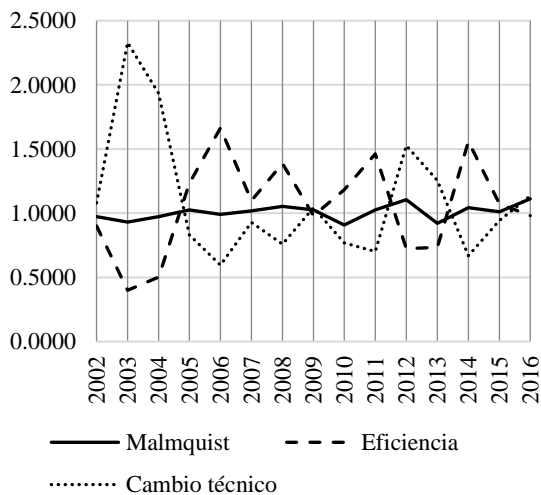
Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Gráfica 18. México. Dual Evolución de la eficiencia (2003-2017) (índices)



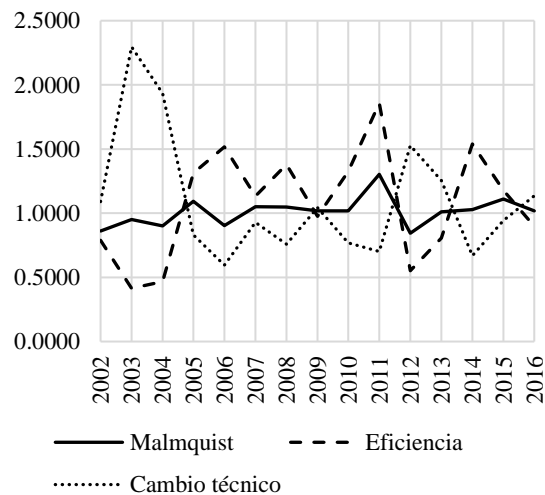
Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Gráfica 19. México. Carboeléctrica Evolución de la eficiencia (2003-2017) (índices)



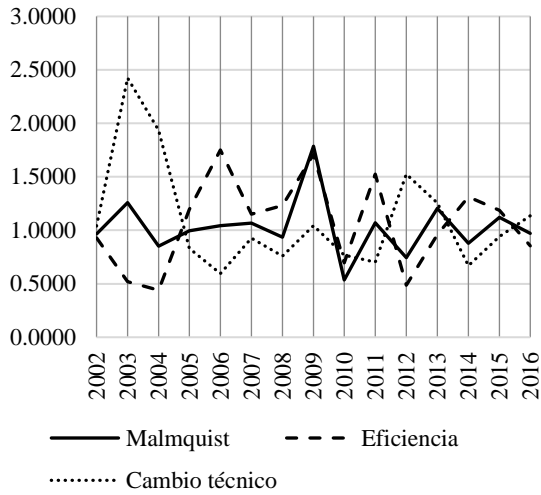
Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Gráfica 20. México. Nucleoeléctrica Evolución de la eficiencia (2003-2017) (índices)



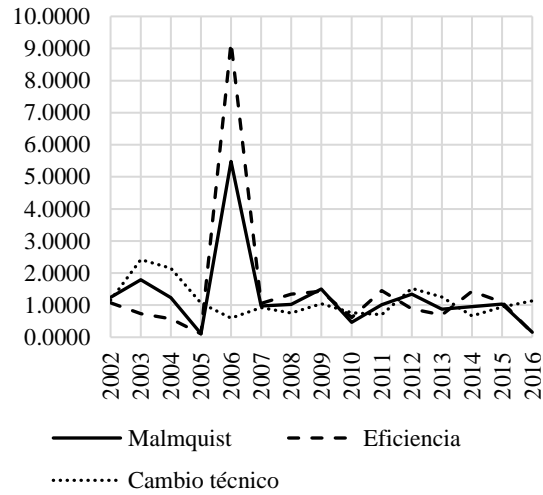
Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Gráfica 21. México. Geotérmica
Evolución de la eficiencia
(2003-2017) (índices)



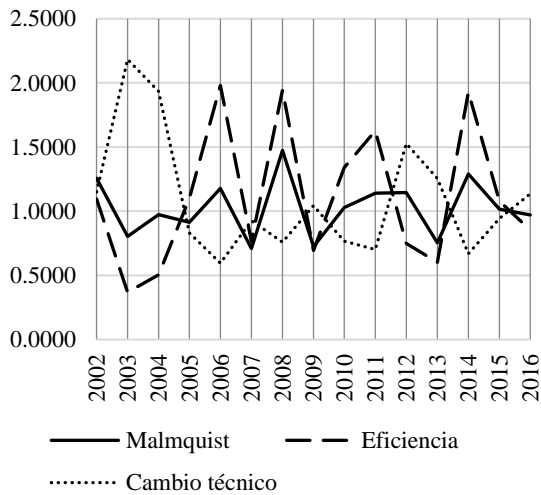
Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Gráfica 22. México. Eólica
Evolución de la eficiencia
(2003-2017) (Índices)



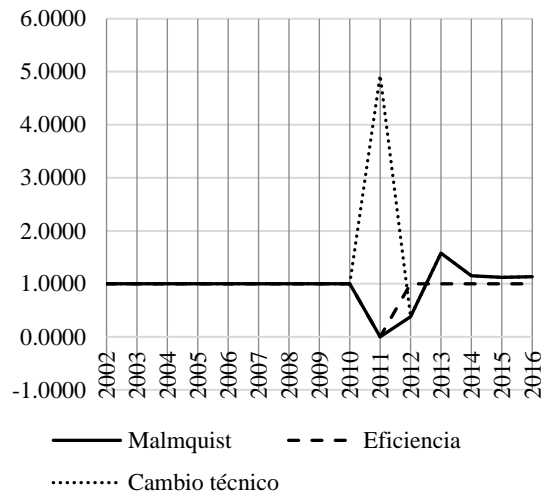
Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Gráfica 23. México. Hidroeléctrica
Evolución de la eficiencia
(2003-2017) (índices)



Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Gráfica 24. México. Fotovoltáica
Evolución de la eficiencia
(2003-2017) (índices)



Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (2020)

Anexo C. Pruebas de heterocedasticidad, correlación serial y normalidad

Primera etapa

Prueba heterocedasticidad Breusch-Pagan

$$H_0 = \text{Varianza constante}$$

$$\text{chi2}(1) = 0.75$$

$$\text{Prob} > \text{chi2} = 0.3880$$

$$0.3880 > 0.05 \text{ No se rechaza } H_0$$

Prueba correlación serial Breusch-Godfrey

$$H_0 = \text{No correlación serial}$$

Lags	ch2	df	Prob > chi2
1	0.245	1	0.6207
2	0.418	2	0.8115
3	1.061	3	0.7864
4	3.331	4	0.504
5	6.608	5	0.2514

$$\text{Prob chi2} > 0.05 \text{ No se rechaza } H_0$$

Prueba de normalidad Skewness/Kurtosis (sobre los residuos de la estimación)

$$H_0 = \text{Los residuos se distribuyen normalmente}$$

Pr(Skewness)	Pr(Kurtosis)	adj chi2(2)	Prob>chi2
0.2528	0.5274	1.95	0.3771

$$0.3771 > 0.05 \text{ No se rechaza } H_0$$

Segunda etapa

Prueba heterocedasticidad Breusch-Pagan

$$H_0 = \text{Varianza constante}$$

$$\text{chi2}(1) = 0.14$$

$$\text{Prob} > \text{chi2} = 0.7119$$

$$0.7119 > 0.05 \text{ No se rechaza } H_0$$

Prueba correlación serial Breusch-Godfrey

$$H_0 = \text{No correlación serial}$$

Lags	ch2	df	Prob > chi2
1	3.270	1	0.0706
2	6.775	2	0.0538
3	7.320	3	0.0624
4	7.335	4	0.1192
5	8.143	5	0.1485

Prob $\text{chi2} > 0.05$ No se rechaza H_0 en ninguno de los valores

Prueba de normalidad Skewness/Kurtosis (sobre los residuos de la estimación)

$$H_0 = \text{Los residuos se distribuyen normalmente}$$

Pr(Skewness)	Pr(Kurtosis)	adj chi2(2)	Prob>chi2
0.9599	0.8068	0.06	0.9693

$$0.9693 > 0.05 \text{ No se rechaza } H_0$$