UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA

CENTRO DE INVESTIGACIONES SOCIOECONÓMICAS

DOCTORADO EN ECONOMÍA REGIONAL

TESIS

México: matriz de generación eléctrica e impactos en los costos de producción y en las emisiones de CO_2e. Un análisis con modelos tipo SAM.

MSc. Reynier Rodríguez Socarrás

Director: Dr. Alejandro Dávila Flores

Codirectora: Dra. Miriam Valdés Ibarra

Saltillo, Coahuila

Agosto de 2024

Tabla de Contenido

1. Introducción 5
   1.1 Contexto actual 7
   1.2 Revisión de literatura 11
   1.3 Problema de Investigación 16
      1.3.1 Objetivo General 17
      1.3.2 Objetivos específicos 17
      1.3.3 Hipótesis 17
2. Metodología 18
   2.1 Matrices de Contabilidad Social 18
   2.2 Modelo de Leontief 21
      2.2.1 Modelo de producción 23
      2.2.2 Modelo de precios 25
      2.2.3 Modelos de Equilibrio General Computable 28
   2.3 Multiplicadores y descomposición de Stone 30
      2.3.1 Descomposición multiplicativa 31
      2.3.2 Descomposición aditiva de Stone 32
   2.1 Índices de Rasmussen y clasificación de los sectores. 34
   2.2 Elasticidades totales 36
   2.3 Análisis de ruta 38
      2.3.1 Influencia directa 39
      2.3.2 Influencia total 40
      2.3.3 Influencia global 41
3. Fuentes y método de construcción del modelo SAM 42

3.1 Matriz de Contabilidad Social Agregada 44
3.2 Apertura del sector eléctrico y la generación eléctrica 48
3.2.1 Planteamiento teórico del problema de desagregación 52
3.2.2 Restricciones y estimación inicial 53
3.3 Desagregación del sector eléctrico mexicano 58
3.3.1 Cálculo del costo de los combustibles y reajuste de los insumos energéticos primarios por tipo de tecnología 61
4. Resultados del modelo MCS 2018 67
4.1 Análisis estadístico descriptivo de la industria eléctrica. 67
4.2 Efectos multiplicadores del sector eléctrico 72
4.3 Impacto de los costos sobre los precios finales de la electricidad 76
4.3.1 El sector eléctrico y el consumo residencial 82
4.3.2 Elasticidades totales 84
4.4 Comentarios finales del capítulo 88
5. Sustitución perfecta de tecnologías contaminantes por energías renovables 89
5.1 Escenario $\boldsymbol{Z1}$: Extracción de tecnologías ineficientes. 92
5.1.1 Metodología de simulación 92
5.1.2 Impacto de la extracción sobre la economía. 94
5.2 Escenario $\boldsymbol{Z2}$: Reasignación de la demanda eléctrica. 100
5.2.1 Metodología de simulación. 100
5.2.2 Reconfiguración de la estructura de costos del sector eléctrico. ... 106
5.3 Escenario $\boldsymbol{Z3}$: Reajuste del precio final de la electricidad. 111
5.3.1 Metodología de simulación. 111
5.3.2 Impacto de la disminución del precio de la electricidad sobre la economía. 114
5.4 Comentarios finales del capítulo 121

6. Emisiones de CO_2 y políticas sobre la matriz eléctrica de México. 123
6.1 Metodología de cálculo de emisiones de CO_2e 124
6.1.1 Literatura sobre e-SAM y emisiones de CO_2 125
6.1.1 Vector de emisiones totales de CO_2e 126
6.2 Resultados medioambientales de $\boldsymbol{Z0}$ y $\boldsymbol{Z3}$ 133
6.2.1 Escenario base 2018 133
6.2.2 Escenario alternativo ideal $\boldsymbol{Z3}$ 138
6.3 Políticas en el sector eléctrico y la matriz de generación eléctrica. 141
6.3.1 Escenario No. 1: Proyección de PRODESEN 2018 143
6.3.2 Escenario No. 2: Proyección de PRODESEN 2022 148
6.3.3 Escenario No. 3: Política de la 4T 152
6.4 Alcances de los planes de política energética. 157
6.4.1 Vector de emisiones inicial de cada escenario 160
6.4.2 Resultados del modelo para cada escenario 162
6.5 Comentarios finales del capítulo 169
7. Conclusiones generales 170
Bibliografía 173

1. Introducción

En las últimas décadas, el sector de la energía mundial se ha transformado como consecuencia de su enfrentamiento a los nuevos desafíos que ha traído el siglo XXI. Problemas económicos, sociales y sobre todo ambientales han generado cambios significativos en la combinación energética, la eficiencia, las estrategias y las perspectivas con que se intenta satisfacer nuestra demanda creciente de energía. Los principales países productores han modernizado el sector energético, particularmente en la generación de energía eléctrica, desarrollando tecnologías pioneras en la industria y diversificando los modos de producción como respuesta a los problemas de contaminación, el aumento de la demanda, la variación en los precios, los conflictos políticos y otros acontecimientos que de una forma u otra influyen sobre el comportamiento del mercado energético.

Según la OCDE, México posee un potencial enorme para impulsar el crecimiento económico, así como la generación de empleos a través de la modernización de su sector energético. Con un amplio margen para la inversión, México se encuentra entre los primeros diez países del mundo más atractivos para ampliar la capacidad de exploración y producción, facilitar la competencia en los procesos de refinación y transporte de hidrocarburos, así como para impulsar el desarrollo de energías renovables.

Sin embargo, la principal empresa de Petróleos Mexicanos PEMEX, así como la Comisión Federal de la Electricidad (CFE) se encuentran en un rezago tecnológico significativo respecto a los estándares internacionales y con una necesidad de inversión muy grande. Además, presentan una crisis financiera desde hace varios años con ingresos netos negativos y una disminución de la producción que han desembocado en una crisis estructural de agotamiento del modelo extractor de un recurso no renovable que revela la fragilidad de la seguridad energética mexicana (Oswald, 2017).

La importancia de la modernización en el sector eléctrico proviene directamente de lo fundamental que resulta en el desarrollo, sustentabilidad, crecimiento y competitividad de una economía, en especial para México. La diversificación de la generación eléctrica, y la incorporación de energías renovables que poseen costos de insumos energéticos nulos, significa eficiencia en el modo de producción, disminución del costo de generación y de las emisiones de gases contaminantes y, por último, competitividad de los precios finales tanto residenciales como para la industria. Estos efectos se transmiten directa e indirectamente para toda la economía del país, perfeccionando la competitividad y el crecimiento de todas las restantes actividades productivas.

El objetivo del presente trabajo consiste en el estudio de la industria eléctrica mediante un modelo multisectorial, tomando en cuenta las diferentes tecnologías con las que se produce la energía eléctrica, que permita la cuantificación de los vínculos, los efectos multiplicadores y el impacto de los costos y emisiones de los insumos energéticos de este subsector en la economía nacional.

El presente capítulo introductorio incluye la presentación del contexto y los desafíos actuales en la industria eléctrica mexicana, particularmente la referente a la generación de electricidad; una revisión de literatura sobre estudios del sector eléctrico a través de modelos multisectoriales, así como un estado del arte sobre los principales resultados obtenidos en los marcos de otros países y en México; y por último, se describirá la fundamentación del problema que da origen a la presente investigación, definiendo a su vez el planteamiento del problema, su justificación y sus objetivos generales y específicos.

El capítulo 2 consiste en el desarrollo de la metodología utilizada para el análisis del sector eléctrico. Primeramente, el desarrollo matemático del modelo Insumo-Producto de Leontief dentro del marco de su extensión a Matrices de Contabilidad Social (MCS) y como herramienta fundamental del análisis. También se desarrollan las técnicas para obtener información valiosa de la MCS tales como la descomposición de Stone, el análisis de ruta y los índices de Rasmussen.

El capítulo 3 se centra en las fuentes de datos utilizadas para la construcción de la MCS y la descripción metodológica y práctica de desagregación del sector eléctrico en los subsectores de generación por tipo de tecnología para la conformación del modelo final utilizado en el presente estudio. Por último, se presentan los resultados obtenidos a través del diseño metodológico descrito y su interpretación, así como algunos comentarios finales con respecto a estos.

Los capítulos 4, 5 y 6 corresponden a los resultados, primeramente, generales del modelo para el año base y luego para varios escenarios de simulación de la matriz eléctrica de generación. Se estudian diferentes escenarios que revelan resultados relevantes en la discusión de la política energética del país y justifican la transición energética a nivel medioambiental con énfasis en los beneficios económicos de esta. Por último, se realizan conclusiones generales del presente estudio y recomendaciones para futuras investigaciones en el tema.

1.1 Contexto actual

El Congreso de la Unión aprobó en 2013 la Reforma Energética más abarcadora y profunda de su historia, como un paso importante a la modernización del sector energético de México y el aprovechamiento de los recursos y potencialidades del país. Sus objetivos incluían permitir que la Nación ejerza la planeación y control del Sistema Eléctrico Nacional junto con la inversión privada en el sector energético, en beneficio de un sistema competitivo que permitiera reducir los precios de la energía eléctrica; y contar con un mayor abasto de energéticos a mejores precios impulsando el desarrollo, con responsabilidad social y ambiental.

Sin embargo, la actual administración ha decidido convocar una contrarreforma que limite al 46% la participación del sector privado en la generación de energía eléctrica en un intento por recuperar el protagonismo y la competitividad en el mercado eléctrico de la Comisión Federal de la Electricidad (CFE), así como garantizar la seguridad energética del país en manos del estado.

De acuerdo con la nueva política energética de la Administración Pública Federal, no se considera el retiro de Centrales Eléctricas y se plantea la incorporación de 15,178 MW de Centrales Eléctricas dentro del periodo 2019-2025 por parte de la CFE, de los cuales 66.3% (10,056 MW) son de Ciclo Combinado, 13.2% (2,002 MW) de Cogeneración, 8.6% (1,305 MW) Eólicos, 8.2% (1,252 MW) Fotovoltaicos, 3.1% (471 MW) Hidroeléctricos, 0.3% (42 MW) de combustión Interna y 0.3% (50 MW) Geotérmicos (PRODESEN, 2019).

Por tanto, si bien la apuesta del gobierno plantea en total la incorporación durante los 15 años siguientes de 70,313 MW de nueva capacidad eléctrica del cual 56% corresponde a tecnologías limpias (SENER, 2020), este prioriza mediante la CFE la generación de electricidad a través de tecnologías basadas en combustibles fósiles en plantas ya existentes en el país tales como el carbón, el diésel, el combustóleo y el gas natural. También se han cancelado subastas ya planificadas tales como la cuarta subasta de energías renovables que impactan en la confianza de los inversores en el sector energético mexicano (OCDE, 2019).

Esto significa un retraso en el plan de desarrollo del sector eléctrico y en la transición tecnológica hacia energías renovables que pueden poner en riesgo la meta que México planteó de generar al menos el 35% de la electricidad mediante energías renovables en 2024 en la Ley General de Cambio Climático. Para lograrlo, y según (Del Río Monges, 2019) la proporción de generación de electricidad a partir de fuentes renovables deberá ser cuatro veces mayor que la de electricidad mediante fuentes no renovables durante el período 2018-2024.

México ha procurado ser un actor relevante entre los países en desarrollo y, en general, entre aquellos comprometidos con el combate efectivo al cambio climático. Desde el 30 de noviembre al 11 de diciembre de 2015 forma parte del Acuerdo de París, aprobado en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático celebrada en París, cuyo objetivo fundamental es mantener el aumento de la temperatura del planeta por debajo de los 2ºC hacia finales de este siglo, reconociendo que ello reducirá considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático.

La reforma de 2013 dio paso a una nueva Ley de Industria Eléctrica publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 11 de agosto de 2014, que tiene como finalidad impulsar el desarrollo de la industria eléctrica — en especial la generación — asegurando de forma ininterrumpida, eficiente y segura en el provecho de los consumidores, así como cumplir como organizaciones de servicio público y universal, de energías limpias y de reducción de emisiones contaminantes. (DOF, 2014).

Se creó el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), operado por el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), que incluye el Mercado de energía de Corto Plazo, el Mercado de Balance de Potencia, Subastas de energía y potencia de Mediano y Largo Plazo, donde privados nacionales y extranjeros pueden realizar transacciones de compraventa de energía eléctrica. En particular, uno de los grandes intereses de esta ley es propiciar y potenciar el desarrollo de tecnologías renovables y poco contaminantes, por lo que también incluyó la creación del Mercado de Certificados de Energías Limpias.

De esta forma se pretende fomentar la participación de inversión privada impulsando el desarrollo de una industria orientada a la libre competencia donde se permite la participación de la Empresas Productivas del Estado CFE y de empresas privadas, bajo reglas claramente definidas y en igualdad de condiciones, con el objetivo de promover la inversión y la utilización de mejores tecnologías (SENER, 2018).

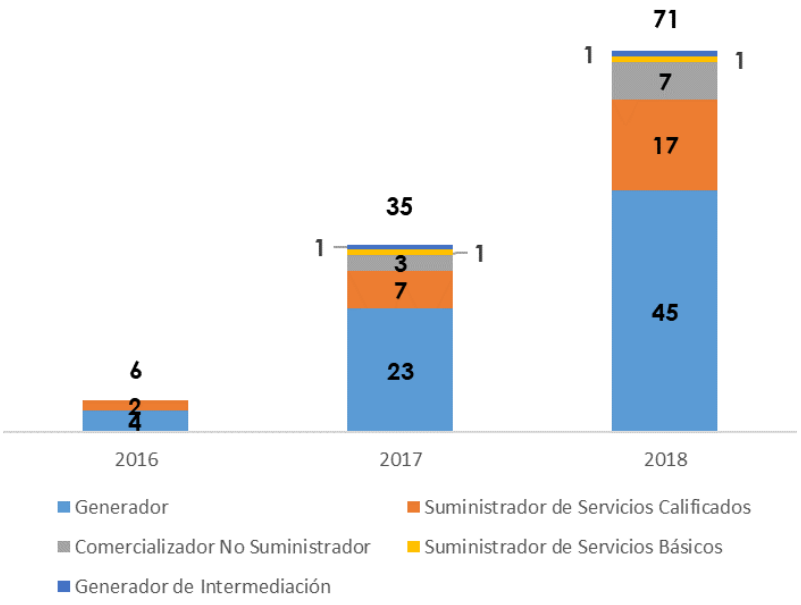
Adicionalmente se redactó la Ley de Transición Energética (LTE) cuyo objetivo consistió en regular el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica. La estrategia para seguir se resume en la Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios:

- Fomentar un sector energético basado en tecnologías limpias, energéticamente eficientes y que promuevan la productividad y el desarrollo sustentable.

- Lograr que la oferta de energéticos sea de acceso universal, diversificada, suficiente, de alta calidad y a precios competitivos.
- Fomentar la reducción de emisiones contaminantes originadas por la industria eléctrica.
- Reducir, bajo criterios de viabilidad económica, la dependencia del país de los combustibles fósiles como fuente primaria de energía.

La diversificación del sector principalmente hacia tecnologías renovables es una buena noticia provocada por la nueva ley, resultado de inversiones privadas a menores costos, las cuales el gobierno federal carece de recursos y tecnología para impulsar y desarrollar.

La Gráfica 1.1 muestra el crecimiento del número de participantes en el Mercado Eléctrico Mayorista producto de la Ley de Industria Eléctrica. La incorporación de nuevos inversores — principalmente hacia la modalidad de generación de energía eléctrica con un 63% en 2018 — se ha traducido en un aumento consistente de la generación por tecnologías limpias y en segunda instancia, un estancamiento del crecimiento tecnologías de generación fósil, tal como se evidencia en la Tabla 1.1.



Gráfica 1.1 Evolución del número de Participantes del Mercado con operaciones en el MEM por modalidad: 2016-2018.
Fuente: (SENER, 2020) con información del Sistema de Información del Mercado.

De esta manera, ambas leyes impulsan el crecimiento gradual de la participación de energías limpias en la generación de electricidad con el objetivo común de cumplir con las metas establecidas en materia energética del país, y su alineación con los compromisos internacionales establecidos en el Acuerdo de Paris. Todo esto, manteniendo la competitividad del sector eléctrico en particular y demás de los sectores productivos con la creación del Mercado Eléctrico y la incorporación de nuevos agentes — principalmente privados — en la generación y distribución de la energía eléctrica.

	2015	2016	2017	2018	Var 2018/2015 (%)
Total, energía limpia	61,684	62,729	66,105	73,538	6.0%
Total, energía fósil	225,977	235,698	243,265	243,740	2.6%

Tabla 1.1 Evolución de la generación bruta de CFE y energía eléctrica recibida de permisionarios (GWh).
Fuente: (PRODESEN, 2019).

1.2 Revisión de literatura

La transición energética es un reto que se le impone a la industria mexicana de la electricidad y de la energía en general. Más allá de los objetivos en el corto plazo para renovar tecnológicamente la industria ante la inminente tercera revolución energética — en la cual el petróleo será substituido por las energías renovables como la principal fuente mundial de energía — posiblemente será necesario plantearse la meta de generar el 100% de la electricidad mediante fuentes renovables en algún momento del período 2040-2050 (Del Río Monges, 2019).

Existen varios factores que influyen sobre esta necesidad. Los más difundidos a nivel mediático son las presiones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global y al cambio climático, así como el creciente costo energético y económico de extraer petróleo. De acuerdo con información de la ONU, se estima que México genera 3% de los gases de efecto invernadero, más del doble del promedio mundial per cápita (Valdivia & Domínguez, 2008).

La importancia de este debate proviene también de lo fundamental que resulta la generación de energía eléctrica en el desarrollo, sustentabilidad, crecimiento y competitividad de una economía, particularmente relevante para el caso de México. La modernización y la diversificación de esta significa eficiencia en el modo de producción, se traduce en disminución de costos, en competitividad de los precios finales y finalmente en una mayor rentabilidad de las empresas del sector.

Para el caso de las energías también debe tomarse en cuenta que los efectos van más allá, los costos asociados a esta se transmiten directa e indirectamente para prácticamente toda la economía de un país, afectando no solo la competitividad y el crecimiento del sector eléctrico sino la de todas las actividades productivas. De esta forma, es importante identificar los vínculos e interrelaciones que el sector energético presenta dentro de la economía mexicana y para ello una herramienta fundamental resultan ser los modelos multisectoriales tales como matrices Insumo-Producto, Contabilidad Social y modelos de equilibrio general computable, los cuales frecuentemente son utilizados en este tipo de estudios en la literatura consultada sobre el tema energético.

La literatura refleja la preocupación y difusión ambiental en artículos como (Manresa & Sancho, 2004), (Cardenete, Fuentes Saguar, & Polo, 2008) y (Alcántara & Padilla, 2009) que utilizan los métodos pioneros de (Alcántara & Roca, 1995) en el uso de modelos multisectoriales y el análisis de Leontief para el estudio de las intensidades energéticas y las emisiones de CO_2 de las actividades productivas. A través de los flujos intersectoriales se puede estudiar cuantas

emisiones generan la demanda de un bien o la cantidad de energía necesaria para la producción en cierta industria de forma directa e indirecta.

Cuando el modelo utilizado incluye las cuentas de los hogares el análisis se puede extender al ámbito residencial para evidenciar cómo desde nuestro consumo cotidiano se afecta al medio ambiente. Los estudios suelen dividirse abordando la problemática industrial — (Park & Lee, 2013), (Zhang, Hu, & Zhang, 2014) — y los que incluyen el factor residencial dentro de la ecuación tales como (Kok, Benders, & Moll, 2006), (Zhang, Bian, Tan, & Song, 2015) y (Ding, Cai, Wang, & Sanwal, 2017).

En México también la problemática ambiental es la más común entre los que utilizan este tipo de modelos para el estudio del sector eléctrico. Debido a la puesta en marcha de la reforma propuesta en materia energética de 2013, y luego de su implementación, el interés por el tema climático, energético y en particular del sector eléctrico ha ido en aumento. (Ortiz, 2011) realiza uno de los primeros estudios en materia de requerimientos de energía a través de las matrices energéticas para el caso de México en el período 1971-2007. (Santillán Vera, de la Vega Navarro, & Islas Samperio, Climate change and income inequality: An I-O analysis of the structure and intensity of the GHG emissions in Mexican households, 2021) identifica la relación entre el cambio climático y la desigualdad en el ingreso calculando la estructura y la intensidad de las emisiones en los hogares mexicanos.

En (Chapa & Ortega, 2017) se identifican los principales sectores contaminantes de la economía, incorporando además un estudio sobre la afectación de un impuesto al carbón en los sectores y en los hogares a través de los diferentes deciles de ingreso. Esta evaluación de políticas y estrategias de mitigación de emisiones mediante modelos multisectoriales es abordada también por (Ruiz Nápoles, 2012) y (Bravo Pérez, Castro Ramírez, Gutiérrez Andrade, & Omaña Pulido, 2017) usando nuevamente impuestos a los contaminantes. Esta alternativa para impulsar la transición energética suele abordarse desde el concepto del doble dividendo en (Boyd & Ibarrarán, 2002) y (Ibarrardn Viniegra & Boyd, 2001), la

aplicación de impuestos al carbón puede utilizarse para disminuir impuestos sobre otras actividades y obtener, bajo una captación neta idéntica, un mejoramiento en las emisiones contaminantes.

Otro aspecto importante que impulsa la necesidad de la transición hacia vías alternativas de producir electricidad se refiere a la seguridad energética. Con una demanda creciente de la energía eléctrica además de la crisis severa de PEMEX, los precios fluctuantes del crudo, la falta de capacidad de refinación y la debilidad técnica y financiera del gobierno mexicano, resulta urgente la búsqueda de soluciones para asegurar una producción que satisfaga el consumo de los años venideros.

México cuenta con muchos otros recursos energéticos renovables, que podrían resolver los embudos en el abasto y la refinación de los combustibles fósiles, al mismo tiempo que se protege el entorno natural y se reducen los gases de efecto invernadero. Esta alternativa incluso va más allá de una visión de seguridad energética militar-política y permitiría a México independizarse un poco de los intereses norteamericanos que permean en gran medida su dependencia de combustibles fósiles (Oswald, 2017). El sector energético debe por tanto diversificar la forma en la que obtiene y satisface la demanda de energía interna. La alternativa renovable parece muy atractiva, principalmente porque ataca simultáneamente el problema medioambiental.

La tarea de asegurar el suficiente suministro de energía eléctrica, a precios competitivos, pasa hoy por la necesidad de asegurar el suministro de energéticos primarios en cantidades y a precios adecuados (Valdivia & Domínguez, 2008). Los Certificados de Energías Limpias (CEL) son instrumentos que México ha implementado para integrar las energías limpias en la generación eléctrica al menor costo e incentivar el desarrollo de nuevos proyectos de inversión en generación eléctrica limpia. Mientras más amplio sea el listado de tecnologías limpias, menor será el costo de incorporarlas al sistema y contar con una matriz de generación eléctrica diversificada (SENER, 2018).

La importancia de esto radica en lo clave que resultan los insumos energéticos, en particular los eléctricos, los cuales permitirán renovar la competitividad del país y mantener un balance eficiente y seguro del sistema eléctrico. La electricidad es el insumo más importante de la economía mexicana, su precio, calidad y confiabilidad de suministro determina, como ningún otro factor, el nivel de competitividad de esta. (Moreno, García-Álvarez, Ramos, & Fernández-Vázquez, 2014) subrayan la importancia de mejorar los costos energéticos para mejorar la competitividad industrial, en particular para la competitividad internacional. Si se quieren tarifas eléctricas más bajas, se necesita generarla a costos menores, transmitirla por todo el territorio nacional de manera eficiente, y distribuirla hasta el usuario más pequeño de manera competitiva (Marcos, 2008). El estudio en este sentido se erige como una necesidad básica para la toma de decisiones en el sector eléctrico y energético en general.

En (Loizou , Chatzitheodoridis, Michailidis , Tsakiri, & Theodossiou, 2015) realizan un análisis de multiplicadores y elasticidades con matrices Insumo-Producto para evaluar la dinámica del sector energético griego en términos de producción total, empleo y los ingresos familiares. Un análisis similar realiza en (Topcuoğlu & Oral, 2020) examinando la importancia, la estructura y la relación de la industria energética con otras industrias a través del uso de tablas Insumo-Producto en Turquía. Ambos concluyen que los sectores y los productos energéticos secundarios tienen fuertes vínculos en la economía y poseen la capacidad de impulsar la actividad económica de un país a través de exportaciones y vínculos intersectoriales, incluso si no es una economía productora de petróleo crudo.

(Moreno, García-Álvarez, Ramos, & Fernández-Vázquez, 2014) destaca la importancia de los costos en combustibles fósiles como el gas natural, el carbón y el petróleo, como ningún otro dentro de la generación del sector eléctrico, en explicar las variaciones de los precios eléctricos para consumidores industriales en España y en la determinación de la competitividad y estabilidad de estos. (Santillán Vera, de la Vega Navarro, Rodríguez Peña, & García Manrique, 2023) también destaca la parte ambiental y alerta sobre el uso desmedido de las

centrales de ciclo combinado y el gas natural como alternativa a combustibles fósiles más “pesados” como el carbón y el petróleo. La codependencia con este recurso aumenta el crecimiento de emisiones gases de efecto invernadero y debe ser sustituida por una composición de gas natural, tecnologías limpias y eficiencia energética en favor de evitar esta situación.

(Vaca, Núñez, & Kido, 2019) simula varios escenarios de aumento en los costos de la electricidad en México y profundizan sobre los efectos que provocan en la economía mexicana mediante un modelo de precios. Muestra una alta dependencia de la economía mexicana a los combustibles fósiles y rescatan la necesidad de establecer programas de generación de electricidad con fuentes alternativas de energía. Su investigación continua en (Vaca Serrano & Kido Cruz, 2021) donde identifica los sectores claves en el uso de energía eléctrica, calcula las emisiones de CO_2 correspondientes a algunas tecnologías de generación y en base a los resultados propone una estrategia de eficiencia en el consumo de electricidad y mitigación para el aparato productivo nacional.

1.3 Problema de Investigación

Ante la tercera revolución energética, la transición hacia la generación de electricidad mediante tecnologías alternativas a las fósiles es una necesidad de tres índoles: ambiental, energética y económica. La modernización y la diversificación de este sector significa eficiencia en la producción, disminución de costos y competitividad de los precios finales.

El sector eléctrico no ha sido estudiado, al menos para el caso de México, desde un modelo basado en Matrices de Contabilidad Social, las cuales incluyen las relaciones adicionales a las interindustriales como el pago a factores y el consumo privado de los hogares. Los resultados obtenidos de este tipo de matrices incorporan todo el proceso de redistribución del ingreso a partir del pago de salarios y el regreso de ese dinero hacia las industrias en forma de consumo final de bienes y servicios, completando el ciclo económico.

De los modelos multisectoriales se desprenden análisis de programación, planeación y política industrial que ayudan a dar luz sobre cómo debería estar compuesto el sistema eléctrico, particularmente la generación de electricidad, para que sea más eficiente. La reforma energética de 2013 no incluyó ningún estudio de este tipo, dejando el destino de la industria en manos del mercado. Sin embargo, México puede y debe priorizar el desarrollo de energías renovables y la generación limpia, el Mercado Eléctrico Mayorista, así como muchas otras instituciones creadas a partir de la reforma son herramientas poderosas para lograr ese objetivo. En base a todas las consideraciones antes descritas se determinan los objetivos generales y específicos de la presente tesis.

1.3.1 **Objetivo General**

Estudiar el sector eléctrico desde una perspectiva de eficiencia económica a través de un modelo de precios, evidenciar el efecto diferenciado que la estructura de costos de la generación eléctrica por tecnología provoca en los precios finales de la electricidad, y como esto repercute en el funcionamiento de la economía, la seguridad energética y las emisiones de México.

1.3.2 **Objetivos específicos**

- Caracterizar el sector eléctrico a través de los efectos multiplicadores en los precios y la producción nacional de México.
- Contrastar por tipo de tecnología de generación, los impactos que tienen los costos de las energías sobre el resto de los sectores productivos y residenciales.
- Con base a este análisis realizar proyecciones para diferentes escenarios, determinando posibles variaciones de la matriz de generación eléctrica y su incidencia sobre la economía mexicana y el medioambiente.

1.3.3 **Hipótesis**

La transición a energías limpias significa un cambio en la estructura de insumos de la generación eléctrica, traduciéndose en precios finales más baratos de la

electricidad industrial y residencial, en una mayor seguridad ante variaciones en los costos de las energías primarias y en un impacto medioambiental positivo.

2. Metodología

Para cumplir con los objetivos y los propósitos de este documento y alcanzar la profundidad anteriormente descrita en el análisis y estudio, se pretende la construcción de un modelo de precios con Matrices de Contabilidad Social. Esto implica varios retos, por un lado, es necesario construir una matriz de Contabilidad Social a través de las estadísticas nacionales disponibles.

Una vez construido el modelo resulta necesario definir a través de que metodologías se extraerá información valiosa y conclusiones que aporten al debate sobre el problema energético mexicano. En este caso se realizará un análisis basado en un modelo de precios que describa los efectos en la estructura de los costos de producción debido a variaciones en los precios de los sectores energéticos, particularmente el sector eléctrico.

El análisis de multiplicadores y elasticidades es típico en estos casos, sin embargo, existen otras metodologías que aportan información adicional y descomponen incluso estos multiplicadores en diferentes efectos para su estudio. Se incluyen entre otros, la metodología de descomposición de Stone (Stone, 1981) para analizar efectos directos, indirectos e inducidos; el análisis de ruta (Defourny & Thorbecke, 1984) para el estudio de las trayectorias que trazan los efectos en la estructura de costos y el cálculo de índices de Rasmussen (Rasmussen, 1957) para la clasificación de los sectores.

2.1 Matrices de Contabilidad Social

Primeramente, es necesario presentar el marco teórico de la metodología utilizada, en este caso la herramienta de análisis consiste en las Matrices de

Contabilidad Social. Cuando el Sistema de Cuentas Nacionales (SCN) se combina con la Matriz Insumo Producto, incorporando las actividades interindustriales junto con los consumos y producciones finales, se obtiene un panorama comprensivo del sistema económico de una región. Las transacciones y transferencias descritas en los cuadros de oferta y utilización entre instituciones asociadas a las industrias y los productos descritos pueden ser inspeccionadas de manera más profunda al interesarnos por el lugar donde ocurren estos intercambios, es decir los mercados.

Las demandas y ofertas entre los consumidores y negocios ocurren primeramente en el mercado de productos con el consumo de bienes y servicios; y luego en el mercado de recursos con las transacciones de factores en el valor agregado de la producción tales como sueldos y salarios de empleados, ganancias, impuestos y consumo de capital fijo incluyendo la tierra.

Si ahora incorporamos el papel de las instituciones sociales, así como los consumos e ingresos de los individuos, este marco ya de por sí explicativo nos provee una caracterización más detallada y la posibilidad de ampliar los estudios de problemas como las características del empleo, los costos laborales y la demografía de la fuerza de trabajo comprendiendo el mercado de oferta y demanda laboral.

La incorporación de esta información, así como la coherencia entre las estadísticas de varias fuentes y su conciliación con las cuentas económicas básicas son posibles a través de la herramienta conocida como Matriz de Contabilidad Social (MCS). La MCS constituye una generalización del SCN donde la característica más novedosa que se le adiciona es la incorporación de transacciones y transferencias entre instituciones relacionadas con la distribución del ingreso en toda la economía, véase Figura 2.1.

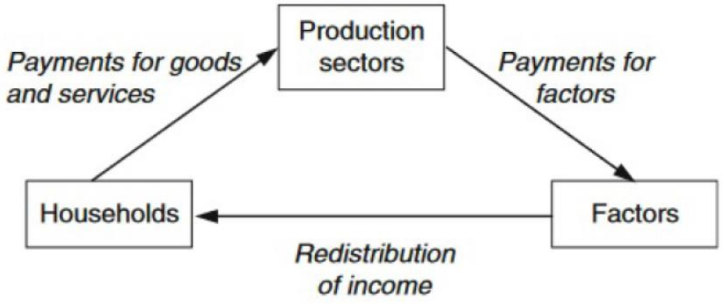


Figura 2.1 Flujos de ingreso de las principales cuentas de una MCS. Fuente: (van Leeuwen, 2010)

Al incorporar la MCS al marco de oferta y utilización, se puede desarrollar un modelo extendido de insumo producto el cual puede ser utilizado en el análisis de políticas sociales y económicas en un modo mucho más claro y comprensible. La MCS puede ser resumida como un sistema de equilibrio general de las cuentas de ingresos y gastos que vincula las actividades productivas, los factores de producción y las instituciones de una economía. Su estructura general es la siguiente detallada en la Tabla 2.1:

Por / Para		Cuentas Endógenas: Producción	Cuentas Endógenas: Factores	Cuentas Endógenas: Inst y Hog	Cuentas Exógenas	Total
Cuentas Endógenas	Producción	$\mathbf{S}$		$\mathbf{C}$	$\mathbf{f_p}$	$\mathbf{x_P}$
	Factores	$\mathbf{V}$			$\mathbf{f_F}$	$\mathbf{x_F}$
	Inst y Hog		$\mathbf{Y}$	$\mathbf{H}$	$\mathbf{f_H}$	$\mathbf{x_H}$
Cuentas Exógenas		$\mathbf{e_p}$	$\mathbf{e_F}$	$\mathbf{e_H}$		
Total		$\mathbf{x'_p}$	$\mathbf{x'_F}$	$\mathbf{x'_H}$		

Tabla 2.1 Estructura general de una MCS. Fuente: Elaboración propia guiada por (van Leeuwen, 2010)

La submatriz $\mathbf{S}$ representa los flujos interindustriales domésticos de compras y ventas entre las actividades productivas, $\mathbf{V}$ son los pagos a factores de producción

primarios: trabajo y capital, algunos de estos ingresos como trabajo y parte de las ganancias pasan por un proceso de distribución hacia los hogares descrito en $\mathbf{Y}$ junto con los correspondientes impuestos del gobierno. Por último, dentro de las cuentas endógenas está el consumo de los hogares en bienes y servicios representado en $\mathbf{C}$ y las trasferencias entre las propias instituciones y hogares que compone el apartado $\mathbf{H}$.

Las cuentas exógenas $\mathbf{f_p}$, $\mathbf{f_F}$ y $\mathbf{f_H}$ representan la demanda final exógena, generalmente incluye la inversión, los gastos de gobierno y las exportaciones. La fila de cuentas exógenas $\mathbf{e_p}$, $\mathbf{e_F}$ y $\mathbf{e_H}$ representan cuentas que balancean los ingresos con los gastos, donde se incluyen los ahorros, los impuestos y las importaciones. Por tanto, el total por filas y por columnas, de ingresos y gastos respectivamente, debe ser el mismo representado en la Tabla 2.1 por $\mathbf{x_P}$, $\mathbf{x_F}$ y $\mathbf{x_H}$.

2.2 Modelo de Leontief

Mediante esta información económica observada, donde se describen los flujos de productos y transacciones desde cada sector industrial, institucional, financiero o de hogares interpretado como productor hacia cada uno de los otros sectores, incluyéndose a sí mismo, considerados como consumidores; se puede desarrollar, dentro del marco analítico desarrollado por Wassily Leontief en la década de 1930, el modelo que lleva su nombre y que también es conocido como análisis Insumo-Producto. Este marco analítico se puede extender hacia los modelos tipo SAM, los cuales utilizan como base del modelo una Matriz de Contabilidad Social envés de una tabla Insumo-Producto.

Las ventajas de utilizar una Matriz de Contabilidad Social sobre una de Insumo-Producto son bastante claras al conocer todo lo descrito en la sección anterior. Añadir una dimensión adicional a cómo funcionan los flujos de ingresos en una economía permite reconocer las trayectorias que estos trazan y el papel que juegan las instituciones y la redistribución del ingreso en el comportamiento de una economía. Una parte importante de las MCS son las cuentas de hogares ya que

gran parte de las interacciones económicas suceden en estas cuentas, principalmente cuando son desagregadas por nivel de ingreso.

En cuanto a las desventajas estas no difieren de las padecidas por las matrices Insumo-Producto, ya que se basan en el mismo modelo teórico. Para construir un modelo SAM, se deben hacer suposiciones similares a la suposición de coeficientes fijos para las industrias. El resultado es que, además de los coeficientes técnicos fijos del modelo Insumo Producto, se supone que la distribución del ingreso nominal entre salarios y ganancias es fija. Además, la distribución de los ingresos salariales y de utilidades a los hogares se da en proporciones fijas, al igual que las tasas promedio de impuestos y ahorro de los hogares, y la composición sectorial del consumo de los hogares.

Precisamente los coeficientes fijos son la principal fuente de críticas al modelo. Implica economías constantes a escala, tecnología lineal de producción, factores de producción absolutamente complementarios y que el modelo responde solo a cambios en la demanda, obviando posibles cuellos de botella en la oferta de insumos.

No obstante, el uso práctico de estas matrices, en particular las MCS, es más que pertinente. No solo consisten en una manera eficiente de presentar una cantidad de información bastante amplia y la posibilidad de extraerle aún más información, sino que las conclusiones derivadas de estas son perfectamente aplicables a múltiples estudios del funcionamiento de una economía particular. Las matrices Insumo Producto y de Contabilidad Social deben entenderse como una foto de la economía de una región para un período específico, de la cual, aunque sabemos que no funciona justo como la observamos, podemos extraer innumerables características de lo que hemos capturado. En la presente sección se describe el modelo tradicional cuantitativo y luego se extiende al trabajo con el modelo de precios.

2.2.1 **Modelo de producción**

Los cuadros de Contabilidad Social pueden interpretarse como un sistema de ecuaciones lineales. Desde esta perspectiva se puede desarrollar el modelo de Leontief, en este caso, para la MCS. Denotando la matriz de cuentas endógenas que incluye las submatrices $\mathbf{S, V, Y, C}$ y $\mathbf{H}$; como la matriz $\mathbf{Z}$ de dimensión $\boldsymbol{n}$ y a sus elementos como $\boldsymbol{z_{ij}}$ la Tabla 2.1 puede ser representada de la siguiente forma utilizando las sumas por filas:

$$\begin{gathered} z_{11} + z_{12} + \cdots + z_{1n} + f_1 = x_1 \\ z_{21} + z_{22} + \cdots + z_{2n} + f_2 = x_2 \\ \vdots \\ z_{n1} + z_{n2} + \cdots + z_{nn} + f_n = x_n \end{gathered}$$

Lo que se resume en:

$$x_i = \sum_{j=1}^{n} z_{ij} + f_i \qquad i = 1,2,\dots,n \tag{2.1}$$

Al dividir las columnas de la matriz $\mathbf{Z}$ por los totales de producción en cada cuenta x_i, se obtiene la matriz de coeficientes técnicos $\mathbf{A}$, los cuales son la primera piedra angular del análisis Insumo-Producto en general, incluyendo las matrices MCS. Estos coeficientes son fijos y se interpretan como la cantidad de centavos necesarios de cada insumo para generar un peso de producto final, por lo que las funciones de producción de cada sector son funciones de producción de Leontief, función de proporciones fijas o de insumos complementarios perfectos.

Los coeficientes técnicos quedan definidos como la razón entre los elementos de las columnas de la matriz $\mathbf{Z}$ y la producción total $\mathbf{x}$ de dichas columnas. La información recopilada en $\mathbf{Z}$ es la base para definir dichas proporciones. Esto significa que la función de producción y los coeficientes técnicos son deducidos de las estadísticas obtenidas de la información recopilada por Cuentas Nacionales a través de encuestas, y luego son estos coeficientes los que determinan el paso analítico al desarrollo del modelo MCS.

$$x_j = min\left(\frac{z_{1j}}{a_{1j}}, \frac{z_{2j}}{a_{2j}}, \dots, \frac{z_{nj}}{a_{nj}}\right) \qquad j = 1,2, \dots, n \tag{2.2}$$

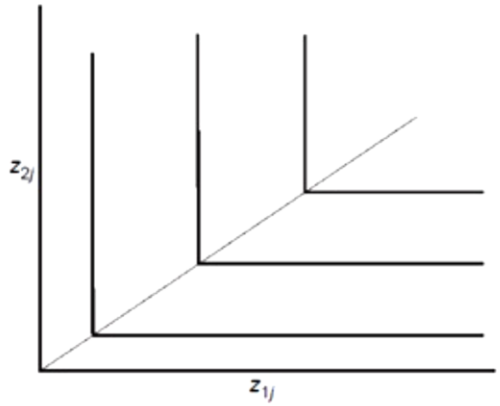


Figura 2.2 Función de producción de Leontief para dos insumos. Fuente: (Miller & Blair, 2009).

La ecuación (2.2) refleja claramente que solo se podrá producir el mínimo de las razones $\frac{z_{ij}}{a_{ij}}$ por tanto, para aumentar la producción no basta con que algunos insumos aumenten y otros no, todos deben hacerlo en la misma proporción. Por otro lado, la función de producción refleja los rendimientos constantes a escala anteriormente mencionados: si multiplicamos todos los factores de producción por un valor la cantidad de producto resultante será proporcional a dicho valor.

La segunda piedra angular del análisis corresponde a la inversa de Leontief, la cual se obtiene a partir de la matriz de coeficientes técnicos. Primeramente, notemos que el sistema de ecuaciones (2.1) en notación matricial se expresa como sigue:

$$\mathbf{x} = \mathbf{Zi} + \mathbf{f} \tag{2.3}$$

donde $\mathbf{i}$ es un vector columna con todos sus elementos igual a 1. Ahora, expresamos las sumas por columnas de la matriz $\mathbf{Z}$ en términos de la matriz $\mathbf{A}$

$$\mathbf{Zi} = \mathbf{Ax}$$

Y sustituyendo en la ecuación (2.3) se tiene

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{f}$$

Por último, despejando el vector $\mathbf{x}$ de producción total se obtiene la inversa de Leontief.

$$\begin{aligned} \mathbf{x} - \mathbf{A}\mathbf{x} &= \mathbf{f} \\ (\mathbf{I} - \mathbf{A})\mathbf{x} &= \mathbf{f} \\ \mathbf{x} &= \underbrace{(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}}_{\text{Inversa de Leontief}} \mathbf{f} \end{aligned}$$

La inversa de Leontief es también conocida en la literatura como la matriz de multiplicadores y denotada usualmente como $\mathbf{M}$ o $\mathbf{L}$. La última ecuación permite obtener los totales de producción correspondientes a una demanda final $\mathbf{f}$ arbitraria. De esta forma podemos sustituir $\mathbf{f}$ por cualquier demanda que se quiera estudiar y obtener cuanta producción es necesaria para satisfacerla, o conocer los efectos en toda la economía y en los totales de producción que genera una variación en la demanda exógena.

Este estudio de la variación en la producción, originada por el cambio de una variable exógena, tal como la demanda final, se realiza a través de la versión cuantitativa del modelo de Leontief, o modelo de empuje por el lado de la demanda (Vaca Serrano, Kido Cruz, & Nuñez Rodriguez, 2018). El análisis estándar se realiza con vectores $\mathbf{f}$ con ceros en todos sus elementos exceptuando un elemento con valor igual a 1. El vector $\mathbf{x}$ resultante coincide con la suma por columna para dicho sector en la matriz $\mathbf{M}$, todas estas sumas por columnas toman el nombre de multiplicadores, de ahí su denominación.

2.2.2 **Modelo de precios**

Hasta ahora siempre se ha hablado en términos de producción. Referirse a los elementos de $\mathbf{f}$ y $\mathbf{x}$ de esta forma, ya sea en términos físicos o monetarios — en lo cuál por lo regular se expresan todos los valores de la Tabla 2.1 y de modo general todo el Sistema de Cuentas Nacionales — implica una suposición importante: los precios son invariantes en cualquier escenario que se estudie o simulación que se realice.

Si consideramos los valores en términos monetarios los valores de la producción serán el resultado de las cantidades físicas por el precio de dichos productos. Esto en la realidad es mucho más complejo, pero de forma muy simplificada y para ilustrar el punto teórico en cuestión, cada valor de la matriz $\mathbf{Z}$ se podría describir a través de la siguiente ecuación:

$$z_{ij} = t_i p_i \tag{2.4}$$

donde t_i representaría la cantidad de producto comprado por la cuenta j y vendido por la cuenta i, y p_i su precio correspondiente, para una transacción total de z_{ij} desde la cuenta j a la cuenta i. Al suponer los precios fijos, entonces las variaciones en z_{ij} se deberán a cambios en la cantidad de producto t_i, de aquí que tome el nombre de Modelo de Producción y se interpreten sus resultados en estos términos.

Una inspección adicional a la Tabla 2.1 permite definir una nueva relación de sus datos analizando las sumas, esta vez por columnas.

$$\begin{gathered} z_{11} + z_{21} + \cdots + z_{n1} + e_1 = x_1 \\ z_{12} + z_{22} + \cdots + z_{n2} + e_2 = x_2 \\ \vdots \\ z_{1n} + z_{2n} + \cdots + z_{nn} + e_n = x_n \end{gathered}$$

Dividiendo cada ecuación por el x_j correspondiente y definiendo $v_j = e_j / x_j$ como elementos del vector $\mathbf{v}$ se obtiene las siguientes identidades:

$$\begin{gathered} a_{11} + a_{21} + \cdots + a_{n1} + v_1 = 1 \\ a_{12} + a_{22} + \cdots + a_{n2} + v_2 = 1 \\ \vdots \\ a_{1n} + a_{2n} + \cdots + a_{nn} + v_n = 1 \end{gathered}$$

que en notación matricial resulta

$$\mathbf{i}'\mathbf{A} + \mathbf{v}' = \mathbf{i}'$$

El lado derecho de esta ecuación representa los costos de los insumos por unidad del producto. Por tanto, ilustra las unidades de medida únicas en la tabla del año base: las cantidades que se pueden comprar por $ 1.00 (Miller & Blair, 2009). Al

denotar estos índices de precios del año base en un vector $\mathbf{p}$ se desarrolla para obtener el llamado modelo de precios:

$$\mathbf{p}'\mathbf{A} + \mathbf{v}' = \mathbf{p}'$$

Despejando el vector de índices de precios $\mathbf{p}$ obtenemos una fórmula, nuevamente con la inversa de Leontief, que permite modelar la variación en los precios finales causada por un cambio en los costos exógenos $\mathbf{v}'$:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}' - \mathbf{p}'\mathbf{A} &= \mathbf{v}' \\ \mathbf{p}'(\mathbf{I} - \mathbf{A}) &= \mathbf{v}' \\ \mathbf{p}' &= \mathbf{v}' \underbrace{(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}}_{\text{Inversa de Leontief}} \\ \mathbf{p}' &= \mathbf{v}'\mathbf{M} \end{aligned}$$

Esta versión dual del modelo regular se aplica en la simulación de procesos inflacionarios de empuje de costos. Impulsado por el vector de costos exógenos $\mathbf{v}'$ a diferencia del modelo de producción el cual es impulsado por la demanda exógena f . Una variación en los costos exógenos para un sector producirá un aumento del precio de su producto, el cual es insumo de otros sectores que aumentarán su precio en consecuencia. Los efectos en toda la economía de variaciones unitarias en el vector $\mathbf{v}'$ se describen, esta vez por filas, en la matriz $\mathbf{M}$.

En este caso, el supuesto que se está adoptando es que las cantidades de producción se mantienen fijas y la variación ocurre en los precios. En la fórmula (2.4), las cantidades t_j serán fijas y los cambios en los flujos z_{ij} se deberán a cambios en los precios p_i de dichos productos. Se mantienen también los mismos supuestos estrictos y estándares de la versión cuantitativa junto con la suposición de que cada incremento en el precio pasa enteramente hacia el comprador tomador de precios cuya demanda no reacciona en lo absoluto (Oosterhaven, 1996).

2.2.3 **Modelos de Equilibrio General Computable**

Como se vio, las Matrices de Contabilidad Social (MCS) y los modelos de Leontief basados en el análisis insumo-producto, proporcionan una estructura contable y metodológica esencial para entender las interacciones económicas dentro de una economía. Estos modelos tienen supuestos clave que, aunque útiles hasta cierto punto, también presentan limitaciones que justifican el uso y desarrollo de otros modelos más avanzados como los de Equilibrio General Computable (EGC).

A diferencia de los modelos de Leontief, los modelos EGC permiten una mayor flexibilidad en la tecnología de producción, incluyendo la posibilidad de sustitución entre insumos. Se relaja el supuesto de precios o cantidades fijas y se modelan cómo se ajustan para equilibrar la oferta y la demanda en todos los mercados. Este enfoque permite analizar los efectos de las políticas económicas y otros choques externos sobre la estructura de precios de la economía, y cómo estos cambios afectan a su vez a la producción, el consumo, y el comercio.

Esto es crucial para analizar cómo las economías se adaptan a cambios en precios relativos, por ejemplo, debido a políticas comerciales o innovaciones tecnológicas. Incluso es posible incorporar elementos dinámicos y estocásticos, permitiendo analizar cómo las economías se adaptan a lo largo del tiempo ante choques y políticas, y cómo la incertidumbre afecta a las decisiones económicas. Los modelos de Leontief ofrecen herramientas valiosas principalmente para analizar las estructuras económicas y los flujos de producción, los modelos de EGC proporcionan un marco más flexible y comprensivo para entender las respuestas dinámicas de una economía a diversas políticas y choques externos.

Todas estas ventajas sin duda representan un avance teórico significativo para un correcto y más profundo análisis del tema desarrollado en la presente investigación. A pesar de que pudiera ser una crítica válida a los medios utilizados para el análisis realizado, el alcance de esta tesis no incluye modelos de este tipo. Esto se debe principalmente a que el desarrollo de un modelo EGC implica ajustar parámetros del modelo, como elasticidades de sustitución y preferencias, que a

menudo requiere información adicional no contenida directamente en la MCS. Unido a que la Matriz de Contabilidad Social utilizada se construyó prácticamente desde su base, incluyendo una apertura al sector eléctrico que requirió la búsqueda e investigación tanto de datos como de metodologías para su construcción; esto repercutió en que por cuestiones de tiempo y forma no alcanzara para el desarrollo de un modelo superior y más flexible.

Esto no significa por ningún motivo que la presente herramienta de investigación no sea válida y no aporte hacia la discusión del sector eléctrico mexicano o la proyección de su comportamiento de acuerdo con la matriz de generación eléctrica. En primera instancia la MCS nos da una panorámica sobre el sector eléctrico y su interrelación con los demás sectores, el papel que juega y su estado actual en la economía mexicana. Aunque la simulación de escenarios no es ideal a nivel teórico, realizarla con MCS nos brinda una primera aproximación a las consecuencias de los supuestos y variaciones utilizadas para su construcción, y su repercusión sobre el futuro del sector y el cumplimiento de los objetivos de la Agenda 2030 y el Acuerdo de Paris.

Por otra parte, el presente trabajo significa en sí mismo un avance significativo para la construcción de un modelo de Equilibrio General Computable. La utilización de una Matriz de Contabilidad Social en la construcción de EGC ofrece un marco robusto y coherente que facilita la calibración, validación, y realización de estos modelos. Su uso mejora significativamente la precisión, relevancia y capacidad del análisis, por lo que puede considerarse como un paso inmediatamente anterior a la construcción del modelo EGC. Por tanto, esta Matriz de Contabilidad Social aporta en este sentido y exhorta implícitamente a realizar investigaciones del sector eléctrico usándola como base para modelos más avanzados y que puedan aportar resultados más valiosos a una discusión tan relevante como esta.

2.3 Multiplicadores y descomposición de Stone

Como se ha mencionado, una ventaja importante de las cuentas de contabilidad social sobre las cuentas de Insumo-Producto es el modelado de la vinculación entre la generación de ingresos y la distribución de estos, tal como se identifica en la Matriz de Contabilidad Social, Tabla 2.1 Estructura general de una MCS. Fuente: Elaboración propia guiada por Tabla 2.1. El resultado es un cierre de modelo más preciso cuando los hogares son tratados como una variable endógena en modelos multisectoriales de precio fijo.

Los sectores productivos al realizar sus actividades económicas generan un valor agregado que consiste casi en su totalidad en remuneración a asalariados y en excedente bruto de operación. Las cuentas de instituciones reciben ingresos por factores de las cuentas de valor agregado y las distribuyen a otras instituciones que generan demanda final. Las filas para los hogares representan los ingresos brutos del trabajo, ingresos de los propietarios, ingresos por ganancias de capital de las empresas e ingresos por transferencias del gobierno y del exterior. Estos son utilizados para el consumo, tanto por los hogares como otras instituciones, de productos finales provenientes de los sectores productivos cerrando el flujo económico representado en la MCS.

La evaluación del efecto en una economía ante elementos cambiantes que son exógenos al modelo propuesto se denomina efectos multiplicadores. Estos son el resultado de todo el ciclo económico anteriormente expuesto y se calculan a través de la inversa de Leontief como las sumas de las columnas o de las filas de $\mathbf{M}$, dependiendo de si el análisis es sobre la producción o sobre los precios, véase secciones 2.2.1 y 2.2.2.

La noción de multiplicadores se basa en la diferencia entre el efecto inicial de un cambio exógeno y los efectos totales de ese cambio:

$$\mathbf{M} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} = \mathbf{I} + \mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \mathbf{A}^3 + \cdots$$

Los efectos totales descritos en la matriz $\mathbf{M}$ incluyen el efecto inicial de la matriz $\mathbf{I}$, el efecto directo de la matriz $\mathbf{A}$, y todos los efectos consecuentes descritos en las matrices $\mathbf{A}^2 + \mathbf{A}^3 + \cdots$ de efectos indirectos.

El multiplicador de producción se define entonces como el valor total de la producción en todos los sectores de la economía que es necesario para satisfacer el valor de un peso de la demanda final de la producción del sector j (Miller & Blair, 2009). Para el caso del modelo de precios este se define como el aumento en los precios finales en toda la economía debido al aumento de un peso en los costos del sector i.

Una decisión clave en el empleo de multiplicadores en cualquier análisis es determinar qué sectores serán vistos como exógenos al modelo y cuáles serán incorporados endógenamente su estructura. Dado que las MCS generalmente están diseñadas para tratar de capturar transacciones y transferencias entre todos los agentes económicos en un sistema, es una decisión algo arbitraria en cuanto a qué transacciones y transferencias se consideran exógenas para fines de modelado. En particular para el cálculo de multiplicadores, las cuentas del gobierno, el capital y el "resto del mundo" suelen considerarse exógenas.

2.3.1 **Descomposición multiplicativa**

Para realizar la descomposición multiplicativa de $\mathbf{M}$, comencemos por notar que la matriz $\mathbf{A}$ tal y como se ha definido en 2.2.1 se compone de varias sub matrices, cada una correspondiente a los flujos descritos en la Tabla 2.1:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{S} & 0 & \mathbf{C} \\ \mathbf{V} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Y} & \mathbf{H} \end{bmatrix}$$

De acuerdo y siguiendo a (Holland & Wyeth, 1993) la matriz $\mathbf{A}$ se puede descomponer en la suma de dos matrices $\mathbf{Q}$ y $\mathbf{R}$ como sigue:

$$\mathbf{A} = \mathbf{Q} + \mathbf{R} \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{S} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{H} \end{bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \mathbf{C} \\ \mathbf{V} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Y} & 0 \end{bmatrix}$$

Y definiendo $\mathbf{T} = (\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1}\mathbf{R}$ podemos descomponer la matriz $\mathbf{M}$ de la siguiente manera:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M_2}\mathbf{M_3}\mathbf{M_1}$$

Donde

$$\mathbf{M_1} = (\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \quad \mathbf{M_2} = \mathbf{I} + \mathbf{T} + \mathbf{T^2} \quad \mathbf{M_3} = (\mathbf{I} - \mathbf{T^3})^{-1}$$

La estructura de las matrices $\mathbf{M_1}$, $\mathbf{M_2}$ y $\mathbf{M_3}$ en términos de las sub matrices $\mathbf{S}$, $\mathbf{V}$, $\mathbf{Y}$, $\mathbf{C}$ y $\mathbf{H}$ puede encontrarse en (Pyatt & Round, 1985), por razones de espacio no se incluyen aquí.

En el contexto de las matrices de contabilidad social, donde se originó gran parte del trabajo fundamental sobre descomposiciones de multiplicadores, se dice que $\mathbf{M_1}$ captura un efecto de "transferencia", $\mathbf{M_2}$ incorpora efectos de "bucle abierto" y $\mathbf{M_3}$ contiene efectos de "bucle cerrado" (Pyatt & Round, 1985). Estas etiquetas tienen una lógica más clara en el marco interregional describiendo los efectos intrarregionales, los efectos de spillovers interregionales y la retroalimentación interregional.

2.3.2 **Descomposición aditiva de Stone**

Los multiplicadores aditivos fueron primeramente propuestos por (Stone, 1981) y luego desarrollados por (Pyatt & Round, 1985). Es conveniente formular estos multiplicadores con el fin de que, tal como dice el nombre, la matriz $\mathbf{M}$ sea el resultado de una suma y no de multiplicaciones de matrices de multiplicadores. Estos se definen a través de la descomposición multiplicativa:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M_2}\mathbf{M_3}\mathbf{M_1}$$
$$\mathbf{M} = \mathbf{M_1} + \mathbf{M_2}\mathbf{M_3}\mathbf{M_1} - \mathbf{M_3}\mathbf{M_1} + \mathbf{M_3}\mathbf{M_1} - \mathbf{M_1}$$
$$\mathbf{M} = \mathbf{M_1} + [\mathbf{M_2}\mathbf{M_3}\mathbf{M_1} - \mathbf{M_3}\mathbf{M_1}] + [\mathbf{M_3}\mathbf{M_1} - \mathbf{M_1}]$$
$$\mathbf{M} = \mathbf{N_1} + \mathbf{N_2} + \mathbf{N_3}$$

Conceptualmente, la descomposición de Stone es más simple que la propuesta por Pyatt y Round. Similarmente a la descomposición anterior, cada matriz

representa un tipo de efecto. $\mathbf{M_1}$ es una matriz diagonal de bloques que define los multiplicadores de "efecto directo" o multiplicadores intragrupo, de cada uno de los grupos del sector (industria, valor agregado e instituciones domésticas) en respuesta a la demanda final especificada de manera exógena. Estos efectos son los provocados por las interacciones hacia dentro de un mismo grupo de cuentas, como lo es por ejemplo las compras y ventas intersectoriales de producción.

La matriz $\mathbf{M_2}$ define los multiplicadores intergrupos. Para una demanda exógenamente especificada en un grupo sectorial - nuevamente, industria, valor agregado o instituciones familiares - estos multiplicadores especifican el impacto generado en otros grupos. Por lo tanto, los elementos diagonales de bloque son todas matrices de identidad ya que esas particiones se relacionan con los impactos dentro del grupo. Los efectos recogidos por $\mathbf{M_2}$ incluyen por ejemplo el aumento de los impuestos a alguna industria sobre el ingreso de los hogares, estos pertenecen a diferentes grupos de cuentas, pero debido a las interacciones entre toda la economía una incide sobre la otra.

Por último, la matriz $\mathbf{M_3}$ define los multiplicadores “extragrupos”, ya que capturan los efectos de retroalimentación entre los grupos del sector. Estos multiplicadores a veces se denominan multiplicadores de “circuito cerrado”, los efectos de captura de las demandas generadas en un grupo producen un efecto en otro que, a su vez, genera un efecto de retroalimentación en el grupo original. Solo las particiones diagonales de bloque serán distintas de cero. Cuando un aumento en la demanda o en los costos de algún producto es exógenamente impuesto sobre un sector, los efectos iniciales recorren los sectores de su propio grupo de cuentas, luego se replican a los restantes y al completar todo el ciclo económico vuelven a afectar al grupo de cuentas original donde se encuentra incluida la cuenta donde ocurrió la variación inicial. Este último efecto es el capturado en la matriz $\mathbf{M_3}$.

2.1 Índices de Rasmussen y clasificación de los sectores.

En el análisis de Leontief la producción de un sector posee dos tipos de efectos económicos sobre los demás sectores de la economía. Si la demanda de un sector aumenta este provocará una demanda adicional sobre los demás sectores para satisfacerla, de esta manera "arrastrará" a los sectores que más necesite para cumplir con la producción inducida por la demanda inicial (Miller & Blair, 2009). Este primer efecto se denomina vinculación hacia atrás, efectos de absorción o "efecto arrastre". Los sectores con mayores efectos de arrastre posibilitan el desarrollo de la economía en general, desde el lado de la demanda, cuando su crecimiento es potenciado.

El segundo efecto sobre la economía de un sector es por el lado de la oferta. El crecimiento de un sector significa que su producto se encuentra disponible para que sea usado como insumo en las demás actividades económicas. Este efecto es conocido como efecto de difusión, vinculación hacia adelante o "efecto de empuje". Los sectores con grandes efectos de este tipo suelen ser indispensables en una economía y su poco desarrollo puede provocar cuellos de botella en la producción, al no satisfacer toda la demanda que de ellos se espera. Desde el punto de vista monetario, estos sectores también son propagadores de costos. Un aumento en el costo, y por tanto de su precio final, sobre un sector con altos índices de difusión provoca que todas las actividades económicas sufran un proceso inflacionario.

La cuantificación de estos efectos, así como la clasificación de los sectores de acuerdo con criterios de arrastre y empuje ha sido ampliamente discutida en la literatura. La forma más simple de medir estos efectos fue la propuesta por (Chenery & Watanabe, 1958) y consiste en la suma de los elementos de la j-ésima columna, o la i-ésima fila de la matriz de coeficientes $\mathbf{A}$, denominados y denotados como efectos directos de arrastre (BL) y de empuje (FL), siguiendo a (Miller & Blair, 2009).

$$BL(d)_j = \sum_{i=1}^{n} a_{ij} \qquad j = 1,2,\dots,n \qquad FL(d)_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \qquad i = 1,2,\dots,n$$

Para capturar los efectos totales — directos e indirectos — se puede calcular la suma para la inversa de Leontief $\mathbf{M}$. Es importante notar que los índices totales coinciden con los multiplicadores descritos en 2.3 y para el caso de los índices directos son iguales a los multiplicadores directos de las descomposiciones multiplicativas ($\mathbf{M_1}$) y aditivas ($\mathbf{N_1}$).

$$BL(t)_j = \sum_{i=1}^{n} m_{ij} \qquad j = 1,2,\dots,n \qquad FL(t)_i = \sum_{j=1}^{n} m_{ij} \qquad i = 1,2,\dots,n$$

A través de estos índices se tiene el cálculo absoluto de los efectos de absorción y difusión. Estos proporcionan información sobre la cantidad de pesos que genera sobre la economía una demanda exógena unitaria sobre el sector de la agricultura o sobre la industria metálica, por poner algunos ejemplos. También se puede cuantificar cuanto afecta a los precios finales de toda la economía un aumento en los costos de un sector en particular.

		Vínculos hacia delante directos o totales	
		Bajo (< 1)	Alto (> 1)
Vínculos hacia atrás directo o totales	Bajo (< 1)	(1) Independiente General	(4) Dependiente de la demanda interindustrial
	Alto (> 1)	(3) Dependiente de la oferta interindustrial	(2) Dependiente General

Tabla 2.2 Clasificación de acuerdo con los resultados de los vínculos hacia detrás y hacia adelante. Fuente: (Miller & Blair, 2009)

Sin embargo, para clasificar los sectores sobre sus niveles de arrastre y/o empuje es necesario normalizar los índices y expresar dichas clasificaciones relativas a algún parámetro. Varias normalizaciones han sido propuesta y usadas en estudios empíricos tales como el “Índice de Poder de Dispersión” propuesto por

(Rasmussen, 1957) y utilizado en (Fuentes & Sastré Gutiérrez, 2001) donde se normaliza con el promedio de los efectos de absorción y difusión.

$$\overline{BL}(t)_j = \frac{BL(t)_j}{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} BL(t)_j} \qquad \overline{FL}(t) = \frac{FL(t)_i}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} FL(t)_i}$$

A través de esta medición relativa se pueden clasificar los sectores de acuerdo con sus vínculos hacia atrás o hacia adelante, véase Tabla 2.2.

Se suele establecer una clasificación en cuatro cuadrantes con las etiquetas (1) generalmente independiente de (sin conexiones fuertes con) otros sectores, (2) generalmente dependiente a (conectado fuertemente con) otros sectores, (3) dependiente de la oferta interindustrial y (4) dependiente de la demanda interindustrial. Otros estudios, como (Dávila Flores, 2019) clasifican estos cuadrantes también como (1) Independientes, (2) Claves, (3) Impulsores y (4) Estratégicos. Esta clasificación responde a un criterio más cercano a la creación de políticas, siguiendo lo que aporta cada uno al desarrollo de la economía.

2.2 Elasticidades totales

Los multiplicadores representan los efectos de modo absoluto, el incremento de un peso sobre la demanda final o sobre los costos exógenos repercute en el producto bruto total o el precio final necesario para equilibrar este cambio. Debido a la diferencia de tamaños entre los sectores, los multiplicadores no son una medida útil o realista cuando se comparan unos con otros ni los efectos que estos producen en la economía. Una actividad productiva puede tener un efecto multiplicador grande y ser a la vez, un sector relativamente pequeño en la economía. Claramente sus efectos sobre el resto de la economía no serán tan significativos, el efecto real de cada sector sobre la economía no está dado solo por su multiplicador.

La idea es medir tanto el estímulo inicial como su efecto en términos porcentuales, el cambio porcentual en la producción total (ingresos o empleo, etc.) debido a un

cambio porcentual en la demanda final de una industria determinada. Estas medidas de "cambio porcentual / cambio porcentual" se llaman "elasticidades" en términos económicos (Miller & Blair, 2009), más específicamente elasticidad producto-demanda final. Para el caso del modelo de precios la elasticidad sería el cambio porcentual que se genera en los precios finales totales debido a un cambio inicial unitario del 1% en los costos exógenos del sector. En este caso estamos en presencia de una elasticidad costo-precio final.

Las elasticidades totales toman en cuenta la dimensión de los sectores económicos dentro de toda la actividad económica y lo cuantifican en conjunto con su propiedad para transmitir a otros sectores los cambios en su demanda o en sus costos. En otras palabras, las elasticidades totales proporcionan una medida más completa del impacto que un sector determinado tiene en la economía en su conjunto, tomando en cuenta tanto la magnitud de los cambios en la demanda como la importancia relativa del sector en la economía.

La metodología del cálculo de elasticidades será explicada tal y como aparece en (Dávila Flores, 2019). El primer cálculo es el del ponderador de la actividad económica que consiste en el cociente de la demanda final exógena (f_i) dividido entre el producto bruto total de toda la economía ($\mathbf{i}'\mathbf{x}$):

$$f_i/\mathbf{i}'\mathbf{x}$$

Este ponderador es multiplicado por el multiplicador de producción para obtener las elasticidades totales de producción:

$$oe_j = m(o)_j[f_i/\mathbf{i}'\mathbf{x}]$$

Donde $m(o)_j$ es la notación del multiplicador de producción (*output*), y oe_j la elasticidad total de producción (*output elasticity*) del sector *j*. El ponderador representa la medida relativa en base a la cual las elasticidades pueden ser comparadas posteriormente. La interpretación por tanto se realiza en porcientos, un cambio de un por ciento sobre el sector origen provoca un cambio de x porciento en el producto bruto de toda la economía.

Además, esta medida puede ser reformulada de acuerdo con el indicador con que se requiera comparar los sectores. De esta forma, en vez de utilizar toda la demanda final $\mathbf{f}$, se pueden ponderar solo las exportaciones (k).

$$oe_j = m(o)_j[k_i/\mathbf{i}'\mathbf{x}]$$

De forma equivalente se pueden calcular las elasticidades totales para variables como el empleo ($\mathbf{t}$), los salarios ($\mathbf{w}$), el valor agregado ($\mathbf{va}$) o cualquier otra que interese de acuerdo con el análisis realizado. Para ello se deben recalcular los multiplicadores pre multiplicando a la inversa de Leontief $\mathbf{M}$ por matrices diagonales con los coeficientes correspondientes a cada variable. Para el caso del empleo se denotaría esta matriz diagonal como $\hat{\mathbf{t}}$:

$$m(t)_j = \mathbf{i}'\hat{\mathbf{t}}\mathbf{M}$$

En cada caso, el análisis se hace en las unidades de medida de cada variable. Por ejemplo, la elasticidad total del empleo nos indica cuanto cambia el empleo en toda la economía cuando aumenta la producción bruta en un sector en la cantidad necesaria para generar un empleo adicional (Dávila Flores, 2019). En el análisis presente interesan también las elasticidades correspondientes a los cambios en los precios provocados por variaciones en los costos, en particular de las importaciones. Su cálculo se fórmula de la siguiente forma:

$$pe_j = m(p)_j[e_i/\mathbf{i}'\mathbf{x}]$$

Donde e_i son los costos exógenos del sector j que se pueden sustituir por las importaciones, y $m(p)_j$ son los multiplicadores de precios definidos como:

$$m(p)_j = \mathbf{M}\mathbf{i}$$

2.3 Análisis de ruta

Debido a que el SAM es un sistema de datos integral, esencialmente de equilibrio general, en el modelo de precios toda la red a través de la cual se transmite la influencia de un costo se puede identificar y especificar a través del

análisis de ruta estructural. Al analizar los componentes estructurales aislados se gana conocimiento sobre los mecanismos de transmisión de los precios y sus implicaciones para las políticas públicas y el bienestar. Esta metodología proporciona una forma alternativa y mucho más detallada de descomponer los multiplicadores, en comparación con el tratamiento tradicional de Stone y Pyatt y Round (descomposición aditiva y multiplicativa).

Para ir un paso más allá y comprender las interconexiones entre las diferentes cuentas, es necesario identificar y reconocer las vías por las cuales se transmiten los costes, los caminos por los cuales viaja. El análisis de estas trayectorias es abordado y desarrollado como metodología en (Defourny & Thorbecke, 1984) y extendido en (Roland-Holst & Sancho, 1995). En (Santos, 2004) se modela el endeudamiento de la economía portuguesa a través de un modelo MCS y se utiliza el análisis de ruta para identificar rublos y políticas que pudieran contribuir a mejorar la situación.

A pesar de que la descomposición de Stone es reveladora al desglosar los efectos dentro y entre las tres cuentas endógenas y al enfatizar la importancia del equilibrio general en oposición al análisis de equilibrio parcial de una economía, desde el punto de vista de las políticas, esta tiene una utilidad operativa limitada, ya que no identifica los diversos caminos por los que viaja una inyección determinada. En particular, no revela los sectores individuales específicos (actividades, factores y grupos de hogares) a través de los cuales se transmite la influencia. En ese sentido sigue siendo una caja negra.

2.3.1 **Influencia directa**

El análisis de estas trayectorias es descrito en (Defourny & Thorbecke, 1984), consiste en la siguiente metodología. Cada par $\langle i, j \rangle$ de índices en MCS original es nombrado un arco, una trayectoria o sendero será definido como una secuencia de índices $s = \langle i, k, l, \dots, m, j \rangle$ los cuales a su vez pueden siempre ser descompuestos en arcos $\langle i, k \rangle, \langle k, l \rangle, \dots, \langle m, j \rangle$. Una trayectoria sin índices repetidos

es llamada una trayectoria elemental. Una trayectoria que termine donde empezó, es decir posea el mismo índice al principio y al final es nombrado un circuito de influencia.

La influencia de la cuenta i en la cuenta j a través de la trayectoria s es denotado como $(i \rightarrow j)_s$. La influencia de los costos de la cuenta i en la cuenta j a través de $\langle i, j \rangle$ está determinada por el coeficiente a_{ji}.

$$I^D{}_{\iota \rightarrow j} = a_{ij}$$

Debido a la estructura lineal del modelo, la influencia directa a través de una trayectoria elemental $\langle i, k, l, \ldots, m, j \rangle$ es el efecto compuesto de los arcos contiguos que forman dicha trayectoria:

$$I^D{}_{i \rightarrow j} = a_{jn} \ \ldots a_{mi}$$

Dado el ejemplo de (Defourny & Thorbecke, 1984), se tiene la ruta elemental $p = (i, x, y, j)$ y su influencia directa será:

$$I^D{}_{i \rightarrow j_p} = \ I^D{}_{(i,x,y,j)} = a_{xi}\, a_{yx}\, a_{jy}$$

2.3.2 **Influencia total**

En particular, es probable que los polos a lo largo de cualquier camino elemental estén vinculados a otros polos y otros caminos formando circuitos que amplifican de manera compleja la influencia directa de ese mismo camino elemental. Dada una ruta elemental $p = (i, \ldots j)$ con origen i y destino j, la influencia total es la influencia transmitida de i a j a lo largo de la ruta elemental p incluyendo todos los efectos indirectos dentro de la estructura imputable a esa ruta.

Tomando el ejemplo anterior donde $p = (i, x, y, j)$, la influencia total se define como la suma de todas las influencias directas que pueden existir en esta ruta, ya sea hacia adelante o hacia atrás, por ejemplo: $I^D{}_{\iota \rightarrow x} = a_{xi}$, $I^D{}_{y \rightarrow x} = a_{xy}$, $I^D{}_{\iota \rightarrow y} = a_{yx} a_{xi}$, etc. Su fórmula se define de la siguiente manera:

$$I^{T}{}_{(i\to j)_p} = I^{D}{}_{(i\to j)_p}\mathbf{M_p}$$

Se puede ver fácilmente que el primer término en el lado derecho representa la influencia directa previamente definida $I^{D}{}_{i\to j_p}$ y el segundo término es el multiplicador de ruta $\mathbf{M_p}$, el cual captura la medida en que la influencia directa a lo largo de la ruta p se amplifica a través de los efectos de los circuitos de retroalimentación adyacentes. El cálculo de este multiplicador de ruta se realiza obteniendo la razón entre dos determinantes Δ_p/Δ donde Δ_p es el determinante de la matriz $\mathbf{I} - \mathbf{A_p}$ a la cual se le han excluido todos los polos pertenecientes a la ruta p, y Δ es el determinante de la matriz $\mathbf{I} - \mathbf{A_n}$ con todos los sectores incluidos.

Una forma alternativa de presentar el multiplicador de trayectoria es calcular su inverso, es decir, la relación entre la influencia directa y la influencia total $\mathbf{I}/\mathbf{M_p} = I^{D}{}_{(i\to j)_p} / I^{T}{}_{(i\to j)_p}$. Esta relación muestra la proporción de la influencia total transmitida a lo largo de un camino elemental que se explica por los efectos inmediatos, es decir, la influencia directa. Este parámetro puede ser bastante relevante en un contexto de política al indicar en qué medida una inyección inicial en un polo determinado generará rápidamente o solo después de un largo período de tiempo cualquier aumento en la producción o en los ingresos de otros polos de la estructura económica.

2.3.3 **Influencia global**

La influencia global del polo i al polo j simplemente mide los efectos totales sobre el ingreso o la producción del polo j como consecuencia de una inyección de una unidad de producto o ingreso en el polo i. Captura todos los efectos de una inyección exógena sobre un sector endógeno, el efecto global es el coeficiente m_{ji} de la inversa de Leontief $\mathbf{M}$.

$$I^{G}{}_{(i\to j)_p} = m_{ji}$$

Es importante esclarecer la diferencia entre la influencia global I^G y la influencia directa I^D. La última está ligada a una ruta elemental particular completamente aislada del resto de la estructura económica (i.e. asumiendo *ceteris paribus*). Captura lo que se puede llamar efecto inmediato de un polo sobre otro siguiendo esta ruta en particular. La influencia global difiere en que captura la influencia directa de todas las rutas elementales que unen a los polos extremos y esto lo hace considerando la integralidad de la estructura de la economía, incluyendo efectos inducidos y de retroalimentación (Defourny & Thorbecke, 1984).

3. Fuentes y método de construcción del modelo SAM

En esta sección se presentarán las fuentes de datos utilizadas para la construcción de la Matriz de Contabilidad Social con apertura en el sector energético por tipo de tecnología en la generación de la electricidad, así como la metodología usada en cada etapa del proceso que concluyó con la matriz final doméstica e importada con la que se realizará el análisis. Realizar una tarea como esta requirió la recopilación de información desde diferentes fuentes oficiales gubernamentales y no gubernamentales referidas al sector energético, la resolución de problemas e incompatibilidad entre estas, la consulta a catedráticos especializados en el tema como el doctor José Antonio Rojas Nieto y el trabajo en conjunto de un equipo dirigido por los doctores Alejandro Dávila Flores y Miriam Valdés Ibarra y compuesto por los masters Ylsel Areli Gutiérrez Alonso y Reynier Rodríguez Socarrás.

La matriz doméstica final posee 77 cuentas de 42 sectores productivos y 35 sectores institucionales que se agrupan en cuentas de generación, asignación y utilización del ingreso, así como cuentas financieras y de capital junto con las referentes a la importación y exportación de bienes y servicios. La matriz de importación es solo de 42 sectores productivos y describe la importación al país

clasificada en esos mismos 42 sectores productivos. El sector 221 de Generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica quedó desagregado en 8 cuentas. Una cuenta agrupa la transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica y 7 cuentas que describen la generación de la energía eléctrica para cada uno de los tipos de tecnología de generación de esta, a saber: ciclo combinado, carboeléctricas, termoeléctricas convencionales, hidráulica, solar, eólica y otros tipos de tecnología limpia.

Finalmente se determinaron siete cuentas exógenas: las cuentas de gobierno de la asignación de ingreso primario y de utilización del ingreso, la formación bruta de capital fijo (FBKF), la variación de existencias, las tres cuentas correspondientes al resto del mundo (Exportaciones/Importaciones, cuenta corriente y cuenta de capital) y la cuenta de ajuste por compatibilidad de fuentes. El modelo MCS para el análisis de precios queda determinado con 69 cuentas endógenas y 8 cuentas exógenas.

3.1 Matriz de Contabilidad Social Agregada

INEGI presentó el 26 de abril de 2021 por primera vez una colección de matrices de contabilidad social para el período 2012-2018 con un formato que sigue de cerca la secuencia de cuentas del Sistema de Cuentas Nacionales de las Naciones Unidas. A través de la publicación de esta serie de Matrices de Contabilidad Social (MCS), el INEGI adopta el punto de vista de los usuarios como la referencia esencial, es decir, un formato que contribuya a ampliar la base de usuarios de las actuales cuentas nacionales.

	Cuenta de bienes y servicios	Cuenta de producción	Cuenta de generación del ingreso	Cuenta de asignación del ingreso primario	Cuenta de distribución secundaria del ingreso	Cuenta utilización del ingreso	Cuenta de capital	Variación de Existencias	Formación bruta de capital fijo	Cuenta financiera	Cuenta corriente con el RM	Cuenta de capital con el RM	Total
Cuenta de bienes y servicios		Consumo Intermedio				Gastos de Consumo		Variación de existencias	FBKF		Exportaciones		
Cuenta de producción	Producción												
Cuenta de generación del ingreso		Valor agregado bruto											
Cuenta de asignación del ingreso primario	Impuestos netos a los productos		Ingreso Generado Neto	Ingresos a la propiedad							Ingresos a la propiedad y remun. recibidos del RM		
Cuenta de distribución secundaria del ingreso				Ingreso Nacional Neto	Transferencias Corrientes						Transferencias corrientes del RM		
Cuenta utilización del ingreso					Ingreso Disponible Neto	Ajuste por cambio en los derechos de pensiones					Compras de no residentes en el país		
Cuenta de capital						Ahorro Neto	Transferencias de capital			Emisión neta de pasivos		Transferencias de capital del RM	
Variación de Existencias							Variación de existencias						
Formación bruta de capital fijo			Consumo de Capital fijo				FNKF						
Cuenta financiera							Adquisición neta de activos financieros					Endeudamiento neto	
Cuenta corriente con el RM	Importaciones			Ingresos a la propiedad pagados al RM	Transferencias corrientes al RM	Compras de residentes en el extranjero							
Cuenta de capital con el RM							Transferencias de capital al RM				Balance corriente externo		
Total													

Figura 3.1 Formato de la Matriz de Contabilidad Social. Fuente: INEGI (2021).

La construcción de estas matrices se realiza a través del ensamble de varios productos del INEGI, tales como: las cuentas por sectores institucionales, los cuadros de Oferta y Utilización, la Encuesta Nacional de Ingreso Gasto de los Hogares (ENIGH) y el Proyecto KLEMS.

Para el presente trabajo se decidió utilizar la MSC de 2018 con año base de 2013, en millones de pesos corrientes y a precios de comprador que se encuentra en el apartado de estadísticas experimentales de INEGI. Su estructura general se detalla en la Figura 3.1 donde se presentan los tipos de cuentas incluidas, así como los flujos entre ellas. Estas cuentas registran, en las sub matrices en color amarillo, la producción y uso de bienes y servicios y la generación de ingresos por la producción; las sub matrices en color verde muestran la distribución posterior y redistribución de los ingresos entre las unidades institucionales; las sub matrices en color azul muestran el papel del circuito financiero en la acumulación de activos financieros y no financieros. Esta matriz de formato reducido se puede desagregar para mostrar la secuencia completa de las cuentas, incluidos los detalles de los sectores institucionales y las categorías de transacciones, para llegar a una matriz extendida del Sistema de Cuentas Nacionales (SCN) (INEGI, 2021).

Para poder trabajar con esta MCS a través del análisis Insumo-Producto debemos modificar las cuentas referentes a los cuadros de Oferta y Utilización por cuentas Insumo-Producto. Afortunadamente INEGI también publicó una lista de Matrices Insumo Producto para el período 2012-2018. Utilizando la correspondiente a 2018 tenemos una Matriz Insumo Producto (MIP) doméstica y una importada que poseen una contabilidad consistente con la MCS a precios básicos.

Para realizar la integración, por tanto, el primer paso es establecer en precios básicos la contabilidad de la MCS 2018. Se utilizan las tablas a precio de comprador junto con los impuestos sobre los productos, netos de subsidios y márgenes de transporte y comercialización provenientes de los cuadros de utilización para construir las tablas de la MCS 2018 a precios básicos. El resultado se presenta en el cuadro resumen de la Figura 3.2.

		Cuenta de bienes y servicios	Cuenta de producción	Cuenta de generación del ingreso	Cuenta de asignación del ingreso primario	Cuenta de distribución secundaria del ingreso	Cuenta utilización del ingreso	Cuenta de capital	Variación de Existencias	Formación bruta de capital fijo	Cuenta financiera	Exportaciones / Importaciones	Cuenta corriente con el RM	Cuenta de capital con el RM	Total
		Productos	Industrias	Categorías de ingresos	Sectores institucionale	Sectores institucionale	Sectores institucionales	Sectores institucionales	Industrias	Industrias	Activos financieros	Países	Cuenta corriente con el RM	Cuenta de capital con el RM	
Cuenta de bienes y servicios	Productos		Consumo intermedio				Gastos de Consumo		Variación de existencias	FBKF		Exportaciones			
Cuenta de producción	Industrias	Producción													
Cuenta de generación del ingreso	Categorías de ingresos		Valor agregado												
Cuenta de asignación del ingreso primario	Sectores institucionales		Impuestos sobre los productos (CI)	Ingreso Generado Neto	Ingresos a la propiedad		Impuestos sobre los productos (CP)			Impuestos sobre los productos			Ingresos a la propiedad y remun. recibidos		
Cuenta de distribución secundaria del ingreso	Sectores institucionale				Ingreso Nacional	Transferencias Corrientes							Transferencias corrientes del RM		
Cuenta utilización del ingreso	Sectores institucionales					Ingreso Disponible Neto	Ajuste por cambio en los derechos de						Compras de no residentes en el país		
Cuenta de capital	Sectores institucionales						Ahorro Neto	Transferencias de capital			Emisión neta de pasivos financieros			Transferencias de capital del RM	
Variación de Existencias	Industrias							Variación de existencias							
Formación bruta de capital fijo	Industrias			Consumo de Capital fijo				FNKF							
Cuenta financiera	Activos financieros							Adquisición neta de activos financieros						Endeudamiento neto	
Exportaciones / Importaciones	Países		Importaciones intermedias				Importaciones de Consumo Privado		Variación de existencias de importaciones	Importaciones de bienes de capital			Saldo de la balanza comercial		
Cuenta corriente con el RM	Cuenta corriente con el RM				Ingresos a la propiedad pagados al	Transferencias corrientes al RM	Compras de residentes en el extranjero								
Cuenta de capital con el RM	Cuenta de capital con el RM							Transferencias de capital al RM					Balance corriente externo		
Total															

Figura 3.2 Formato de la MCS 2018 a precios básicos. Fuente: Elaboración propia.

Los recuadros en verde representan las cuentas provenientes de la información recogida en las Matrices de Insumo Producto tanto doméstica como importada. En estas podemos directamente sustituir la información proveniente de INEGI para obtener la integración entre MIP-MCS a precios básicos requerida para el análisis. El formato resultante junto con los totales para cada cuenta en millones de pesos se muestra en la Figura 3.3.

		Cuenta de producción	Cuenta de generación del ingreso	Cuenta de asignación del ingreso primario	Cuenta de distribución secundaria del ingreso	Cuenta utilización del ingreso	Cuenta de capital	Variación de Existencias	Formación bruta de capital fijo	Cuenta financiera	Exportaciones / Importaciones	Cuenta corriente con el RM	Cuenta de capital con el RM	Total
		Industrias=258	Categorías de ingresos primarios	Sectores institucionales	Sectores institucionales	Sectores institucionales	Sectores institucionales	Industrias	Industrias	Activos financieros	Países	Cuenta corriente con el RM	Cuenta de capital con el RM	
Cuenta de bienes y servicios	Industrias = 258	10,177,682				15,935,144		751,090	4,145,144		8,792,977			39,802,036
Cuenta de generación del ingreso	Categorías de ingresos primarios	22,191,164												22,191,164
Cuenta de asignación del ingreso primario	Sectores institucionales	145,722	18,101,506	6,653,307		1,115,282			39,340			240,989		26,296,145
Cuenta de distribución secundaria del ingreso	Sectores institucionales			18,798,789	9,359,022							650,550		28,808,361
Cuenta utilización del ingreso	Sectores institucionales				19,428,518	299,031						436,673		20,164,222
Cuenta de capital	Sectores institucionales					1,472,800	820,909			3,758,129			4,523	6,056,361
Variación de Existencias	Industrias						790,354							790,354
Formación bruta de capital fijo	Industrias		4,089,658				1,094,999							5,184,658
Cuenta financiera	Activos financieros						3,344,340						413,790	3,758,129
Exportaciones / Importaciones	Países	7,287,469				1,124,263		39,265	1,000,174			-658,194		8,792,977
Cuenta corriente con el RM	Cuenta corriente con el RM			844,049	20,821	217,702								1,082,573
Cuenta de capital con el RM	Cuenta de capital con el RM						5,759					412,553		418,312
Total		39,802,036	22,191,164	26,296,145	28,808,361	20,164,222	6,056,361	790,354	5,184,658	3,758,129	8,792,977	1,082,573	418,312	

Figura 3.3 Formato y totales de la integración MIP-MCS 2018.
Fuente: Elaboración propia con información de INEGI.

La cuenta de hogares en la utilización del ingreso se desagregó en deciles para brindar la posibilidad de describir los impactos por niveles de ingreso. Tanto la cuenta de distribución secundaria del ingreso como el pago de instituciones financieras dentro de la cuenta de utilización en sus respectivos cruces con los hogares se pudieron desagregar sin ningún inconveniente ya que dicha información estaba disponible en las propias fuentes de la MCS 2018. Para desagregar el consumo de los hogares a las cuentas de producción se utilizaron las estadísticas de consumo reportadas en la ENIGH. Se pasó a precios básicos este consumo con los impuestos y los márgenes de comercio y transporte de INEGI y se abrió en deciles mediante la estructura presente en la propia ENIGH para cada sector productivo.

El pago de impuestos por decil a la cuenta gubernamental de asignación primaria del ingreso se desagregó calculando la distribución porcentual de impuestos por decil y multiplicando por el valor total de pago de los hogares. La fuente para su elaboración fueron los ingresos tributarios del gobierno federal y la contribución porcentual a la recaudación de impuestos de la Cuenta de la Hacienda Pública Federal de 2018. Por último, se balancearon las nuevas cuentas de hogares por decil a través del ahorro de estos para garantizar la consistencia de todo el marco contable de la MCS. De esta forma quedó como resultado un ahorro negativo para el decil 1 y positivo y creciente para los restantes deciles de ingreso.

Antes de pasar a la apertura del sector energético es necesario aclarar una incongruencia que fue detectada en las estadísticas ofrecidas en la MCS de INEGI y que influye en la apertura de dicho sector. Se trata de una subestimación en la contabilización de las compras de combustibles fósiles como insumos energéticos, específicamente las compras del sector energético 221 al sector 324-326 tanto domesticas como importadas y que además se creen están contabilizadas en las compras del sector 324-326 al propio sector 324-326. En el cálculo de los costos de energéticos utilizando la metodología de cálculo de costos de combustibles en la generación (COPAR, 2015) y los datos del censo económico de 2019 (INEGI, 2021) se tienen discrepancias con las estadísticas de INEGI reportadas en la MCS

2018. Dicha subestimación fue corroborada por las estimaciones de las compras de combustóleo, diésel, gas natural y carbón realizadas en consulta al Dr. Rojas y que arrojan hasta el doble de compras de gas natural por encima de lo estimado a trasvés de los datos reportados por INEGI. La observación de esta discrepancia en el consumo de combustibles fósiles fue notificada al propio INEGI y a la fecha en que se redacta el presente documento no se ha obtenido respuesta de dicha institución.

Como último ajuste a la MCS 2018 se realizó una reasignación dentro de las cuentas de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica y derivados del petróleo y del carbón; industrias químicas, del plástico y del hule. Así se reasignan 18,165.00 millones de pesos desde las compras domesticas de 324-326 hacia las del sector 221 y 111,306.00 desde las compras importadas de 324-326 hacia las del sector 221. Para mantener la contabilidad general de la matriz se ajusta a través de las cuentas de valor agregado el desequilibrio generado, específicamente con los impuestos y el excedente bruto de operación bajo el razonamiento de precios subsidiados a la compra de estos combustibles. Se reasignan 1,364.89 desde los impuestos del sector 221 hacia el sector 324-326 y 128,106.11 desde el excedente bruto de operación del sector 221 hacia el sector 324-326. De esta forma quedan sin alterar dentro de las cuentas de generación del ingreso la remuneración a asalariados y la contabilidad general de la matriz se mantiene intacta.

3.2 Apertura del sector eléctrico y la generación eléctrica

En las cuentas nacionales de INEGI la mayor desagregación disponible en la clasificación SCIAN solo se divide entre la correspondiente al sector 221 Generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica y al sector 222 Suministro de agua y suministro de gas por ductos al consumidor final. El principal inconveniente para realizar la apertura radica en que la desagregación del sector 221 incluye realizar estimaciones basadas en datos oficiales externos a las estadísticas de la MCS e incluso externos a las cuentas nacionales.

El sector 221 representa una de las actividades económicas que pueden sufrir del efecto referido en la literatura de Insumo-Producto como “sesgo por agregación” (Kymn, 1990), (Miller & Blair, 2009), (Lenzen, 2011). En algunas actividades la agregación de subsectores tiene pocos efectos adversos en la representación económica de las tablas Insumo-Producto y en los resultados de su análisis debido a su tamaño, relevancia o estructuras similares de insumos y productos. El sesgo de agregación afecta, por otro lado, a sectores que agregan actividades económicas con una composición de compras y/o ventas muy heterogéneas. Este problema es ilustrado en (Lenzen, 2011) con un ejemplo del uso de agua en subsectores de cultivo de arroz y de trigo agregados en un solo sector llamado “cultivo de granos”. La extensión al análisis con Matrices de Contabilidad Social no cambia significativamente la magnitud del problema en ninguno de los sentidos (Llop & Manresa, 2014).

Para el caso del sector eléctrico este efecto suele estar enmarcado en el análisis de emisiones de CO_{2e} asociadas a la generación de energía eléctrica y la agregación del sector que no permite la diferenciación por tipo de tecnología. Las emisiones de CO_{2e} asociadas con una unidad de producción de carbón son muy diferentes de las provenientes de fuentes de energía renovable, pero todas las unidades de generación generalmente se combinan en un sector en las tablas IO (Lindner, Legault, & Guan, 2012).

Este sesgo es análogo dentro de la estructura de compras y ventas de un sector, y en particular, del análisis de impactos de los costos primarios en los precios finales. El uso de una entrada agregada para el sector eléctrico supone que cada tecnología de generación de electricidad utiliza las energías primarias — y otros insumos — en el promedio de ese sector, lo cual pudiera ser plausible para los demás insumos, pero para el caso de las materias primas energéticas dista de ser correcto. Los costos asociados con una unidad de producción de carbón son muy diferentes de los de una unidad de producción de fuentes de energía renovable: el precio de la electricidad como producto final será diferente para cada tecnología si se tiene en cuenta una desagregación. (Lenzen, 2011) muestra que, para el caso

de sectores ambientalmente intensivos, la desagregación basada incluso en pequeñas porciones de información puede mejorar significativamente la precisión de los multiplicadores Insumo-Producto. Creemos que su estudio y conclusiones son fácilmente extensibles también para el análisis del modelo de precios.

Realizar la apertura de un sector requiere información acerca de la composición de los subsectores, desagregar mediante una distribución uniforme supone lo mismo que dejarlo agregado: todos los subsectores utilizan los insumos en el promedio del sector agregado. El dato más factible para realizar la desagregación, y el más utilizado en la literatura sobre desagregación, es el producto bruto total de cada uno de los subsectores o en su defecto la proporción en la cual se distribuye. Estas ponderaciones se utilizan para formar una suposición inicial para la desagregación siguiendo la metodología de (Wolsky, 1984). Debido a que esta primera aproximación es solo una de las múltiples configuraciones que pueden tener la desagregación, en (Lindner, Legault, & Guan, 2012) muestran como explorar todo el rango de posibles soluciones e identificar donde se encuentra la inicial.

La estimación inicial se puede enriquecer con información adicional del sector eléctrico, datos o proxys de las compras y ventas intermedias de los subsectores utilizándola para obtener una aproximación más cercana a la distribución real. (Lindner, Legault, & Guan, 2013) utiliza datos regionales sobre las mezclas de generación de electricidad y la distribución espacial de la industria para obtener una estimación del suministro de cada sector de generación de electricidad a los demás sectores. Para los insumos de los sectores de generación utilizan la suma ponderada de los costos de operación y mantenimiento de las centrales eléctricas y la producción anual de generación de electricidad, siguiendo el método descrito por (Marriot, 2007).

(Wiedmann, y otros, 2011) siguen una metodología híbrida en la que los datos de evaluación del ciclo de vida basados en procesos o Life-Cycle Assessment (LCA) se jerarquizan con tablas Insumo-Producto. Se desagrega el subsector de energía eólica del sector eléctrico en el Reino Unido en las tablas de oferta y utilización

con la estimación inicial y especifican los insumos eólicos con datos de materiales, electricidad y productos en unidades físicas para la fabricación y operación de turbinas eólicas. (Liu, Lenzen, & Murray, 2012) utilizan este método para desagregar el inventario de emisiones de Taiwán. Se divide el sector eléctrico original usando la cantidad de electricidad generada y ajustan el sistema de insumo-producto resultante para reflejar las especificidades de los subsectores asumiendo que los subsectores de energía a carbón, nuclear e hidroeléctrica no requieren directamente ninguno de los productos de petróleo crudo, derivados del petróleo y gas natural.

Un enfoque similar es el estudio para el sector eléctrico portugués de (Cruz, 2002) donde realizan suposiciones directas sobre las ventas y compras de electricidad: los insumos fósiles son atribuidos a las tecnologías fósiles y suponen que todas las ventas de generación son realizadas al sector de distribución y este a los demás sectores. Este último supuesto es considerado también en (Turner, Allan, McGregor, & Swales, 2007) para el análisis de impactos de la generación eléctrica por tecnologías limpias en la economía escocesa.

La metodología utilizada en la presente investigación para la apertura del sector eléctrico mexicano contiene, apropia y extiende muchos aspectos de la utilizada en los artículos (Lindner, Legault, & Guan, 2012) y (Lindner, Legault, & Guan, 2013). Utilizamos la Matriz de Contabilidad Social de 2018 anteriormente descrita y se realiza la apertura con información de los censos económicos de INEGI para 2019. Junto con algunas suposiciones que se detallaran más adelante, se reasignan los valores de insumos energéticos primarios con datos del Anuario Estadístico (PEMEX, 2021). A través de la estimación inicial se determinan las ventas de energía eléctrica a los sectores de la economía incluyendo el suministro directo de los subsectores de generación. La descripción detallada se define como método híbrido y se presenta en las siguientes secciones.

3.2.1 **Planteamiento teórico del problema de desagregación**

Supongamos dos matrices $\mathbf{A}$ y $\mathbf{A}^*$ de coeficientes técnicos a_{ij} y a_{ij}^*, que describen una misma economía de $N+1$ sectores con la única diferencia siendo que el último sector $N+1$ de $\mathbf{A}$ ha sido desagregado en n subsectores, resultando en que $\mathbf{A}^*$ posee dimensión $(N+n)\times(N+n)$. Además, denotemos como x_i y $x_i{}^*$ al producto bruto total del sector i en las economías agregada y desagregada respectivamente. De la misma forma denotamos por y_i y $y_i{}^*$ a la demanda final y por e_j y $e_j{}^*$ a los insumos exógenos por actividad productiva i y j en la Matriz de Contabilidad Social. Los N sectores no desagregados le llamaremos "sectores comunes" mientras que a los n subsectores en los que se desagregó el sector $N+1$ los llamaremos "sectores nuevos". Se puede entonces determinar algunas relaciones entre las matrices $\mathbf{A}$ y $\mathbf{A}^*$.

$$\begin{matrix} a_{ij}^* = a_{ij} \\ x_i^* = x_i \\ y_i^* = y_i \\ e_j^* = e_j \end{matrix} \quad para \quad i,j = 1,\dots,N$$

De los $(N+n)^2$ coeficientes técnicos de $\mathbf{A}^*$, los correspondientes a las interrelaciones de los primeros N sectores comunes (N^2), así como los productos brutos totales, demandas finales e insumos exógenos en la economía descrita por $\mathbf{A}^*$ se mantienen invariantes. Los restantes coeficientes asociados a los nuevos sectores no pueden ser determinados de la misma forma que los asociados con los comunes.

Estos nuevos $2Nn+n^2$ coeficientes están conformados por los Nn coeficientes que describen la estructura de compra de los nuevos sectores a los comunes, Nn de la estructura de ventas de los nuevos sectores a los comunes y n^2 correspondientes a las compraventas de los nuevos sectores con ellos mismos. El problema de desagregación consiste en atribuir valores a estos $2Nn+n^2$ coeficientes técnicos asociados a los nuevos n subsectores, tal que de forma agregada estos describan la misma economía del sector $N+1$. Aunque el mayor peso de la desagregación recae sobre esta problemática, es necesario resaltar

que además de los coeficientes técnicos, también se debe cumplir que los valores de x_i^*, y_i^* y e_j^* correspondientes a los nuevos n subsectores de forma agregada también sumen los valores del sector agregado $N+1$.

3.2.2 **Restricciones y estimación inicial**

Denotemos por w_k al peso o la razón entre el producto bruto total del k-ésimo sector de los n sectores nuevos y el producto bruto total del sector $N+1$ que se está desagregando: $w_k = x_{N+k}^*/x_{N+1}$. Como los productos brutos totales de los n sectores nuevos deben sumar el valor del sector $N+1$, entonces los pesos w_k cumplen que $\sum_k w_k = 1$. Si estos pesos no se conocen y tampoco se pueden calcular a través de alguna información que funcione como proxy de este, el espacio de soluciones del problema de desagregación es extremadamente extenso y sería muy difícil, si no estéril, justificar alguna solución en particular. Suponiendo que de alguna forma estos pesos son conocidos se llega a las siguientes $2N+1$ restricciones correspondientes a la conservación consumidos y vendidos entre los nuevos sectores con los sectores comunes y ellos mismos:

$$\sum_{k=1}^{n} w_k a_{i,N+k}^* = a_{i,N+1} \qquad \text{para } i = 1, \dots, N \tag{3.1}$$

$$\sum_{k=1}^{n} a_{N+k,j}^* = a_{N+1,j} \qquad \text{para } j = 1, \dots, N \tag{3.2}$$

$$\sum_{k=1}^{n} \sum_{k'=1}^{n} w_k a_{N+k',N+k}^* = a_{N+1,N+1} \tag{3.3}$$

Estas ecuaciones son equivalentes a las planteadas por (Wolsky, 1984) y reproducidas en (Lindner, Legault, & Guan, 2012). En este último se agrega una restricción adicional que compete a las demandas finales de los sectores nuevos, de no ser tomada en cuenta, bajo ciertas condiciones la demanda final de algún sector pudiera dar negativa. Denotando z_{ij} como el flujo en valor absoluto de un sector a otro, la restricción queda de la siguiente forma:

$$\sum_{j=1}^{N+n} z^*_{N+k,j} + f^*_{N+k} = \sum_{j=1}^{n} x^*_j a^*_{N+k,j} + f^*_{N+k} = x^*_{N+k} \quad \text{para } k = 1, \dots, n$$

La cual dividiendo por x_{N+1} lleva a:

$$\sum_{j=1}^{N} \frac{x_j}{x_{N+1}} a^*_{N+k,j} + \sum_{j=1}^{n} w_k a^*_{N+k,j} + b_k = w_k \quad \text{para } k = 1, \dots, n \tag{3.4}$$

Donde b_k denota el peso de la k-ésima demanda final de los nuevos sectores sobre el producto bruto total del vector que se está desagregando: $b_k = f^*_{N+k}/x_{N+1}$. Tal como es describe en (Lindner, Legault, & Guan, 2012), estos pesos de la demanda final b_k son agregados como variables al problema de desagregación incorporándole una complejidad adicional importante, pero necesaria.

Un problema que no es tomado en cuenta en (Lindner, Legault, & Guan, 2012) son los valores que pueden tomar los insumos exógenos de los sectores nuevos. Al centrar el análisis en las ventas de los sectores nuevos a los comunes, las compras de los nuevos sectores a los sectores comunes son supuestas explícitamente, en este artículo, como equivalentes a la proporción $\mathbf{w} = \{w_1, \dots, w_n\}$ del producto bruto total.

Sin embargo, esto supone también implícitamente, que los valores correspondientes a los insumos exógenos desagregados se abren en esta misma proporción. Esto no tiene por qué ser necesariamente así y esta posibilidad no aparece en (Lindner, Legault, & Guan, 2012) debido principalmente al tipo de análisis llevado a cabo centrado en los coeficientes de ventas. Dicha suposición la reemplazamos en esta investigación por una restricción adicional:

$$\sum_{i=1}^{N+n} z^*_{i,N+k} + e^*_j = \sum_{i=1}^{n} x^*_{N+k} a^*_{i,N+k} + e^*_{N+k} = x^*_{N+k} \quad \text{para } k = 1, \dots, n$$

La cual dividiendo x^*_{N+k} resulta:

$$\sum_{i=1}^{n} a^*_{i,N+k} + v^*_k = 1 \quad \text{para } k = 1, \dots, n \tag{3.5}$$

Donde v^*_k es el "coeficiente técnico" de los insumos exógenos: $v^*_k = e^*_{N+k}/x^*_{N+k}$. Nuevamente este nuevo coeficiente asociado a los insumos exógenos de los nuevos sectores es agregado como variable al problema, posibilitando que puedan tomar valores más allá de las mismas proporciones del producto bruto total. En total se tienen $N_v = 2Nn + n^2 + 2n$ variables ($2Nn + n^2$ correspondientes a los coeficientes técnicos, n pesos de la demanda final y n pesos de los insumos exógenos), y $N_r = 2N + 2n + 1$ restricciones. Esto significa que existen parámetros libres igual a $N_d = N_v - N_r = 2Nn + n^2 - 2N + 1$ que en la literatura son referidos como parámetros distintivos (Lindner, Legault, & Guan, 2012). Si se reacomoda la expresión de N_d tendremos que es igual a $(n-1)(2N+n+1)$, esta ilustra primeramente la trivialidad de que $n > 2$, y segundo que la complejidad algorítmica del problema de desagregación es lineal con respecto al número de sectores comunes y cuadrática con respecto a la cantidad de subsectores nuevos en los que se desagrega el sector $N+1$.

El número de variables N_v pueden ser reorganizadas en el vector columna de variables $\mathbf{y_v}$ como sigue:

$$\mathbf{y_v} = \begin{bmatrix} a^*_{1,N+1}, \dots, a^*_{1,N+n}, & a^*_{2,N+1}, \dots, a^*_{2,N+n}, & \dots & a^*_{N,N+1}, \dots, a^*_{N,N+n}, \\ a^*_{N+1,1}, \dots, a^*_{N+n,1}, & a^*_{N+1,2}, \dots, a^*_{N+n,2}, & \dots & a^*_{N+1,N+n}, \dots, a^*_{N+n,N+n}, \\ & b_1, \dots, b_n, v_1, \dots, v_n & & \end{bmatrix}^T$$

Para entender mejor la composición de este vector, entiéndase que la primera fila que se ilustra corresponde a los coeficientes técnicos asociados a las compras de los sectores nuevos a los sectores comunes, la segunda fila son los coeficientes de las ventas de los sectores nuevos a los comunes incluyendo a las de los sectores nuevos a ellos mismos y, por último, los coeficientes de demanda final e

insumos exógenos. De la misma forma se puede reorganizar el número de constantes de las restricciones N_r:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} a_{1,N+1}, a_{2,N+1}, \dots, a_{N,N+1}, \\ a_{N+1,1}, a_{N+1,2}, \dots, a_{N+1,N+1}, \\ w_1, \dots, w_n, \underbrace{1, \dots, 1}_{n \text{ veces}} \end{bmatrix}^T$$

La estimación inicial, como se le conoce en la literatura (Wolsky, 1984), resulta de suponer que los nuevos sectores tienen idéntica tecnología o idénticas funciones de producción y además que estos suministran a los demás sectores proporcionalmente a los pesos **w** de la apertura del producto bruto total. Esto es, suponiendo que:

$$a^*_{i,N+1} = a^*_{i,N+2} = \cdots = a^*_{i,N+n} = a_{i,N+1} \quad \text{para } i = 1, \dots, N$$
$$a^*_{N+k,j} = w_k a_{N+1,j} \quad \text{para } k = 1, \dots, n \text{ y } j = 1, \dots, N$$
$$a^*_{N+k,N+1} = a^*_{N+k,N+2} = \cdots = a^*_{N+k,N+n} = w_k a_{N+k,N+1} \quad \text{para } k = 1, \dots, n$$
$$b_k = w_k \frac{f_{N+1}}{x_{N+1}} \quad \text{para } k = 1, \dots, n$$
$$v_k = \frac{e_{N+1}}{x_{N+1}} \quad \text{para } k = 1, \dots, n$$

Dando como resultado el vector solución de la estimación inicial:

$$\mathbf{y_0} =$$

$$\begin{bmatrix} \underbrace{a_{1,N+1}, \dots, a_{1,N+1},}_{Nn \text{ veces}} \\ w_1 a_{N+1,1}, \dots, w_n a_{N+n,1}, \quad w_1 a_{N+1,2}, \dots, w_n a_{N+n,2}, \quad \dots \quad, w_1 a_{N+1,N+n}, \dots, w_n a_{N+n,N+n} \\ w_1 \frac{f_{N+1}}{x_{N+1}}, \dots, w_n \frac{f_{N+1}}{x_{N+1}}, \quad \underbrace{\frac{e_{N+1}}{x_{N+1}}, \dots, \frac{e_{N+1}}{x_{N+1}}}_{n \text{ veces}} \end{bmatrix}^T$$

Con la notación descrita, el sistema de ecuaciones (3.1), (3.2), (3.3), (3.4), y (3.5) que describen el problema de desagregación puede ser presentado de forma matricial, incluyendo el caso particular de la estimación inicial:

$$\mathbf{C y_u} = \mathbf{q} \qquad \mathbf{C y_0} = \mathbf{q}$$

Donde $\mathbf{C}$ es la matriz de restricciones propuesta en (Lindner, Legault, & Guan, 2012) y extendida en la presente investigación:

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{C_{12}} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{C_{21}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{C_{33}} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{C_{42}} & \mathbf{C_{43}} & \mathbf{I_n} & 0 \\ \mathbf{C_{51}} & 0 & \mathbf{C_{53}} & 0 & \mathbf{I_n} \end{bmatrix}$$

Las dimensiones de la matriz $\mathbf{C}$ son $N, N, 1, n$ y n para las filas con un total de $N_r = 2N + 2n + 1$ y Nn, Nn, n^2, n y n para las columnas con un total de $N_v = 2Nn + n^2 + 2n$. Las submatrices $\mathbf{C_{ij}}$ descritas presentan la siguiente forma:

$$\mathbf{C_{12}} = \begin{bmatrix} \mathbf{1_n} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{1_n} & & \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & & \cdots & \mathbf{1_n} \quad 0 \\ & & & 0 \quad \mathbf{1_n} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C_{21}} = \begin{bmatrix} \mathbf{1_n w} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{1_n w} & & \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & & \cdots & \mathbf{1_n w} \quad 0 \\ & & & 0 \quad \mathbf{1_n w} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C_{33}} = [w_1 \mathbf{1_n}, \dots, w_n \mathbf{1_n}] \quad \mathbf{C_{42}} = \left[\frac{x_1}{x_{N+1}} \mathbf{I_n}, \dots, \frac{x_N}{x_{N+1}} \mathbf{I_n}\right] \quad \mathbf{C_{43}} = [w_1 \mathbf{I_n}, \dots, w_n \mathbf{I_n}]$$

$$\mathbf{C_{51}} = \left[\underbrace{\mathbf{I_n}, \dots, \mathbf{I_n}}_{N \text{ veces}}\right] \quad \mathbf{C_{53}} = \begin{bmatrix} \mathbf{1_n} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{1_n} & & \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & & \cdots & \mathbf{1_n} \quad 0 \\ & & & 0 \quad \mathbf{1_n} \end{bmatrix}$$

Donde $\mathbf{1_n}$ es un vector fila de n unos, $\mathbf{w}$ es el vector columna de pesos del producto bruto total $[w_1, \dots, w_n]^T$ y $\mathbf{I_n}$ es la matriz identidad de orden n. Las submatrices $\mathbf{C_{12}}$ y $\mathbf{C_{53}}$ son matrices con los mismos valores y estructura, pero de dimensiones diferentes: $\mathbf{C_{12}}$ es de dimensión $N \times Nn$ y $\mathbf{C_{53}}$ es de dimensión $n \times n^2$. De esta forma queda determinada la estructura de la apertura inicial de un sector para una matriz cualquiera, incluyéndose los insumos exógenos como variable y restricción adicional al problema.

3.3 Desagregación del sector eléctrico mexicano

Es necesario mencionar, antes de detallar la desagregación del sector eléctrico de México, algunos supuestos generales tomados en cuenta en la investigación. A diferencia de (Cruz, 2002) suponemos que los sectores de generación sí poseen una estructura de venta sobre los demás sectores de la economía y, por tanto, el supuesto de que toda la generación va al sector de transmisión, distribución y comercialización de la electricidad no es tomada en cuenta. La decisión se justifica con los valores de la apertura inicial, el producto bruto total de la generación no es compatible con el de la distribución.

El otro supuesto general es sobre las compras a insumos de los subsectores de la energía eléctrica, la estructura de compras intermedias a otros sectores se supone no se diferencian de acuerdo con su origen, ya sea doméstico o importado. La apertura se realiza de la misma forma para la matriz de importaciones como para los insumos intermedios de la matriz doméstica.

Código SCIAN	Sector	PBT (A111A)	**w**
22111	Generación de energía eléctrica	376,930	67.1%
22112	Transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica (TDC)	185,038	32.9%
2211	Generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica	561,968	100%

Tabla 3.1 Variable censal A111A referente a la producción bruta total (PBT) reportada en millones de pesos para el 2018 y proporciones de cada subrama en el total.
Fuente: Censo Económico 2019 de INEGI (INEGI, 2021).

Una vez aclarado estos supuestos, el primer nivel de desagregación realizado en el trabajo corresponde a la separación del sector eléctrico en las subramas de generación de energía eléctrica y de transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica. En los censos económicos de 2019 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2021) encontramos la producción bruta en millones de pesos desagregada en estas ramas, véase Tabla 3.1. Esta información no coincide con la producción bruta total reportada en la matriz, su

utilidad se da calculando las proporciones de cada subrama y obteniendo los pesos **w** del producto bruto total iniciales (w_1 y w_2).

El siguiente paso es abrir la generación de energía eléctrica, para ello se utiliza información del Observatorio de la Transición Energética en México (OBTREN MX, 2022) correspondiente a la generación de energía eléctrica por tipo de central y los precios marginales locales, con los que se obtienen los ingresos anuales de la venta de electricidad en el Mercado de Corto Plazo del Mercado Eléctrico Mayorista.

Se consideró la energía eléctrica generada por día y por hora (MWh) durante el 2018 por tipo de central y los precios marginales locales (PML) promedios diarios y por hora (Pesos por MWh) a los cuales se vendió la electricidad en el Mercado del Día en Adelanto (MDA) a los diferentes tipos de usuarios del SEN. Se multiplicó la generación por su PML correspondiente y el producto resultante se sumó, obteniéndose los ingresos en pesos de cada una de las siete centrales eléctricas para el año de análisis. (Alonso, 2022). Se agregaron los valores para las termoeléctricas de vapor, turbo gas y combustión interna en una sola rama de termoeléctricas convencionales, así como la geotérmica y la nucleoeléctrica en la rama otros tipos de tipos de energía limpia.

Nuevamente se calcularon las proporciones que representaban los datos del total y con ella se calcularon nuevos pesos para estas subramas en siete tipos de tecnologías de generación, véase Tabla 3.2.

Código SCIAN	Sector	Ingresos	%
221111-1	Generación de electricidad a partir de combustibles fósiles en centrales de Ciclo Combinado.	258,126	50.7%
221111-2	Generación de electricidad a partir de combustibles fósiles en centrales Carboeléctricas.	44,727	8.8%
221111-3	Generación de electricidad a partir de combustibles fósiles en centrales Termoeléctricas Convencionales.	96,835	19.0%

221112	Generación de electricidad a partir de energía hidráulica.	58,664	11.5%
221113	Generación de electricidad a partir de energía solar.	3,817	0.7%
221114	Generación de electricidad a partir de energía eólica.	18,439	3.6%
221119	Generación de electricidad a partir de otro tipo de energía.	28,447	5.6%
22111	Generación de energía eléctrica.	509,054	100%

Tabla 3.2 Participación de las clases en los ingresos anuales obtenidos de la venta de energía eléctrica en el Mercado Eléctrico Mayorista en millones de pesos y proporciones de cada subrama en el total.
Fuente: Observatorio de la Transición Energética en México, OBTREN MX

El peso inicial de la generación se abre en siete: $w_1 = w_1^* + w_2^* + w_3^* + w_4^* + w_5^* + w_6^* + w_7^*$, quedando determinada la distribución de los pesos del producto bruto total:

$$\mathbf{w} = (w_1^*, w_2^*, w_3^*, w_4^*, w_5^*, w_6^*, w_7^*, w_2)$$

Los valores finales se muestran en la Tabla 3.3. Para una primera aproximación de la apertura de las columnas correspondientes a cada rama y subrama se utiliza la estimación inicial $(\mathbf{y_0})$ descrita en la sección anterior: todas las celdas se abren en las mismas proporciones con las que se abrió el producto bruto total por filas y columnas. Este proceso se repite para la matriz de importaciones.

Generación de energía eléctrica							TDC
67.1%							32.9%
Ciclo combinado	Carboeléctricas	Termoeléctricas convencionales	Energía hidráulica	Energía solar	Energía eólica	Otras limpias	
34.0%	5.9%	12.8%	7.7%	0.5%	2.4%	3.7%	

Tabla 3.3 Vector de pesos $\mathbf{w}$ por tipo de tecnología del producto bruto total.
Fuente: Elaboración propia con datos del Censo Económico 2019 de INEGI y OBTREN MX.

3.3.1 Cálculo del costo de los combustibles y reajuste de los insumos energéticos primarios por tipo de tecnología

Una vez obtenida la estimación inicial, se desea agregar información adicional que ajuste la estimación hacia un escenario más realista sobre la estructura de la desagregación. Para la presente investigación se concentra la atención sobre las compras de insumos energéticos de cada tecnología de generación. Por parte de la estructura de ventas se supone tal como resulta de la estimación inicial.

Las energías primarias representan los insumos más determinantes en el funcionamiento de la generación eléctrica, principalmente en las tecnologías de combustibles fósiles que utilizan combustibles para su funcionamiento. Las tecnologías limpias son intensas en inversión inicial, sin embargo, no necesitan el consumo de insumos energéticos para su funcionamiento por lo que las estimaciones finales de sus compras quedan bastante similares a la primera aproximación.

Para estimar el costo de combustible se siguió la metodología descrita en (COPAR, 2015). El primer paso consiste en calcular el consumo de combustible de cada central. Este se obtiene dividiendo el régimen térmico de cada central ($RegTer$) de la misma entre el poder calorífico del combustible ($PowCal$) que utiliza para su funcionamiento. El régimen térmico promedio dado (GJ/MWh) es la relación entre la energía suministrada al ciclo termodinámico en forma de combustible (GJ) y la energía que se obtiene a la salida del generador eléctrico en forma de electricidad (MW). Esta información fue obtenida del (PRODESEN, 2018). El poder calorífico, por su parte, expresa la energía que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente. La fuente de información de este último fue (COPAR, 2015).

El consumo de cada unidad generadora es multiplicado luego por el precio del combustible que utiliza para obtener el costo de generación promedio por mega watt hora, es decir cuantas unidades monetarias cuesta generar 1MWh de electricidad en cada central. Dichos precios fueron consultados en el Anexo B del Acuerdo Núm. A/058/2017: Acuerdo por el que la Comisión Reguladora de

Energía, para el período el periodo desde el 1 de diciembre de 2017 hasta el 31 de diciembre de 2018.

Finalmente, para calcular el costo total de generación asociado al concepto de consumo de combustible, se multiplica el costo promedio de combustible por MWh (obtenido en el paso anterior) por la energía eléctrica generada en el 2018 en la central correspondiente, disponibles en el Observatorio de la Transición Energética en México (OBTREN MX, 2022).

$$CostoGeneración_i = \frac{RegTer_i}{PowCal_k} * Precio_k * GeneraciónTotal2018_i \quad (3.6)$$

La ecuación (3.6) resume la fórmula para el cálculo del gasto de la generación en combustibles primarios. En este caso se calcula el costo de la generación para cada central i, en concepto de los combustibles k que utiliza, a saber: carbón, gas natural, diésel, combustóleo y uranio. Por último, para cada tecnología se agregan los costos por consumo de combustible y se obtiene una estimación de la proporción en la que el sistema eléctrico mexicano utiliza las diferentes energías primarias, Tabla 3.4.

Combustible	%
Gas Natural	64.70%
Carbón	11.44%
Combustóleo	13.47%
Diésel	9.83%
Uranio	0.57%

Tabla 3.4 Participación de los diferentes combustibles en el costo total por este concepto. Fuente: Elaboración propia con información y metodología de (COPAR, 2015), (OBTREN MX, 2022) y (PRODESEN, 2019)

Con esta información, el próximo paso para desagregar el sector eléctrico, consiste en reajustar de forma manual los valores de los principales insumos energéticos a los sectores con mayor intensidad en su consumo. Estos corresponden a los sectores de 2121 (Minería de carbón mineral) por parte de las

carboeléctricas y el 324-325 (Derivados del petróleo y del carbón e industrias químicas) por parte de las tecnologías convencionales y el ciclo combinado.

Las compras de carbón realizadas por el sector eléctrico 221 en el año 2018 ascienden a 7,467 y 13,747 millones de pesos en concepto de carbón doméstico e importado respectivamente. El carbón se reasignó hacia las tecnologías de carboeléctricas y termoeléctricas convencionales, en la misma proporción tanto para las compras domésticas como importadas. Dicha proporción se obtuvo de la muestra proporcionada por el PIIRCE del (PRODESEN, 2018) sobre el número de unidades eléctricas que emplean carbón, véase Tabla 3.5.

Ciclo combinado	Carboeléctricas	Termoeléctricas convencionales	Energía hidráulica	Energía solar	Energía eólica	Otras limpias	TDC
-	94.5%	5.5%	-	-	-	-	-

Tabla 3.5 Distribución de los insumos provenientes del sector Minería de carbón mineral (2121) por tipo de tecnología doméstica e importada.
Fuente: Elaboración propia con datos de (INEGI, 2021), (OBTREN MX, 2022), (COPAR, 2015) y la MCS 2018.

El diésel, combustóleo, gas natural y uranio se supusieron provenientes del subsector 324-325. Utilizando las fuentes anteriormente mencionadas fue posible calcular la participación de estos combustibles. En este caso si se distinguió entre cuánto porciento provino de compras al exterior y cuánto de compras domésticas tal como se visualiza en la Tabla 3.6.

Origen	Doméstico	Importado
Gas Natural	39%	61%
Combustóleo	85%	15%
Diésel	37%	63%
Uranio	0%	100%

Tabla 3.6 Origen doméstico e importado del Gas Natural, Combustóleo y Diésel.
Fuente: Elaboración propia con información de Prospectiva del Gas Natural 2018-2032 y Prospectiva del petróleo crudo y petrolíferos 2018-2032 de la Secretaría de Energía (SENER, 2020).

El diésel y el combustóleo fueron asignados a las termoeléctricas convencionales y el uranio hacia otros tipos de tecnologías limpias donde se contabilizaron las nucleoeléctricas. El gas natural fue distribuido entre ciclo combinado y termoeléctricas convencionales igualmente mediante una proporción calculada con el número de centrales y el costo de generación de cada tecnología. La distribución final se detalla en la Tabla 3.7.

	Ciclo combinado	Carboeléctricas	Termoeléctricas convencionales	Energía hidráulica	Energía solar	Energía eólica	Otras limpias	TDC
Doméstico	40.3%	-	59.7%	-	-	-	-	-
Importado	52.8%	-	46.0%	-	-	-	1.2%	-

Tabla 3.7 Distribución de los insumos provenientes del sector Derivados del petróleo y del carbón e industrias químicas (324-325) por tipo de tecnología doméstica e importada.
Fuente: Elaboración propia con datos de (INEGI, 2021), (OBTREN MX, 2022), (COPAR, 2015) y la MCS 2018.

Una vez reasignados los insumos energéticos la matriz importada queda finalizada con nuevos valores totales de importación, sin embargo, la contabilidad inicial del producto bruto total por tipo de tecnología queda desbalanceado en la matriz doméstica. Este dato es el más fuerte estadísticamente de todo el proceso y el más justificado metodológicamente con la apertura inicial, se prefiere dejarlo fijo. Es preferible redefinir el total del consumo intermedio buscando compatibilidad con los nuevos valores incorporados.

Con datos del censo económico (INEGI, 2021) se calcula la proporción que representa el consumo intermedio del producto bruto total para cada tecnología. Multiplicando estas proporciones por los PBT iniciales se calcula un estimado del consumo intermedio total alternativo al obtenido después de la reasignación de energías primarias. Ambos resultados son incompatibles con la contabilidad general de la matriz. Para la tecnología de ciclo combinado se mantiene el total derivado de la reasignación y para las restantes tecnologías se incorpora la nueva

estimación basada en censos. El residuo es atribuido al sector de transmisión y distribución de la electricidad.

Con los totales de consumo intermedio doméstico se ajustan los valores de las celdas del consumo intermedio para las 7 columnas de la apertura mediante el RAS modificado para matrices en conflicto con su información (MRAS). Se fijan (igualan a 0) los valores de las compras intermedias de energía primaria (sectores 2121 y 324-326) y se ajustan las matrices con RAS. Se reincorporan los valores de las compras intermedias de energía primaria de los sectores 2121 y 324-326 y la contabilidad general de la matriz queda restaurada. Más detalles sobre este método pueden consultarse en (Lenzen, Gallego, & Wood, 2009).

Por diferencia entre el producto bruto y el consumo intermedio, se obtienen los totales de valor agregado. Se fijan los valores de las remuneraciones a los asalariados y otros impuestos a la producción, y se ajustó por diferencia el valor del excedente bruto de capital. Para la tecnología de termoeléctricas convencionales quedan valores negativos para el excedente bruto de capital, quedando en evidencia el déficit financiero en el cual operan muchas centrales de estas tecnologías.

De esta forma queda finalizada la construcción de la matriz. Es preciso destacar la importancia analítica y metodológica de la construcción de esta Matriz de Contabilidad Social 2018 con la apertura al sector energético presentada en este documento. El método de desagregación realizado y detallado en esta sección se basa mayormente en la información disponible y su acceso, así como en las metodologías disponibles en la revisión de literatura.

Los datos sobre el sector eléctrico varían de país en país y para el caso de México la información pública sobre este sector es limitada y muchas veces contradictoria entre las diferentes fuentes. La matriz resultante representa una gran herramienta y el análisis a través del modelo de Leontief presenta grandes potencialidades en el estudio del sector eléctrico. El proceso descrito, además, puede servir como guía metodológica para la apertura de cualquier otro sector, teniendo en cuenta

las fuentes de datos disponibles y las características distintivas de la sección productiva en cuestión, o bien actualizando el trabajo realizado en esta apertura.

4. Resultados del modelo MCS 2018

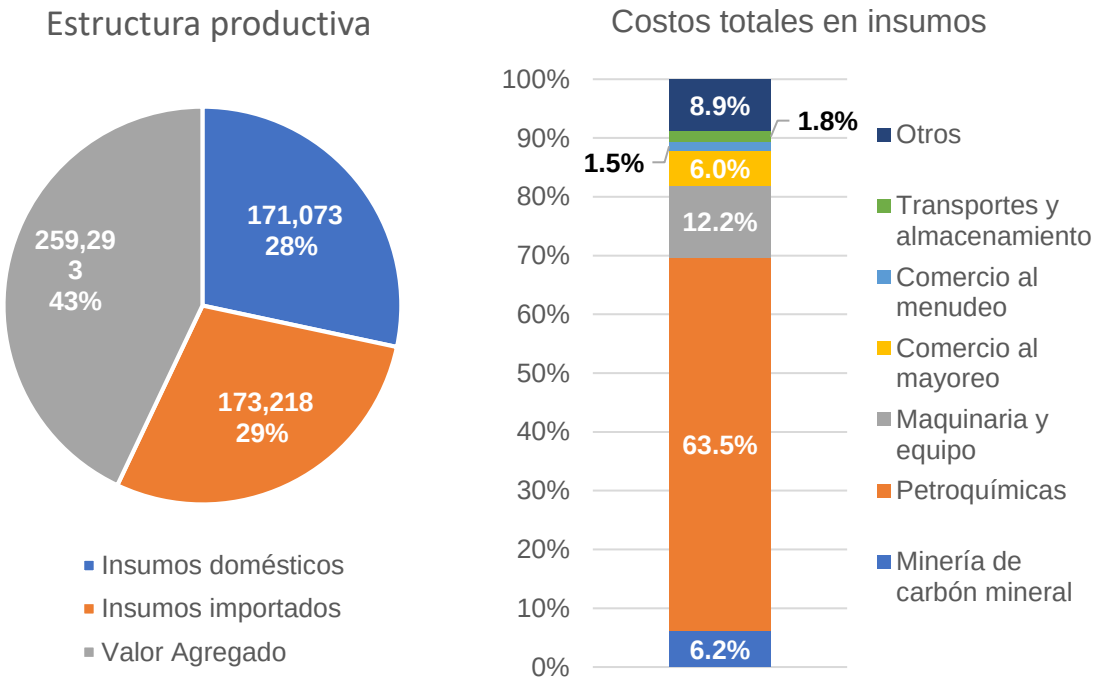
En esta sección se presenta una serie de resultados iniciales que caracterizan el sector eléctrico, primeramente, con respecto a la estructura productiva nacional y luego hacia el interior del sector incluyendo su distribución por tipo de tecnología para obtener una perspectiva de cómo se está dando el funcionamiento de esta actividad en el país. Además, se presentan los resultados de los impactos que tienen los costos de los insumos en el precio final de la energía eléctrica y el contraste entre las tecnologías limpias y las basadas en combustibles fósiles. Todo el análisis presentado se basa en los resultados del modelo económico multisectorial e interregional tipo SAM construido exprofeso para este estudio y descrito en el apartado anterior.

4.1 Análisis estadístico descriptivo de la industria eléctrica.

En la economía mexicana, el valor de la producción bruta de la actividad de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica alcanzó un monto de 602,568 millones de pesos en el año 2018. Se generó un valor agregado de 259 293 millones de pesos, representantes del 43.0% del producto bruto total, de los cuales el 73.1% correspondió al excedente bruto de operación e ingreso mixto bruto, 26.1% a la remuneración de asalariados y el restante 0.8% al pago de impuestos netos sobre la producción. La compra de insumos domésticos ascendió a un total de 171 073 millones de pesos, 28.4% del total, similarmente la de insumos importados a 173 218 (28.7%) y ambos orígenes de insumos recibieron un subsidio neto por parte del gobierno de 1 015 millones de pesos representando poco más del 0.1% del PBT (ver Gráfica 4.1, izquierda).

A la derecha de la misma gráfica podemos observar los principales costos de insumos en los que incurrió el sector, de origen tanto domésticos como importados, para la producción de energía eléctrica. El gran peso de las compras

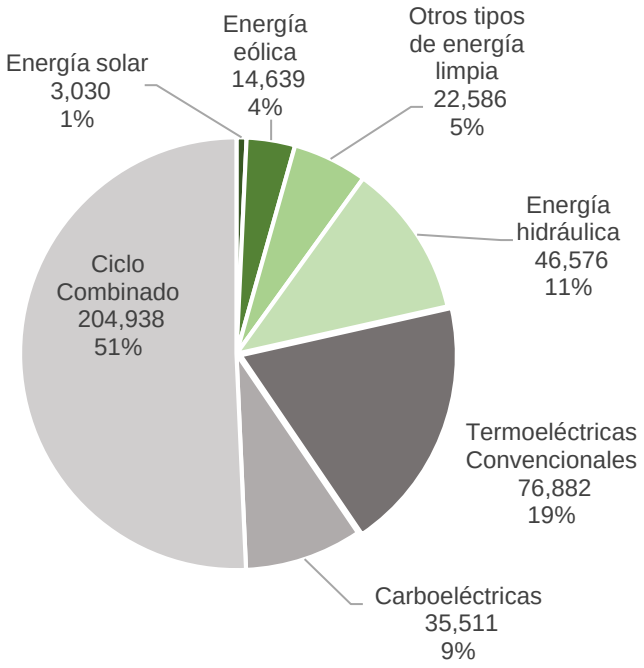
realizadas por esta industria corresponde al sector de petroquímicas[1], con un 63.5% por concepto de compras de combustibles fósiles como el diésel, el combustóleo y el gas natural principalmente empleados en la generación de la energía eléctrica. En un segundo lugar, ya más alejado, se encuentran las compras a la industria de maquinaria y equipo con 12.2%; en tercer lugar se encuentra el cúmulo de actividades productivas restantes de forma agregada que acumulan el 8.9% de las compras; en cuarto lugar los insumos de carbón mineral con 6.2% para la generación a través de carboeléctricas y por último, el pago a los servicios de comercialización al por mayor, los servicios de transporte y almacenamiento, y el comercio al menudeo con proporciones de 6.0, 1.8 y 1.5 puntos porcentuales respectivamente.



Gráfica 4.1 México, 2018. Estructura productiva y costos de insumos domésticos e importados del sector energético. Valor (millones de pesos, 2018=100) y Porcentaje del total (%).
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI.

[1] Se refiere específicamente al sector 324-326 Derivados del petróleo y del carbón; industrias químicas, del plástico y del hule.

Hacia dentro de la oferta del sector energético podemos desagregar como se comportó la producción bruta total correspondiente a la generación de electricidad por tipo de tecnología. En la Gráfica 4.2 se detalla que la generación eléctrica a través de centrales de ciclo combinado domina significativamente con un valor monetario de 204 938 millones de pesos que representan el 50.7% de la generación eléctrica. Esta oferta es secundada por las centrales termoeléctricas convencionales con un 19.0% que representan 76 882 millones de pesos. Completando las tecnologías fósiles se encuentran las centrales carboeléctricas que equivalen a un 8.8% con 35 511 millones de pesos, para un total de 78.5% de producción bruta asociada con tecnologías de generación de electricidad contaminante[2].

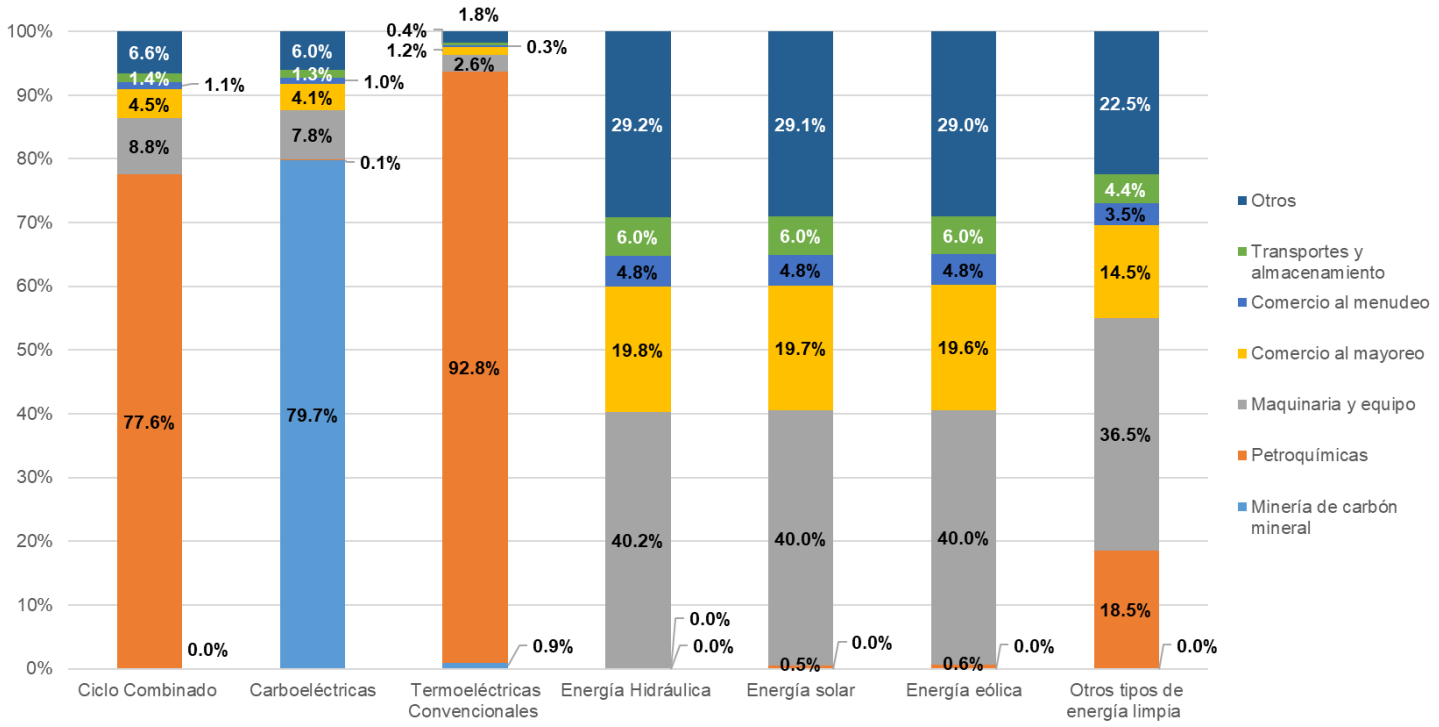


Gráfica 4.2 México, 2018. Estructura de la oferta nacional de energía eléctrica por tipo de tecnología. Valor (millones de pesos, 2018=100) y Porcentaje del total (%).
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI.

[2] En general, la clasificación contaminante es utilizada para referirse a la generalidad de la industria y debe ser tomada con cautela. La clasificación de tecnología de generación convencional — o contaminante — de (SENER, 2020) no incluye las plantas con equipos de captura y confinamiento de CO_2.

El 21.5% restante es asumido por las tecnologías limpias[3], comenzando por la generación a partir de energía hidráulica con 46 576 millones de pesos (11.5%), seguida por otros tipos de generación eléctrica limpia con 22 586 (5.6%) y finalizando con la generación eólica y solar con valores de 14 639 (3.6%) y 3 030 (0.7%) respectivamente.

Estos datos reflejan que la actividad económica de generación de electricidad se concentra mayormente en las tecnologías basadas en combustibles fósiles y que las energías limpias están lejos de alcanzar un rol protagónico en la oferta y la

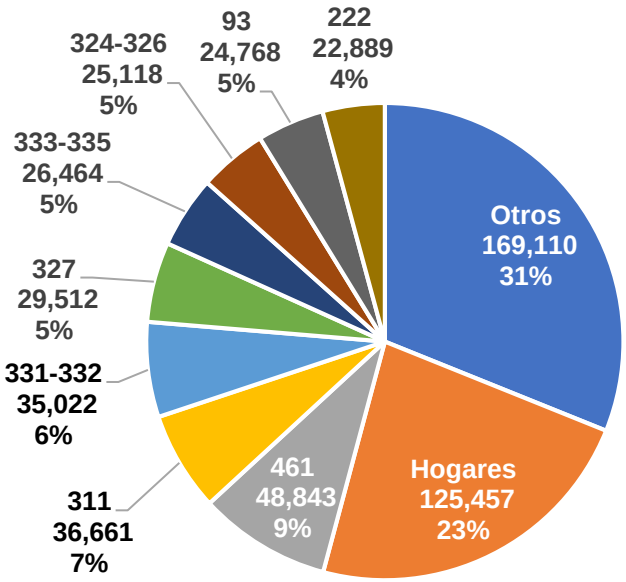


Gráfica 4.3 México, 2018. Costos de insumos totales por tipo de tecnología en la generación de energía eléctrica. Porcentaje del total (%).
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI.

[3] Esta clasificación se refiere también a la generalidad de la industria de energías limpias. Siguiendo la definición de (SENER, 2020) se usará limpias y renovables indiferentemente.

generación eléctrica. Por tanto, el sector eléctrico en su conjunto tiende a responder de acuerdo con la estructura de las tecnologías contaminantes, predominantes en su composición.

Dicha estructura se visualiza a través de la distribución de las compras realizadas para la generación de energía eléctrica por tipo de tecnología en la Gráfica 4.3. Es evidente el contraste entre tecnologías, principalmente las basadas en combustibles fósiles y las renovables. Para las energías limpias la estructura de costos se mantiene transversalmente similar entre todas, con una predominancia de las compras a la industria de maquinaria y equipo y el agregado de industrias recogida en la categoría otros.



Gráfica 4.4 México, 2018. Estructura de la demanda nacional de energía eléctrica.
Valor (millones de pesos, 2018=100) y Porcentaje del total (%).
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI.

Para las tecnologías contaminantes se tiene una heterogeneidad significativa, las termoeléctricas convencionales se caracterizan por el consumo sobre la industria petroquímica con hasta 92.8% del total de las compras. Las carboeléctricas dependen casi exclusivamente de los insumos del sector minero de carbón con

79.7% y para el caso de las centrales de ciclo combinado la distribución es más equitativa con una mayoría en insumos petroquímicos correspondientes a las compras de gas natural, su principal energía primaria.

Ahora pasemos a revisar cuales sectores dependen en mayor medida del consumo eléctrico para el funcionamiento de sus actividades productivas, esta información se muestra en la Gráfica 4.4.

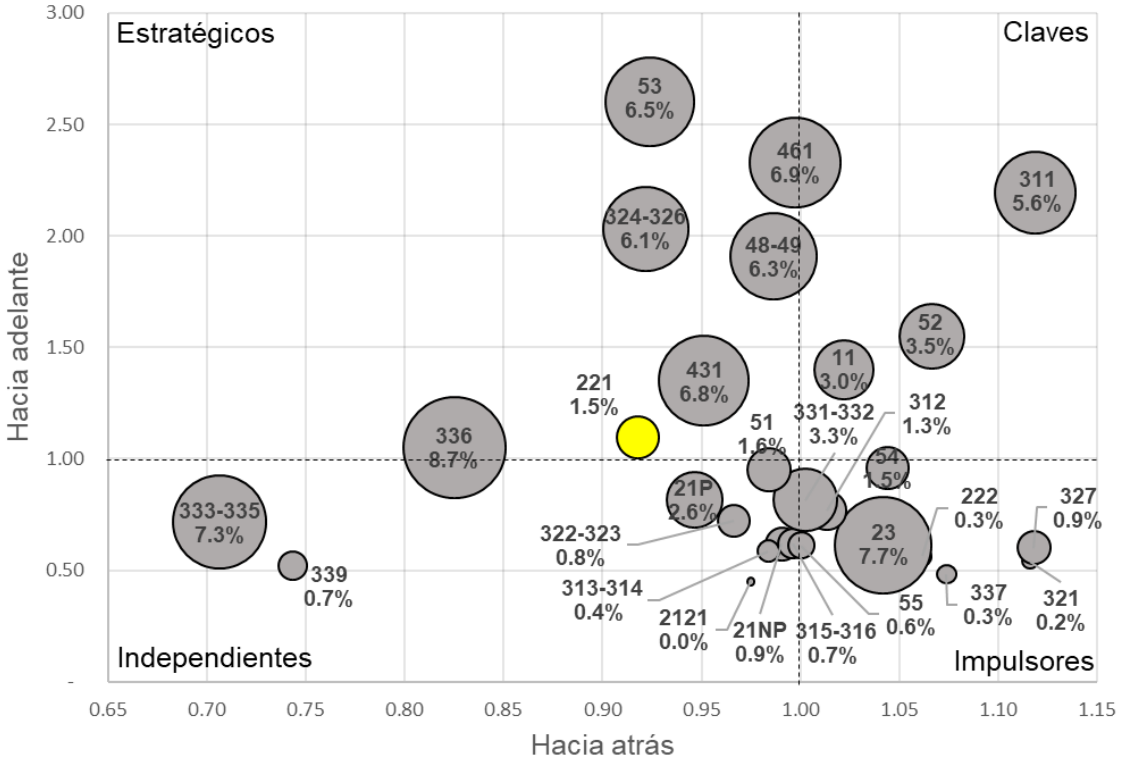
Obviando el agregado de industrias restantes incluidas en la categoría otros que representan el 31.1%, se tiene que el principal gasto en energía eléctrica lo realizan los hogares con un valor monetario de 125 457 millones de pesos que representan el 23.1% de la demanda total de energía. Más distante se encuentra el comercio al por menor con 9.0% y la mayor parte del consumo energético restante se concentra en actividades manufactureras como industrias metálicas (331-332), fabricación de productos a base de minerales no metálicos (327), maquinaria y equipo (333-335) y derivados del petróleo (324-326); entre todas equivalen al 28.1% del consumo energético total. Cierran la distribución las actividades de gobierno (93) y el suministro de agua y gas por ductos al consumidor final (222) con 4.6% y 4.2% respectivamente.

4.2 Efectos multiplicadores del sector eléctrico

A partir de la matriz de multiplicadores $\mathbf{M}$ se calcularon los valores totales de cada columna a fin de obtener los totales del efecto de arrastre, o efectos hacia atrás, y con la suma total de cada fila se obtienen los totales del efecto de dispersión, o efectos hacia adelante, de cada sector. Se puede identificar cómo se comporta el sector energético en la estructura productiva del país utilizando los índices de Rasmussen de arrastre hacia atrás y hacia adelante aplicados a los multiplicadores de los sectores productivos. Las líneas discontinuas señalan la normalización del promedio de multiplicadores explicado en la sección 2.1, que en este caso es de 2.33. Estas dos rectas determinan los cuatro cuadrantes en el plano cartesiano donde los sectores productivos pueden ser catalogados en

estratégicos, claves, independientes e impulsores en la Gráfica 4.5. Además, el tamaño de las burbujas indica el peso de cada actividad en la producción bruta total de la economía.

Los sectores con mayores multiplicadores de hacia atrás (más a la derecha en la Gráfica 4.5) se concentran en actividades de gobierno (93) con 2.64, industria alimentaria (311) con 2.61, fabricación de productos a base de minerales no metálicos (327) con 2.61, industria de la madera (321) con 2.60 y servicios educativos (61) con 2.57. Estos sectores son especialmente sensibles a cambios en la demanda final y tienen pocos efectos de difusión por lo que en su mayoría se catalogan como impulsores y claves, mientras que sus participaciones en el PBT son variadas.



Gráfica 4.5 México, 2018. Clasificación de los sectores basada en los efectos de difusión y absorción. Participación en la producción bruta total (Porcentaje).
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI.

En cuanto a los sectores con mayores efectos hacia adelante se encuentran los servicios inmobiliarios y de alquiler (53) con 6.07, el comercio al por menor (461) con 5.44, la industria alimentaria (311) con 5.12, derivados del petróleo y el carbón (324-326) con 4.74 y transporte y almacenamiento (48-49) con 4.45.

Estas actividades productivas son sensibles a los costos de producción exógenos, encareciendo el precio de sus productos finales y provocando, bajo un cambio unitario, una inflación en toda la economía. Sus participaciones en la producción total son bastante significativas y muy por encima del promedio. Se caracterizan por tener altos multiplicadores de producción, en su mayoría se clasifican como sectores claves para la economía excepto para el caso de la industria petroquímica que se califica como estratégico por sus bajos efectos de absorción.

Para determinar el grado de relevancia de cada sector, independientemente de su clasificación, se calcula la distancia euclidiana hacia el centro $(1,1)$. En la Tabla 4.1 se muestran los ocho sectores que más se desmarcan de la tendencia en la economía mexicana.

Servicios inmobiliarios, comercio al por menor, derivados del petróleo y transporte y almacenamiento se destacan como sectores estratégicos que se caracterizan por ser insumos frecuentes o de gran intensidad por algunos sectores y a su vez, requieren pocos bienes y servicios para su producción. Son importantes del lado de la oferta porque producen de forma “barata” — en el sentido de que requieren pocos insumos — y se requieren a través de toda la economía. Una falla de estos sectores puede generar múltiples cuellos de botella que malogren cualquier estrategia de desarrollo.

La industria alimentaria y los servicios financieros se clasifican como sectores claves. Estos requieren y son requeridos en grandes cantidades por toda la economía. Su diferencia con los estratégicos radica en también demandan mucho a las restantes actividades económicas siendo claves en la oferta y la demanda.

El sector actividades de gobierno se clasifica como impulsor ya que demanda con intensidad bienes y servicios, pero no es requerido de igual forma por los sectores

productivos y su producción suele estar orientada a la demanda final, otros sectores con estas características son la fabricación de muebles, y los servicios de esparcimiento, culturales y deportivos.

Sector	Multiplicador de dispersión	Multiplicador de arrastre	Relevancia	Clasificación
53 - Servicios inmobiliarios…	6.07	2.16	1.60	Estratégico
461 - Comercio al por menor…	5.44	2.33	1.33	Estratégico
311 - Industria alimentaria…	5.12	2.61	1.20	Clave
324-326 - Derivados del petróleo…	4.74	2.15	1.03	Estratégico
48-49 - Transportes, almacenamiento…	4.45	2.30	0.91	Estratégico
93 - Actividades del Gobierno.	1.02	2.64	0.58	Impulsor
52 - Servicios financieros y de seguros.	3.62	2.49	0.55	Clave
2121 - Minería de carbón mineral	1.05	2.27	0.55	Independiente

Tabla 4.1 Los ocho sectores con mayor relevancia de México, sus efectos de dispersión y arrastre, y su clasificación.
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI.

Por último, la minería de carbón mineral se clasifica como sector independiente, al igual que otros sectores como maquinaria y equipo, y la fabricación de prendas de vestir. Los sectores independientes necesitan pocos insumos para su funcionamiento y suelen vender hacia pocos sectores o concentrarse hacia la demanda final ya sea en forma de exportaciones, consumo residencial o gasto de gobierno. Su funcionamiento no suele verse afectado por irregularidades en la economía doméstica. Por ejemplo, el caso del sector mexicano de maquinaria y equipo se clasifica como independiente porque adquiere insumos desde el exterior y su producción final también está destinada en su mayoría hacia las exportaciones.

El sector eléctrico se puede identificar de color amarillo en la Gráfica 4.5. El multiplicador de arrastre (2.56) se encuentra por debajo de la media nacional, mientras que el de dispersión (2.14) se encuentra por encima. Su participación en

la producción bruta nacional es de 1.5%, por debajo del promedio (2.9%). La generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica se puede entonces clasificar como un sector estratégico, sin embargo, no es demasiado relevante dentro de estos.

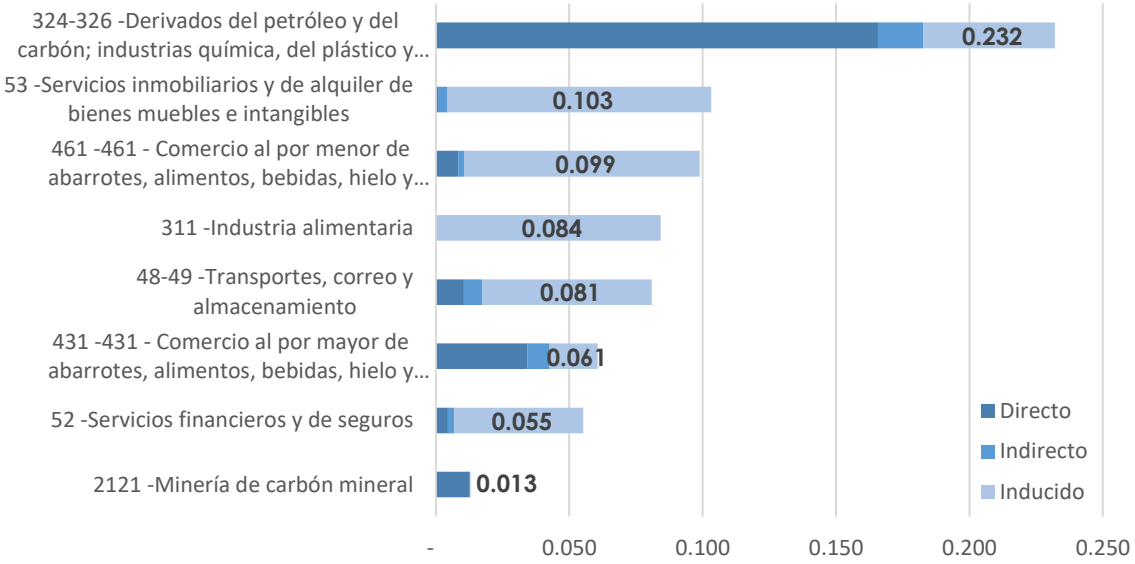
El sector eléctrico no demanda mucho a la economía nacional ya que su multiplicador de arrastre es bajo. Aun así, requiere de grandes cantidades de insumos como el carbón, combustóleo y gas natural, provenientes de la minería de carbón mineral y el sector petroquímico doméstico e importado. Este último es importante resaltarlo ya que en los multiplicadores no está siendo contabilizado, pudiéndose interpretar como que el sector eléctrico está lo suficientemente independiente de sus insumos energéticos.

Transformar la matriz energética hacia la producción de electricidad mediante tecnologías limpias y renovables lo desvincula de la necesidad de energías primarias provenientes de otros sectores, generando la electricidad mucho más barata y colocándolo como un sector aún más estratégico para la economía. Adicionalmente lo hace menos dependiente de importaciones cuyos precios no son regulados dentro de la economía y pueden provocar alteraciones exógenas en el suministro y el precio de la electricidad. Esta situación es estudiada con mayor profundidad en las secciones siguientes.

4.3 Impacto de los costos sobre los precios finales de la electricidad

Luego de explorar las características del sector energético dentro del sistema nacional productivo, podemos pasar a estudiar los impactos que tienen los costos de producción sobre los precios finales de la electricidad hacia dentro de la generación de energía eléctrica. Estos impactos influyen en cómo se desarrolla la generación de electricidad y evidencian a través de que vías la industria en general es más sensible a variaciones en los precios, el alcance de estos impactos, y la heterogeneidad entre los tipos de tecnología en la producción de electricidad.

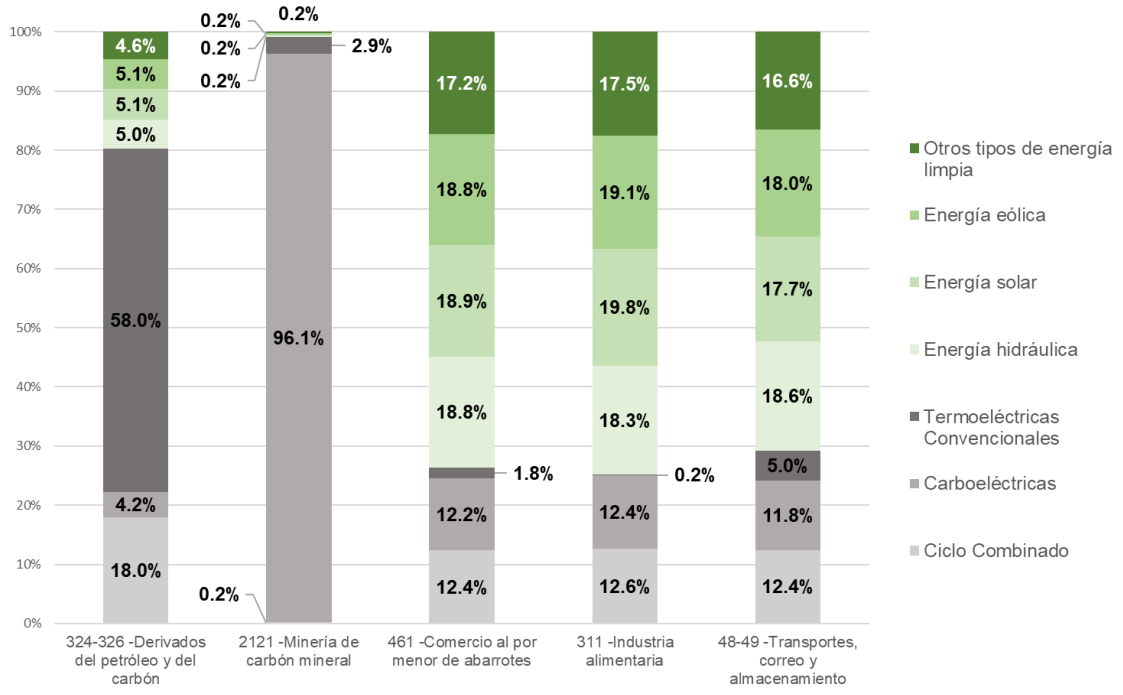
La Gráfica 4.6 muestra los ocho insumos que mayor impacto tienen sobre la generación de electricidad (celdas de la columna correspondiente al sector eléctrico 221 en la matriz **M** y su descomposición de Stone). Variaciones unitarias en el costo de los productos petroquímicos, en conceptos como combustóleo, diésel o gas natural, provocarían un aumento de 0.232 pesos en el precio de la electricidad. La mayor parte del efecto (71%) ocurre de manera directa debido al consumo de combustibles fósiles de las plantas de generación, y otra bastante significativa (21%) ocurre como efecto inducido luego del consumo de los hogares y una nueva demanda de electricidad.



Gráfica 4.6 Impactos de los costos en los insumos sobre la generación de energía eléctrica.
(Primeros 7 sectores con mayor multiplicador total y el sector minería de carbón).
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI.

Los demás insumos que mayormente afectan a la generación no son energéticos primarios sino costos principalmente logísticos tales como los servicios inmobiliarios y de alquiler con una afectación total al precio final de la electricidad de 103 pesos, comercio al por menor con 99, la industria alimentaria con 84, servicios de transporte y almacenamiento con 81, comercio al por mayor con 61, servicios financieros con 55 y minería petrolera con 45 pesos por cada mil de aumento en los costos.

Estos impactos se deben principalmente al efecto de retroalimentación proveniente del pago a los factores de producción, especialmente la remuneración a asalariados. Para el caso del comercio al por mayor la afectación predomina de forma directa y para la minería petrolera el impacto ocurre indirectamente, es decir, el coste del petróleo encarece al combustóleo y este en última instancia a la generación eléctrica. Para el caso de la minería de carbón mineral se tiene un multiplicador menor (0.013 pesos en el precio final de la electricidad por cambio unitario en el costo del carbón) pero donde la totalidad de la afectación ocurre de manera directa, indicando una dependencia con este insumo del sector eléctrico y particularmente, como se verá enseguida, de la generación de electricidad a través de carboeléctricas.



Gráfica 4.7 Afectación de los insumos a la generación eléctrica por tipo de tecnología (Porcentaje).
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI.

En la Gráfica 4.7 se detallan las afectaciones, expresadas en porcientos, de los insumos hacia cada tecnología de generación. El impacto ante la variación de los

costos en la industria petroquímica ocurre principalmente en las tecnologías que la utilizan como energía primaria, las termoeléctricas convencionales resultan las más afectadas en un 58.0% seguidas por las centrales de ciclo combinado con 18.0%. La afectación hacia las generaciones de energía limpias son pequeñas relativas a las de combustibles fósiles, de manera agregada estas agrupan un 19.8% de la afectación. Las carboeléctricas son las menos afectadas con solo 4.2 puntos porcentuales del aumento en el precio de la generación.

Por el contrario, si se visualiza la columna correspondiente a la minería de carbón mineral, las carboeléctricas constituyen, con un 96.1%, casi la totalidad del destino de las afectaciones en los costos de este sector. Esta tecnología es por si sola responsable de la sensibilidad del sector eléctrico a los precios del carbón. Los demás insumos afectan de forma más homogénea a las diferentes tecnologías, sin embargo, lo hacen en una mayor proporción sobre aquellas poco contaminantes con más del cincuenta por ciento del total en cada actividad productiva.

El precio de la electricidad en México depende de forma crítica de las energías primarias fósiles, ningún otro insumo impacta siquiera en la mitad como este lo hace, y ocurre a su vez, en las tecnologías de generación más contaminantes. Además, es importante señalar que, al ocurrir en su mayor parte de forma directa, significa que la dependencia con los insumos fósiles no se debe a la configuración de la economía, sino a una dependencia directa proveniente de la tecnología que solo puede ser sobrepuesta a través de un cambio estructural de la industria.

Los impactos del aumento en los costos de energías primarias fósiles no solamente afectan al precio final de la electricidad. Mediante las interrelaciones sectoriales el precio de energía eléctrica termina por afectar otros sectores. Mediante el análisis de ruta se pueden identificar que parte de la afectación proviene de la generación de electricidad, particularmente de la basada en combustibles fósiles.

En la Tabla 4.2 se muestran respectivamente los sectores origen y destino, la trayectoria de la afectación (es decir, la vía por la cual influyen los costos sobre los precios), el efecto global, el efecto directo, el efecto total (resultado del efecto

directo por el multiplicador de senda), el multiplicador de senda (describe el resultado de todas las interacciones que ocurren entre los sectores incluidos en la trayectoria), y por último, el porcentaje que representa el efecto total sobre el global. TC corresponde a la tecnología de Termoeléctricas Convencionales, CC a Ciclo Combinado y C a Carboeléctricas.

RUTA DE DESCOMPOSICION DE LA INFLUENCIA DE PRECIOS							
Incremento de costos del sector i	Efecto del precio en el destino j	Trayectoria	Global	Directo	Total	Senda	%T/G
Derivados del petróleo y del carbón…	Suministro de agua y suministro de gas…		0.116	0.011	0.013	1.174	11.4%
		(324-326)-(TC)-(222)		0.018	0.021	1.173	17.7%
		(324-326)-(CC)-(222)		0.012	0.014	1.179	12.1%
Derivados del petróleo y del carbón…	Fabricación de productos a base de minerales no metálicos		0.118	0.025	0.032	1.257	26.9%
		(324-326)-(TC)-(327)		0.008	0.010	1.256	8.6%
		(324-326)-(CC)-(327)		0.005	0.007	1.262	5.9%
Minería de carbón mineral	Suministro de agua y suministro de gas…		0.003	-	-	1.061	0.0%
		(2121)-(C)-(222)		0.002	0.002	1.062	79.7%
		(2121)-(TC)-(222)		0.000	0.000	1.063	4.6%
Minería de carbón mineral	Fabricación de productos a base de minerales no metálicos		0.002	0.000	0.000	1.136	1.6%
		(2121)-(C)-(327)		0.001	0.001	1.137	65.8%
		(2121)-(TC)-(327)		0.000	0.000	1.138	3.8%

Tabla 4.2 México, 2018. Descomposición de ruta de la influencia de precios de las energías primarias a los sectores más afectados a través de la generación eléctrica.
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI

La primera serie de resultados corresponde al incremento de los costos en el sector petroquímico y su efecto sobre el sector de suministro de gas y agua por ductos. En la primera línea se describe la trayectoria directa entre estos. La

afectación global fue de 0.116 pesos por aumento unitario en las energías primarias, sin embargo, la afectación por compras directas del sector 222 al 324-326 fue de 0.011 pesos y su interacción total entre ellos de 0.013 que representa solamente el 11.4% de toda la afectación.

Se puede ver que un 12.1% del efecto proviene por vía de las centrales de ciclo combinado y hasta un 17.7% desde las termoeléctricas convencionales. Las tecnologías limpias, así como las carboeléctricas — que no fueron incluidas en la tabla de resultados — contribuyen entre todas apenas en un 0.1%, principalmente porque no utilizan como insumo primario los productos de la industria petroquímica.

La afectación del aumento del precio de derivados del petróleo sobre el suministro de gas y agua al consumidor final se debe hasta en un 29.8% al aumento que provoca sobre el precio de la electricidad cuando es generada a través de ciclo combinado y termoeléctricas convencionales, y este entonces provoca el aumento del precio del gas por ducto. Es necesario aclarar que posiblemente estas afectaciones se deban al propio suministro de gas proveniente de los procesos de generación eléctrica y no necesariamente a un consumo eléctrico per se.

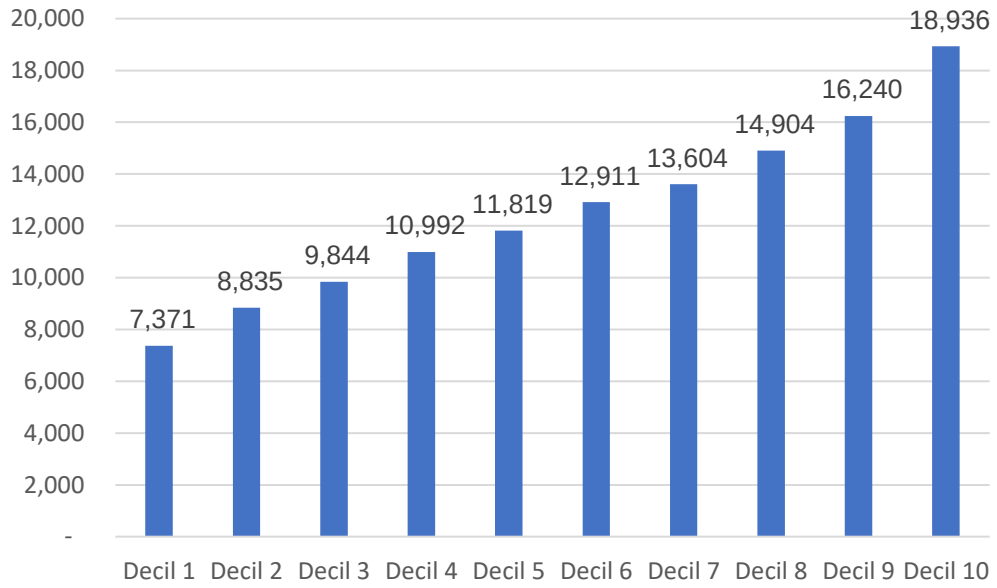
El impacto ocurre de forma similar cuando analizamos un aumento sobre la minería de carbón mineral. Esta vez la afectación proviene por el aumento del precio de la electricidad producida en carboeléctricas con hasta un 79.7% provocado por esta vía. Cabe destacar que en este caso el suministro de gas y agua por ducto no se ve afectado directamente por un aumento del precio del carbón.

La fabricación de productos a base de minerales no metálicos si es afectada mediante el consumo eléctrico. Las termoeléctricas convencionales y las de ciclo combinado afectan el precio de manera conjunta en un 14.5% cuando los combustibles fósiles como el combustóleo o el gas natural aumentan de costo. Cuando esto ocurre en la minería de carbón su afectación proviene de la generación por carboeléctricas hasta en un 65.8%, mientras que solo un 1.6% es provocado por la interacción directa entre esta industria y el carbón mineral.

Esto significa que casi un tercio del aumento en el precio de productos de origen no metálico como el vidrio, arcilla y cemento; provocado por el encarecimiento del carbón en su origen puede ser evitado si la generación por carboeléctricas es reemplazada por cualquier otra tecnología. Si además la energía fuera generada a través de tecnologías limpias se evitarían hasta casi un 15% del aumento de precios provocado por los combustibles fósiles como el combustóleo y el gas natural. Bajo una matriz de generación más limpia la economía en general, y no solo el sector eléctrico, es más segura ante los vaivenes del mercado energético internacional.

4.3.1 **El sector eléctrico y el consumo residencial**

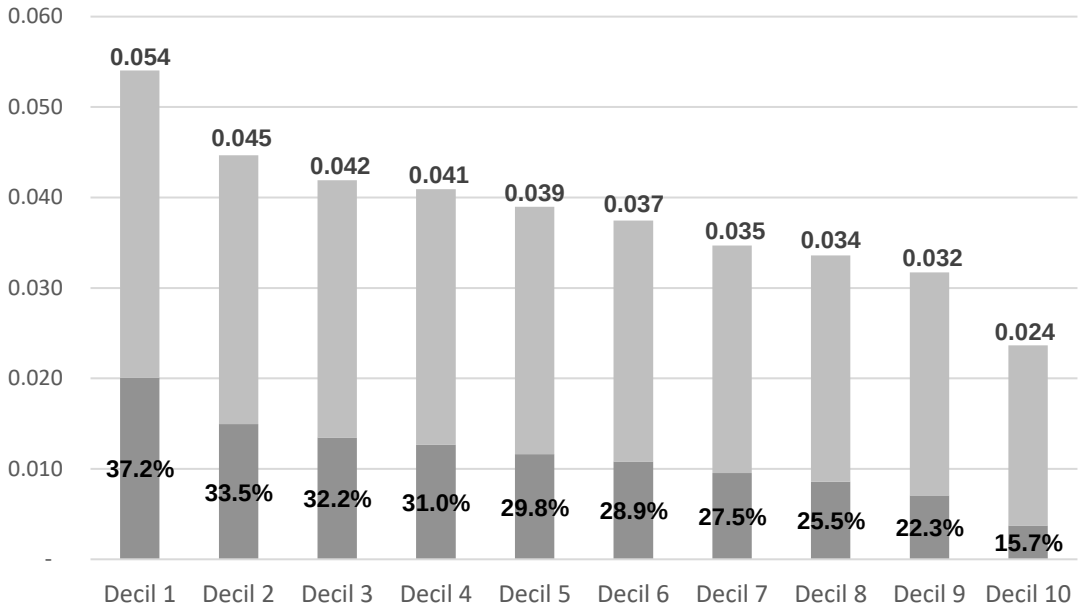
El aumento de precios en la electricidad no solo impacta sobre el sector industrial, por el contrario, el consumo residencial de los hogares representa gran parte de la demanda eléctrica con un 23% del gasto en electricidad total del país (véase Gráfica 4.4). La Gráfica 4.8 muestra la distribución por decil del gasto en electricidad por parte de los hogares.



Gráfica 4.8 México, 2018. Estructura del gasto en energía eléctrica por decil de ingreso.
Valor (millones de pesos, 2018=100)
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI.

El índice de GINI para esta distribución es de 0.86, por lo que el gasto en consumo eléctrico está bastante equitativo entre los deciles de ingreso. Este resultado es esperado dada la naturaleza baja de la elasticidad del consumo eléctrico respecto al ingreso en los hogares. Aun así, a mayor ingreso el gasto en electricidad aumenta hasta alcanzar casi el triple en el decil superior con 18,936 millones de pesos con respecto al inferior, con solo 7,371 millones de pesos.

Sin embargo, al analizar los impactos que tiene un aumento del precio de la electricidad sobre el consumo de los hogares, se puede advertir que tanto el efecto global como el efecto directo son más fuertes para aquellos deciles de menores ingresos. Por cada variación unitaria del precio de la electricidad el consumo del hogar se ve afectado de 5.4 (decil 1) a 2.4 (decil 10) centavos por unidad de energía eléctrica. El efecto directo también disminuye de 1.9 a 0.3 centavos y el efecto total entre el sector eléctrico y los hogares va del 37.2% del efecto global hasta el 15.7%.



Gráfica 4.9 México, 2018. Distribución de la influencia de precios de la electricidad sobre los hogares por decil de ingreso (efecto total y porciento del efecto directo).
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI

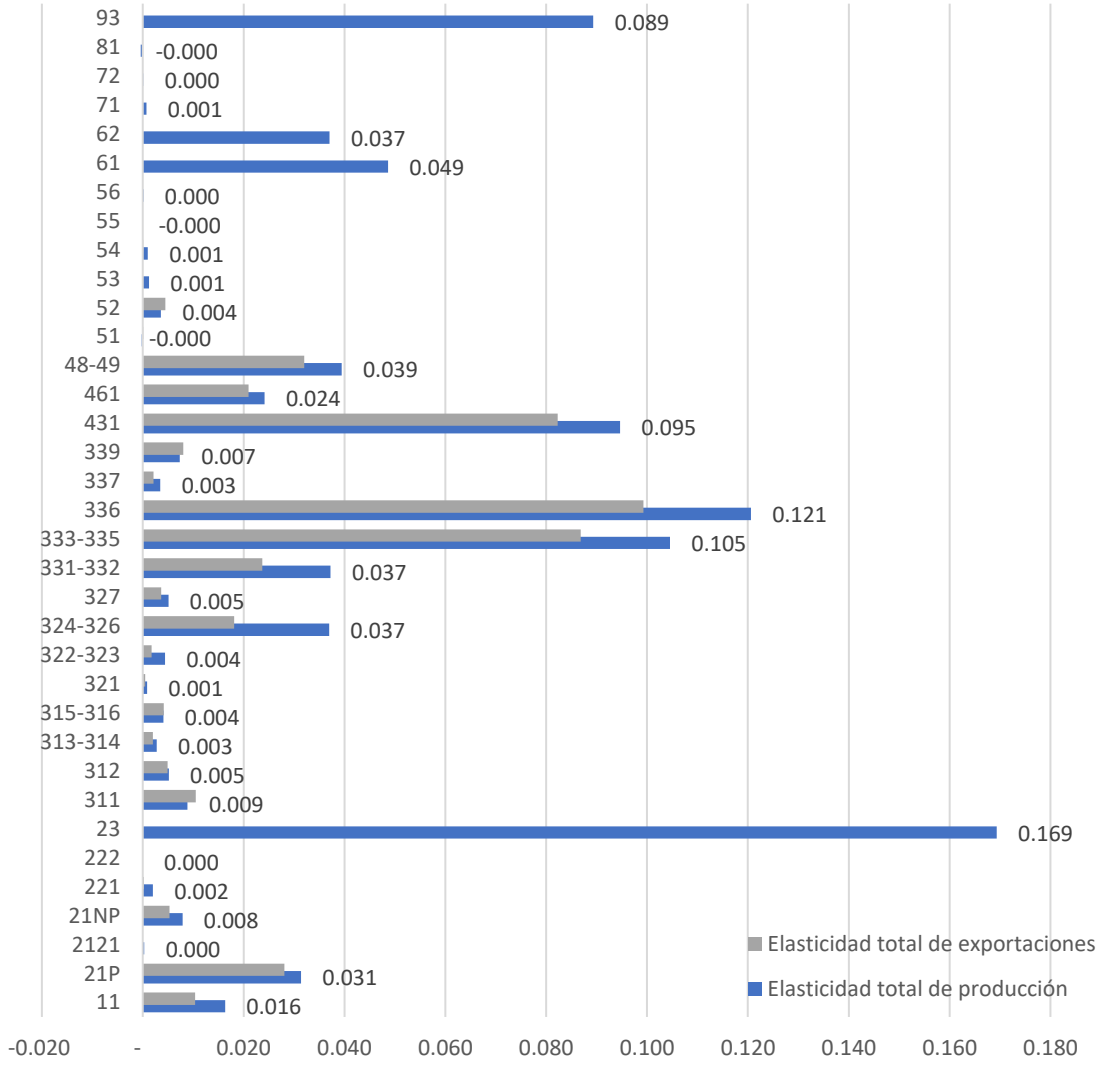
En este caso la distribución tiene un índice de GINI de 0.90, al ser mayor que el anterior significa que el impacto en los bolsillos de los hogares es más equitativo que la forma en la que estos consumen y pagan por la electricidad. A pesar de esto, ocurre que los hogares con mayores ganancias gastan más que los pertenecientes a los estratos más bajos y sin embargo el encarecimiento de la electricidad tiene un impacto global regresivo en el sentido de que recae con mayor fuerza sobre los deciles bajos. Se afecta el consumo y el bolsillo de manera más significativa para un hogar de bajos ingresos que para uno de altas remuneraciones. Además, el efecto ocurre más rápido en los hogares pobres y se tarda más hacia los ricos debido a que el efecto directo es menor tanto de forma absoluta como en proporción del efecto global.

Estos resultados se pueden dar en su interpretación dual. El efecto positivo de la transición a fuentes renovables de energía en el precio final de la electricidad se expresa como una contribución a los hogares más pobres. En este caso tenemos que el gasto en electricidad disminuiría de forma progresiva a través de la distribución del ingreso tal y como muestra la misma Gráfica 4.9. Los mismos resultados se pueden interpretar como los pesos que se ahorra cada decil por cada peso que se abarate el precio de la electricidad, además de que este efecto llegaría más rápidamente a los deciles inferiores.

4.3.2 **Elasticidades totales**

Los multiplicadores presentados dan una perspectiva de que tan propagables son los efectos ocurridos en un sector hacia el resto de la economía, particularmente los efectos de los costos de energías primarias sobre en la producción de electricidad y esta a su vez sobre los restantes sectores. A pesar de que dos sectores tengan multiplicadores de precios o de producción similares, si estos tienen tamaños diametralmente distintos dentro del producto bruto total, entonces los efectos en la práctica serán muy diferentes para cada sector. Esto

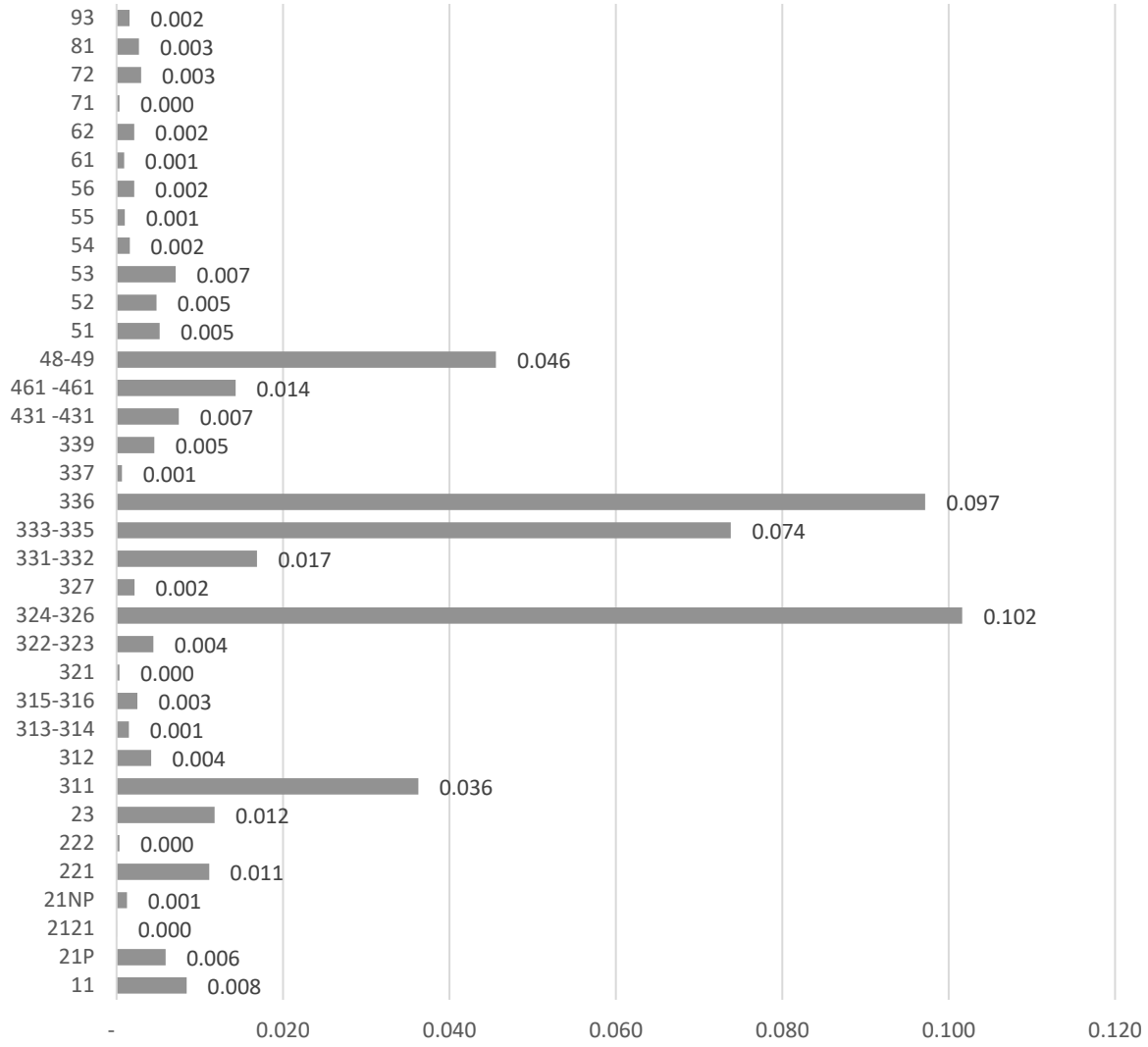
evidencia la necesidad de tomar en cuenta, no solamente la capacidad de propagación de los sectores — contabilizado en los multiplicadores — sino, la importancia relativa de las distintas actividades productivas en el conjunto de la economía estudiada.



Gráfica 4.10 México, 2018. Elasticidades totales de producción y exportaciones (los valores representados corresponden a la elasticidad total de producción).
Fuente: Elaboración propia con datos de la MCS 2018.

Primeramente, se muestran los resultados para las elasticidades totales de producción y de exportaciones en la Gráfica 4.10. Aquí se destacan los sectores de construcción (23), fabricación de equipo de transporte (336) y el sector

maquinaria y equipo (333-335). La interpretación corresponde a que por cada cambio unitario porcentual en la demanda final de estos sectores se produce una variación del 0.169, 0.121 y 0.105 por ciento de la producción bruta respectivamente. Por otro lado, ante una oscilación del 1% en las exportaciones de los sectores fabricación de equipo de transporte (336), maquinaria y equipo (333-335) y comercio al por mayor (431) se provoca un cambio porcentual del 0.099, 0.087 y 0.082 en el producto bruto total de la economía.



Gráfica 4.11 México, 2018. Elasticidades totales de importaciones
Fuente: Elaboración propia con datos de la MCS 2018.

El sector de construcción evidencia la importancia del análisis de elasticidades. Con un valor del multiplicador de producción cercano al promedio (2.43), el tamaño que este sector tiene en la demanda final, lo ubica como el sector al cual la economía nacional es más sensible. A pesar de que existen otros sectores con mayor capacidad de propagación de estos efectos, los cambios en la demanda de construcción impactan como ningún otro sector a todas las demás actividades productivas, así como las cuentas de consumo de los hogares e instituciones.

El sector eléctrico en este caso no resulta relevante ya que se exporta muy poca energía al exterior (4 338 millones de pesos) y las demás cuentas exógenas tampoco demandan electricidad de manera significativa. Sin embargo, es interesante el cálculo de las elasticidades totales de importaciones, de la Gráfica 4.11.

Acá la interpretación ocurre dentro del marco del modelo de precios. Si bien las importaciones de energía eléctrica tampoco son importantes en la producción de la economía, el caso del sector de derivados del petróleo (324-326) es muy relevante. Se puede observar que por cada unidad porcentual que varíe el precio del petróleo externo, se afecta en poco más de un 0.1% los precios internos del país. Si a esto le sumamos que el sector eléctrico gasta en insumos petroquímicos importados 118 672 millones de pesos que representan más del 54% del total que utiliza en este concepto, se puede concluir que una parte significativa de los precios eléctricos en México es determinada por agentes externos al país.

Las variaciones externas de precios en los productos de origen fósil utilizados en la generación eléctrica terminan importándose al país, afectando los precios internos de todos los sectores y en particular los del sector eléctrico, se encarece la generación de electricidad y, por último, los precios finales que pagan las demás actividades productivas y los hogares. Existe cierta evidencia de inseguridad energética en el sistema eléctrico mexicano y poca autonomía respecto a los precios de los energéticos en el mercado mundial. Para garantizar el correcto funcionamiento de la producción eléctrica el gobierno termina por compensar la

variabilidad de precios a través de subsidios, estableciendo una dura carga fiscal sobre los recursos federales.

4.4 Comentarios finales del capítulo

La industria eléctrica mexicana está caracterizada por una gran dependencia de insumos de energía primaria, la cual es suplida en gran medida por combustibles fósiles importados. El precio de estos insumos es controlado por el mercado mundial que en últimos años se ha visto irregular provocando incertidumbre e inestabilidad en el sector energético mexicano. Para garantizar el correcto funcionamiento de la producción eléctrica el gobierno compensa la variabilidad de precios a través de subsidios, estableciendo una dura carga fiscal sobre los recursos federales.

El sector eléctrico se reciente fuertemente ante un aumento de precios de sus energías primarias, principalmente en la generación de la electricidad a partir de combustibles fósiles, responsable de más de la mitad del aumento del precio final. Pero las afectaciones van más allá implicando a todos los sectores productivos del país, en especial el sector manufacturero, base de la demanda energética del país, y además al gasto de los hogares por concepto de electricidad. En este último posee un efecto regresivo afectando con mayor intensidad e inmediatez sobre los estratos más bajos del ingreso.

Su transversalidad hacia todos los agentes económicos impera una solución que garantice la seguridad energética del país a precios competitivos. La transición energética hacia tecnologías limpias es, por tanto, una necesidad no solamente desde un punto de vista ambiental sino una necesidad económica y central en la estrategia de desarrollo de México, pudiendo aportar un triple dividendo para México: menos contaminación atmosférica, precios de electricidad más baratos y mayor seguridad energética para el país.

5. Sustitución perfecta de tecnologías contaminantes por energías renovables

Como hemos visto hasta ahora, la industria de la generación eléctrica enfrenta desafíos significativos, marcados por una creciente conciencia ambiental y la necesidad de transitar hacia fuentes de energía más sostenibles. México, como parte de este panorama global, se encuentra en una encrucijada energética, donde la elección de tecnologías de generación eléctrica no solo define el perfil ambiental del país, sino también su dinámica económica y social. Este capítulo se inserta en este contexto, proponiendo un análisis detallado de un escenario hipotético pero fundamental: la sustitución completa de las tecnologías de generación eléctrica más contaminantes por alternativas renovables.

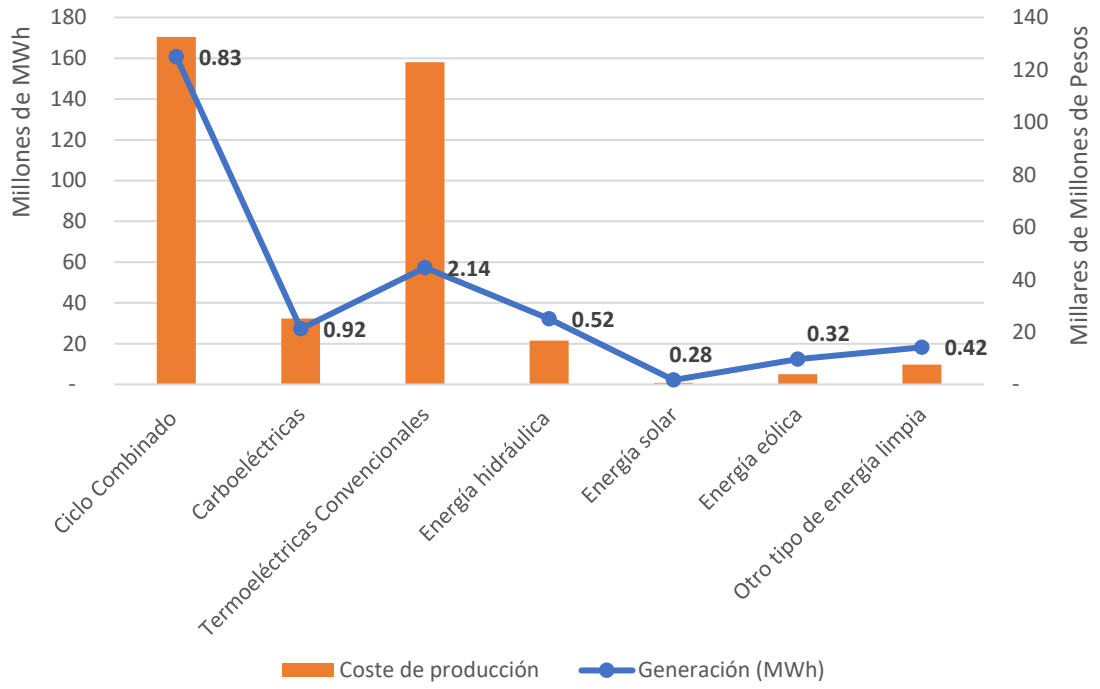
La transición hacia fuentes de energía renovables no es solo una cuestión ambiental, sino también una estrategia económica crucial. Las tecnologías renovables, como la eólica y la solar, ofrecen un camino hacia una mayor sostenibilidad, potencialmente reconfigurando no solo el sector energético, sino también la economía en su conjunto. Este capítulo explora las implicaciones de esta transición, analizando cómo una sustitución perfecta de tecnologías contaminantes por renovables podría repercutir en la estructura económica de México.

Dentro del espectro de tecnologías de generación eléctrica en México, la eficiencia de producción y los costos asociados juegan roles críticos en determinar su viabilidad y sostenibilidad a largo plazo. La Gráfica 5.1 ilumina esta dinámica, desplegando la generación total en megavatios-hora (MWh), el costo total de producción en millones de pesos, y un indicador clave de eficiencia: el costo por kilovatio-hora (KWh).

Al observar las tecnologías con mayores volúmenes de generación, encontramos que el ciclo combinado sobresale como el de mayor producción energética con 160,672,733 MWh, incurriendo en los costos más elevados con 132,649 millones

de pesos. Sin embargo, su eficiencia es notable, reflejada en un costo relativamente bajo por KWh de 0.83 pesos.

Por otro lado, las carboeléctricas, aunque presentan niveles de producción significativamente menores, con 27,344,983 MWh, exhiben un costo de producción de 25,140 millones de pesos, resultando en una eficiencia de 0.92 pesos por KWh. Esta cifra, aunque cercana a la del ciclo combinado, destaca la necesidad de evaluar el desempeño de la tecnología no solo en términos de costos económicos, sino también de impacto ambiental.



Gráfica 5.1 México, 2018. Generación total, costo de producción de electricidad y costo por KWh por tipo de tecnología.
Fuente: Elaboración propia con datos de la MCS 2018 y (PRODESEN, 2018).

Las termoeléctricas convencionales, que representan una porción significativa de la infraestructura energética existente, generaron 57,368,534 MWh a un costo de 122,918 millones de pesos. Esta tecnología arroja un costo de producción por KWh de 2.14 pesos, el más elevado entre las tecnologías analizadas. Este dato resalta la disyuntiva económica que plantean las termoeléctricas convencionales:

aunque son esenciales para satisfacer la demanda energética actual, incurren en costos operativos altos y tienen implicaciones ambientales que no pueden ser desatendidas. El alto costo por KWh refleja no solo los gastos inherentes a la producción de energía por medio de combustibles fósiles sino también la urgencia de transitar hacia alternativas más limpias y rentables.

La disyuntiva económica se acentúa cuando contrastamos estos datos con las fuentes de energía renovable como la solar y la eólica. A pesar de su actual contribución menor en la generación total de energía, presentan costos por KWh de 0.28 y 0.32 pesos respectivamente, cifras considerablemente inferiores a las de las tecnologías convencionales. Este contraste no solo subraya la eficiencia económica de las energías renovables, sino que también alude a su potencial para reemplazar a las fuentes más costosas y contaminantes.

Por último, las hidroeléctricas, con una generación de 32,205,816 MWh a un costo operativo de 16,786 millones de pesos, destacan por un costo de producción por KWh de 0.52 pesos, lo que las posiciona como una opción rentable y estable en términos económicos. Además, las categorías que engloban otras formas de energía limpia, con un costo por KWh de 0.42 pesos, reflejan el potencial y la importancia de explorar y desarrollar una gama más amplia de tecnologías renovables.

La conclusión que se desprende es inequívoca: las tecnologías carboeléctricas y termoeléctricas convencionales, a pesar de su contribución actual a la matriz energética, son candidatas primordiales para ser sustituidas. La energía solar y eólica, con su bajo costo por KWh y su perfil ambiental favorable, se perfilan como las alternativas más prometedoras y eficientes. Este capítulo se dedica a explorar el impacto y las implicaciones de tal sustitución en la economía mexicana. Para abordar este análisis, se mantiene como base el modelo de matriz de contabilidad social (SAM, por sus siglas en inglés) del año 2018.

Se plantean objetivos y escenarios específicos para desglosar este análisis: primero, la extracción y evaluación del papel actual de las tecnologías contaminantes; segundo, la reasignación de la demanda eléctrica a la generación

eólica y solar; y tercero, la simulación de los efectos de este cambio en los precios finales de la electricidad, y el impacto de este en los sectores productivos y el bienestar de los hogares.

5.1 Escenario $\boldsymbol{Z_1}$: Extracción de tecnologías ineficientes.

5.1.1 **Metodología de simulación**

Denominaremos el escenario base como $\boldsymbol{Z_0}$, este refleja la economía basada en los datos de la Matriz de Contabilidad Social (MCS) de 2018. Estos datos proporcionan una visión panorámica de cómo están funcionando los diferentes sectores económicos y su interacción entre sí. $\boldsymbol{Z_0}$ es esencial para entender la estructura económica actual antes de considerar cualquier escenario alternativo o cambio en la configuración de la economía.

Dentro de la estructura de la Matriz de Contabilidad Social (MCS), se encuentra la Matriz de Coeficientes Técnicos, etiquetada como aquí $\boldsymbol{A_0}$. Esta matriz se deriva de $\boldsymbol{Z_0}$ y actúa, como ya hemos visto, como lente interpretativa, evidenciando cuánto insumo de un sector determinado es necesario para producir una unidad de producto en otro sector. $\boldsymbol{A_0}$ descompone las interacciones sectoriales en términos de requerimientos de insumos, permitiendo un análisis más profundo sobre la interdependencia y complementariedad entre sectores. Justo de aquí se deriva el primer escenario. Partiendo de la Matriz de Coeficientes Técnicos $\boldsymbol{A_0}$, se lleva a cabo el proceso de "extracción" sectorial. En este contexto, se focaliza en los sectores de generación eléctrica:

- 221111-2 - Generación de electricidad a partir de combustibles fósiles en centrales.
- 221111-3 -Generación de electricidad a partir de combustibles fósiles en centrales Termoeléctricas Convencionales.

La metodología consiste en eliminar, o en términos matriciales, convertir a cero, las filas y columnas correspondientes a estos sectores en $\boldsymbol{A_0}$. Al hacerlo, se crea una nueva matriz, etiquetada como $\boldsymbol{A_1}$. Esta nueva matriz representa un escenario teórico en el que la economía opera sin la presencia de estos sectores energéticos. Es una forma de aislar y entender cómo los demás sectores se relacionarían en ausencia de las termoeléctricas convencionales y carboeléctricas. Precisamente por esta razón la extracción se realiza en $\boldsymbol{A_0}$ y no en $\boldsymbol{Z_0}$ ya que, si la extracción ocurriera en esta última, al calcular $\boldsymbol{A_0}$ los coeficientes técnicos cambiaran de valor y no se logrará capturar los verdaderos impactos de la extracción de estos sectores (Miller & Blair, 2009).

Este ejercicio es más que una simple eliminación de valores. Al transformar $\boldsymbol{A_0}$ en $\boldsymbol{A_1}$, se está esculpiendo un escenario económico alternativo. Con el cálculo de la inversa de Leontief $\boldsymbol{L_1}$ se posibilita una comprensión más profunda de la relevancia e impacto de estos sectores y permite analizar cómo su ausencia podría reconfigurar las interacciones y dependencias entre los demás sectores económicos. Las cuentas exógenas vinculadas a factores externos o determinadas políticas y condiciones inmutables, no se alteran en este escenario, excepto para los sectores extraídos, incluso cuando se manipula la estructura subyacente de la matriz. Al mantener constantes los flujos originales de estas cuentas exógenas, extraídos de la matriz $\boldsymbol{Z_0}$, se garantiza que ciertos los aspectos externos a la economía no se vean afectados por los cambios introducidos en el modelo.

Dentro de estas cuentas se incluye la demanda final original, etiquetada como $\boldsymbol{f_0}$ pero que, una vez realizada la extracción denotaremos $\boldsymbol{f_1}$. $\boldsymbol{f_1}$ es idéntica a $\boldsymbol{f_0}$ excepto para los valores correspondientes a las termoeléctricas convencionales y las carboeléctricas. Esta demanda refleja las necesidades finales de consumo, inversión, exportaciones, entre otras, basadas en los datos de la MCS 2018. A pesar de las alteraciones realizadas, $\boldsymbol{f_0}$ se mantiene constante para entender cómo la estructura económica reconfigurada respondería a la demanda final original.

Con las herramientas mencionadas en mano, se procede al cálculo de la matriz $\boldsymbol{Z_1}$. Esta matriz se obtiene mediante la fórmula:

$$\boldsymbol{Z_1 = A_1(\widehat{L_1 f_1}) = A_1 \widehat{x_1}} \qquad (5.1)$$

Siguiendo la notación de Miller & Blair (2009), el "sombrero" sobre el vector resultante de $\boldsymbol{x_1}$ denota una matriz diagonal con los elementos del vector en la diagonal principal. Observando la ecuación (5.1) podemos ver que primero se calcula el PBT $\boldsymbol{x_1}$ correspondiente al modelo de Leontief $\boldsymbol{L_1}$ y la demanda final $\boldsymbol{f_1}$.

La suma de filas y columnas de la matriz $\boldsymbol{Z_1}$ no coinciden. Esto significa que los impactos de extraer estas dos tecnologías no afectan de manera simétrica sobre las compras de insumos y las ventas de energía, sino que por el contrario los sectores económicos tendrás efectos diferenciados en el suministro de energía eléctrica y en la demanda de sus productos. Esta matriz es el resultado de la combinación de la influencia multiplicadora de Leontief, la demanda final original y la estructura económica modificada. Permite obtener una perspectiva sobre las potenciales reconfiguraciones económicas y las consecuencias que conlleva la ausencia de los sectores de generación más contaminantes y al mismo tiempo más caros.

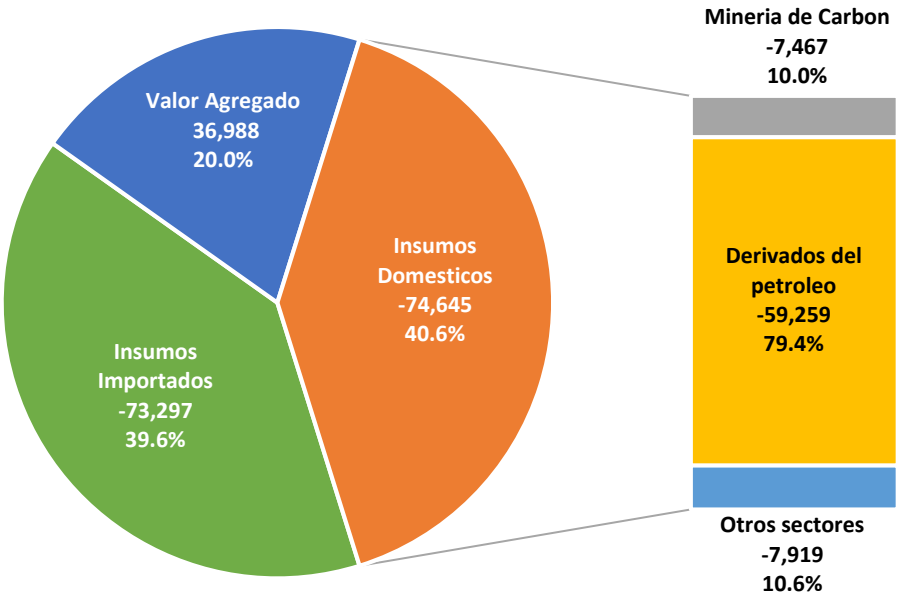
5.1.2 **Impacto de la extracción sobre la economía.**

$\boldsymbol{Z_1}$ emerge como una representación de la MCS en un escenario alternativo, en el que los sectores de termoeléctricas convencionales y carboeléctricas están ausentes. A través de la diferencia con $\boldsymbol{Z_0}$, es posible visualizar cómo se redistribuyen los flujos intersectoriales y cómo reacciona la economía ante la eliminación de estos sectores energéticos.

La supresión de las termoeléctricas convencionales y las carboeléctricas, representa un impacto directo estimado total en 110,765 millones de pesos en su

estructura de costos. En la Gráfica 5.2 se muestra primeramente la distribución de estos impactos a través de las tres grandes componentes de los costos del sector. En concepto de insumos totales se dejarían de comprar 147 942 millones de pesos de los cuales se distribuye a casi partes iguales los correspondientes a domésticos y a importados.

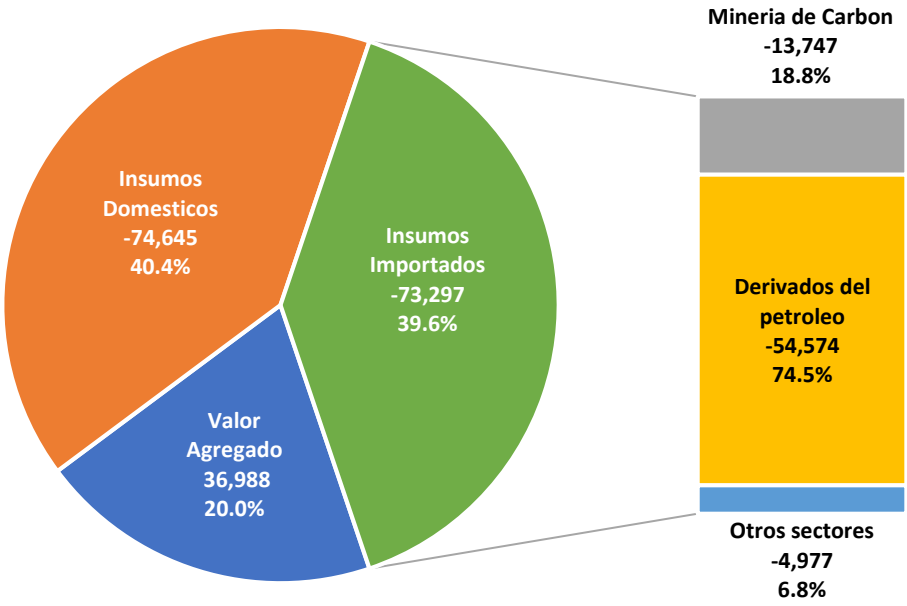
Por el contrario, se observa que el valor agregado tendría un aumento de 36,988 millones de pesos, lo que representa un 20% en términos de valor absoluto del impacto total. Esto refleja una ganancia sustancial en la contribución de valor por parte del sector eléctrico a la economía con efectos positivos en términos de PIB y empleo. Este resultado se debe a la extracción y el efecto en términos financieros de las termoeléctricas convencionales que tal como ya hemos vistos operan en números rojos y representan pérdidas para el sector.



Gráfica 5.2 Impacto sobre la estructura de costos del sector y los insumos domésticos luego de la extracción para el escenario $\boldsymbol{Z_1}$.
Fuente: Elaboración propia con datos de la MCS 2018.

La eliminación de estas tecnologías de generación eléctrica conduciría a una reducción significativa en la demanda de insumos nacionales, afectando potencialmente a las industrias locales y a la economía interna con un impacto negativo de 74,645 millones de pesos. Sin embargo, el 10.0% de dicha afectación ocurre en el sector de minería del carbón, con una reducción de 7,467 millones de pesos; y más relevante aún, el 79.4% ocurre en las compras de derivados del petróleo, siendo los más impactados, con una reducción de 59,259 millones de pesos.

Este dato es crucial, ya que indica la magnitud de la repercusión que tendría la supresión de las termoeléctricas convencionales en la industria de los combustibles fósiles y de cuanto se ahorraría en insumos de energías primarias locales. Solamente 7,919 millones de pesos ocurren sobre el cumulo de los demás sectores de la economía, un 10.6%, lo que sugiere que la reducción de la demanda local mencionada se compone en un 89.4% de combustibles fósiles.



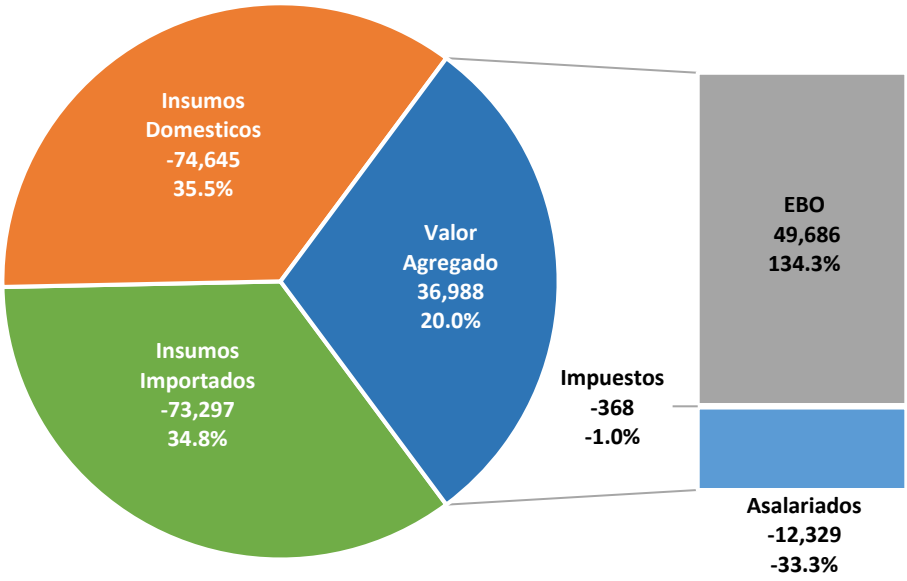
Gráfica 5.3 Impacto sobre la estructura de costos del sector y los insumos importados luego de la extracción para el escenario $\boldsymbol{Z_1}$.
Fuente: Elaboración propia con datos de la MCS 2018.

Algo similar ocurre con los insumos importados, tal y como se puede observar en la Gráfica 5.3. La supresión de estas tecnologías de generación eléctrica produciría una disminución de 73,297 millones de pesos en los insumos importados, lo que corresponde al 39.6% del impacto absoluto total. Este dato sugiere que una parte considerable de los insumos de estas tecnologías están vinculadas a las importaciones, y su eliminación podría tener implicaciones significativas en las dinámicas del comercio internacional de México, principalmente en independizarse del comercio internacional.

De los insumos importados, el 18.8% del impacto negativo, o 13,747 millones de pesos, se relaciona con la minería de carbón. Esto representa el doble del consumo domésticos a este sector, reflejando la dinámica importadora de las carboeléctricas, que son de las dos tecnologías extraídas las más intensivas en esta energía primaria. Nuevamente el sector de los derivados del petróleo muestra la mayor disminución con 54,574 millones de pesos en las importaciones, que representa el 74.5% del impacto sobre los insumos importados. La gran proporción de los insumos importados para la generación de energía en las termoeléctricas convencionales y carboeléctricas consiste en derivados del petróleo, subrayando la dependencia a las importaciones para el funcionamiento actual del sector eléctrico.

Por último, veamos en la Gráfica 5.4 como el efecto sobre el valor agregado, consiste primeramente en un aumento del Excedente Bruto de Operación de 49 686 millones de pesos que representan el 134.3% del total, y luego de una disminución de 12 329 millones de pesos (33.3%) en concepto de salarios, junto con 368 correspondientes a impuestos, para un resultado de 36 988 millones de saldo positivo. La eliminación de las termoeléctricas convencionales y carboeléctricas podría tener repercusiones en el empleo y los ingresos de los trabajadores del sector, pero su saldo final es un aumento en la rentabilidad del sector eléctrico debido a que la deuda con la que operan las termoeléctricas

convencionales también desaparece. Más adelante veremos cómo se recuperarían el empleo y los ingresos para los siguientes escenarios y como esta.



Gráfica 5.4 Impacto sobre la estructura de costos del sector y sobre los componentes del valor agregado luego de la extracción para el escenario $\boldsymbol{Z_1}$.
Fuente: Elaboración propia con datos de la MCS 2018.

Pasando al volumen de la demanda eléctrica que dichas tecnologías satisfacen, en términos monetarios, las termoeléctricas convencionales y las carboeléctricas abarcan una demanda de 112,392 millones de pesos. Esta cifra resalta el papel central que estas tecnologías juegan en el abastecimiento energético en México de sectores críticos y altamente dependientes de un suministro eléctrico estable y continuo.

El sector de la industria manufacturera, conocido por su intensivo consumo de energía, se identifica como el principal consumidor, abarcando el 34.6% de la demanda eléctrica que estas tecnologías proporcionan, las sub-industrias más destacadas por su consumo energético son la alimentaria, las metálicas, aquellas que trabajan con productos basados en minerales no metálicos y las que procesan derivados del petróleo. Los sectores del comercio y el transporte también se

perfilan como grandes consumidores, con una demanda combinada de 12,777 millones de pesos en energía el sector de los servicios incurre en un gasto de 12,128 millones de pesos, lo que más bien ilustra la transversalidad de la electricidad como un recurso clave para una variedad de actividades económicas.

Sin embargo, la demanda eléctrica que estas tecnologías satisfacen sólo constituye el 27.8% del sector eléctrico total. Teniendo en cuenta que los 59,259 millones de pesos de participación en el consumo de derivados del petróleo, representan el 59.4% del total de las compras del sector totales del sector eléctrico, se evidencia la alta dependencia de esta a los combustibles fósiles y la ineficiencia en términos productivos de estos insumos como energías primarias y de estas tecnologías de generación.

Por si no fuera suficiente para las importaciones el panorama tampoco es nada prometedor, de los 173,217 millones de pesos en combustibles fósiles importados que realiza todo el sector eléctrico, las termoeléctricas convencionales y carboeléctricas representan el 42.3%. Todo esto apunta a un potencial ahorro significativo en insumos de energía primaria local e importada al eliminar estas tecnologías y su sustitución por otras formas de generación se muestra como necesaria e indispensable en la búsqueda de electricidad más barata, limpia y segura.

Para terminar con el escenario $\boldsymbol{Z_1}$, veamos los efectos indirectos, ya no sobre el sector eléctrico sino sobre otros sectores productivos que son relevantes para el análisis de este documento. El sector de la minería de carbón mineral se enfrentaría a una disminución en las compras de 7,467 millones de pesos, lo que a su vez reduciría las ganancias del sector en 4,437 millones de pesos. Este impacto representa el 64.7% del total del escenario base $\boldsymbol{Z_0}$, poniendo de relieve la considerable dependencia de la minería de carbón con respecto a las plantas carboeléctricas. Ante un potencial desplazamiento de esta tecnología de generación, se hace evidente la necesidad de considerar la progresiva disminución de la relevancia económica de la industria carbonífera.

Sin embargo, el sector más afectado por la eliminación de las termoeléctricas y carboeléctricas es el de los derivados del petróleo. Dado que el sector eléctrico es el tercer mayor consumidor de estos productos, después del sector transporte y la propia industria petrolera, la disminución en la demanda tiene un efecto significativo en general. Las ventas de derivados del petróleo experimentarían una contracción de 11,913 millones de pesos en ingresos. Además, se observa un impacto indirecto en la minería petrolera; la disminución en estas compras por parte del sector eléctrico afecta también las operaciones mineras de petróleo. Como consecuencia, la minería petrolera se ve con una pérdida de rendimientos de 6,152 millones de pesos.

La reconfiguración del modelo energético hacia fuentes más limpias, como se propone en el Escenario $\boldsymbol{Z_1}$, conlleva una serie de efectos en cadena que trascienden el sector eléctrico. Estos cambios subrayan la interconexión de la economía y exigen una reflexión estratégica para asegurar una transición energética que sea económicamente viable y socialmente justa. La adaptación de las industrias afectadas y la reorientación de sus capacidades productivas serán aspectos cruciales en este proceso de transformación.

5.2 Escenario $\boldsymbol{Z_2}$: Reasignación de la demanda eléctrica.

5.2.1 **Metodología de simulación.**

El modelo $\boldsymbol{Z_2}$ representa una evolución significativa en el análisis centrando su atención en un reajuste específico: la demanda eléctrica. En este nuevo escenario, la propuesta es ambiciosa en el siguiente sentido: transferir la demanda energética de tecnologías consideradas contaminantes, como las termoeléctricas convencionales y carboeléctricas, hacia alternativas más limpias y renovables, como son la energía solar y eólica. Esta reconfiguración representa un panorama óptimo, ya que no solo plantea un giro hacia la sustentabilidad, sino que también desafía la estructura económica y energética actual, suponiendo que las

tecnologías limpias pueden asumir toda la carga energética previamente satisfecha por las fuentes contaminantes.

La elección de las energías solar y eólica no es casual. Anteriormente ya se vio que representan dos de las tecnologías más prometedoras y sostenibles del presente, ofreciendo la posibilidad de una matriz energética más resiliente y barata en su estructura de costos y eficiencia de producción. Debemos entonces reasignar la demanda eléctrica que acumulan los sectores:

- 221111-2 - Generación de electricidad a partir de combustibles fósiles en centrales.
- 221111-3 -Generación de electricidad a partir de combustibles fósiles en centrales Termoeléctricas Convencionales.

Y distribuirla entre las dos tecnologías que se harán cargo de esta demanda:

- 221113 - Generación de electricidad a partir de energía solar.
- 221114 -Generación de electricidad a partir de energía eólica.

El ajuste se lleva a cabo desde dos perspectivas, la generación “física” y su valor monetario correspondiente. Entre las termoeléctricas convencionales y las carboeléctricas, acumulan un total de 84,713,517 MWh de electricidad generada para el año 2018, según los datos de PRODESEN (2018). Por otro lado, basándonos en los datos de la MCS 2018 estas dos tecnologías representan 112 392 millones de pesos. Ambos datos se deben redistribuir entre las tecnologías eólica y solar, el primero porque representa la cantidad física de energía que se asumirá por las tecnologías renovables, y el segundo para que la MCS 2018 resultante no se desequilibre en su marco contable.

Para calcular la proporción que le se le asigna a cada una debemos tomar en cuenta un supuesto importante. Se tomará en cuenta la premisa de un costo de electricidad constante. A partir de los valores iniciales del PBT y la generación de electricidad de las tecnologías solar y eólica, se determina el costo por megavatio-

hora de cada una. Un ejercicio similar al usado anteriormente en la Gráfica 5.1 para determinar las tecnologías más eficientes, pero en vez de usar solo los costos de insumos, se utilizará todo el PBT del subsector de generación. Asumiremos que este costo no cambia a pesar de la reasignación, cuando se les asigna una mayor generación a estas tecnologías, su PBT respectivo crece proporcionalmente, manteniéndose el costo constante. Es decir, las tecnologías solar y eólica asumirán toda esta nueva demanda suponiendo que su estructura de producción no cambia, por lo que obviamos el efecto de economías de escala para este escenario.

	Ciclo Combinado	Carboeléctricas	Termoeléctricas Convencionales	Energía hidráulica	Energía solar	Energía eólica	Otro tipo de energía limpia
Generación (MWh)	160,672,733	27,344,983	57,368,534	32,205,816	2,174,389	12,432,938	18,298,899
PBT (Millones de pesos)	204,938	35,511	76,882	46,576	3,030	14,639	22,586
Coste del MWh en millones de pesos	0.00128	0.00130	0.00134	0.00145	0.00139	0.00118	0.00123

Tabla 5.1 México, 2018. Generación de energía eléctrica, Producto Bruto Total y el coste del megavatio por hora en millones de pesos para cada tecnología de generación.
Fuente: Elaboración propia con datos de la MCS 2018 y (PRODESEN, 2018).

En la Tabla 5.1 se muestra la razón Generación/PBT para cada tecnología dados los datos de la MCS 2018. Denotando como GS y GE como los totales de generación eléctrica que se asignaran a la energía solar y eólica respectivamente, el problema de reasignación se puede definir como un sistema de ecuaciones simple:

$$GS + GE = 84\,713\,517$$

$$0.00139 * GS + 0.00118 * GE = 112\,392$$

Resolviendo el sistema se obtiene la generación que se le asignará a cada tecnología: 58 492 756 MWh y 26 220 761 MWh respectivamente. Al convertirlo a términos monetarios se obtienen 81,518 y 30,874 millones de pesos que representan una proporción de 72.5% y 27.4%. La nueva distribución de se muestra en la Tabla 5.2.

Las tecnologías de energía solar y energía eólica aumentan en un 2790% y 311% respectivamente, un reto en la realidad suficientemente desafiante como para interpretar estas simulaciones con mucho cuidado. El análisis por tanto es descriptivo de una situación meramente hipotética ya que el análisis está exento de las consideraciones en torno a inversiones, factibilidad real de condiciones para instalar paneles solares y parques eólicos, y la reestructuración económica del sector eléctrico y de la economía en general necesaria para lograr un escenario como de esta magnitud.

	Ciclo Combinado	Carboeléctricas	Termoeléctricas Convencionales	Energía hidráulica	Energía solar	Energía eólica	Otro tipo de energía limpia
Generación (MWh)	160,672,733	-	-	32,205,816	60,667,145	38,653,699	18,298,899
PBT (Millones de pesos)	204,938	-	-	46,576	84,549	45,514	22,586
Coste del MWh en millones de pesos	0.00128	-	-	0.00145	0.00139	0.00118	0.00123

Tabla 5.2 México, 2018. Generación de energía eléctrica, Producto Bruto Total y el coste del megavatio por hora en millones de pesos para cada tecnología de generación luego de la reasignación de la demanda eléctrica.
Fuente: Elaboración propia con datos de la MCS 2018 y (PRODESEN, 2018).

Antes de pasar hacia como se reasignará esta demanda a lo largo de las filas de estas tecnologías en la MCS 2018, cabe notar un resultado preliminar de la diferencia entre las tablas Tabla 5.1 y Tabla 5.2. Al calcular el por ciento de energías limpias en ellas tenemos que para el escenario original el 20.97% de la

energía generada ocurrió mediante este tipo de tecnologías (Hidráulica, Solar, Eólica y otros tipos de energía limpia). Al realizar el cálculo para el escenario $\boldsymbol{Z_2}$ este porciento asciende a 48.25%. Si se lograran sustituir las termoeléctricas convencionales y las carboeléctricas, la mitad de la generación eléctrica total de podría potencialmente ser producida de manera limpia y cumplir las metas para 2032 que suscribió México en el Acuerdo de Paris y que se estipularon en la Ley de Transición Energética (SENER, 2018).

Bajo este prisma, $\boldsymbol{Z_2}$ se erige como una herramienta de modelado que busca visualizar un futuro donde la transición energética total es posible. Al optar por esta reasignación, el modelo reflejaría un compromiso con la reducción de la huella de carbono y con la promoción de tecnologías que respeten el medio ambiente y, al mismo tiempo, satisfagan las necesidades energéticas de la sociedad.

El reajuste entonces se realizará sobre las filas de la MCS, no siendo así para las columnas. El supuesto principal de esta decisión es nuevamente que, con la tecnología de las energías solar y eólica representadas por las columnas de la matriz de coeficientes técnicos, se asume toda la demanda eléctrica de las dos tecnologías extraídas. La tecnología de generación se mantiene invariante mientras que las ventas de estos sectores se modifican para satisfacer la misma demanda eléctrica del modelo original $\boldsymbol{Z_0}$.

La construcción de $\boldsymbol{Z_2}$ implica varios pasos detallados a continuación. Primeramente, se reasignan 81,518 millones de pesos hacia la generación a partir de energía solar y 30,874 hacia la generación a partir de energía eólica. Para efectuar esta reasignación, se emplean fórmulas que toman en cuenta los valores originales y distribuyen los nuevos consumos eléctricos en proporción a los originales de la matriz $\boldsymbol{Z_0}$. Estas fórmulas permiten redistribuir la demanda asegurando que los totales por columna permanezcan inalterados, y así mantener la coherencia y balance del modelo. La fórmula para la reasignación es la siguiente:

$$\boldsymbol{Z_{2_{Solar}}} = \boldsymbol{Z_{0_{Solar}}} + \%_{Reasignado\ a\ Solar} * (\boldsymbol{Z_{0_{Termo}}} + \boldsymbol{Z_{0_{Carbo}}})$$

$$\boldsymbol{Z_{2_{Eolica}}} = \boldsymbol{Z_{0_{Eolica}}} + \%_{Reasignado\ a\ Eolica} * (\boldsymbol{Z_{0_{Termo}}} + \boldsymbol{Z_{0_{Carbo}}})$$

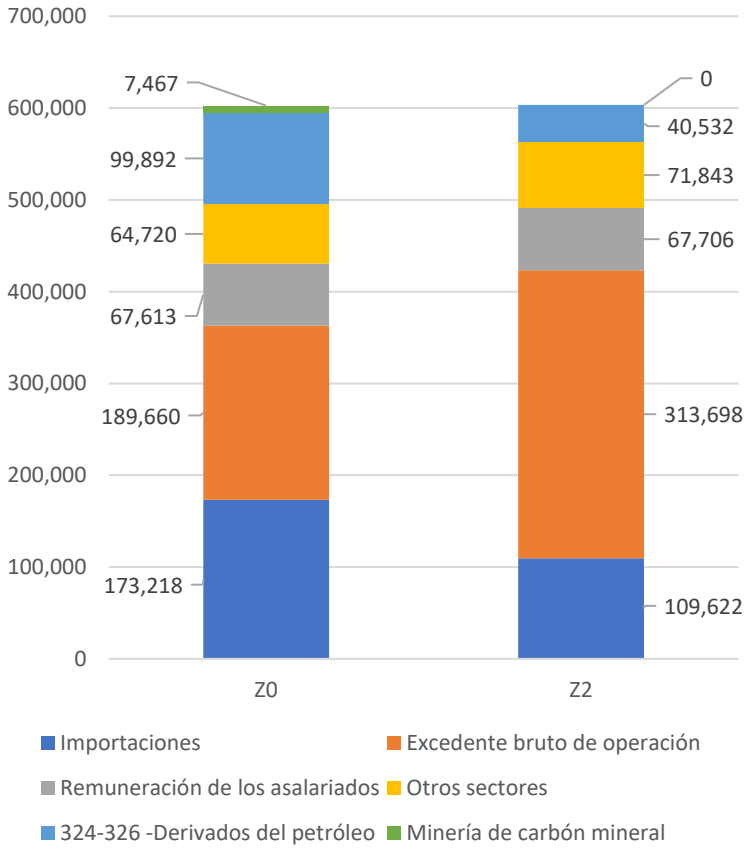
Al reasignar la demanda, surgen valores en la matriz que, en el contexto de la nueva configuración, no tienen un significado lógico. Estos valores corresponden a flujos intersectoriales entre las tecnologías limpias (solar y eólica) y las tecnologías eliminadas (termo y carboeléctricas) y así como de estas últimas hacia ellas mismas. Estos flujos intersectoriales "residuales" representan una cantidad de energía que ya no será utilizada por ningún sector económico, ya que los sectores que anteriormente la consumían, en este modelo, se asume que han desaparecido. Ante este problema, se propone la solución de reasignar dichos valores, específicamente 39.58 y 21.30 millones de pesos, hacia las energías que serán exportadas. Este ajuste garantiza que las cuentas se equilibren y que la matriz refleje una representación coherente de los flujos económicos y energéticos.

Con esta matriz resultante se calcula una nueva matriz de coeficientes técnicos (que llamaremos $\boldsymbol{A_2}$) y su inversa de Leontief ($\boldsymbol{L_2}$) correspondientes. Se toma el nuevo vector de demanda final, $\boldsymbol{f_2}$, resultado del reajuste de la demanda que representa las nuevas necesidades finales de consumo bajo este nuevo paradigma energético. Con $\boldsymbol{f_2}$ y $\boldsymbol{L_2}$, se calcula el Producto Bruto Total (PBT) del modelo, denominado $\boldsymbol{x_2}$. Este cálculo es vital para entender el impacto total en la economía de este cambio hacia fuentes de energía más limpias y además calcular los flujos intersectoriales $\boldsymbol{Z_2}$ como el resultado de multiplicar las columnas de $\boldsymbol{A_2}$ por $\boldsymbol{x_2}$, o en términos matriciales:

$$\boldsymbol{Z_2} = \boldsymbol{A_2}(\widehat{\boldsymbol{L_2 f_2}}) = \boldsymbol{A_2 \hat{x}_2}$$

5.2.2 **Reconfiguración de la estructura de costos del sector eléctrico.**

Al adentrarnos en el Escenario $\boldsymbol{Z_2}$, luego de la reasignación y una vez resuelto el modelo, observamos una transformación profunda en la estructura de costos del sector eléctrico, impulsada por la reconfiguración de la demanda energética y las alteraciones en los flujos de compra hacia diferentes sectores. Este escenario esboza un panorama donde la economía se ajusta a la disminución de la dependencia en los combustibles fósiles y orienta la industria hacia una mayor autosuficiencia.



Gráfica 5.5 Estructura de costos del sector agregado y su reconfiguración luego de la asignación de la demanda eléctrica.
Fuente: Elaboración propia con datos de la MCS 2018.

La reconfiguración de la demanda energética, como se muestra en la Gráfica 5.5, conduce a una reestructuración notable de la distribución de costos en el sector

eléctrico. Se registra una disminución sustancial en la adquisición de insumos domésticos, que desciende de 171,779 millones de pesos a 112,375 millones de pesos. Esto representa un ahorro significativo de 59,404 millones de pesos en la producción del mismo volumen de electricidad entre los dos escenarios comparados.

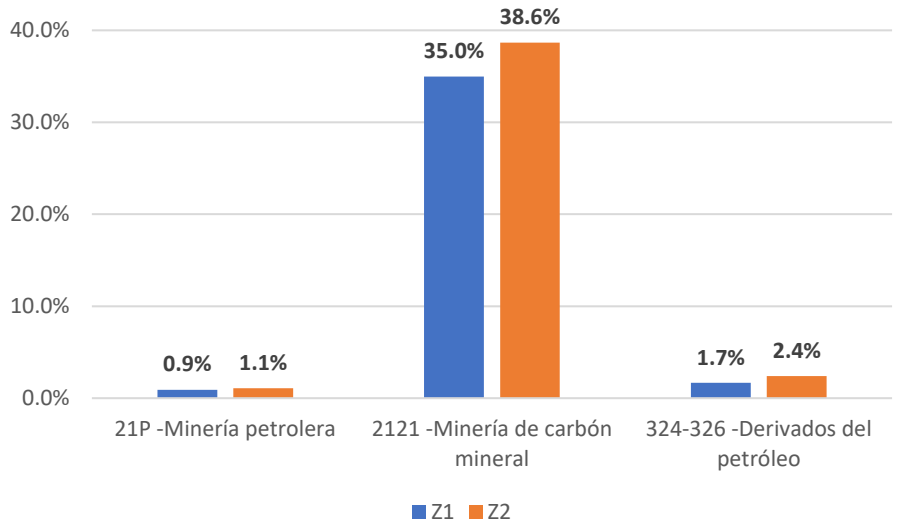
Dentro del segmento de insumos domésticos, se destaca la eliminación completa del consumo procedente de la minería de carbón, lo que se traduce en un ahorro integral de los 7,467 millones de pesos previamente destinados a este rubro en el escenario base. Además, se observa una reducción marcada en los costos asociados con los derivados del petróleo, que caen en 59,360 millones de pesos, reflejando una significativa disminución en la dependencia de este insumo.

Paralelamente, se registra un incremento en los costos de otros sectores, tales como el comercio al por mayor, maquinaria, equipo y transporte, aunque este aumento es mucho más modesto, sumando un total de 7,123 millones de pesos. Para los insumos importados nuevamente se da un ahorro significativo de 63 595 millones de pesos. Hay que tener en cuenta que, al ser una cuenta exógena, no se dan cambios al variar el modelo y este dato coincide con el que se vio para el escenario $\boldsymbol{Z_1}$. Como ya vimos se compone principalmente del ahorro en productos de la industria carbonífera y de otros combustibles fósiles del sector de derivados del petróleo.

Las nuevas tecnologías emergentes dependen mucho menos de las importaciones de insumo. El ahorro en importaciones representa más del 50% del ahorro total por el cambio de paradigma energético. Esto significa que la industria pasaría a un estado de mayor seguridad energética, asegurando la determinación del precio de la electricidad de manera interna. Este escenario nos indica que existe un fuerte incentivo económico para migrar a formas más limpias de generación eléctrica que van más allá de términos ambientales. Es beneficioso para la producción más eficiente del sector y para los participantes en este mercado, generar la electricidad en estas formas alternativas a las tradicionales.

Los efectos van más allá del efecto sobre la composición del sector eléctrico, el cambio se traslada al resto de sectores productivos mediante la demanda intermedia hacia el resto de la economía y generando el ciclo productivo que incluye efectos de retroalimentación. De estos efectos salen entonces beneficiados los sectores con mayores multiplicadores hacia adelante, sectores transversales e intensivos en la oferta intermedia, calificados en la Gráfica 4.5 como Claves y Estratégicos tales como: la industria alimentaria con un crecimiento de 10 338 millones de pesos, Comercio al por Mayor con 10 962 y Servicios Inmobiliarios con 11 665.

El sector de derivados del petróleo, junto con la minería de carbón y petrolera, experimentan una contracción debido a la significativa rebaja en su demanda, como consecuencia de la desaparición de las dos tecnologías de generación intensivas en sus usos, y además como consecuencia de la nueva distribución de compras derivada de la reasignación de la demanda.



Gráfica 5.6 Contracción porcentual de los sectores afectados para cada escenario.
Fuente: Elaboración propia con datos de la MCS 2018.

Para este escenario la contracción es aún mayor que para $\boldsymbol{Z_1}$, siendo la de minería de carbón la más afectada con 35.0% debido a la desaparición de las

tecnologías más contaminantes y un 3.6% adicional por los cambios en la estructura económica derivados de la reasignación de la demanda eléctrica. Para la minería petrolera y los derivados del petróleo los efectos son mucho más discretos relativos al tamaño del sector, sin embargo, en términos absolutos las afectaciones son de 10 999 y 58 052 millones de pesos respectivamente, en contraste con los 7 561 de la minería carbonífera.

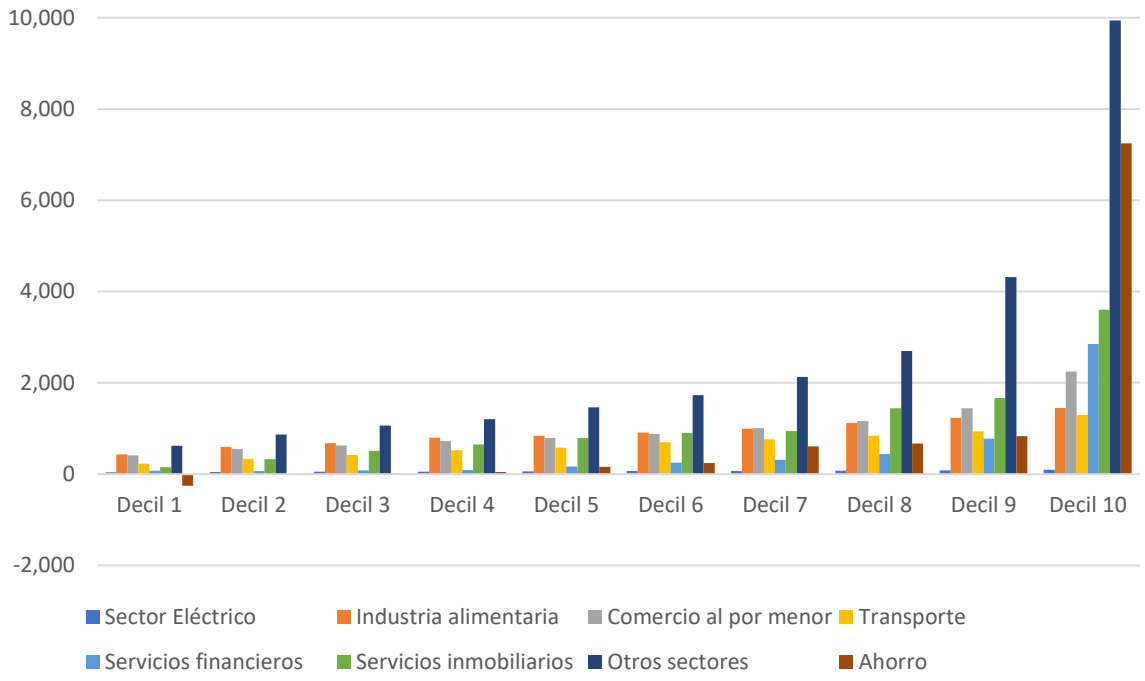
Desde la perspectiva laboral, el pago a los asalariados en el sector eléctrico se mantiene estable, similar a lo observado en el Escenario $\boldsymbol{Z_0}$, indicando una mínima perturbación en términos de empleo dentro de este sector luego del reajuste sub sectorial. No obstante, los sectores más afectados por la transición —como los de los derivados del petróleo y la minería de carbón y petróleo— experimentan una disminución en la remuneración de los asalariados (3 243, 443 y 440 millones de pesos respectivamente), mientras que los que han crecido experimentan un aumento en este renglón para un saldo positivo general de 6 543 millones de pesos.

Esto podría implicar un traslado de la fuerza laboral desde sectores más especializados como derivados del petróleo hacia otros de carácter más general, como el comercio al por menor, el transporte, la industria alimentaria o los servicios inmobiliarios. Este fenómeno señala un cambio potencial en el mercado laboral que podría ocurrir sin mayores complicaciones, aunque debe considerarse la logística de reubicación de trabajadores y la absorción de mano de obra por los nuevos sectores.

Así, los hogares, a través del aumento de salarios y otros ingresos provenientes del excedente bruto de operación, reciben un impacto positivo en su ingreso disponible de 77 855 millones de pesos. De estos 9 569 impactan sobre la capacidad de ahorro de los hogares, debido a los efectos indirectos que se derivan del ciclo económico, los cambios en la demanda intermedia y el propio patrón de consumo de los estos.

Precisamente en este último, el consumo, es utilizado el resto del ingreso disponible, con un aumento de 68 287 millones de pesos, destacándose los rubros

de servicios inmobiliarios, financieros, comercio e industria alimentaria. En la Gráfica 5.7 se muestran estos datos a través de la distribución por deciles del ingreso de los hogares.



Gráfica 5.7 México, 2018. Cambios en la estructura de consumo y ahorro de los hogares por decil de ingreso para el escenario $\boldsymbol{Z_2}$.
Fuente: Elaboración propia con datos de la MCS 2018.

Por último, y regresando a la estructura del sector eléctrico, el ahorro conjunto resulta en 123 301 millones de pesos por concepto de insumos primarios. Teniendo en cuenta que la remuneración a asalariados se mantiene relativamente constante entre los escenarios con un aumento de solo 93 millones de pesos, podemos entonces concluir que el ahorro total resulta reflejado en un aumento pronunciado del Excedente Bruto Total. Pasando de 189 660 a 313 698 millones de pesos representa un aumento del 165.4% en este rubro. Debemos tener en cuenta que para este escenario existe una suposición implícita, la cual consiste en que el precio final de la electricidad se ha mantenido constante luego de la

reasignación de la demanda. Por tanto, estos ahorros se terminan reflejando sobre el pago al capital en vez de una disminución del precio de la electricidad. Este dato sirve como punto de partida para el siguiente escenario $\boldsymbol{Z_2}$.

5.3 Escenario $\boldsymbol{Z_3}$: Reajuste del precio final de la electricidad.

5.3.1 **Metodología de simulación.**

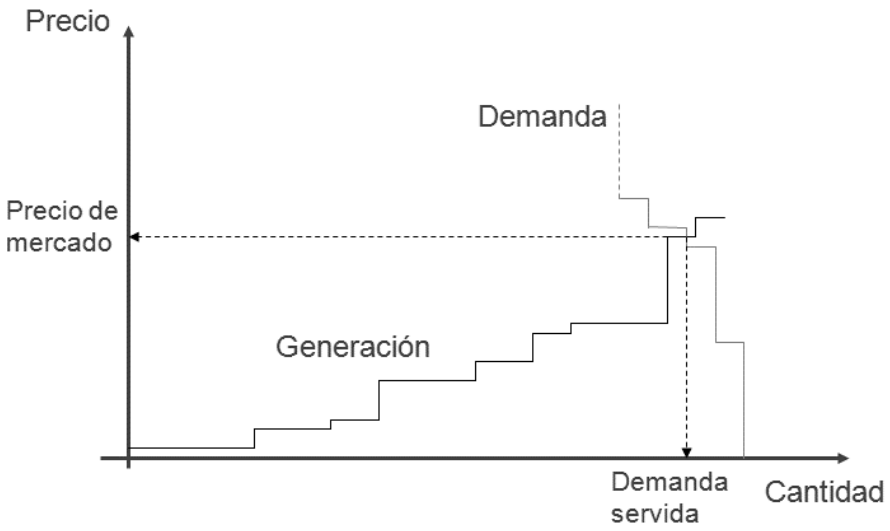
Antes de analizar el último escenario que llamaremos $\boldsymbol{Z_3}$, que representa un estudio más integral del sector eléctrico, analicemos más a fondo la razón detrás del incremento en las ganancias del sector eléctrico de 124 038 millones de pesos. Este aumento se atribuye al cambio en el método de generación de energía eléctrica.

Al reemplazar tecnologías más contaminantes y costosas con alternativas más limpias y económicas, el sector logra importantes ahorros. Estas tecnologías renovables aprovechan la energía de la naturaleza y reducen significativamente los costos operativos y energías primarias en los que incurren principalmente tecnologías como la carboeléctrica y las tecnologías convencionales.

No obstante, es fundamental destacar que el Mercado Eléctrico Mayorista no opera como otros mercados convencionales. A pesar de que el modelo $\boldsymbol{Z_2}$ sugiere un aumento en el pago a capital debido a la reducción de costos, hay que tener en cuenta que se está asumiendo implícitamente que los precios de la electricidad se mantienen inalterados.

Tras la Reforma Eléctrica y la introducción de los mercados de Energía de Corto Plazo y las Subastas de Mediano y Largo Plazo, los precios de la electricidad se establecen según una lógica marginalista (SENER, 2018). Las tecnologías con menores costos de producción tienen prioridad, y el precio se determina en la intersección entre esta la oferta y la demanda eléctrica, estas se dan desde las

comercializadoras y se le paga a todos la energía ofertada justo a este precio, conocido como precio de casación.



Gráfica 5.8 Oferta y demanda de energía eléctrica en el mercado eléctrico mayorista. Toda la generación antes del punto de casación se paga a este precio de mercado. Fuente: Elaboración propia.

En este sistema, las centrales que ofrecen energía a un precio inferior logran mayores ganancias, ya que otras centrales sólo pueden ofrecer a precios más elevados. Al eliminar las tecnologías más caras, el precio equilibrio de la electricidad disminuirá y el precio general de la electricidad bajará junto con las ganancias de todo el sector eléctrico. Por tanto, el reemplazo de las tecnologías costosas por otras más baratas repercute directamente sobre el precio de la electricidad y no sobre las ganancias del sector. En resumen, el modelo $\boldsymbol{Z_2}$ no refleja con precisión la realidad del mercado, por lo que es necesario realizar un último escenario $\boldsymbol{Z_3}$ que si refleje la realidad del mercado eléctrico.

Para abordar este tema, es esencial reajustar entonces los 313 698 millones de pesos del excedente y considerar parte de este monto como una reducción en los precios de la electricidad. Inicialmente, debemos definir un valor adecuado para el pago de capital. Con este fin, se propone que las ganancias del sector

permanezcan consistentes con el resto de los gastos, equivalente a la estructura de la matriz original $\boldsymbol{Z_0}$. En otras palabras, se utilizará la proporción que tenía la cuenta de Excedente Bruto de Operación en relación con el producto bruto total del sector de generación eléctrica en la matriz $\boldsymbol{Z_0}$ para determinar el nuevo Excedente Bruto de Operación de la matriz $\boldsymbol{Z_3}$.

Nos centraremos exclusivamente en el sector de generación agregado, ya que los costes y ganancias de los sistemas de transmisión, distribución y comercialización de electricidad consideraremos no afectarlos por los cambios en la matriz de generación eléctrica, ya que el monto agregado de electricidad se ha mantenido constante.

En la matriz original $\boldsymbol{Z_0}$, las ganancias del sector de generación eléctrica agregado se situaron en 48,469 millones de pesos, lo que representa el 11.99% del PBT del sector. Esto contrasta con los 172 327 millones de pesos del modelo $\boldsymbol{Z_2}$, que representan el 74.53% de otros insumos y el 42.58% del PBT. Al aplicar el porcentaje de 13.67% a los insumos derivados de $\boldsymbol{Z_2}$, se obtiene un total de 31 598 millones de pesos, en lugar de los 172 327 millones registrados en el modelo $\boldsymbol{Z_2}$. Esto implica que es necesario considerar 140 729 millones de pesos como una reducción en los precios de la electricidad.

Esta cantidad se deducirá de las ventas del sector eléctrico a otros sectores en la matriz de flujos $\boldsymbol{Z_2}$, proporcionalmente a las compras de cada sector al eléctrico. Es importante aclarar que esta reducción no implica que los sectores compren menos energía; simplemente indica que, debido a la reducción en los precios de la electricidad, gastan menos por la misma cantidad de energía necesaria para sus operaciones. Este ahorro en gastos eléctricos se traduce en un beneficio para cada sector, reflejándose en los rendimientos de sus cuentas de Excedente Bruto de Operación e Ingreso Mixto Bruto. Asumimos que estos mercados operan tradicionalmente, generando mayores rendimientos correspondientes al ahorro en insumos. En el caso del consumo doméstico, la disminución en el gasto eléctrico se considera como un aumento en el ahorro de los hogares.

Tras realizar estos ajustes, la matriz aún presenta desequilibrios en su marco contable y es necesario ajustar las cuentas exógenas de formación bruta de capital, la cuenta corriente, de capital y el déficit del gobierno. El desajuste en el Excedente Bruto de Operación (EBO) de los sectores productivos y del ahorro en el caso de los hogares, se refleja en la Formación Bruta de Capital Fijo (FBKF) y esta finalmente sobre la cuenta de importaciones como salida de capital. Las cuentas exógenas referentes a las tecnologías extraídas se ajustan mediante los gastos de gobierno en la cuenta corriente y esta nuevamente sobre las importaciones y además sobre la cuenta de capital. Por último, la cuenta de capital se refleja sobre el sector endógeno de cuenta financiera y la matriz queda ajustada en sus filas y columnas.

5.3.2 **Impacto de la disminución del precio de la electricidad sobre la economía.**

En el Escenario $\boldsymbol{Z_3}$, alcanzamos la culminación de nuestro modelo hipotético de transición energética, donde se han aplicado todos los supuestos previamente establecidos para la transformación del sector eléctrico. Hasta aquí hemos visto varios resultados que se evidencian en este último escenario de manera conjunta, el cual es el objetivo final de la simulación. Por tanto, se tienen los efectos de la extracción de las carboeléctricas y termoeléctricas convencionales, así como la reasignación de la demanda de estas y la subsecuente reestructuración del sector eléctrico agregado para satisfacerla. Adicionalmente se agregan los efectos de la disminución del precio final de la electricidad y su papel en el comportamiento económico de todo el sistema. Esta última simulación implica entonces interpretar el modelo desde la perspectiva de precios.

Al calcular el precio promedio de la electricidad para el escenario original tenemos un coste de 1.30 pesos por KWh, para el nuevo escenario este precio decrece hasta 80 centavos por kilovatio hora, un 38.4% de reducción. Por tanto, para este escenario, la primera característica sobresaliente que se observa es la reducción

generalizada en los costos de electricidad, que beneficia a todos los sectores, particularmente aquellos cuyo funcionamiento depende intensamente de este insumo. Tal y como en el escenario $\boldsymbol{Z_1}$, sectores como el comercio al por menor, la industria alimentaria y especialmente las industrias manufacturas son los más favorecidos, disfrutando de ahorros significativos que se reflejan, de acuerdo con la construcción de la simulación, positivamente en sus rendimientos del EBO.

RUTA DE DESCOMPOSICION DE LA INFLUENCIA DE PRECIOS										
Incremento de costos del sector i	Efecto del precio en el destino j	Trayectoria a través de…	Global		Directo		Total		%T/G	
			$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$	$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$	$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$	$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$
221	31-33		0.474	0.364	0.332	0.254	0.367	0.280	77.3%	77.0%
		327			0.013	0.010	0.017	0.013	3.5%	3.5%
		21NP			0.010	0.008	0.012	0.009	2.6%	2.5%
		222			0.008	0.006	0.009	0.007	1.8%	1.8%
		331-332			0.004	0.003	0.004	0.003	0.9%	0.9%
		313-314			0.004	0.003	0.004	0.003	0.7%	0.7%

Tabla 5.3. Descomposición de ruta de la influencia de precios desde el sector eléctrico hacia otros sectores de la economía para los escenarios $\boldsymbol{Z_0}$ y $\boldsymbol{Z_3}$.
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI

Para este último caso, podemos ver en la Tabla 5.3 los cambios (y la estructura) en la influencia del precio de la electricidad sobre esta rama agregada de la economía tan importante. En esta serie de resultados podemos ver que para el caso de $\boldsymbol{Z_0}$, por cada 10 pesos que aumenta el precio de la electricidad, el sector manufacturero termina aumentando sus precios en 4.7 pesos como efecto global de este impacto.

De estos, 3.6 pesos se deben a los gastos en electricidad directos que realizan las manufacturas y 1.1 mediante el aumento de los precios de otros sectores, a su vez provocados por el aumento de la electricidad. Estas trayectorias intermedias de influencia pasan por 327 Fabricación de productos a base de minerales no

metálicos, 21NP Minería no petrolera, 222 Suministro de agua y suministro de gas por ductos al consumidor final, 331-332 Industrias metálicas y 313-314 textiles.

Si bien para el escenario $\boldsymbol{Z_3}$ la estructura de influencia desde el sector eléctrico al manufacturero no cambió (por cientos en la Tabla 5.3), si lo hizo la magnitud de estos impactos. Ahora bajo el nuevo escenario por cada 10 pesos de aumento de la electricidad solo 3.6 terminan afectando la inflación de los productos manufactureros. Este efecto es común para todos los sectores por lo que los efectos directos e indirectos disminuyen de manera lineal y proporcional sin afectar la estructura de la influencia de precios. Los cambios se deben simplemente a un menor gasto eléctrico como consecuencia de la disminución de su precio en este nuevo escenario.

RUTA DE DESCOMPOSICION DE LA INFLUENCIA DE PRECIOS										
Incremento de costos del sector i	Efecto del precio en el destino j	Trayectoria a través de…	Global		Directo		Total		%T/G	
			$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$	$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$	$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$	$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$
21P	221		0.045	0.029	0.000	0.001	0.000	0.001	1.0%	2.2%
		324-326			0.032	0.017	0.036	0.019	80.3%	63.3%
324-326	221		0.232	0.148	0.166	0.088	0.188	0.099	81.2%	64.8%
		324-326			0.009	0.005	0.012	0.006	5.0%	4.0%
		48-49			0.001	0.001	0.001	0.002	0.5%	1.1%
48-49	221		0.081	0.091	0.010	0.015	0.012	0.017	14.9%	18.7%
		324-326			0.003	0.002	0.004	0.002	5.5%	2.5%

Tabla 5.4 Descomposición de ruta de la influencia de precios desde sectores de la economía hacia el sector eléctrico para los escenarios $\boldsymbol{Z_0}$ y $\boldsymbol{Z_3}$.
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI.

Para la segunda sección de resultados mostrada en la Tabla 5.4 se tienen los impactos de precios en sectores productivos sobre el precio de la electricidad. En las rutas de influencia se destacan los sectores de 324-326 derivados del petróleo, 48-49 Transporte y 21P Minería petrolera. El primer caso de la Tabla 5.3 es muy

interesante. La industria eléctrica no consume directamente los productos de la minería petrolera, sin embargo, a través de derivados del petróleo, reciben impactos relacionados con el precio de estos. El impacto sobre el sector eléctrico de 10 pesos en el precio final de la minería petrolera pasa de 45 centavos para el escenario $\boldsymbol{Z_0}$ a 29 para el escenario $\boldsymbol{Z_3}$, debido particularmente porque la ruta intermedia de derivados del petróleo disminuye de 32 centavos a 17 centavos.

Para estos casos no solo cambia la magnitud de influencia del sector origen al sector destino, sino que cambia la estructura de influencia de los precios. La ruta (21P)-(324-326)-(221) pasa de ser responsable del 80.3% al 63.3% del impacto del precio del petróleo crudo en el precio de la electricidad. El 17.0% del impacto se diversifica entre los demás sectores. Este aspecto de diversificación es muy deseable para la estabilidad del precio de la electricidad, pues su variabilidad depende de que varíen más sectores al mismo tiempo.

Lo mismo ocurre para las rutas (324-326)-(324-326)-(221) y (324-326)-(48-49)-(221) pertenecientes al impacto de derivados del petróleo sobre la electricidad. Sin embargo, para la ruta (48-49)-(324-326)-(221) el impacto aumenta. Esto se debe nuevamente al cambio de las estructuras de influencia. Al cambiar toda la estructura de costos del sector eléctrico, los sectores de energías primarias se ven afectados, y al mismo tiempo los demás sectores adquieren mayor protagonismo en la conformación del precio final.

RUTA DE DESCOMPOSICION DE LA INFLUENCIA DE PRECIOS										
Incremento de costos del sector i	Efecto del precio en el destino j	Trayectoria a través de…	Global		Directo		Total		%T/G	
			$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$	$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$	$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$	$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$
324-326	222		0.116	0.096	0.011	0.011	0.013	0.013	11.4%	13.8%
		221			0.030	0.012	0.035	0.014	30.3%	14.8%
324-326	327		0.118	0.106	0.025	0.025	0.032	0.032	26.9%	29.7%
		221			0.014	0.006	0.017	0.007	14.8%	6.6%

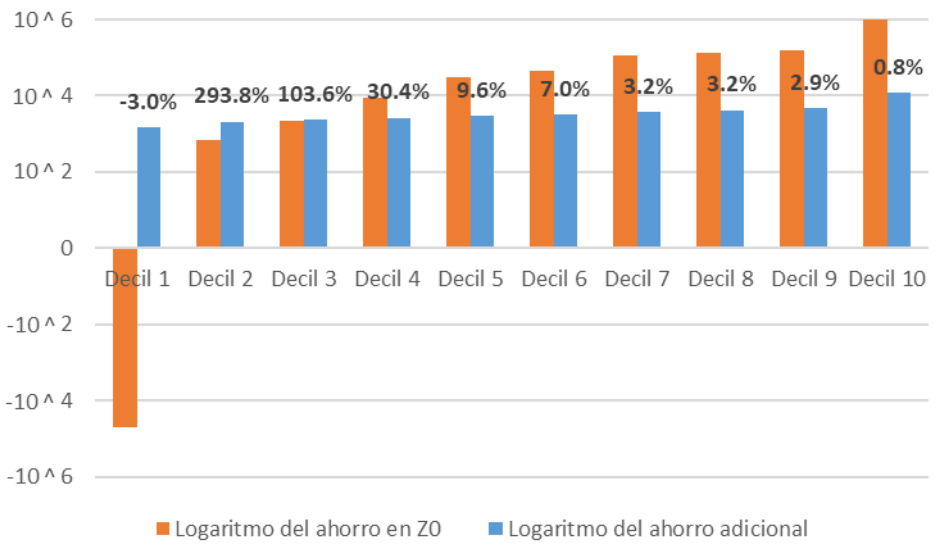
Tabla 5.5 Descomposición de ruta de la influencia de precios entre sectores de la economía a través del sector eléctrico para los escenarios $\boldsymbol{Z_0}$ y $\boldsymbol{Z_3}$.
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI.

Para la última serie de resultados entre la relación de industrias y el sector eléctrico se presentan los impactos desde sectores productivos hacia otros que pasan y son influenciados por el precio de la electricidad. La Tabla 5.5 muestra los casos desde derivados del petróleo hacia 222 Suministro de agua y gas por ductos al consumidor final y 327 Fabricación de productos a base de minerales no metálicos, los cuales son los dos sectores más consumidores de electricidad.

Por cada 10 pesos de aumento en el precio de energías primarias como el combustóleo, diésel, gasolina y otros; para el escenario $\boldsymbol{Z_0}$ el suministro de agua y gas se encarece 1.16 pesos y la fabricación de productos con base no metálicos en 1.18, para el nuevo escenario las afectaciones son de 0.96 pesos y 1.06 respectivamente. Para la ruta que pasa por el sector eléctrico es de más de la mitad, no solo en cuanto a la magnitud sino también en cuanto a la estructura pasando de 30.3% a 14.8% y de 14.8% a 6.6%.

Lo más interesante es que como se puede ver, esta reducción no ocurre de manera directa, sino que se debe exclusivamente a que para el escenario $\boldsymbol{Z_3}$ el sector eléctrico no se ve perturbado de la misma manera ante el aumento del precio de derivados del petróleo, y por tanto no traslada la afectación a los sectores que más consumen electricidad. Este ejemplo, más que ninguno, muestra como la diversificación de la matriz eléctrica, y en particular la transición hacia energías renovables, son claves para la seguridad energética del país y la garantía de tener precios de electricidad bajos.

Pasando a los efectos sobre los hogares mexicanos, como se vio en la metodología de simulación, la capacidad de ahorro de los hogares se fortalece notablemente, el nuevo ahorro se comporta de forma progresiva a través de la distribución de ingreso siendo los deciles más altos los que más ahorro ganan con el cambio de paradigma. Sin embargo, al analizarlos de forma relativa, son los deciles de ingresos más bajos y medios son los que más se benefician de este crecimiento.



Gráfica 5.9 Ahorro por decil en el escenario base, su aumento para el escenario $\boldsymbol{Z_3}$ y el por ciento relativo de crecimiento.
Fuente: Elaboración propia con datos de la MCS 2018.

La Gráfica 5.9 muestra en escala logarítmica el ahorro inicial de cada decil y el aumento de este para el escenario $\boldsymbol{Z_3}$. Para el primer decil el ahorro inicial es negativo, por lo que la capacidad para aprovechar la disminución del precio de la electricidad es limitada y el ahorro adicional a pesar de ser positivo solo representa el 3.0% de la deuda en términos absolutos.

El segundo decil es el más beneficiado con un aumento del 293.8% pasando de ahorrar 709 millones de pesos hasta los 2 793, llegando a superar los niveles del decil 3 en el escenario base. Este por su lado aumenta también significativamente en un 103.6% con respecto a $\boldsymbol{Z_0}$ y para los restantes dicha proporción va disminuyendo considerablemente hasta llegar al 0.8% para el decil más alto. Este fenómeno refleja cómo medidas que apuntan a la eficiencia energética y la sostenibilidad pueden, de hecho, contribuir a una redistribución más equitativa de la riqueza.

La estructura de consumo de los hogares ha cambiado relativamente con respecto al sector eléctrico, de la misma manera, las vías en las que el aumento de precios los afecta han cambiado igual. En la Tabla 5.6, una vez más podemos ver que

para el nuevo escenario $\boldsymbol{Z_3}$ se da una disminución del impacto de los precios de la electricidad sobre los hogares. Pasando de 0.382 a 0.293 dicho impacto disminuye en un 23.3% debido principalmente a la disminución del gasto en consumo eléctrico por parte de los hogares (0.105 a 0.080), consecuencia que se deriva directamente de la simulación realizada. Por otro lado, esta disminución también se debe a las otras vías, en las cuales la electricidad afecta los precios de los demás productos y estos a los hogares. Tal es el caso de los sectores 46 Comercio al por menor, 311 Industria alimentaria y 222 Suministro de agua y gas; todos con grandes niveles de consumo por parte de los hogares.

RUTA DE DESCOMPOSICION DE LA INFLUENCIA DE PRECIOS										
Incremento de costos del sector i	Efecto del precio en el destino j	Trayectoria a través de…	Global		Directo		Total		%T/G	
			$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$	$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$	$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$	$\boldsymbol{Z_0}$	$\boldsymbol{Z_3}$
221	Hogares		0.382	0.293	0.105	0.080	0.113	0.086	29.5%	29.4%
		46			0.025	0.019	0.030	0.023	7.9%	7.8%
		311			0.023	0.018	0.029	0.022	7.6%	7.6%
		222			0.006	0.005	0.007	0.006	1.9%	1.9%
324-326	Decil 1		0.164	0.159	0.056	0.056	0.064	0.064	39.0%	40.3%
		221			0.003	0.001	0.004	0.001	2.3%	0.9%
324-326	Decil 5		0.133	0.129	0.045	0.045	0.053	0.053	39.6%	40.7%
		221			0.002	0.001	0.002	0.001	1.6%	0.7%
324-326	Decil 10		0.094	0.092	0.031	0.031	0.042	0.042	44.8%	45.9%
		221			0.000	0.000	0.001	0.000	0.7%	0.3%

Tabla 5.6 Descomposición de ruta de la influencia de precios entre los hogares, sectores productivos y el sector eléctrico para los escenarios $\boldsymbol{Z_0}$ y $\boldsymbol{Z_3}$.
Fuente: Modelos multisectoriales construidos con la MSC 2018 de INEGI.

Además, bajo esta nueva estructura el sector eléctrico deja también de transmitir hacia los hogares, los aumentos de precios que se produzcan en derivados del petróleo. Si bien la reducción del impacto no es demasiada significativa en términos absolutos, la segunda serie de datos de la Tabla 5.6 nos indica que la transmisión del precio mediante la vía del sector eléctrico y su estructura en esta ruta disminuye casi en tres partes para el decil más bajo (2.3% a 0.9%), en dos

para el decil 5 (1.6% a 0.7%) y el decil más alto (0.7% a 0.3%). Como se puede ver, el efecto incluye un aspecto progresivo donde los deciles más bajos son los más beneficiados ante este cambio de paradigma.

La transición energética presentada no solo tiene el potencial de transformar la infraestructura energética del país sino también de ser un motor para el progreso social. El ahorro en costos de electricidad y la disminución del impacto del precio eléctrico sobre los hogares se traduce directamente en una mayor disponibilidad de recursos, lo que puede impulsar la inversión en educación, salud y bienestar. Además, se anticipa que el ahorro promovido por la disminución de los precios de la electricidad propicie una economía más dinámica, estable y resiliente, en la que los hogares no solo consumen más, sino que también invierten y ahorran, alimentando así un círculo virtuoso de crecimiento y desarrollo.

5.4 Comentarios finales del capítulo

En este capítulo, hemos realizado un recorrido analítico a través de una simulación energética de transición en México, evaluando las repercusiones de una hipotética sustitución total de tecnologías de generación eléctrica contaminantes por opciones renovables. Nuestro análisis ha revelado que, más allá de la imperativa ambiental, la transición hacia energías renovables como la solar y la eólica presenta una estrategia económica fortalecedora, con el potencial de redefinir la sostenibilidad del sector energético y estimular la dinámica económica del país.

El Escenario $\boldsymbol{Z_1}$ nos ofreció una mirada preliminar sobre la economía sin las termoeléctricas convencionales y carboeléctricas, mostrando cómo su eliminación podría conducir a un ahorro significativo en costos tanto domésticos como importados. Este escenario subrayó la urgencia de reemplazar las fuentes energéticas de alto costo y baja eficiencia por alternativas más económicas y limpias.

Avanzando hacia el Escenario $\boldsymbol{Z_2}$, la reasignación de la demanda eléctrica a la generación solar y eólica demostró ser una medida prometedora que no solo apunta a la viabilidad económica sino también a la autosuficiencia energética del sector eléctrico. Este escenario adelantó los beneficios de una matriz energética más independiente, resaltando el ahorro sustancial en importaciones y la mayor seguridad que esto implica para la determinación interna de precios.

Finalmente, el Escenario $\boldsymbol{Z_3}$ consolidó la visión de una transición energética con su impacto integral en la economía. La disminución del precio de la electricidad, reflejada en este escenario, se reveló como un catalizador para el ahorro en todos los sectores y un potenciador del bienestar de los hogares. La redistribución más equitativa del ahorro entre los distintos estratos de ingreso pone de manifiesto el potencial de las políticas de eficiencia energética para promover no solo la sostenibilidad ambiental sino también la equidad social.

La transición hacia energías renovables no es meramente una opción ambientalmente responsable, sino una decisión estratégica para el avance económico y el bienestar social en México. La transformación del sector energético se presenta como una oportunidad para que México no solo cumpla con sus compromisos internacionales en materia de cambio climático, sino que también fomente un crecimiento económico inclusivo y sostenible.

La sustitución de tecnologías contaminantes por energías renovables es una ruta benefactora, tanto desde la perspectiva del desarrollo nacional como desde la óptica de la responsabilidad global. Es imperativo, entonces, que las políticas y estrategias futuras se alineen con estos hallazgos para aprovechar al máximo las oportunidades que esta transición energética ofrece. El próximo y último capítulo de la tesis ahonda precisamente en este aspecto más tradicional del análisis de la transición energética, los beneficios de la externalidad ambiental. Para ello se describe la situación real en la que se encuentra el país actualmente y las diferentes propuestas que se han planteado, y sus respectivos efectos económicos y medioambientales, para alcanzar dicha transición.

6. Emisiones de CO_2 y políticas sobre la matriz eléctrica de México.

El debate actual sobre la política energética en México es de suma importancia, hoy en día se está dando una transformación en el sector eléctrico que comenzó con la reforma energética de 2013 y que representa la respuesta del país a la creciente demanda de energía de los sectores económicos y el consumo de la población, la adaptación a las nuevas dinámicas energéticas que vienen surgiendo desde hace varias décadas en el ámbito mundial, y la necesidad de proteger al medio ambiente plasmada y ratificada por el país en la firma del Acuerdo de París de 2015. En un momento tan crítico para el sector eléctrico mexicano, los planes y decisiones que se tomen en el presente tendrán un impacto directo en la vía como se abordan estas problemáticas y, en consecuencia, el futuro energético de todos.

En el capítulo anterior, se destacaron los beneficios económicos y la estabilidad del precio de la electricidad resultantes de la transición simulada. No obstante, también se identificaron potenciales contracciones en sectores económicos específicos que dependen de las tecnologías tradicionales. Para empezar el propio sector eléctrico tendría una contracción fuerte al desaparecer dos de sus principales formas de producción eléctrica. Como consecuencia, habrá una contracción indirecta en sectores relacionados, como el de los derivados del petróleo, la minería de petróleo y el carbón mineral.

Estos sin duda representan efectos negativos de la transición, pero no deben menospreciar ni restar importancia a los efectos económicos positivos previamente analizados. Pero, además es fundamental considerar el impacto medioambiental positivo que resulta de la transición. La transición hacia fuentes de energía renovables representa un paso crucial en la lucha contra el calentamiento global y sus efectos adversos. Aunque el camino hacia una economía más sostenible y ecológica puede presentar desafíos, los beneficios ambientales a largo plazo justifican plenamente estos esfuerzos.

Es precisamente el presente capitulo el que se dedicara a estudiar y cuantificar cuales son estos beneficios en términos de emisiones de CO_2 equivalentes, y además a analizar cuáles han sido los esfuerzos hacia este objetivo por parte de las ultimas administraciones gubernamentales y sus proyecciones a futuro. Utilizando la disposición de la matriz eléctrica de generación mexicana para cada uno de los planes gubernamentales especificados en los PRODESEN (2018) y (2022) se quiere obtener una proyección de como quedaría la estructura de producción del sector eléctrico y cuantificamos sus efectos medioambientales a través del cálculo de las emisiones de CO_2e.

Este capítulo busca ofrecer una visión integral de los beneficios medioambientales de la transición energética, así como de los esfuerzos y proyecciones gubernamentales que apuntalan este cambio crucial. A pesar de los desafíos y contracciones económicas en sectores específicos, los beneficios a largo plazo tanto para la economía como para el medio ambiente son indiscutibles y representan un paso esencial hacia un futuro más sostenible y saludable.

6.1 Metodología de cálculo de emisiones de CO_2e.

Para el análisis de emisiones usaremos una metodología muy común para este propósito en el trabajo con matrices de insumo producto, contabilidad social y en modelos intersectoriales de modo general. Dicha metodología corresponde a las matrices de insumo producto ambientales, así como su versión extendida a matrices de contabilidad social, conocidas en la literatura como e-SAM (Environmental Social Accounting Matrices). Aunque no son tan comunes en el estudio ambiental comparado con otras metodologías, las matrices ambientales son una herramienta útil e integral para el análisis de políticas energéticas debido a que representan el ciclo circular completo del ingreso e incorporan una desagregación a nivel de actividades productivas y deciles de ingreso para los hogares.

6.1.1 **Literatura sobre e-SAM y emisiones de CO_2**

La literatura existente incluye estudios como el artículo de Manresa & Sancho (2004) donde se estiman la intensidad energética y las emisiones de CO_2 para la economía de Catalunya, y otros como (Park & Lee, 2013) para determinar la relación entre el consumo energético, las emisiones de CO_2 y la actividad económica, y (Park & Eunnyeong , 2006) donde cuantifican los requerimientos de energía directa e indirecta de los hogares en Corea del Sur desde 1980 hasta 2000, utilizando tablas de insumo producto con información ambiental.

Para el caso de México, existen varios estudios recientes que se han acercado a esta problemática por la vía del estudio Insumo Producto. Dos de los más destacados en el presente análisis son (Betancourt Rodríguez, 2015) y (de la Vega Gomar, 2021), los cuales estudian la aplicación de impuestos a las emisiones de CO_2 mediante matrices de Insumo Producto.

(Betancourt Rodríguez, 2015) identifica primeramente los sectores más contaminantes de la economía mexicana, siendo el sector eléctrico el segundo solo por detrás del transporte; y luego plantea varios escenarios como una variación de las exportaciones del sector petrolero, un impuesto ecológico y el cambio tecnológico como alternativa para la mitigación de las emisiones. (de la Vega Gomar, 2021) estudia el fenómeno de manera multirregional e identifica la posibilidad de diferenciar el impuesto sectorialmente y la región en base a la propia intensidad de emisiones, donde el sector eléctrico adquiere altas cargas impositivas particularmente para el norte y el sur del país.

Otros estudios han abordado la problemática desde modelos más sofisticados como los de equilibrio general computable. (Elizondo, Ibarrarán, & Boyd, 2020) estudia medidas sobre el sector agropecuario de mitigación de gases de efecto invernadero y calcula mediante este tipo de modelos el impacto a nivel económico, el cual resulta ser de un incremento potencial del 6.8% de la producción agropecuaria. Este tipo de estudia se alinea con una idea transversal de nuestro análisis: los beneficios económicos de las medidas medioambientales; la cual no suele ser abordada en los análisis de este tipo. (Ibarrarán Viniegra, Elizondo, &

Boyd, 2022) también usan un modelo de equilibrio general para estudiar los impuestos medioambientales como incentivo y catalizador de la transición de la matriz eléctrica de generación mexicana.

Sin embargo, los análisis recientes que más se aproximan al objetivo de este capítulo son los estudios de (Mardones & Lipski, 2020) y (Mardones & Brevis, 2021). Para el primero se evalúa la implementación de un impuesto a las emisiones de CO_2 equivalente producidas por el sector de la agricultura chileno usando una matriz de contabilidad social ambiental. Se comparan los escenarios de antes y después del impuesto y se evalúa la eficiencia de este como revulsivo para la reducción de emisiones. El segundo y más reciente estudio simula subsidios en los subsectores de generación de energía renovable no convencional e impuestos ambientales, y calculan sus impactos mediante la matriz de contabilidad social ambiental chilena de 2016.

Uno de los puntos más relevantes de este estudio es que realiza una desagregación del sector eléctrico muy similar a la realizada en esta investigación, y además demuestran que las políticas energéticas y ambientales simuladas con modelos intersectoriales que no desagregan el sector eléctrico producen sesgos significativos en los resultados. Esto debido a que cada subsector eléctrico difiere en la tecnología de producción eléctrica y en sus intensidades de emisión. Muchos estudios como (Xie, 2000), (Lenzen & Schaeffer , 2004) y (Li & Su, 2018), como algunos de los ya mencionados, realizan análisis sobre las intensidades de energía y emisiones, pero no realizan desagregación alguna del sector eléctrico.

6.1.1 **Vector de emisiones totales de CO_2e**

El método necesita principalmente un vector de emisiones totales, en este caso expresado en CO_2 equivalente, medida estándar utilizada para comparar las emisiones de varios gases de efecto invernadero (GEI) sobre la base de su potencial de calentamiento global (GWP). Este debe incluir las emisiones totales de todas las actividades productivas y las cuentas de hogares. Llamaremos a este

vector $\boldsymbol{t_{CO_2e}}$ y junto con el vector de producto bruto $\boldsymbol{x}$ de la matriz de contabilidad social, se puede obtener un vector $\boldsymbol{v_{CO_2e}}$ de emisiones por millón de pesos para cada cuenta:

$$\widehat{\boldsymbol{v_{CO_2e}}} = \widehat{\boldsymbol{t_{CO_2e}}} * \hat{\boldsymbol{x}}$$

Nuevamente los “sombreros” representan una matriz diagonal con los valores de los vectores correspondientes. Al post multiplicar matricialmente la matriz diagonal $\widehat{\boldsymbol{v_{CO_2e}}}$ por el modelo de Leontief $\boldsymbol{L}$ se obtienen las intensidades de emisiones de cada una de las cuentas endógenas del modelo, pudiendo contabilizar las emisiones de CO_2e por millones de pesos que realizan cada una de las actividades económicas luego de que se integran en el flujo económico representado por la matriz de contabilidad social.

En el marco de esta metodología, el vector clave identificado es $\boldsymbol{t_{CO_2e}}$, el cual debe ser elaborado a partir de la intensidad de consumo de cada sector productivo y del hogar. La construcción de este vector es un proceso complejo que puede abordarse mediante diversas metodologías y que requiere de múltiples fuentes de información.

Dado que el objetivo de este documento no es detallar exhaustivamente todo el proceso metodológico, se optará por utilizar el vector resultante del estudio realizado por (Maldonado Cruz, 2022) descrito en la última columna de la tabla 3.5 de dicho documento, y que aquí se reproduce en la Tabla 6.1.

Este estudio se fundamenta en fuentes de información como las Cuentas Ambientales de WIOD (2019) y el Sistema de Información Energética (SIE). Además, sigue la metodología detallada por Miller y Blair (2009), la cual es ampliamente aceptada en la literatura especializada. Al emplear este vector preexistente, garantizamos que el análisis se sustenta en datos robustos y en una metodología validada y desarrollada en colaboración cercana con el estudio actual, permitiendo así un enfoque más directo en los resultados y conclusiones pertinentes a nuestra investigación.

COD. SCIAN	Descripción SCIAN	Diésel (ton CO2/l)	Electricidad (ton CO2/KWh)	Gasolina (ton CO2/l)	Gas natural (ton CO2/m3)	Gas LP (ton CO2/kg)	Total	%
11	Agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza	3,355,555.93	6,299,884.18	7,356,173.82	0.00	0.00	17,011,613.93	4.28
21P	Minería petrolera	136,369.76	11,749,282.88	298,390.60	18,728,428.78	0.00	30,912,472.02	7.77
21NP	Minería no petrolera	31,807.69	2,740,471.95	69,598.38	4,368,329.06	0.00	7,210,207.08	1.81
22	Electricidad, agua y suministro de gas por ductos al consumidor final	101,128.83	32,583,369.34	221,100.48	99,507,632.61	0.00	132,413,231.26	33.30
23	Construcción	2,657,788.29	3,431,076.46	5,807,879.23	2,268,626.36	0.00	14,165,370.35	3.56
311	Industria alimentaria	572,218.05	10,784,609.34	1,254,003.86	819,538.62	0.00	13,430,369.87	3.38
312	Industria de las bebidas y del tabaco	110,596.66	2,084,418.39	242,370.27	158,398.08	0.00	2,595,783.40	0.65
313-314	Fabricación de insumos textiles y acabado de textiles, excepto prendas de vestir	65,387.81	657,188.17	143,374.12	468,158.81	0.00	1,334,108.91	0.34
315-316	Fabricación de prendas de vestir; Curtido y acabado de cuero y piel	125,801.92	1,264,387.53	275,842.54	900,707.28	0.00	2,566,739.27	0.65
321	Industria de la madera	47,230.00	741,571.12	103,643.18	538,315.57	0.00	1,430,759.87	0.36
322-323	Industrias del papel, impresión e industrias conexas	44,003.19	4,598,425.58	96,491.27	1,534,054.53	0.00	6,272,974.58	1.58
324-326	Derivados del petróleo y del carbón; industrias química, del plástico y del hule	208,104.92	11,190,015.55	455,755.88	15,351,922.20	24,215.33	27,230,013.89	6.85
327	Fabricación de productos a base de minerales no metálicos	147,856.87	10,646,112.94	323,888.27	3,371,678.64	0.00	14,489,536.72	3.64
331-332	Industrias metálicas	171,649.47	12,074,480.34	375,445.04	9,107,038.00	799,802.13	22,528,414.98	5.67
333-336	Maquinaria y equipo	563,792.16	11,441,978.19	1,232,564.48	2,443,127.95	0.00	15,681,462.78	3.94
337	Fabricación de muebles y productos relacionados	57,480.53	619,991.23	125,781.06	455,773.42	0.00	1,259,026.25	0.32
339	Otras industrias manufactureras	98,541.94	1,062,884.02	215,633.18	781,356.67	0.00	2,158,415.82	0.54
43	Comercio al por mayor de abarrotes, alimentos, bebidas, hielo y tabaco	1,692,314.83	5,952,274.92	3,708,085.51	118,252.47	0.00	11,470,927.74	2.89
46	Comercio al por menor de abarrotes, alimentos, bebidas, hielo y tabaco	1,542,221.38	5,036,299.80	3,379,324.99	100,073.68	0.00	10,057,919.85	2.53
48-49	Transportes, correo y almacenamiento	25,243,157.04	1,177,425.12	103,401.53	81,892.15	0.00	26,605,875.84	6.69
51	Información en medios masivos	346,675.78	1,549,684.32	78,115.10	208,409.84	0.00	2,182,885.04	0.55
52	Servicios financieros y de seguros	283,846.34	801,778.52	620,243.52	16,013.74	0.00	1,721,882.13	0.43
53	Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
54	Servicios profesionales, científicos y técnicos	62,664.54	559,228.19	135,223.38	11,083.45	0.00	768,199.55	0.19
55	Dirección de corporativos y empresas	7,324.41	101,421.31	16,099.73	2,011.05	0.00	126,856.50	0.03
56	Servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación	238,138.76	3,648,430.74	520,980.82	82,339.82	0.00	4,489,890.15	1.13
61	Servicios educativos	1,067,170.89	2,640,083.60	2,340,751.96	52,424.31	0.00	6,100,430.76	1.53
62	Servicios de salud y de asistencia social	506,168.03	2,713,183.97	1,110,693.58	53,844.38	0.00	4,383,889.96	1.10
71	Servicios de esparcimiento, culturales y deportivos y otros servicios recreativos	69,525.46	331,743.39	152,508.42	6,612.39	0.00	560,389.66	0.14
72	Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas	766,139.20	3,856,490.57	1,678,227.58	76,748.03	0.00	6,377,605.38	1.60
81	Otros servicios, excepto actividades del gobierno	312,914.10	1,490,482.05	686,337.17	109,125.09	0.00	2,598,858.41	0.65
93	Actividades del Gobierno	1,191,539.06	3,580,237.51	2,609,705.73	70,799.97	0.00	7,452,282.27	1.87
	Total 2018	**41,825,113.85**	**157,408,911.23**	**35,737,634.73**	**161,792,716.95**	**824,017.46**	**397,588,394.22**	**100.00**

Tabla 6.1 México, 2018: Vectores de emisiones en toneladas de CO2e de las actividades productivas por tipos de energéticos.
Fuente: Estimación y análisis de las emisiones de CO2e de los hogares mexicanos (Maldonado Cruz, 2022) Nota: En color azul por columna se señalan los 5 valores más elevados.

Sin embargo, es importante notar que las emisiones se presentan en un nivel de agregación diferente al que presenta la matriz. Para poder utilizarlas en el modelo de la presente investigación, es necesario dejarlo con el nivel de agregación acorde, especialmente para el sector que contiene al sector eléctrico. De esta forma se debe desagregar los sectores de 21NP Minería no petrolera, 333-336 Maquinaria y Equipo y 22 Electricidad, agua y gas al consumidor final. Este último

primero en 221 Generación, Transmisión, Distribución y Comercialización de Energía Eléctrica; y 222 Suministro de agua y gas al consumidor final y luego el sector 221 en los subsectores correspondientes a cada tecnología de generación y el sector de transmisión, distribución y comercialización.

La Tabla 6.1 presenta no solo el vector total de emisiones acumuladas correspondientes a cada fuente de energía, sino también la desagregación específica de las emisiones para cada una. La metodología empleada para esta desagregación se basa en la asociación de cada energético con un sector específico de la matriz. Por ejemplo, el diésel, la gasolina, el gas natural y el gas LP se asocian al consumo del sector 324-326 (Derivados del petróleo y del carbón), mientras que la electricidad se asocia de manera agregada al sector eléctrico.

Subsector	Emisiones CO_2e
221111-1 Generación de electricidad en centrales de Ciclo Combinado	37,825,470
221111-2 Generación de electricidad en Carboeléctricas	6,633,954
221111-3 Generación de electricidad en Termoeléctricas Convencionales	55,137,353
221112 Generación de electricidad a partir de energía hidráulica	478,923
221113 Generación de electricidad a partir de energía solar	18,095
221114 Generación de electricidad a partir de energía eólica	121,121
221119 Generación de electricidad a partir de otro tipo de energía limpia	168,248
22112 Transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica	1,081,024

Tabla 6.2 México, 2018: Desegregación del vector de emisiones en toneladas de CO2e por tipo de tecnología de generación y TDC de energía eléctrica.
Fuente: Elaboración propia con información de (Maldonado Cruz, 2022).

Para cada subsector en el que se desea desagregar las emisiones, se utiliza el consumo relativo de los sectores asociados a los energéticos como un proxy para estimar la cantidad de emisiones que producen. Por ejemplo, las plantas termoeléctricas convencionales, debido a su intenso consumo de derivados del

petróleo, tendrán una proporción significativamente mayor de emisiones comparadas con la generación eólica.

La desagregación de los sectores se presenta de la siguiente manera (en toneladas de CO2e): 2121 Minería de carbón mineral (493,367), 21NP Minería no petrolera (6,716,840), 221 Sector eléctrico (101,464,187), 222 Suministro de agua y gas al consumidor final (30,949,045), 333-335 Maquinaria y equipo (7,502,394) y 336 Fabricación de equipo de transporte (8,179,068). Posteriormente, el sector eléctrico se desagrega por tipo de tecnología, tal como se muestra en la Tabla 6.2.

Para el caso de las emisiones de los hogares nuevamente utilizamos la información disponible en (Maldonado Cruz, 2022) contenida en la tabla 3.30 de dicho documento y replicada en este con la información para el año 2018 en la Tabla 6.3.

Decil	Electricidad tCO2e/kWh
1	1,419,215.17
2	1,898,871.11
3	2,218,210.31
4	2,553,507.76
5	2,874,424.14
6	3,251,845.55
7	3,598,525.76
8	3,918,638.95
9	4,621,403.64
10	5,968,889.28
Total	32,323,531.67

Tabla 6.3 México: Vector de emisiones en toneladas de CO2e por consumo de electricidad en los hogares para el año 2018.
Fuente: Estimación y análisis de las emisiones de CO2e de los hogares mexicanos (Maldonado Cruz, 2022). *Nota: Emisiones de CO2e anuales.

Toda esta información corresponde al escenario base. Para los demás escenarios debemos asignarle un vector de emisiones específico, ya que para estos ha cambiado la participación de cada tecnología en la generación eléctrica. Es decir,

al cambiar la matriz eléctrica debe cambiar el nivel de emisiones que genera el sector eléctrico de forma agregada, ya que la participación de las tecnologías más contaminantes disminuye y esto tiene un efecto ambiental que debe reflejarse las emisiones totales del sector.

Por tanto, en este caso sería incorrecto simplemente redistribuir las emisiones hacia las tecnologías que aumentan su participación, si se produce la electricidad con tecnologías limpias el resultado deberían ser menos emisiones.

$$\boldsymbol{e_{escenario}} = \%\boldsymbol{participacion_{escenario}}/\%\boldsymbol{participacion_{base}} * \boldsymbol{e_{base}}$$

La metodología utilizada es calcular en cuanto disminuyo o aumento la participación de cada tecnología en la matriz eléctrica relativamente a la participación del escenario base, y disminuir la cantidad de emisiones correspondientes en la misma medida. Supongamos una participación de 60% para alguna tecnología, si para el nuevo escenario la participación es de 15%, entonces la participación disminuyo en un 75%, por lo que las emisiones de esta tecnología disminuirían en 75%.

Tecnología	**Base**	$\boldsymbol{Z_3}$
Convencionales	***99,596,776***	***37,825,470***
Ciclo Combinado	37,825,470	37,825,470
Carboeléctrica	6,633,954	-
Termo Convencional	55,137,353	-
Limpias	***786,386***	***1,526,721***
Hidroeléctrica	478,923	478,923
Solar	18,095	504,077
Eólica	121,121	375,474
Otras Limpias	168,248	168,248
Total, Sector Eléctrico	**101,464,187**	**40,433,215**

Tabla 6.4 México: Vectores de emisiones en toneladas de CO_2e por tipo de tecnología de generación eléctrica para el escenario ideal y las proyecciones de 2024 y 2030.
Fuente Elaboración propia con información (Maldonado Cruz, 2022).

En particular para el escenario construido en el capítulo anterior ($\boldsymbol{Z_3}$) que llamaremos escenario ideal, el vector de emisiones del sector eléctrico cambia de acuerdo con la Tabla 6.4.

Así como se realiza la simulación y el cálculo de la matriz de contabilidad social para cada escenario, los cambios en la estructura de producción del sector eléctrico tienen como consecuencia un impacto sobre los sectores más dependientes de este. Si bien estos cambios no son significativos para todas las actividades productivas, debemos tener en cuenta que el vector de emisiones debe cambiar también para el resto de los sectores y no solo para el sector eléctrico. Para estos no tenemos información tan detallada como para el sector eléctrico, por lo que la metodología es se realizará de manera simple adoptando el supuesto de que las emisiones son proporcionales al PBT de cada sector.

Decil de Ingreso	Base	$\boldsymbol{Z_3}$
Decil 1	1,419,215	1,419,308
Decil 2	1,898,871	1,899,002
Decil 3	2,218,210	2,218,368
Decil 4	2,553,508	2,553,694
Decil 5	2,874,424	2,874,635
Decil 6	3,251,846	3,252,086
Decil 7	3,598,526	3,598,795
Decil 8	3,918,639	3,918,930
Decil 9	4,621,404	4,621,753
Decil 10	5,968,889	5,969,315

Tabla 6.5 México: Vectores de emisiones en toneladas de CO_2e de los hogares para el escenario ideal y las proyecciones para 2024 y 2030.
Fuente Elaboración propia con información (Maldonado Cruz, 2022).

Esto aplica para todos los sectores excepto para el sector eléctrico, como se vio para este se tiene información adicional que podemos utilizar para modificar de forma más precisa la información sobre las emisiones.

$$\boldsymbol{V_{escenario} = PBT_{escenario}/PBT_{base} * V_{base}}$$

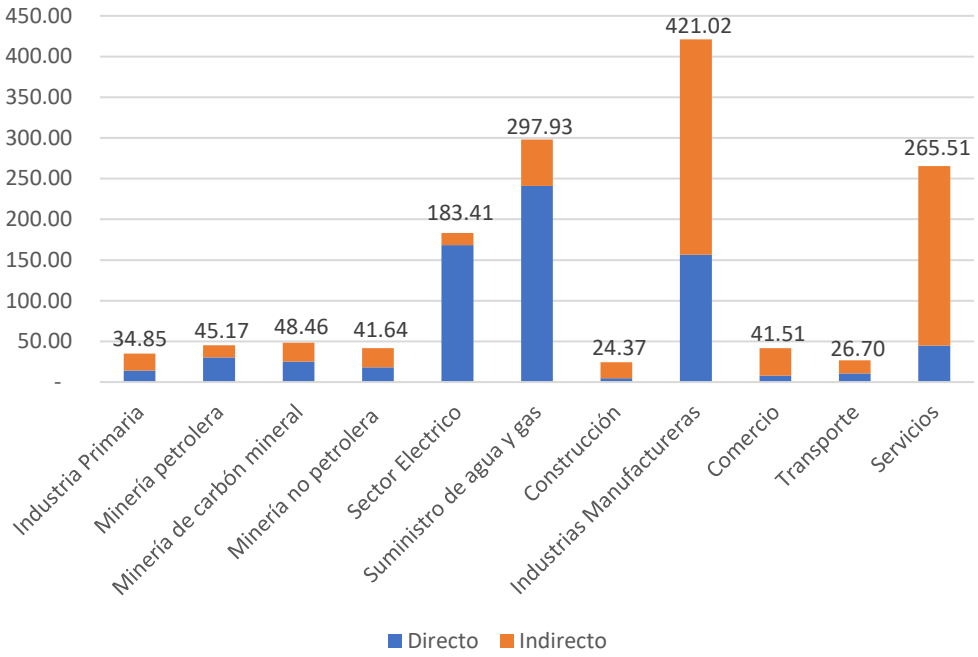
Con los nuevos PBT calculados para generar cada una de las matrices de contabilidad social, se calcula la razón de estos con los del escenario base y el resultado se multiplica por el vector de emisiones base, tal y como se muestra en la ecuación. Para el caso de los hogares, se aplica el mismo supuesto mencionado, los resultados para se presentan en la Tabla 6.5.

6.2 Resultados medioambientales de $\boldsymbol{Z_0}$ y $\boldsymbol{Z_3}$

6.2.1 **Escenario base 2018**

Primeramente, comenzaremos analizando el escenario base con respecto a las emisiones de CO_2 equivalentes calculadas mediante el modelo de Leontief. La Gráfica 6.1 muestra las emisiones por millón de pesos en varios sectores y grupos de sectores de la economía. Se destaca primeramente el acumulado de industrias manufactureras con 421.02 toneladas de emisiones de CO_2e por millón de pesos de actividad económica. Este resultado es bastante esperado debido a las características de estas actividades productivas, con altos consumos de energéticos contaminantes incluidas el consumo eléctrico que incluye emisiones importantes.

Por otro lado, se tienen los sectores de suministro de agua y gas al consumidor final, el aglomerado de servicios y el sector eléctrico con amplios márgenes de emisiones con 297.93, 265.51 y 183.41 toneladas de CO_2e por millón de pesos de demanda final del sector. También se observa que los aglomerados de manufactureras y servicios se caracterizan por tener un volumen de emisiones predominantemente indirecto, es decir que se debe al ciclo económico y a las emisiones que producen indirectamente en otros sectores o que otros sectores inciden en estos. A diferencia de sectores como el eléctrico y el suministro de agua y gas, que son más intensivos en las emisiones directas de su actividad económica, estos directamente contaminan al operar.

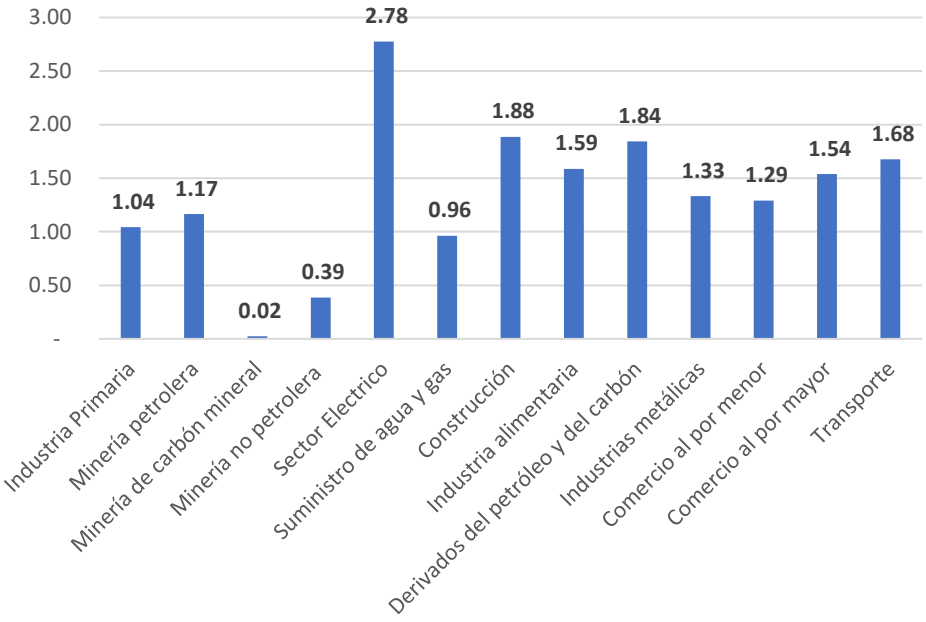


Gráfica 6.1 México, 2018: Toneladas de emisiones directas e indirectas de CO_2e por millón de pesos en el sector correspondiente.
Fuente: Elaboración propia con información de la MCS 2018 y (Maldonado Cruz, 2022).

Estos resultados nos indican qué sectores son menos eficientes en términos de contaminación por cada millón de pesos de producción. Por ejemplo, el sector de Suministro de Agua y Gas presenta altos niveles de contaminación relativa, pero su tamaño en la economía no lo posiciona como uno de los mayores contaminadores absolutos.

Para identificar los sectores que contribuyen de manera más significativa a la contaminación total, es necesario aplicar una metodología similar a la de las elasticidades. Esta metodología considera tanto el tamaño relativo de cada sector dentro de la economía como sus emisiones específicas. Primero, se determina el tamaño de cada sector en relación con el total de las actividades productivas. Luego, este tamaño relativo se multiplica por las emisiones de CO2 correspondientes a ese sector. Este enfoque permite ajustar las emisiones en

función del peso económico de cada sector, proporcionando una visión más precisa de su impacto ambiental absoluto.



Gráfica 6.2 México, 2018: Toneladas de emisiones de CO_2e de cada sector por cada millón de pesos de PBT en la economía total.
Fuente: Elaboración propia con información de la MCS 2018 y (Maldonado Cruz, 2022).

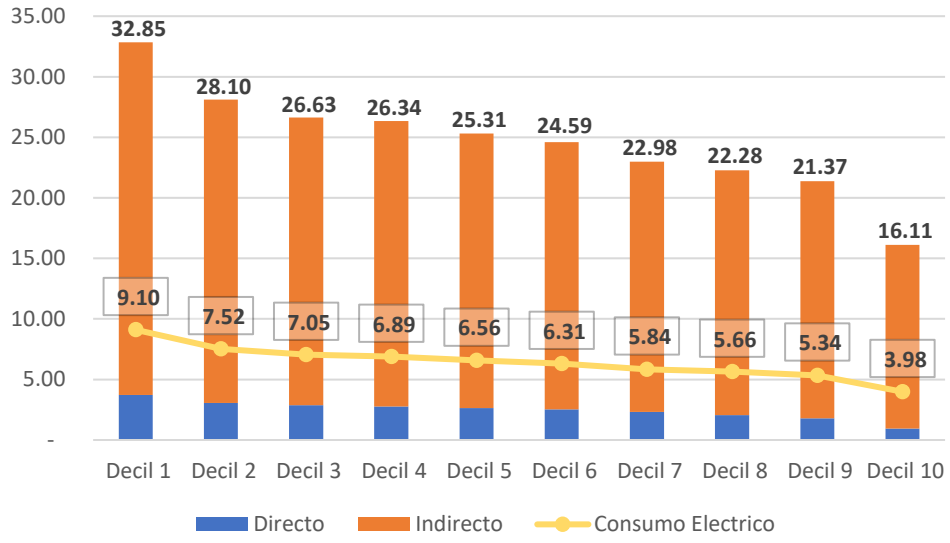
Los resultados son mostrados en la Gráfica 6.2. Aquí la interpretación consiste en la cantidad de toneladas de CO_2e emitidas por cada sector relativos a un millón de pesos de PBT en toda la economía. Cada que se produce un millón de pesos en la economía, el sector eléctrico emite 2.78 toneladas de CO_2e, siendo el sector más contaminante de la economía. Lo siguen los sectores de construcción, derivados del petróleo y el carbón, y el transporte con 1.88, 1.84 y 1.68 respectivamente.

Le siguen en términos de contaminación los sectores de construcción, derivados del petróleo y carbón, y transporte. Cabe destacar que el sector de suministro de agua y gas al consumidor final no se encuentra entre los más contaminantes, así como ningún servicio en particular, los cuales no fueron incluidos en la gráfica debido a sus bajos valores de emisión. Un punto notable es la minería de carbón

mineral. Aunque en la gráfica anterior aparecía en el quinto lugar en términos de emisiones relativas, al considerar el tamaño del sector dentro de la economía, el impacto real de sus operaciones es mucho menor.

Estos dos ejemplos subrayan la importancia de ajustar las emisiones por el tamaño económico de los sectores para obtener una comprensión más precisa de su contribución a la contaminación. En conclusión, la interpretación de la Gráfica 6.2 nos ofrece una perspectiva ajustada de las emisiones de CO2e, resaltando que los sectores con mayor impacto absoluto son aquellos con altos niveles de emisiones relativas combinadas con un tamaño significativo en la economía.

Por último, veamos el caso de los hogares y sus emisiones en la matriz de contabilidad social ambiental. El consumo de los hogares emite de emisiones en su mayoría de forma indirecta, al demandar productos de las actividades económicas, estos contaminan y las emisiones son asignadas a los hogares de forma indirecta. Por si mismos sus emisiones son relativamente pequeñas comparado al total.

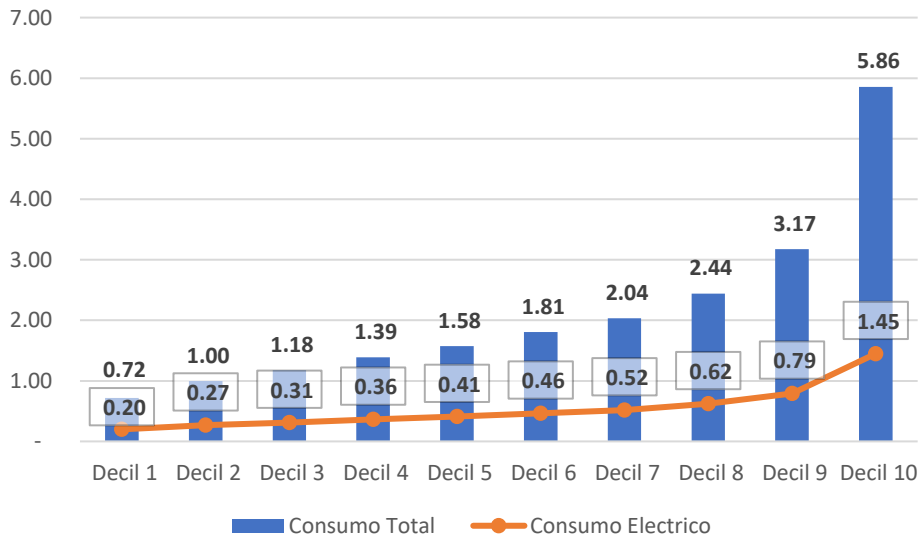


Gráfica 6.3 México, 2018: Toneladas de emisiones de CO_2e por millón de pesos por consumo de los hogares.
Fuente: Elaboración propia con información de la MCS 2018 y (Maldonado Cruz, 2022).

Los hogares de menos ingresos son los que más emiten con 32.85 toneladas de CO_2e por cada millón de pesos de consumo. Cada decil superior emite menos que el anterior y el decil más alto emite la mitad que el menor relativo al millón de pesos de consumo. Lo mismo ocurre para el caso de las emisiones debidas al consumo eléctrico. Comenzando por 9.10 y terminando con 3.98 toneladas de CO_2e las emisiones del decil de ingreso superior es casi un tercio del de menor ingreso.

Para este caso, repetimos el análisis realizado para las actividades productivas, ajustando las emisiones en función del peso relativo del consumo de cada decil dentro del consumo total de los hogares. Los resultados se presentan en la Gráfica 6.4.

En esta gráfica, se observa que, por cada millón de pesos de consumo de los hogares, el decil más alto emite 5.86 toneladas de CO2e, de las cuales 1.45 toneladas corresponden al consumo eléctrico. En contraste, los demás deciles emiten menos de 3.17 toneladas cada uno. Particularmente, el decil de menor ingreso emite solo 0.72 toneladas, de las cuales 0.2 corresponden al consumo eléctrico, siendo hasta 8 veces menor que el decil de mayor ingreso.



Gráfica 6.4 México, 2018: Toneladas de emisiones de CO_2e de cada decil de ingreso por cada millón de pesos de consumo total de los hogares.
Fuente: Elaboración propia con información de la MCS 2018 y (Maldonado Cruz, 2022).

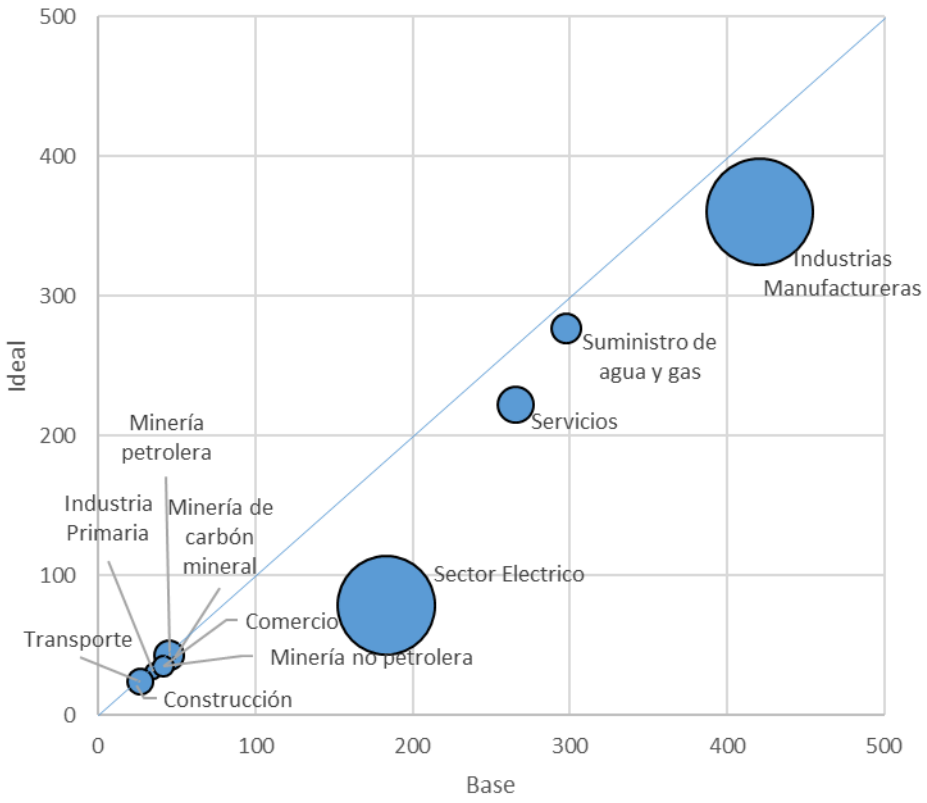
Estos resultados ponen de manifiesto la significativa disparidad en las emisiones de CO2e entre los diferentes deciles de ingreso. El análisis muestra que los hogares con mayores ingresos tienen un impacto ambiental considerablemente superior, incluyendo el consumo eléctrico, en comparación con los hogares de menores ingresos. Por demás, se pone de manifiesto una vez más la importancia de tener en cuenta el tamaño de cada decil en el consumo total para tener una mejor perspectiva de las emisiones correspondientes a cada decil.

6.2.2 **Escenario alternativo ideal Z_3**

Veamos entonces la aportación en el plano medioambiental de la alternativa ideal descrita en el capítulo anterior, en contraste con el escenario actual. Las ventajas de esta nueva estructura de producción eléctrica comienzan desde las emisiones totales descritas en la Tabla 6.4 que representan el vector de emisiones inicial.

Las emisiones totales se reducen más de la mitad llegando a representar el 39.8% de las emisiones del escenario base, disminuyendo desde 101,464,187 a 40,433,215 toneladas de CO_2e. Este se debe obviamente a la desaparición de las tecnologías de termoeléctricas convencionales y de carboeléctricas, que reducen las emisiones totales de las tecnologías a base de combustibles fósiles en 61,771,306 toneladas de CO_2e.

Por otro lado, la contaminación de las energías calificadas como limpias aumentan el doble debido su crecimiento. Al asumir la demanda eléctrica dejada por las convencionales, sustituyen a dichas tecnologías aumentando su participación en la matriz eléctrica, y por tanto aumentando también sus emisiones asociadas. Sin embargo, el aumento es de solo 740,335 toneladas, representando el 1.1% de las emisiones ahorradas en dicha sustitución.



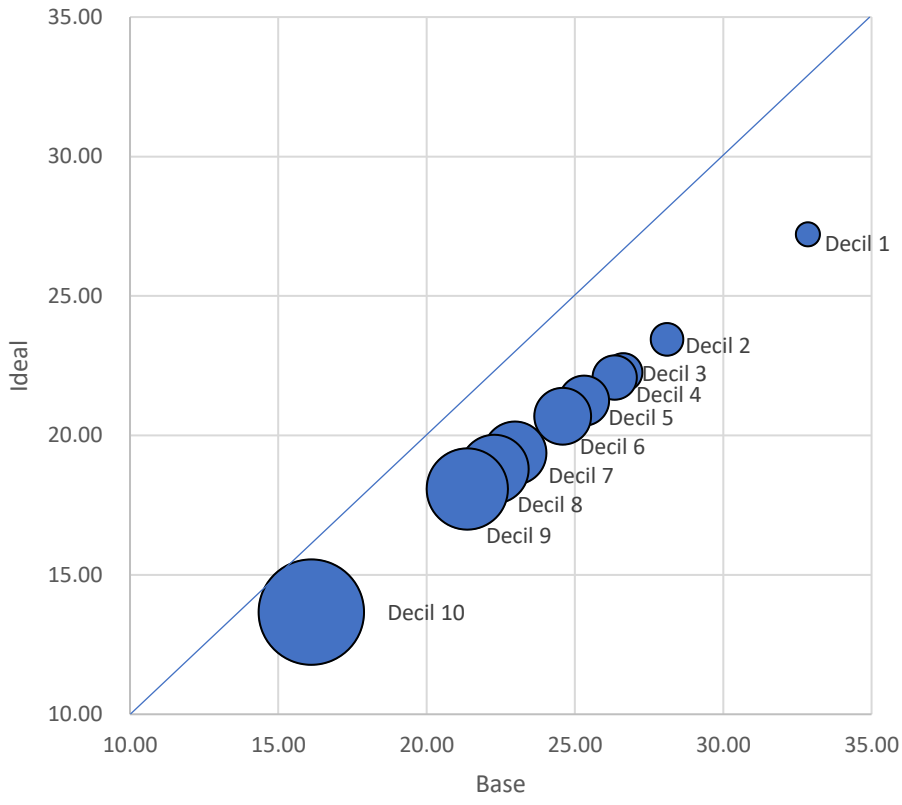
Gráfica 6.5 México: Comparación entre los escenarios base e ideal. *Nota: Las burbujas representan el tamaño de las emisiones de CO_2e iniciales de cada sector y cada coordenada las emisiones por millón de pesos en el sector, para un escenario y para el otro.
Fuente: Elaboración propia con información de la MCS 2018 y (Maldonado Cruz, 2022).

Aplicando ahora el modelo de Leontief a cada escenario obtenemos las emisiones por millón de pesos para los sectores. En la Gráfica 6.5 las coordenadas X de la gráfica representan las emisiones de CO_2e por millón de pesos en el sector correspondiente para el escenario base. Es la información que ya vimos en la sección pasada del escenario base. Para la coordenada Y se tiene la misma información, esta vez para el escenario alternativo ideal. Mientras más alejado de la línea diagonal se encuentre un sector, mayor es la diferencia entre escenarios. Las burbujas representan las emisiones totales iniciales de cada sector, como medida del tamaño absoluto de los contaminantes.

El sector que más destaca resulta el propio sector eléctrico, disminuyendo de 183.41 toneladas hasta solo 78.51 para un total de 104.90 toneladas de CO_2e por

millón de pesos. De estos 100.33 se deben a la disminución de emisiones iniciales calculada en 6.1.1 y 4.57 a las emisiones indirectas. Este resultado es esperado debido a que como ya vimos en la Gráfica 6.1 la mayoría de las emisiones de sector eléctrico son directas.

Lo contrario sucede para el caso de las industrias manufactureras la disminución de 60.88 toneladas de CO_2e se deben íntegramente a las emisiones indirectas. Las emisiones de este aglomerado, y de todos los demás sectores no ha disminuido con respecto a su PBT, por lo que la reducción de sus emisiones corresponde completamente a como se interrelacionan con los demás sectores y en particular, con el sector eléctrico que es el que ha cambiado su forma de producción y sus emisiones directas.



Gráfica 6.6 México: Comparación entre los escenarios base e ideal. *Nota: Las burbujas representan el tamaño de las emisiones de CO_2e iniciales de cada decil y cada coordenada las emisiones por millón de pesos de consumo, para un escenario y para el otro.
Fuente: Elaboración propia con información de la MCS 2018 y (Maldonado Cruz, 2022).

Por último, se destacan el aglomerado de servicios con una reducción de 42.99 y el sector de suministro de gas y agua con 21.34 toneladas de CO_2e. Para los demás sectores la disminución es menos pronunciada acumulando entre todos 32.30 toneladas de CO_2e menos.

Los efectos indirectos variados entre sectores se muestran directamente en su relación con el sector eléctrico, donde ocurre el cambio inicial. El cambio en la estructura de producción tiene un impacto significativo no solo en sus propias emisiones directas, sino también en las emisiones indirectas de otros sectores. A pesar de algunas contracciones económicas destacadas en el capítulo anterior, la combinación de la disminución en los precios de la electricidad y la ganancia en términos ambientales mostrada en este capítulo justifica estas transformaciones tan necesarias

Para el caso del consumo de los hogares y sus emisiones correspondientes, los resultados se muestran en la Gráfica 6.6. Los efectos de un cambio de política en la generación eléctrica benefician a los hogares de forma muy significativa, con una reducción total de 39.74 toneladas de CO_2e. Esta, además, ocurre de forma progresiva en la distribución del ingreso, siendo los deciles más bajos los de mayor disminución de sus emisiones por millón de pesos de consumo con 5.64, en contraste con los de mayor ingreso de solo 2.45, aunque estos últimos parten de emisiones menores con relación a su consumo.

6.3 Políticas en el sector eléctrico y la matriz de generación eléctrica.

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) se planifica anualmente dentro de un marco de quince años en el futuro. Esto como parte de la política energética en materia de electricidad que plasma el Plan Nacional de Desarrollo (PND), documento en el que el Gobierno de México, a través de consultas públicas, explica cuáles son sus objetivos y estrategias prioritarias durante la gobernatura del sexenio. Para ello existe un instrumento conocido como Programa para el

Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) publicado por la Secretaría de Energía (SENER) bajo el cual se orienta y se concreta dicha planeación por parte del gobierno en turno. En este documento se detalla el estado de la infraestructura del SEN, las proyecciones de demanda y consumo, y se incluyen otros elementos relevantes planeación, tales como el Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas (PIIRCE), así como los programas de ampliación y modernización de la Red Nacional de Transmisión y de las Redes Generales de Distribución.

En el PIIRCE se consideran los proyectos de centrales eléctricas que se añadirán al SEN en los próximos quince años, así como aquellas unidades que dejarán de operar durante este periodo de tiempo, dando conformidad con el Artículo 13 de la LIE: “con el objetivo de promover la instalación de los recursos suficientes para satisfacer la demanda en el Sistema Eléctrico Nacional y cumplir con los objetivos de Energías Limpias, la Secretaría desarrollará programas indicativos para la instalación y retiro de las Centrales Eléctricas, cuyos aspectos relevantes se incorporarán en el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional” (PRODESEN, 2019).

El cambio de sexenio en 2018 conllevó un nuevo gobierno en el poder que significó en materia de electricidad un giro de política que prioriza mediante la CFE la generación eléctrica, limitando al 46% la participación del sector privado y que no considera el retiro de centrales eléctricas ya existentes y planea la incorporación de nuevas plantas basadas en combustibles fósiles. Por tanto, existe una discrepancia entre el último PRODESEN correspondiente al PND de 2013 – 2018 y los que pertenecen al PND de 2019 – 2024, principalmente en concepto de planificación PIIRCE.

Teniendo en cuenta las proyecciones hechas por estos documentos, se pretenden construir varios escenarios que caractericen el Sistema Nacional Eléctrico y particularmente se concentrará en las matrices de generación eléctrica que como resultado arrojará cada plan. Estas matrices se utilizarán para simular cómo se comportaría la estructura de producción eléctrica, y a través del modelo de

Leontief obtener los efectos ambientales de cada una. Se realizarán escenarios para los años señalados de 2024 y 2030, las cuales son fechas puntuales que tienen como objetivo el cumplimiento de las metas de 35% y 37.7% de generación limpia respectivamente, planteadas en el Acuerdo de Paris y estipuladas en la Ley de Transición Energética (SENER, 2018).

Para el análisis posterior se consideran tres escenarios, los dos primeros reflejan las proyecciones que los diferentes sexenios tienen del sistema eléctrico. La evolución en materia de energías limpias a través del PIIRCE guían la conformación de las matrices de generación eléctricas correspondientes y estas serán la base para el estudio de cómo impactan en la estructura del sector eléctrico y este a su vez sobre las emisiones de CO_2 la herramienta principal del presente documento, la matriz de contabilidad social. El tercer escenario es una estimación de lo que realmente puede llegar a concretarse partiendo del plan del actual gobierno y de su política de restringir la generación privada al 46%, teniendo en cuenta que no se cuentan con recursos federales suficientes para la inversión en algunas tecnologías de energías renovables.

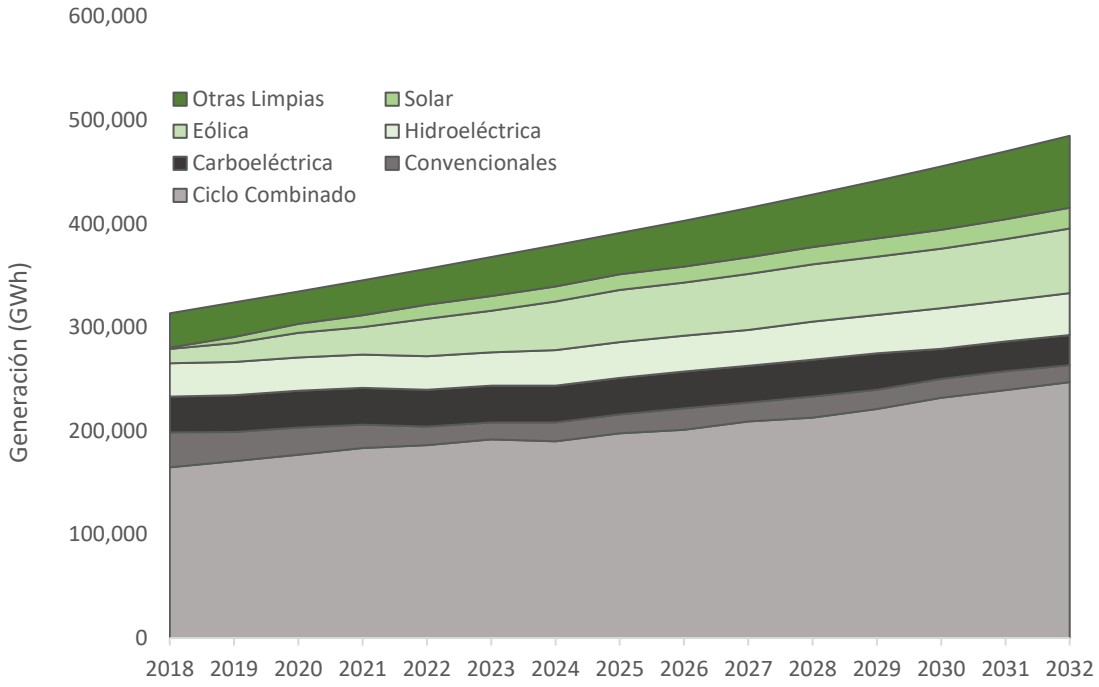
6.3.1 **Escenario No. 1: Proyección de PRODESEN 2018**

El primer escenario se considera la política energética nacional en materia de electricidad determinada durante el gobierno de Enrique Peña Nieto y contenida en el último documento del PRODESEN publicado por dicho gobierno, el PRODESEN 2018 – 2032 (PRODESEN, 2018).

En el PIIRCE de este documento se contempla un aumento del 73% en relación con la capacidad instalada reportada en diciembre del 2017 (75,685 MW), requiriéndose 66,912 MW adicionales para un total de 130,292 MW planificados para el final del período 2018 – 2032. Esto representa una inversión de 1.7 billones de pesos en estos quince años que equivalían al 7.8% del PIB de 2017. La capacidad adicional para la generación eléctrica se integraría como 45% de tecnologías convencionales y 55% de tecnologías limpias, destacándose los

proyectos de ciclo combinado (42%) y un compendio de energías limpias diversificado en proyectos eólicos, solares, nucleares y de cogeneración eficiente (49%).

A su vez, el retiro de centrales contemplado ascendía a 11,821 MW, siendo equivalente a 115 unidades generadoras evaluadas por el CENACE dadas sus pertinencias en asegurar la confiabilidad del SEN a través de varios criterios que incluyen la entrada en operación en la fecha programada de las centrales que sustituirán a las candidatas a retiro, la reducción de fallas prolongadas y la garantía del suministro de combustibles, entre otras. Estos retiros correspondían en un 62% a centrales de termoeléctricas convencionales, 14% a ciclo combinado y 12% a centrales carboeléctricas.

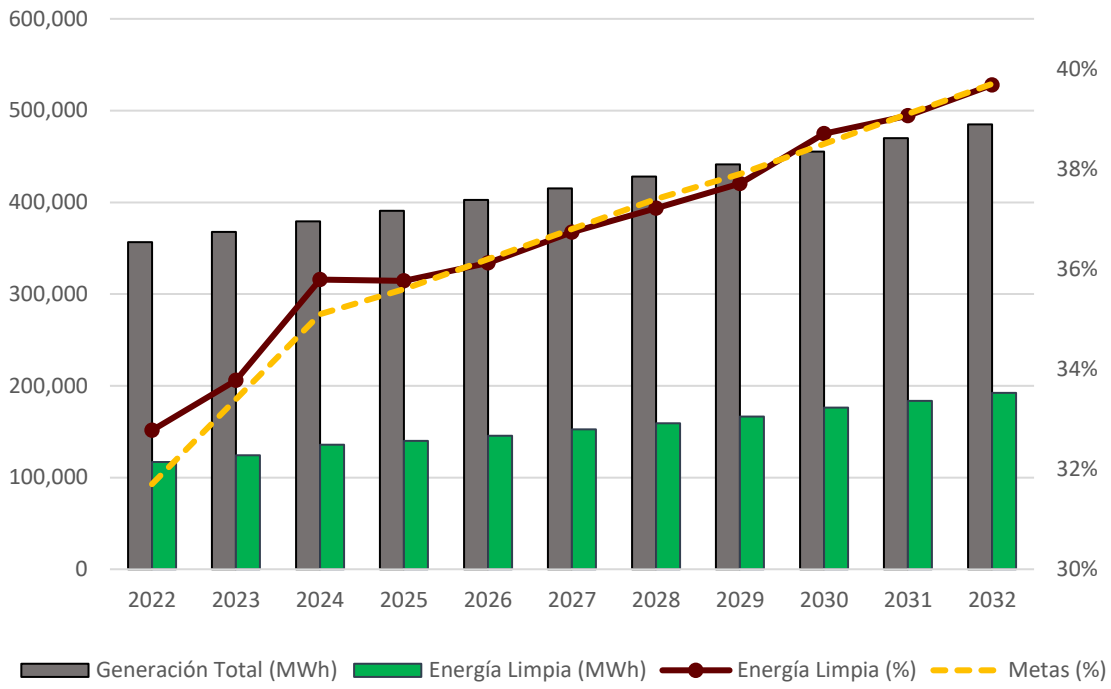


Gráfica 6.7 Generación eléctrica estimada por PRODESEN 2018 – 2032 y el PIIRCE 2018 – 2032 para las diferentes tecnologías (MWh).
Fuente: Elaboración propia con información de (PRODESEN, 2018)

Esto se traduciría en una generación eléctrica estimada para 2032 de 484,788 GWh y una matriz eléctrica que contaría con una participación en la generación

del 60% de energías convencionales y 40% de Energías Limpias, pasando por una distribución de 64% y 36% en 2024; y 61% y 39% en 2030 respectivamente, ver Gráfica 6.7. De acuerdo con el escenario de planeación, la generación de energía eléctrica crecerá a una tasa media anual de 3.1% en los próximos 15 años donde las tecnologías fósiles crecerán a un ritmo de 1.6% anual y las limpias a un 6.4% anual.

Esta programación contemplaba entonces el cumplimiento de las metas de mitigación climática correspondientes a la generación eléctrica para los años 2024 y 2030. Estas también aparecen proyectadas en (PRODESEN, 2018) y pueden visualizarse junto con su cumplimiento en la Gráfica 6.8 para el período de 2022 a 2032. De acuerdo con esta planeación el crecimiento de las energías limpias seguiría el pautado por las metas establecidas por la Ley de la Industria Eléctrica. Se sobre cumpliría el objetivo para 2024 en casi un 1% y para 2030 también, aunque en menor medida.



Gráfica 6.8 México 2022 – 2032. Generación de electricidad total y correspondiente a energías limpias (MWh) y por ciento de las metas y la planificación (%).
Fuente: Elaboración propia con información de (PRODESEN, 2018)

La matriz eléctrica evolucionaría de la forma en que se presenta la Tabla 6.6 Esta información fue obtenida directamente del documento de PRODESEN 2018 – 2032 donde se estima la generación de cada tipo de generación (solamente se agregan de acuerdo con las tecnologías consideradas en el presente análisis) a partir de las proyecciones de capacidad instalada que este mismo programa presenta en su anexo 4.5.7 (PRODESEN, 2018).

Tecnología	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Convencionales	***241,339***	***239,658***	***243,491***	***243,551***	***251,106***	***257,259***
Ciclo Combinado	183,344	186,126	191,721	189,770	197,489	201,085
Convencionales	22,545	18,082	16,320	18,252	18,167	20,724
Carboeléctrica	35,450	35,450	35,450	35,529	35,450	35,450
Limpias	***104,040***	***116,843***	***124,161***	***135,746***	***139,801***	***145,484***
Hidroeléctrica	32,334	32,334	32,334	34,433	34,565	34,565
Eólica	26,390	36,134	40,180	46,899	50,452	51,121
Solar	11,585	13,496	14,002	14,568	15,071	15,655
Otras Limpias	33,731	34,879	37,645	39,846	39,713	44,143
Generación Total	***345,379***	***356,501***	***367,652***	***379,297***	***390,907***	***402,743***

Tecnología	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Convencionales	***262,611***	***268,704***	***274,889***	***279,059***	***286,252***	***292,433***
Ciclo Combinado	209,010	212,760	221,174	231,981	239,166	246,990
Convencionales	18,151	20,415	18,265	18,232	18,240	16,518
Carboeléctrica	35,450	35,529	35,450	28,846	28,846	28,925
Limpias	***152,495***	***159,271***	***166,412***	***176,203***	***183,520***	***192,355***
Hidroeléctrica	34,705	36,685	36,918	39,246	39,253	40,563
Eólica	53,984	55,141	56,352	57,454	59,536	62,238
Solar	16,245	16,903	17,464	18,220	19,062	20,022
Otras Limpias	47,561	50,542	55,678	61,283	65,669	69,532
Generación Total	***415,106***	***427,975***	***441,301***	***455,262***	***469,772***	***484,788***

Tabla 6.6 México 2021 – 2032. Evolución de la generación eléctrica por tipo de tecnología para el Escenario No.1 (MWh).
Fuente: Elaboración propia con información de (PRODESEN, 2018).

Para el ejercicio de simulaciones, sin embargo, dado que las estimaciones de producción se ajustaron a la baja en el PRODESEN más reciente (PRODESEN, 2022), se tomaron estos nuevos montos y se distribuyeron de acuerdo con la participación de las tecnologías reportada en la Tabla 6.6, esto con el objetivo de que las comparaciones entre los escenarios sean más directas y el único elemento diferenciador sea la matriz de producción eléctrica. El ajuste en la evolución de generación se presenta en la Tabla 6.7. Esta información es la que últimamente se utilizará en el ejercicio de simulación que más adelante se explicará su metodología.

Tecnología	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Convencionales	**244,870**	**229,816**	**234,251**	**233,684**	**240,451**	**245,830**
Ciclo Combinado	186,026	178,482	184,445	182,082	189,109	192,151
Convencionales	22,875	17,339	15,701	17,513	17,396	19,803
Carboeléctrica	35,969	33,994	34,105	34,090	33,946	33,875
Limpias	**105,562**	**112,044**	**119,449**	**130,246**	**133,869**	**139,020**
Hidroeléctrica	32,807	31,006	31,107	33,038	33,098	33,029
Eólica	26,776	34,650	38,655	44,999	48,311	48,850
Solar	11,754	12,942	13,471	13,978	14,432	14,959
Otras Limpias	34,224	33,447	36,216	38,232	38,028	42,182
Generación Total	**350,432**	**341,860**	**353,700**	**363,930**	**374,320**	**384,850**

Tecnología	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Convencionales	**249,752**	**254,493**	**259,154**	**261,772**	**267,056**	**271,412**
Ciclo Combinado	198,776	201,507	208,514	217,611	223,128	229,236
Convencionales	17,262	19,335	17,219	17,103	17,017	15,331
Carboeléctrica	33,714	33,650	33,421	27,059	26,912	26,846
Limpias	**145,028**	**150,847**	**156,886**	**165,288**	**171,214**	**178,528**
Hidroeléctrica	33,006	34,745	34,805	36,815	36,621	37,647
Eólica	51,341	52,225	53,126	53,895	55,544	57,764
Solar	15,450	16,009	16,464	17,091	17,784	18,583
Otras Limpias	45,232	47,869	52,491	57,487	61,265	64,534
Generación Total	**394,780**	**405,340**	**416,040**	**427,060**	**438,270**	**449,940**

Tabla 6.7 México 2021 – 2032. Evolución de la generación eléctrica por tipo de tecnología para el Escenario No.1 con los montos de generación del PRODESEN 2022 (MWh).
Fuente: Elaboración propia con información de (PRODESEN, 2018) y (PRODESEN, 2022).

6.3.2 **Escenario No. 2: Proyección de PRODESEN 2022**

El segundo escenario corresponde a la política energética del presente gobierno, conocido como la Cuarta Transformación (4T) y administrado por Andrés Manuel López Obrador. Esta se encuentra alineada con en el PND 2019 – 2024 y se manifiesta para el caso de la industria eléctrica en los PRODESEN de los años 2019, 2020, 2021 y 2022.

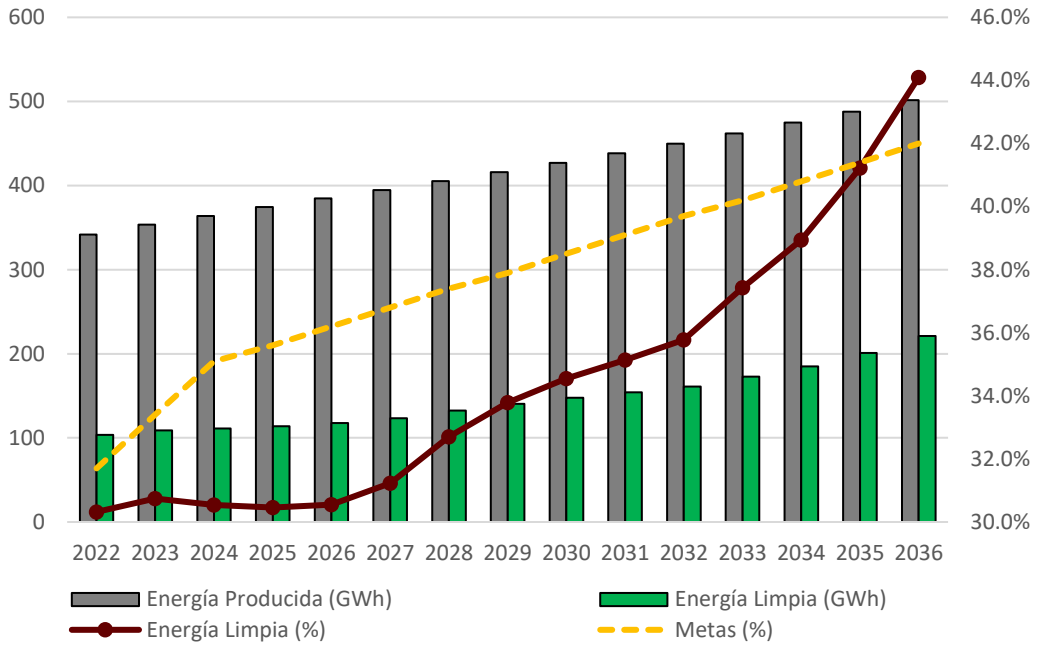
En el PIIRCE del 2019-2033 se proyectaba una capacidad instalada de 127,747 MW para el 2032, es decir, 2,545 MW (2%) menos que lo estimado por el PRODESEN 2018. Las adiciones de capacidad requeridas entre el 2019 y 2032 se contabilizan en 65,029 MW, significando aproximadamente una inversión de 1.67 billones de pesos. Los retiros programados ascienden a 1,331 MW de unidades térmicas convencionales, las cuales se planean desinstalar entre el 2021 y 2024. La generación de electricidad estimada para el 2032 era de 476,606 GWh (siendo 2% inferior a lo proyectado en el PRODESEN 2018), proviniendo el 61% de plantas convencionales y el 39% de fuentes limpias (Alonso, 2022).

Sin embargo, en el PRODESEN 2022-2036, las estimaciones tanto de producción como de participación de energías limpias se ajustaron a la baja dada la crisis mundial derivada de la pandemia por el COVID-19, la guerra de Rusia y Ucrania, el aumento de los combustibles y la desaceleración económica que conllevaron estos dos sucesos. En el presente estudio se consideró que este documento es más fiable para la construcción de los escenarios y que caracteriza de mejor manera la política del actual gobierno en materia eléctrica.

La nueva proyección de la generación de electricidad se reduce a 449,940 GWh, 5.6% y 7.2% menor en comparación con las estimaciones del PRODESEN 2019 y PRODESEN 2018 respectivamente (Alonso, 2022). También se reducen las participaciones de las energías limpias en con solo un 30.5% para 2024 y un 34.6% para 2030. Esto significa un retroceso en los objetivos que se había planteado México para dichos años. Las estimaciones para la generación eléctrica

agregada y su correspondiente parte de energías limpias se pueden observar en la Gráfica 6.9.

Está claro que para este caso las metas dispuestas en la LIE solo se alcanzarían para el año 2035 y no están programadas para cumplirse ni siquiera para el año 2032, último año del plan de PRODESEN 2018. La evolución de la generación por tipo de tecnología, tal como aparece en la Tabla 6.6 no se encuentra disponible en ninguno de los PRODESEN publicados por el gobierno en turno, solo aparecen en (PRODESEN, 2022) los montos agregados con los que se construyó la Gráfica 6.9.



Gráfica 6.9 México 2022 – 2036. Generación de electricidad total y correspondiente a energías limpias (GWh) y por ciento de las metas y la planificación (%).
Fuente: Elaboración propia con información de (PRODESEN, 2022).

Para este escenario se tuvo que estimar dicha generación. Para ello se hizo uso de las adiciones de capacidad instalada proyectadas en el PIIRCE de 2019-2033 que se muestran en la Tabla 6.8 para estimar la evolución de la generación

eléctrica por tecnología en el período 2021 – 2032. Esta información se hizo corresponder con los montos agregados de generación total y de generación por parte de energías limpias presentes en el (PRODESEN, 2022).

Tecnología	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Convencionales	***56,847***	***59,100***	***61,024***	***60,624***	***61,580***	***61,624***
Ciclo Combinado	35,060	37,557	39,882	39,882	40,838	40,838
Convencionales	16,324	16,080	15,679	15,279	15,279	15,323
Carboeléctrica	5,463	5,463	5,463	5,463	5,463	5,463
Limpias	***32,632***	***33,266***	***34,231***	***37,249***	***38,923***	***40,570***
Hidroeléctrica	12,614	12,728	12,931	13,013	13,025	13,744
Eólica	7,691	8,211	8,386	9,662	9,762	10,012
Solar	7,026	7,026	7,588	8,378	9,128	9,806
Otras Limpias	5,301	5,301	5,326	6,196	7,008	7,008

Tecnología	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Convencionales	***62,618***	***64,376***	***66,191***	***68,621***	***70,826***	***73,113***
Ciclo Combinado	41,788	43,546	45,317	47,703	49,908	52,151
Convencionales	15,367	15,367	15,411	15,455	15,455	15,499
Carboeléctrica	5,463	5,463	5,463	5,463	5,463	5,463
Limpias	***42,220***	***44,388***	***46,957***	***49,385***	***51,904***	***54,634***
Hidroeléctrica	14,598	15,310	15,461	15,461	15,461	15,461
Eólica	10,214	10,800	11,775	12,968	13,747	14,737
Solar	10,400	11,270	12,713	13,948	15,688	17,428
Otras Limpias	7,008	7,008	7,008	7,008	7,008	7,008

Tabla 6.8 México 2021 – 2032. Evolución de la capacidad instalada por tipo de tecnología de acuerdo con PRODESEN 2019 - 2033 (MWh).
Fuente: Elaboración propia con información de (PRODESEN, 2019).

La metodología de estimación consistió en tomar las proporciones resultantes de la Tabla 6.8 y multiplicarlas por los montos agregados de generación dando como resultado una proyección de la generación eléctrica por tipo de tecnología consistente con la información del (PRODESEN, 2022), respecto a generación

limpia, generación total y la evolución de estos en el tiempo. Los resultados se encuentran en la Tabla 6.9 y representa la tabla de generación final, dadas en GWh, con la que se realizarán las simulaciones del escenario 2 correspondientes a las proyecciones del PRODESEN 2022 – 2036.

Tecnología	2022	2023	2024	2025	2026
Convencionales	**238.21**	**244.96**	**252.80**	**260.30**	**267.27**
Ciclo Combinado	146.91	155.67	165.22	171.24	177.25
Convencionales	68.40	66.65	64.95	65.60	66.31
Carboeléctrica	22.89	22.64	22.63	23.46	23.71
Limpias	**103.65**	**108.74**	**111.13**	**114.02**	**117.58**
Hidroeléctrica	40.07	41.61	41.98	39.83	39.35
Eólica	24.43	26.84	27.22	29.58	29.49
Solar	22.32	22.97	24.63	25.65	27.57
Otras Limpias	16.84	17.33	17.29	18.97	21.17
Generación Total	**341.86**	**353.70**	**363.93**	**374.32**	**384.85**

Tecnología	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Convencionales	**271.50**	**272.77**	**275.48**	**279.51**	**284.26**	**288.95**
Ciclo Combinado	179.92	182.03	186.34	191.36	197.61	203.61
Convencionales	67.51	66.94	65.76	65.08	64.02	63.05
Carboeléctrica	24.07	23.80	23.38	23.07	22.63	22.29
Limpias	**123.28**	**132.57**	**140.56**	**147.55**	**154.01**	**160.99**
Hidroeléctrica	41.76	45.84	48.48	48.58	48.22	47.96
Eólica	30.42	32.07	34.20	37.00	40.44	42.64
Solar	29.80	32.66	35.69	39.95	43.50	48.66
Otras Limpias	21.30	22.00	22.19	22.02	21.85	21.74
Generación Total	**394.78**	**405.34**	**416.04**	**427.06**	**438.27**	**449.94**

Tabla 6.9 México 2022 – 2032. Evolución de la generación eléctrica por tipo de tecnología para el Escenario No.2 (GWh).
Fuente: Elaboración propia con información de (PRODESEN, 2019) y (PRODESEN, 2022).

6.3.3 **Escenario No. 3: Política de la 4T**

En el primer documento correspondiente al nuevo mandato (PRODESEN, 2019), se presentan los resultados que se han obtenido a raíz de la reforma energética en materia de electricidad. En esta sección se describen las acciones que, a juicio de la 4T, han sido equivocadas en la planeación integral del Sistema Eléctrico Nacional y que han afectado a la CFE como un competidor más en el mercado eléctrico, de forma financiera, legal y tributaria.

Estas razones son tomadas como justificación para retomar lo que se denomina en el documento como una Nueva Política Energética en Materia de Electricidad y que representa un giro significativo en la planeación del sector. El CENACE se reincorporaría a la CFE y, el Estado a través de la CFE llevaría a cabo el abastecimiento de energía eléctrica de manera exclusiva, generando por lo menos el 54% del consumo eléctrico nacional de manera permanente, quedando la participación del sector privado en la generación reducida hasta el 46% del consumo eléctrico nacional, sujeto siempre a la planeación y control del sistema eléctrico nacional de la CFE (Clavellina Miller & Perea Corona, 2022).

Tecnología	Público	%	Privado	%	Total	%
Convencionales	***46,688***	***75%***	***10,158***	***38%***	***56,846***	***64%***
Ciclo Combinado	*27,035*	43%	***8,025***	30%	35,060	39%
Convencionales	*14,190*	23%	***2,133***	8%	16,323	18%
Carboeléctrica	*5,463*	9%	***0***	0%	5,463	6%
Limpias	***15,756***	***25%***	***16,877***	***62%***	***32,633***	***36%***
Hidroeléctrica	*12,125*	19%	***489***	2%	12,614	14%
Eólica	*699*	1%	***6,993***	26%	7,692	9%
Solar	*6*	0.01%	***7,020***	26%	7,026	8%
Otras Limpias	*2,926*	5%	***2,375***	9%	5,301	6%
Capacidad Total	***62,444***	***69.8%****	***27,035***	***30.2%****	***89,479***	***100%***

Tabla 6.10 México: Capacidad instalada al 30 de abril de 2021 por tipo de permisionario (MW y %).
*Participación del permisionario en la capacidad total.
Fuente: Elaboración propia con información de (PRODESEN, 2019)

Esta medida es clave en la conformación del sector eléctrico en los años venideros. La repartición de cuanto generará cada sector, público y privado, incide directamente en la conformación del Sistema Nacional Eléctrico mexicano, ya que el tipo de tecnología para la generación eléctrica difiere entre uno y otro. Reducir al 46% la generación privada implica que muchos de los proyectos renovables y de energías limpias que provienen de empresas extranjeras en su mayoría con una tecnología no al alcance del gobierno federal, se vean desincentivados y esto impactaría fuertemente sobre la estructura de la matriz eléctrica.

Precisamente este escenario es el que se pretende modelar en la presente sección. Para ello se incluyen en la estimación de la matriz eléctrica el hecho de que CFE garantice el 54% de la energía producida y el resto quede a privados. Se utilizan entonces los datos de capacidad instalada del Escenario No.2, ver Tabla 6.8, y se hace distinción de la capacidad instalada por tipo de permisionario: público o CFE y privado. Se estimó su capacidad para el 2022-2032 aplicando las tasas de crecimiento anuales obtenidas por tipo de tecnología para el 30 de abril de 2021, a falta de información disponible se aplicaron las mismas tasas para ambos permisionarios. Estas se pueden visualizar en la Tabla 6.10.

Se puede observar que, durante el 2021, casi el 70% de la capacidad instalada perteneció al sector público y el 30% restante a los particulares, y las matrices eléctricas son diferentes para cada tipo de permisionario. A nivel nacional, siguen dominando las tecnologías convencionales al concentrar 2/3 de la capacidad total registrada, sin embargo, en los privados predominan más las tecnologías limpias con una repartición de 38 y 62 por ciento en limpias y convencionales respectivamente. Esto permeará la matriz final una vez se tomen en cuenta para las proyecciones y por tanto tendrán un efecto decisivo en el alcance de las metas planteadas en la LIE.

Una vez proyectada la capacidad instalada pública y privada para el periodo analizado se procedió a calcular a partir de estos datos la generación de energía eléctrica por tipo de tecnología. Los datos y la información que aquí se replican a

continuación pertenecen a un estudio que antecede a este y fueron tomados directamente de (Alonso, 2022).

Tecnología	Valor medio (%)
Ciclo Combinado	78
Combustión interna	70
Turbogás	53
Termoeléctrica Convencional	60
Lecho Fluidizado	85
Carboeléctrica	80
Geotermoeléctrica	80
Nucleoeléctrica	90
Hidroeléctrica*	40
Eólica*	27
Solar*	16
Bioenergía*	21
Cogeneración Eficiente*	55

Tabla 6.11 México: Factor de planta promedio por tipo de tecnología.
*No se encontró disponible el valor medio y en su lugar se tomó el factor de planta registrado para el 2017.
Nota: para Otras Convencionales y Otras Limpias se calculó el promedio de las centrales englobadas en dichas categorías.
Fuente: Elaboración propia con información de (PRODESEN, 2018)

Se puede obtener la generación multiplicando el factor de planta de una central por la generación máxima. El factor de planta expresa en términos porcentuales la relación entre la energía eléctrica producida por una unidad generadora y la energía posible de producir por la misma al operar a su potencia máxima durante un periodo determinado (PRODESEN, 2018). Los factores de planta utilizados son los mostrados en la Tabla 6.11 y obtenidos del mismo PRODESEN 2018.

Por su parte, la generación máxima es el producto entre la capacidad instalada y el número máximo de horas que podría operar una central, es decir, 365 días por 24 horas al día. Utilizando las siguientes fórmulas se calcula entonces la generación estimada por tipo de tecnología y por tipo de permisionario:

$$Generación\ máxima = Capacidad\ Instalada * 8{,}760$$

$$Generación\ estimada = Factor\ de\ planta * Generación\ máxima$$

Tecnología	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Convencionales	***256,284***	***267,978***	***275,778***	***277,309***	***282,742***	***289,652***
Ciclo Combinado	188,232	186,000	202,412	204,081	209,106	216,762
Convencionales	47,233	51,676	50,093	49,286	49,545	49,571
Carboeléctrica	20,819	30,302	23,274	23,942	24,091	23,319
Limpias	***94,148***	***73,882***	***77,922***	***86,621***	***91,578***	***95,198***
Hidroeléctrica	33,137	28,584	29,174	30,132	30,420	32,063
Eólica	19,490	18,882	21,208	24,882	24,990	25,617
Solar	18,824	9,355	10,460	11,918	13,508	14,948
Otras Limpias	22,697	17,061	17,079	19,690	22,661	22,570
Generación Total	***350,432***	***341,860***	***353,700***	***363,930***	***374,320***	***384,850***

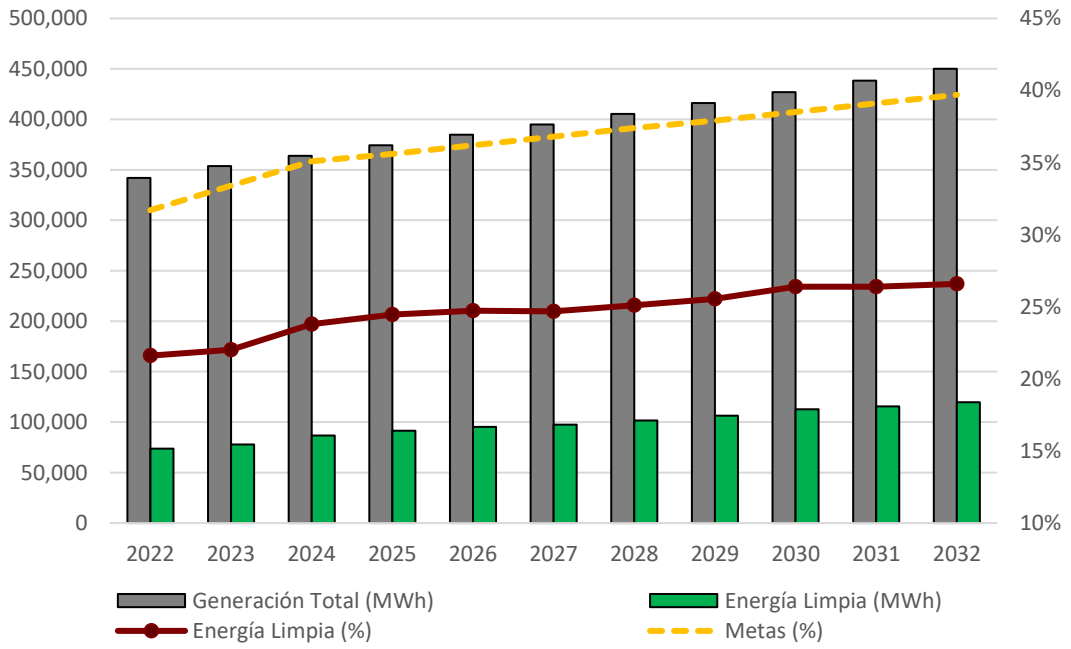
Tecnología	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Convencionales	**297,316**	**303,591**	**309,716**	**314,345**	**322,567**	**330,318**
Ciclo Combinado	226,341	233,625	240,139	250,550	259,181	267,182
Convencionales	48,896	48,588	48,405	49,295	48,910	48,602
Carboeléctrica	22,079	21,379	21,171	14,500	14,476	14,534
Limpias	**97,464**	**101,749**	**106,324**	**112,715**	**115,703**	**119,622**
Hidroeléctrica	33,546	35,073	35,387	35,674	35,538	35,391
Eólica	25,768	27,150	29,280	32,060	33,621	35,470
Solar	15,963	17,581	20,117	23,638	25,515	28,134
Otras Limpias	22,187	21,944	21,541	21,342	21,028	20,628
Generación Total	**394,780**	**405,340**	**416,040**	**427,060**	**438,270**	**449,940**

Tabla 6.12 México 2021 – 2032. Evolución de la generación eléctrica por tipo de tecnología para el Escenario No.3 (MWh).
Fuente: Elaboración propia con información de (PRODESEN, 2019) y (PRODESEN, 2022).

Para considerar las modificaciones al sector planteadas en la iniciativa del gobierno actual, se simuló el escenario donde la CFE produce por lo menos el

54% de la electricidad y el sector privado el 46% restante. Por tanto, para conformar la generación total, se tomó el 54% usando la matriz de generación proyectada para la paraestatal y el 46% con la estructura de los particulares. De esta forma queda planteada la evolución de la matriz eléctrica proyectada en MWh para el período 2021 – 2032 en la Tabla 6.12 México 2021 – 2032. Evolución de la generación eléctrica por tipo de tecnología para el Escenario No.3 (MWh). Fuente: Elaboración propia con información de y .Tabla 6.12.

Con esta nueva estimación las metas de energías limpias quedan significativamente rezagadas. De mantener la matriz eléctrica de CFE que ha tenido hasta ahora y además llevar a cabo la medida que restringe a los privados, la proporción de electricidad generada a partir de tecnologías limpias no llegará ni siquiera al 30% para el final del período estudiado.



Gráfica 6.10 México 2022 – 2036. Generación de electricidad total y correspondiente a energías limpias (MWh) y por ciento de las metas y la planificación (%).
Fuente: Elaboración propia con información de (PRODESEN, 2019) y (PRODESEN, 2022)

En busca de cumplir con los objetivos del Acuerdo de Paris ratificados en la Ley de Industria Eléctrica el gobierno debe acudir a una de dos alternativas, cambiar

su plan de inversiones hacia proyectos más amigables con el medio ambiente (alternativa que se muestra complicada debido a los recursos y la tecnología disponible por CFE) o permitir la entrada de capital privado que permita un desarrollo del sistema de generación más limpio.

6.4 Alcances de los planes de política energética.

Con la información obtenida en la sección anterior podemos comparar las matrices eléctricas de cada escenario para los años 2024 y 2030 con la correspondiente al año base 2018. Esta última puede ser encontrada en (PRODESEN, 2019) y se muestra en la Tabla 6.13 junto con las correspondientes a los años 2024 y 2030 de cada escenario. Además, se incluye la matriz eléctrica correspondiente al capítulo anterior ($\boldsymbol{Z_3}$) donde las tecnologías más contaminantes fueron completamente sustituidas por la eólica y la solar, y que llamaremos escenario Ideal. Como se puede ver los montos agregados de generación coinciden para cada año proyectado, debido a la forma en la que se construyeron los escenarios. Estos difieren solamente en la composición de la generación por tipo de tecnología.

	Base	**Ideal**	**Escenario No.1**		**Escenario No.2**		**Escenario No.3**	
Tecnología			**2024**	**2030**	**2024**	**2030**	**2024**	**2030**
Convencionales	**245,386**	**160,672**	**233,684**	**261,772**	**252,800**	**279,510**	**277,309**	**314,345**
Ciclo Combinado	160,672	160,672	182,082	217,611	165,216	191,364	204,081	250,550
Carboeléctrica	27,344	-	17,513	17,103	64,952	65,077	49,286	49,295
Termo Convencional	57,368	-	34,090	27,059	22,631	23,069	23,942	14,500
Limpias	**65,112**	**73,538**	**130,246**	**165,288**	**111,130**	**147,550**	**86,621**	**112,715**
Hidroeléctrica	32,205	32,205	33,038	36,815	41,980	48,582	30,132	35,674
Solar	2,174	60,667	44,999	53,895	27,225	37,000	24,882	32,060
Eólica	12,432	38,653	13,978	17,091	24,634	39,947	11,918	23,638
Otras Limpias	18,298	18,298	38,232	57,487	17,291	22,021	19,690	21,342
Generación Total	**310,498**	**310,498**	**363,930**	**427,060**	**363,930**	**427,060**	**363,930**	**427,060**

Tabla 6.13 México: Generación eléctrica por tipo de tecnología para 2018 y sus proyecciones para 2024 y 2030 en cada escenario (GWh).

Fuente Elaboración propia con información de MCS 2018, (PRODESEN, 2018), (PRODESEN, 2019) y (PRODESEN, 2022).

Lo que más interesa entonces no son los montos absolutos de generación eléctrica dada en MWh, sino la estructura de estos en términos porcentuales, es decir, la matriz eléctrica. En la Tabla 6.14 aparecen las matrices eléctricas para el año base, ideal y para cada uno de los escenarios en los años 2024 y 2030. Se puede observar cómo difieren en sus estructuras de un año a otro y para los distintos escenarios. Con esta información se puede comenzar a construir la simulación usando la matriz de contabilidad social.

	Base	**Ideal**	**Escenario No.1**		**Escenario No.2**		**Escenario No.3**	
Tecnología			**2024**	**2030**	**2024**	**2030**	**2024**	**2030**
Convencionales	***76.8%***	***51.7%***	***64.2%***	***61.3%***	***69.5%***	***65.4%***	***76.2%***	***73.6%***
Ciclo Combinado	51.7%	51.7%	50.0%	51.0%	45.4%	44.8%	56.1%	58.7%
Carboeléctrica	8.8%	0%	4.8%	4.0%	17.8%	15.2%	13.5%	11.5%
Termo Convencional	18.5%	0%	9.4%	6.3%	6.2%	5.4%	6.6%	3.4%
Limpias	***23.2%***	***48.4%***	***35.8%***	***38.7%***	***30.5%***	***34.6%***	***23.8%***	***26.4%***
Hidroeléctrica	10.4%	10.4%	9.1%	8.6%	11.5%	11.4%	8.3%	8.4%
Solar	0.7%	19.5%	12.4%	12.6%	7.5%	8.7%	6.8%	7.5%
Eólica	4.0%	12.4%	3.8%	4.0%	6.8%	9.4%	3.3%	5.5%
Otras Limpias	5.9%	5.9%	10.5%	13.5%	4.8%	5.2%	5.4%	5.0%

Tabla 6.14 México: Matrices de generación eléctrica para 2018 y sus proyecciones para 2024 y 2030 en cada escenario.
Fuente Elaboración propia con información de MCS 2018, (PRODESEN, 2018), (PRODESEN, 2019) y (PRODESEN, 2022).

A la hora de traducir la estructura de la matriz de generación eléctrica hacia la estructura del sector eléctrico, se comienza utilizando el total de Producción Bruta Total (PBT) del sector eléctrico en el escenario base como punto de referencia. Este valor actúa como el punto de partida para los cálculos subsecuentes distribuyéndose entre las diferentes tecnologías de generación según la estructura

porcentual de la matriz eléctrica del escenario base. La fórmula utilizada para este cálculo sería:

$$\boldsymbol{PBT_{tecnología}} = \boldsymbol{PBT_{Total}} * \%_{\boldsymbol{tecnología}}$$

De esta manera, se asigna una porción del PBT total a cada tecnología, como hidroeléctrica, térmica, eólica, ciclo combinado, etc. de acuerdo con su participación relativa en la matriz eléctrica de cada uno de los escenarios.

Para el próximo paso se establece un supuesto fundamental para esta metodología que implícitamente ha sido usado hasta ahora. Se asume que los coeficientes técnicos de cada tecnología de generación no se modifican entre los diferentes escenarios. Es decir, la eficiencia y la estructura productiva en que cada tecnología utiliza los insumos para generar electricidad permanecen constantes. A partir de esta premisa, se procede a calcular los valores absolutos de estas estructuras, multiplicando el PBT asignado a cada una de ellas por sus respectivos coeficientes técnicos.

Una vez obtenida la estructura en términos monetarios de cada tecnología, se agregan para determinar la estructura de producción del sector eléctrico, ahora de forma agregada en cada escenario. Este proceso permite obtener variaciones en la estructura agregada del sector eléctrico en función de las diferentes proporciones de participación de cada tecnología en la generación total. Aunque cada tecnología mantiene su forma de producción, su participación relativa en la matriz eléctrica cambia, lo que da lugar a una estructura de producción agregada única para cada escenario. Significa entonces que, dividiendo nuevamente entre el PBT del sector, tenemos para cada escenario una estructura de coeficientes técnicos del sector eléctrico diferente, y por tanto un impacto global diferente.

El último paso consiste en obtener la matriz de contabilidad social para cada escenario. Para ello, aplicamos el mismo procedimiento utilizado en el capítulo anterior para construir el escenario $\boldsymbol{Z_2}$, pero esta vez de manera agregada para el sector eléctrico. El procedimiento detallado en el capítulo anterior se puede resumir de la siguiente manera:

Primero, sustituimos en la matriz A del escenario base, la estructura de los coeficientes técnicos del sector eléctrico correspondiente a un escenario en particular. Luego, calculamos el modelo de Leontief correspondiente. Utilizamos este y la demanda final original para resolver el modelo y obtener el PBT correspondiente a ese escenario. Una vez obtenido el PBT, lo multiplicamos por las columnas de la matriz A. Así, obtenemos la matriz de contabilidad social correspondiente al escenario elegido. Este enfoque nos permite adaptar la matriz de contabilidad social a diferentes escenarios, reflejando las variaciones en la estructura de producción del sector eléctrico y proporcionando una herramienta útil para el posterior análisis de emisiones.

6.4.1 **Vector de emisiones inicial de cada escenario**

Tal y como se explicó en la metodología del presente capitulo, el cálculo del vector de emisiones se realiza acorde a la nueva estructura de consumo del sector eléctrico en cada escenario, particularmente el consumo sobre los sectores de electricidad y derivados del petróleo y el carbón. El vector de la Tabla 6.2 entonces, se modifica para el resto de los escenarios tal y como se muestra en la Tabla 6.15.

Adoptando el supuesto de que las emisiones son proporcionales al PBT de cada sector obtenemos las emisiones para el resto de los sectores. Con los nuevos PBT calculados para generar cada una de las matrices de contabilidad social, se calcula la razón de estos con los del escenario base y el resultado se multiplica por el vector de emisiones base.

La mayoría de los sectores no se ven afectados en demasía, sin embargo, para los sectores de minería de carbón mineral y de derivados del petróleo si ocurren cambios más significativos, para estos se muestra la variación en la Tabla 6.16. De esta forma quedan definidos todos los vectores de emisiones iniciales de las actividades productivas para cada escenario.

Tecnología	Ideal	Escenario No.1		Escenario No.2		Escenario No.3	
		2024	2030	2024	2030	2024	2030
Convencionales	***37,825,470***	***68,215,949***	***59,105,264***	***65,113,320***	***60,329,990***	***70,892,370***	***61,749,629***
Ciclo Combinado	37,825,470	36,581,692	37,313,326	33,216,176	32,777,196	41,044,659	42,946,907
Carboeléctrica	-	3,618,520	3,015,434	13,418,679	11,458,647	10,177,088	8,669,371
Termo Convencional	-	28,015,736	18,776,504	18,478,464	16,094,146	19,670,623	10,133,351
Limpias	***1,526,721***	***1,154,087***	***1,227,838***	***1,066,238***	***1,182,788***	***811,912***	***889,822***
Hidroeléctrica	478,923	419,057	396,032	529,578	524,973	382,217	386,822
Solar	504,077	320,541	325,711	193,876	224,896	175,781	193,876
Eólica	375,474	115,065	121,121	205,905	284,633	99,925	166,541
Otras Limpias	168,248	299,424	384,973	136,879	148,286	153,989	142,583
Total Sector Eléctrico	**40,433,215**	**70,451,060**	**61,414,125**	**67,260,582**	**62,593,802**	**72,785,306**	**63,720,475**

Tabla 6.15 México: Vectores de emisiones en toneladas de CO_2e por tipo de tecnología de generación eléctrica para el escenario ideal y las proyecciones de 2024 y 2030.
Fuente Elaboración propia con información (Maldonado Cruz, 2022).

Para el caso de los hogares, se aplica el mismo supuesto mencionado anteriormente. Aunque la variación entre escenarios no es muy significativa, los resultados se presentan en la Tabla 6.17. Sustituyendo cada uno de estos vectores en el vector inicial de emisiones del modelo, obtenemos la variación entre modelos no solamente del producto bruto total resultante del cambio de paradigma de generación eléctrica, sino las emisiones asociadas a dicho cambio.

Escenario		Sector	
		2121 Minería de carbón mineral	324-326 Derivados del petróleo y del carbón; industrias químicas, del plástico y del hule
	Base	493,367	27,230,014
	Ideal	302,460	26,531,944
Escenario 1	2024	401,002	26,830,541
	2030	382,805	26,723,763
Escenario 2	2024	653,332	26,685,916
	2030	599,083	26,646,224
Escenario 3	2024	572,384	26,799,611
	2030	528,064	26,700,807

Tabla 6.16 México: Variación de las emisiones en toneladas de CO_2e para cada escenario de los sectores más afectados.
Fuente Elaboración propia con información (Maldonado Cruz, 2022).

Con esta información, se dispone de todos los datos necesarios para calcular cada modelo con su correspondiente vector de emisiones en cada uno de los escenarios propuestos. De esta manera, estamos preparados para pasar a los resultados que se detallan en la próxima sección.

	Ideal	Escenario No.1		Escenario No.2		Escenario No.3	
Tecnología		**2024**	**2030**	**2024**	**2030**	**2024**	**2030**
Decil 1	1,419,308	1,420,926	1,421,350	1,421,192	1,421,431	1,420,805	1,421,241
Decil 2	1,899,002	1,901,160	1,901,728	1,901,517	1,901,836	1,900,998	1,901,582
Decil 3	2,218,368	2,220,884	2,221,547	2,221,300	2,221,673	2,220,695	2,221,376
Decil 4	2,553,694	2,556,585	2,557,347	2,557,063	2,557,492	2,556,367	2,557,151
Decil 5	2,874,635	2,877,887	2,878,745	2,878,425	2,878,909	2,877,642	2,878,524
Decil 6	3,252,086	3,255,762	3,256,733	3,256,371	3,256,918	3,255,485	3,256,483
Decil 7	3,598,795	3,602,857	3,603,930	3,603,529	3,604,134	3,602,550	3,603,653
Decil 8	3,918,930	3,923,358	3,924,527	3,924,091	3,924,750	3,923,023	3,924,226
Decil 9	4,621,753	4,626,960	4,628,337	4,627,823	4,628,599	4,626,566	4,627,982
Decil 10	5,969,315	5,976,092	5,977,877	5,977,212	5,978,218	5,975,582	5,977,417

Tabla 6.17 México: Vectores de emisiones en toneladas de CO_2e de los hogares para el escenario ideal y las proyecciones para 2024 y 2030.
Fuente Elaboración propia con información (Maldonado Cruz, 2022).

6.4.2 **Resultados del modelo para cada escenario**

En esta sección, se procederá a analizar los escenarios alternativos de cada política energética en comparación con el escenario base. Además, se incluirá el escenario ideal elaborado en el capítulo 5, con el fin de comparar el alcance de cada uno de los escenarios derivados de las políticas discutidas en la sección 6.3. Para una adecuada comprensión del análisis y las conclusiones presentadas, es esencial explicar en detalle en qué consisten las simulaciones, con especial énfasis en su interpretación.

Cada una de las matrices construidas como consecuencia de la matriz eléctrica correspondiente, representa un escenario alternativo al escenario basado en los

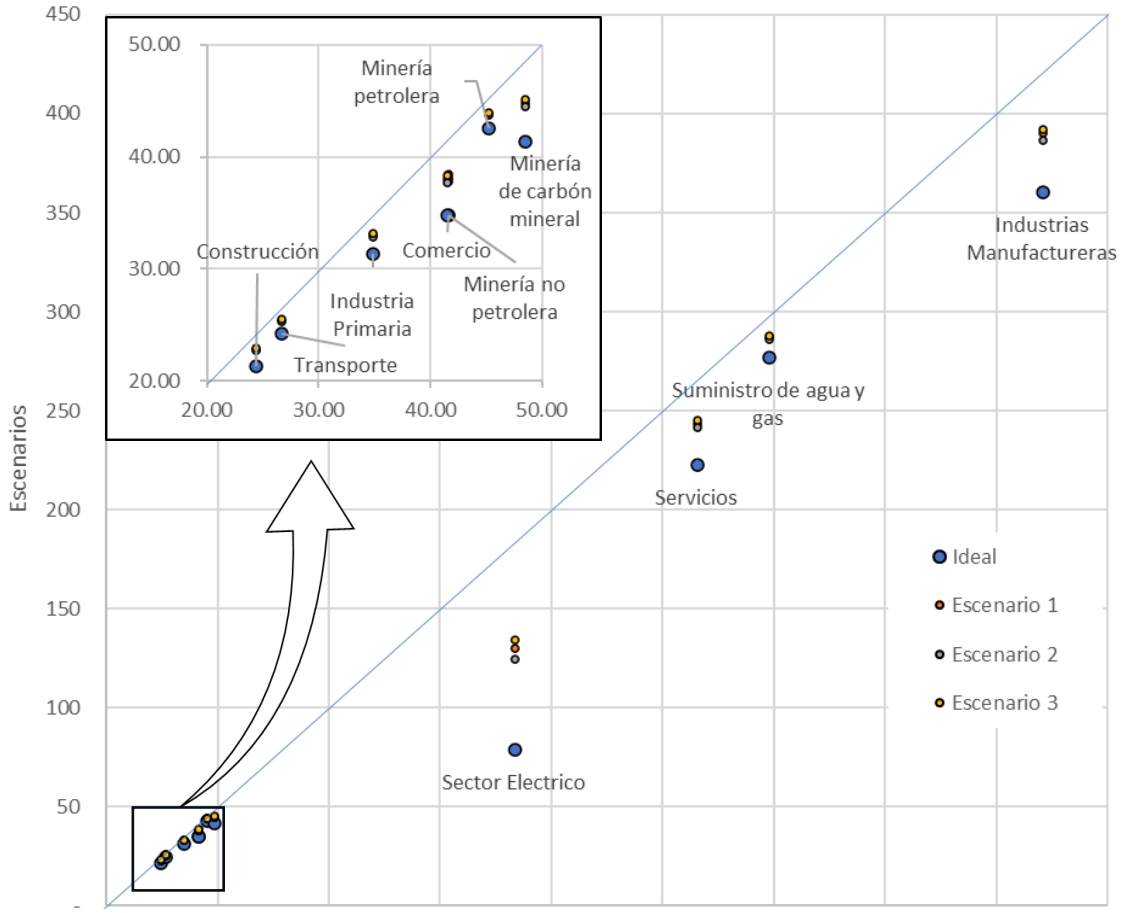
datos actuales disponibles. En cada caso, solo se ha modificado la estructura de producción del sector eléctrico agregado. Así, cada alternativa refleja la economía actual, pero con una diferente forma de producción eléctrica. Esta simple simulación trae consecuencias que sobrepasan al sector eléctrico, ya que al cambiar su modo de producción varían sus gastos sobre otros sectores y estos a su vez deben adaptarse a las nuevas condiciones de demanda. Todo esto queda implícito al resolver los modelos, tal como se explicó en la sección 6.4.1 y, por tanto, las matrices construidas ya incluyen todas estas consecuencias.

La simulación de emisiones de CO_2e hacia los años 2024 y 2030, no constituyen proyecciones en el sentido comúnmente entendido en diversas áreas del conocimiento. El actual estudio no proyecta las emisiones para estos años, ya que para esto sería necesario proyectar la demanda eléctrica futura, su consecuente capacidad de producción en cada tecnología, el crecimiento de la economía y los posibles cambios sobre la matriz de contabilidad social.

Si bien realizar tales proyecciones ofrecería resultados más certeros y útiles para la toma de decisiones en materia de generación eléctrica, y sin duda alguna recomendamos llevar a cabo estos estudios, no es el objetivo de esta investigación. La simulación que se lleva a cabo en este estudio se centra en cómo se comportarían las emisiones de CO_2e en una economía como la actual, pero con la alternativa de producir la electricidad mediante una mezcla diferente de tecnologías.

Aunque esta simulación no es óptima en términos de la precisión y la dependencia de algunos supuestos (mayormente como consecuencia de la disponibilidad de datos), sus resultados no son, en nuestra opinión, descartables ni mucho menos. Por el contrario, los resultados derivados de esta pueden dar información relevante para entender las causas de las emisiones de gases contaminantes y servir como guía para la toma de decisiones en este sentido.

Pasemos ahora a cuáles son los resultados de los esfuerzos y planes de cada administración hacia la transición eléctrica. La Gráfica 6.11 muestra la relación de cada uno de los escenarios con respecto al escenario base y también con respecto al escenario ideal. De esta forma se puede visualizar cual sería el alcance en cada sector de cada una de las políticas eléctricas representadas en los escenarios 1, 2 y 3.



Gráfica 6.11 México: Comparación entre los escenarios alternativos y el escenario base para el año 2024.

*Nota: La coordenada X representa las emisiones por millón de pesos en el sector para el escenario base y la coordenada Y para el resto de los escenarios.

Fuente: Elaboración propia con información de la MCS 2018 y (Maldonado Cruz, 2022).

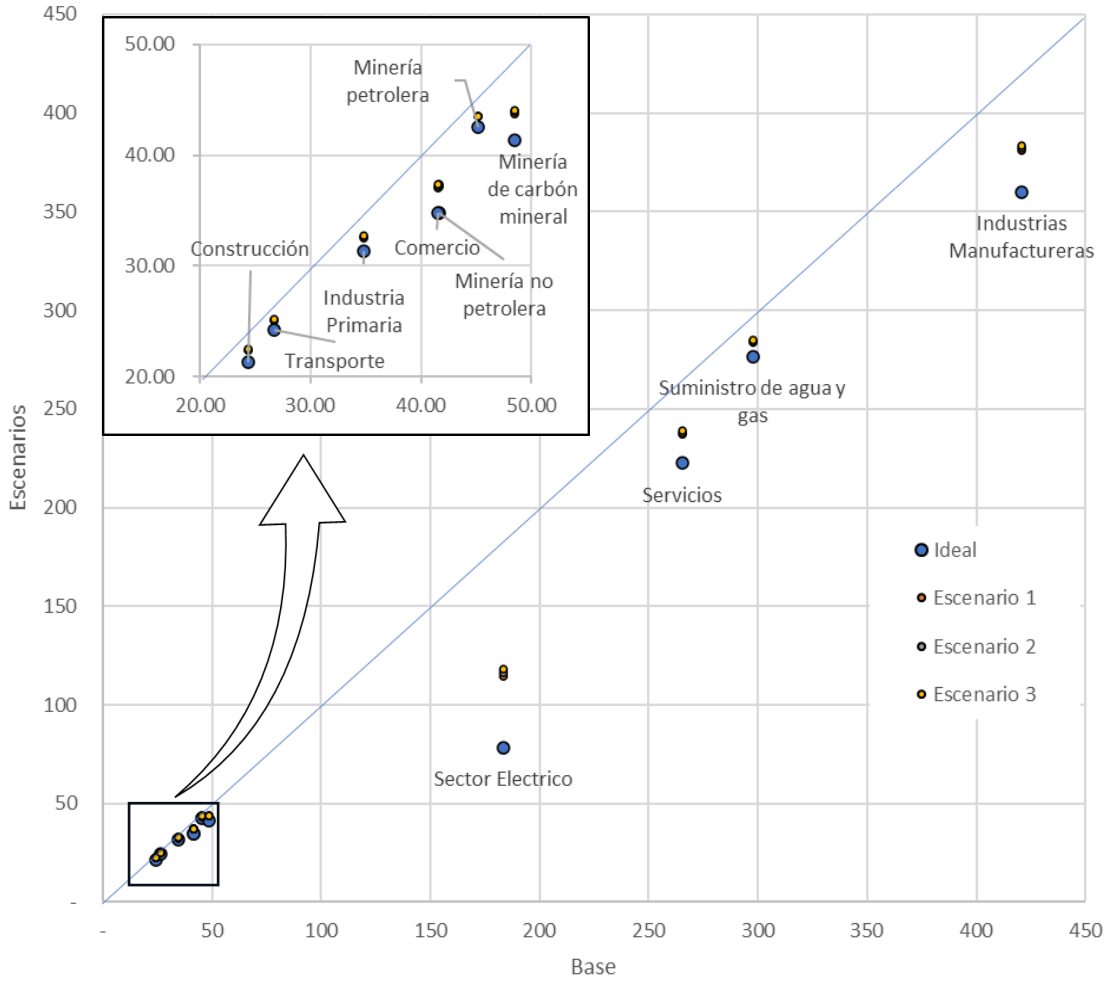
El primer escenario corresponde a la política de la administración gubernamental de 2012 a 2018. En las matrices eléctricas de la Tabla 6.14 se puede apreciar que esta política apuesta para el año 2024, por la reducción drástica de las

carboeléctricas y las termoeléctricas convencionales recortando a la mitad su participación, mientras que mantiene el ciclo combinado y aumenta las tecnologías limpias como la eólica y la solar, particularmente esta última como la segunda con mayor participación en la matriz eléctrica. Bajo esta opción se alcanza el 51.09% de la reducción alcanzada para el escenario ideal, destacándose la reducción en el sector eléctrico de 53.60 toneladas de CO_2e por millón de pesos y las industrias manufactureras con 31.10.

La planificación de la actual administración mantiene otra alternativa de transición reflejada en el escenario 2. En esta se disminuyen las tecnologías de ciclo combinado y termoeléctricas convencionales, pero se aumenta la participación de carboeléctricas significativamente. También incluye el aumento de las tecnologías limpias, de manera menos marcada en el caso de la solar comparado con el escenario 1 y más para el caso de la eólica. Los resultados para el año 2024 son superiores que el escenario 1, alcanzando un 56.15% del objetivo ideal, logrando 15.58 toneladas más de reducción para el sector eléctrico y 9.04 toneladas para el aglomerado manufacturero.

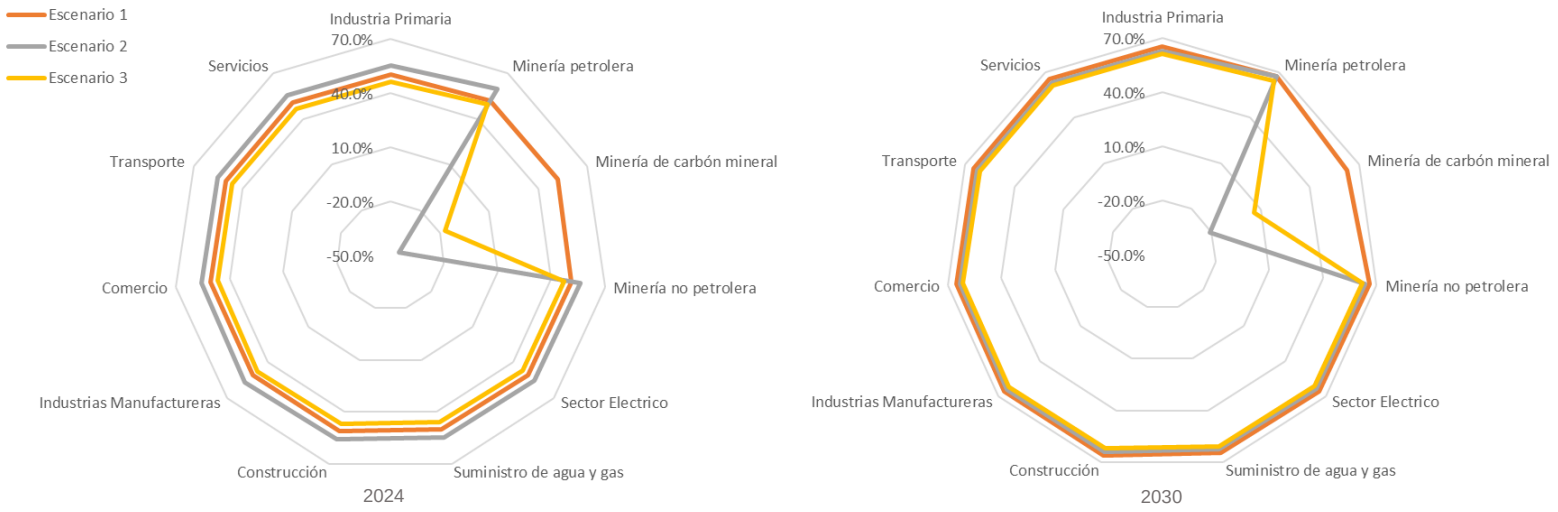
Por último, consideramos la planificación más probable de la actual administración dadas las capacidades del gobierno para realizar la transición. En este caso la planificación cambia debido a las restricciones con las que debe operar el sistema de generación eléctrica (54% estatal, 46% privado), para ello aumentan las centrales de ciclo combinado y las carboeléctricas, mientras que la apuesta de la transición pasaría por las termoeléctricas convencionales. Para el caso de las limpias se aumenta la tecnología solar, pero disminuye la eólica.

Bajo esta alternativa los resultados son mucho menos efectivos, por debajo con un 47.15% de alcanzar los resultados equivalentes a sustituir completamente las tecnologías más contaminantes por las más limpias. El sector eléctrico contamina 4.14 y 9.45 toneladas más que en los escenarios 1 y 2 respectivamente, por millón de pesos. Para el caso de la industria manufacturera se emitirían de más 2.40 y 5.48 toneladas de CO_2e.



Gráfica 6.12 México: Comparación entre los escenarios alternativos y el escenario base para el año 2030.
*Nota: La coordenada X representa las emisiones por millón de pesos en el sector para el escenario base y la coordenada Y para el resto de los escenarios.
Fuente: Elaboración propia con información de la MCS 2018 y (Maldonado Cruz, 2022).

En la Gráfica 6.12 se muestran los resultados para el año 2030. Para este año el escenario 3 se mantiene rezagado con un 62.07% del escenario ideal, mientras que los escenarios 2 y 1 alcanzan 63.85% y 65.95% respectivamente, siendo este último el de mejores resultados para este año. Para 2030 los alcances de los escenarios son similares pero la forma en que llegan a este es diferente. El escenario 3 es el que más avanza en el periodo 2024 – 2030 con 14.92% de más, seguido por el escenario 1 (14.85%) y terminando con un muy bajo avance del escenario 2 de 7.70%.



Gráfica 6.13 México, 2024 y 2030: Alcance hacia el escenario ideal de emisiones en términos porcentuales de cada sector productivo, teniendo en cuenta el tamaño relativo del sector.
Fuente: Elaboración propia con información de la MCS 2018 y (Maldonado Cruz, 2022).

Cuando se incluye el tamaño de los sectores en la contabilidad de las emisiones se obtienen efectos diferenciados para cada actividad productiva podemos visualizar el avance de cada sector en alcanzar el objetivo. Como se puede observar para el año 2024 el escenario 2 es el que alcanza una mayor reducción de emisiones relativas, para casi todos los sectores destacándose el de minería petrolera.

Sin embargo, tanto este como el escenario 3 retrasan significativamente el avance hacia la reducción de emisiones en el sector de minería de carbón mineral, mientras que el escenario 1 avanza bien en este sentido. Esto se debe principalmente a la apuesta de los planes de la actual administración hacia las carboeléctricas.

Para el año 2030 el escenario 1 predomina frente a las otras alternativas, excepto para la minería petrolera, donde se mantiene el escenario 2 como el de mayor reducción para este sector. También se mantienen los retrasos en cuanto a la minería carbonífera, aunque en menor medida. En ambos casos el escenario 3 se mantiene como el escenario que menos alcanza los objetivos de reducción de

emisiones del escenario ideal, mucho más pronunciado en el corto plazo y un poco más cercano al resto de alternativas para el año 2030.

La comparación entre los escenarios revela cómo diferentes enfoques y combinaciones de tecnologías pueden tener impactos variados en la mitigación de emisiones de CO2e. Los resultados demuestran la eficiencia a largo de las políticas que promueven energías limpias (escenario 1) en la reducción de emisiones. La comparación de los resultados entre 2024 y 2030 ofrece una perspectiva a largo plazo, mostrando cómo las políticas iniciales pueden tener un impacto sostenido. Es interesante observar que, aunque todos los escenarios mejoran con el tiempo, las políticas más agresivas (escenario 1) continúan siendo más efectivas.

La diversificación tecnológica, como se observa en el escenario 2, muestra que es posible lograr reducciones significativas de emisiones mediante una combinación optimizada de tecnologías, incluso cuando se incluyen algunas más contaminantes como las carboeléctricas. Esto sugiere que la flexibilidad en la planificación energética puede ser beneficiosa para alcanzar objetivos a corto plazo.

Por otra parte, el escenario 3 pone de relieve las limitaciones y desafíos que enfrentan las políticas energéticas debido a restricciones operativas y estructurales. La menor efectividad de este escenario indica la necesidad de abordar y superar estas barreras para mejorar los resultados de reducción de emisiones. El problema ambiental requiere de una voluntad política activa para encontrar soluciones que se han perdido en el cambio administrativo de la política energética.

6.5 Comentarios finales del capítulo

En conclusión, el análisis de los escenarios alternativos de políticas energéticas revela que la promoción de tecnologías limpias y una planificación estratégica diversificada son esenciales para lograr reducciones significativas de

emisiones de CO_2e. Además, la evolución temporal de las emisiones muestra que las políticas más ambiciosas y bien estructuradas tienen un impacto sostenido y positivo a largo plazo. Finalmente, la comprensión de las interrelaciones entre sectores es crucial para diseñar enfoques integrales que no solo reduzcan las emisiones directas, sino que también optimicen las emisiones indirectas, contribuyendo así a una economía más sostenible y resiliente. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para la toma de decisiones informadas y la formulación de políticas públicas efectivas en el ámbito de la energía y el medio ambiente.

Si no fuera suficiente con los argumentos económicos descritos en el capítulo anterior a favor de la transición energética, el presente capitulo agrega más razones para llevar a cabo un proceso que tendrá como resultados un impacto medioambiental positivo, una seguridad energética más robusta y un precio de electricidad más asequible tanto para los hogares como para las actividades económicas que a su vez pudieran abaratar sus propios precios.

El debate sobre la generación eléctrica debe ponerse sobre la mesa hoy en día más que nunca. En aras de cumplir con las metas establecidas para las energías limpias y además con el objetivo de abaratar el precio de la electricidad es necesario analizar en profundidad el rumbo que pudiera tomar el sector si se continúa con las políticas vigentes.

7. Conclusiones generales

La presente tesis ha abordado exhaustivamente el sector eléctrico mexicano desde una perspectiva de eficiencia económica, explorando el impacto de la estructura de costos de diferentes tecnologías de generación en los precios finales de la electricidad y su repercusión en la economía y la seguridad energética del país. A través de un enfoque metodológico robusto y un análisis detallado, se han logrado obtener conclusiones significativas que permiten vislumbrar un camino hacia una transición energética más sostenible y eficiente en México.

Primeramente, a nivel metodológico el estudio ha revelado que la matriz de Contabilidad Social 2018, con la apertura específica al sector energético, constituye una herramienta analítica crucial. Esta matriz, basada en la metodología de Leontief, ofrece una visión integral de cómo los cambios en el sector eléctrico afectan a la economía en general. Su construcción ha permitido identificar las limitaciones y contradicciones en la información pública disponible, y pese a estas establecer una metodología que las logre una integración y consistencia reflejadas en la matriz resultante.

En particular se aporta a la literatura sobre metodologías de desagregación mediante la generalización del método utilizado en (Lindner, Legault, & Guan, 2013) sobre la apertura inicial, donde se flexibiliza el supuesto sobre los insumos exógenos y se incluye como variable y restricción al problema de desegregación inicial de un sector. Se incorpora el desarrollo matemático de esta nueva aportación y su utilización en el resto de la tesis. El proceso de desegregación utilizado es pionero en México para el sector eléctrico y puede servir de guía para futuros estudios.

Dicha matriz representa, por demás, un avance significativo en el estudio del sector eléctrico. Al desagregar el sector en distintas tecnologías de generación con estructuras de producción diversas, se obtienen resultados más precisos y se evita el sesgo que podría surgir de una agregación general del sector. Ningún estudio sobre el sector eléctrico mexicano incorpora una desagregación como esta.

Esta aportación es importante por la heterogeneidad de las funciones de producción del sector, y aporta un nivel de análisis revelador fundamental para evaluar al interior del sector eléctrico y adicionalmente su interacción con el resto de la economía, permitiendo un análisis más profundo y preciso del impacto de cualquier cambio estructural o de otro tipo en la política energética.

Una de las principales conclusiones del nuestro análisis es la alta dependencia de la industria eléctrica mexicana a los insumos de energía primaria, principalmente los combustibles fósiles, tanto domésticos como importados. La dependencia en particular a estos últimos ha generado una vulnerabilidad significativa ante las fluctuaciones del mercado mundial de estos combustibles, afectando tanto a los sectores productivos como a los hogares mexicanos. La necesidad de subsidios gubernamentales para estabilizar los precios ha impuesto una carga fiscal considerable, subrayando la urgencia de una transición hacia energías más sostenibles y económicamente viables y la garantía de una seguridad energética superior en el país.

Por otra parte, esta dependencia implica altos costos de producción para el sector, impidiendo el abaratamiento de los precios finales de la electricidad. El modelo de precios utilizado ha reflejado como la variación de los precios de los combustibles fósiles impacta con fuerza sobre el precio de la electricidad tanto para consumidores industriales como el residencial.

Este estudio no se ha limitado a mostrar los impactos finales de estas variaciones, sino a través de que canales se ha transmitido mediante la metodología de descomposición de ruta. En promedio, el 23% de los costos de los sectores en electricidad son propagados mediante las tecnologías que dependen de costos en combustibles fósiles: termoeléctricas convencionales, centrales de ciclo combinado y carboeléctricas. Un cambio de paradigma podría deshacer esta dependencia a las energías primarias y garantizar un precio más bajo.

El análisis de los diferentes escenarios de transición energética ha reforzado la conclusión de que adoptar tecnologías limpias, como la energía solar y eólica, puede conducir a una reducción significativa de los costos de generación eléctrica.

Esta transición no solo tiene beneficios ambientales evidentes, sino que también aporta a la seguridad energética reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles. Los escenarios evaluados ($\boldsymbol{Z_1}$, $\boldsymbol{Z_2}$ y $\boldsymbol{Z_3}$) han mostrado que la reestructuración de la matriz energética hacia fuentes renovables puede resultar en precios de electricidad más bajos, lo cual es crucial para el bienestar económico de los hogares y la competitividad de los sectores productivos.

La proyección de los beneficios económicos y ambientales de esta transición es clara. La disminución en los precios de la electricidad tiene el potencial de reducir los costos de producción en diversos sectores, fomentando un desarrollo económico más inclusivo y sostenible. Además, la redistribución de los ahorros en energía puede mejorar la equidad social, beneficiando especialmente a los estratos de ingresos más bajos.

El análisis de las políticas energéticas en el capítulo final subraya la importancia de una planificación estratégica diversificada y ambiciosa. Las políticas bien estructuradas no solo deben enfocarse en la reducción de emisiones directas de CO_2e, sino también en optimizar las emisiones indirectas, contribuyendo a una economía más resiliente y sostenible a largo plazo. Los hallazgos de este estudio proporcionan una base sólida para la formulación de políticas públicas efectivas que promuevan la transición hacia una matriz energética más limpia y eficiente. Es imperativo no retroceder en las políticas destinadas a un cambio de paradigma en la generación eléctrica, el alcance hacia los objetivos medioambientales propuestos para 2030 depende críticamente de esto y de nuevas medidas que permitan una transición aún más rápida o no se verán cumplidos.

En resumen, la transformación del sector eléctrico mexicano hacia tecnologías renovables no es solo una opción ambientalmente responsable, sino una necesidad económica imperativa y una garantía de estabilidad del precio eléctrico. Esta transición ofrece una oportunidad única para México de cumplir con sus compromisos internacionales en materia de cambio climático, mejorar la seguridad energética y fomentar un crecimiento económico inclusivo. Las conclusiones de esta tesis destacan la necesidad de alinear las políticas y estrategias futuras con

estos hallazgos, aprovechando al máximo las oportunidades que la transición energética ofrece para el desarrollo sostenible del país.

Bibliografía

Alcántara, V., & Padilla, E. (2009). Input–output subsystems and pollution: An application to the service sector and CO2 emissions in Spain. *Ecological Economics*, 905-914.

Alcántara, V., & Roca, J. (1995). Energy and CO 2 emissions in Spain. Methodology of analysis and some results for 1980-90. *Energy Economics*, 221-230.

Alonso, Y. A. (2022). Estimación del consumo de energía eléctrica (GWh) y de las emisiones de gases de efecto invernadero (Toneladas de CO2e) derivadas de las actividades productivas y deciles de hogares en México durante el 2018 a través de una Matriz de Contabilidad Social. *Centro de Investigaciones Socioeconómicas*.

Betancourt Rodríguez, Y. (2015). Efectos de la aplicación de un impuesto ambiental al CO2 en México: Análisis mediante un Modelo de Insumo Producto. *Facultad de Economía. Universidad Veracruzana*.

Boyd, R., & Ibarrarán, M. E. (2002). Costs of compliance with the Kyoto Protocol: a developing country perspective. *Energy Economics*, 21-39.

Bravo Pérez, H., Castro Ramírez, J., Gutiérrez Andrade, M., & Omaña Pulido, E. (2017). *Evaluación de una política de sustitución de energías fósiles para reducir las emisiones de carbono.* 137-164: EL TRIMESTRE ECONÓMICO.

Cardenete, A., Fuentes Saguar, P. D., & Polo, C. (2008). Análisis de intensidades energéticas y emisiones de CO2 a partir de la matriz de contabilidad social de Andalucía del año 2000. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 31-48.

Chapa, J., & Ortega, A. (2017). Identifying the Main Emitters of CO2 in Mexico: a Multi-Sectoral Study. *Journal of the Latin American and Caribbean Economic Association*, 135-172.

Chenery, H. B., & Watanabe, T. (1958). International Comparisons of the Structure of Productions. *Econometrica*, 487–521.

Clavellina Miller, J. L., & Perea Corona, S. (2022). Aspectos Relevantes de la Reforma Constitucional en materia Eléctrica 2021. *Economía Informa*, 4-15.

COPAR. (2015). *Anexo 5 Generación.* Subdirección de Programación Coordinación de Evaluación.

Cruz, L. M. (2002). Energy-Environment-Economy Interactions: An Input-Output Approach Applied to the Portuguese Case. *(Paper for the 7th Biennial Conference of the International Society for Ecological Economics, 'Environment and Development: Globalisation & the Challenges for Local & International Governance', Sousse (Tunisia))*.

Dávila Flores, A. (2019). *Dávila Flores, A., & Dávila Flores, A. (2019). Modelos económicos multisectoriales elaborados con matrices de contabilidad social. Modelos económicos de las regiones de México.* México: Editorial Miguel Ángel Porrúa.

de la Vega Gomar, M. (2021). Estudio multisectorial insumo producto de la economía mexicana: una aplicación a la dinámica de emisiones contaminantes (co2) e impactos de impuestos ambientales, bajo un contexto multiregión. *Facultad de Economía. Universidad Autónoma de Nuevo León.*

Defourny, J., & Thorbecke, E. (1984). Structural path analysis and multiplier decomposition within a social accounting matrix framework. *The Economic Journal*, 111-136.

Defourny, J., & Thorbecke, E. (1984). Structural Path Analysis and Multiplier Decomposition within a Social Accounting Matrix Framework. *The Economic Journal* .

Del Río Monges, J. A. (junio de 2019). ¿Cómo podría México eliminar gradual y sosteniblemente el uso de combustibles fósiles para generar electricidad? *notasestratégicas*.

Ding, Q., Cai, W., Wang, C., & Sanwal, M. (2017). The relationships between household consumption activities and energy consumption in china— An input-output analysis from the lifestyle perspective. *Applied Energy*.

DOF. (2014). *DECRETO por el que se expiden la Ley de la Industria Eléctrica, la Ley de Energía Geotérmica y se adicionan y reforman diversas disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales.* DOF: 11/08/2014.

Elizondo, A., Ibarrarán, M., & Boyd, R. (2020). Medidas de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero adoptadas en el sector agropecuario: evaluación e impacto económico en México. *AGRICULTURA, SOCIEDAD Y DESARROLLO*, 513-532.

Fuentes, N. A., & Sastré Gutiérrez, M. (2001). Identificaci6n empirica de sectores clave de la economia sudbajacaliforniana. *Frontera norte*, 51-76.

Holland, D., & Wyeth, P. (1993). SAM Multipliers: Their Decomposition, Interpretation and Relationship to Input-Output Multipliers. *Research bulletin (USA)*.

Ibarrarán Viniegra, M., Elizondo, A., & Boyd, R. (2022). Costo de políticas hacia el cumplimiento de los NDC en México: un análisis de equilibrio general. *Sobre México. Temas de Economía.*, 81-108.

Ibarrardn Viniegra, M., & Boyd, R. (2001). LOS IMPUESTOS AL CARBONO Y LA ECONOMÍA MEXICANA: El efecto del cumplimiento de las restricciones impuestas por el calentamiento mundial. El caso de México. *El Trimestre Económico*, 233-268.

INEGI. (Octubre de 2021). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de www.inegi.org.mx: https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/#Tabulados

INEGI. (2021). *Matrices de Contabilidad Social. Fuentes y metodología.* Ciudad de México: INEGI.

Kok, R., Benders, R. M., & Moll, H. C. (2006). Measuring the environmental load of household consumption using some methods based on input–output energy analysis: A comparison of methods and a discussion of results. *Energy Policy*, 2744–2761.

Kymn, K. O. (1990). Aggregation in Input–Output Models: a Comprehensive Review, 1946–71. *Economic Systems Research*, 65-93.

Lenzen, M. (2011). Aggregation versus Disaggregation in Input–Output Analysis of the Environment. *Economic Systems Research*, 73-89.

Lenzen, M., & Schaeffer , R. (2004). Environmental and Social Accounting for Brazil. *Environmental and Resource Economics*, 201–226.

Lenzen, M., Gallego, B., & Wood, R. (2009). Matrix Balancing Under Conflicting Information. *Economic Systems Research*, 23-44.

Li, Y., & Su, B. (2018). Structural path analysis of India's carbon emissions using input-output and social accounting matrix frameworks. *Energy Economics*, 457-469.

Lindner, S., Legault, J., & Guan, D. (2012). Disaggregating Input–Output Models with Incomplete Information. *Economic Systems Research*, 329–347.

Lindner, S., Legault, J., & Guan, D. (2013). Disaggregating the Electricity Sector of China's Input-Output Table for Improved Environmental Life-Cycle Assessment. *Economic Systems Research*, 329-347.

Liu, C.-H., Lenzen, M., & Murray, J. (2012). A disaggregated emissions inventory for Taiwan with uses in hybrid input-output life cycle analysis (IO-LCA). *Natural Resources Forum*, 123–141.

Llop, M., & Manresa, A. (2014). Comparing the aggregation bias in the input–output model and the social accounting matrix model. *Applied Economics Letters*, 795-800.

Loizou , E., Chatzitheodoridis, F., Michailidis , A., Tsakiri, M., & Theodossiou, G. (2015). Linkages of the energy sector in the Greek economy: an input-output approach. *International Journal of Energy*, 393-411.

Maldonado Cruz, J. A. (2022). Estimación y análisis de las emisiones de CO2e de los hogares mexicanos. *Centro de Investigaciones Socioeconómicas*.

Manresa, A., & Sancho, F. (2004). Energy intensities and CO2 emissions in Catalonia: a SAM analysis. *International Journal of Environment, Workplace and Employment*, 91-106.

Marcos, E. (2008). Situación y perspectivas de la industria petrolera. En G. Gil, & S. Chacón, *La Crisis del Petróleo en México* (págs. 47-62). Foro Consultivo Científico y Tecnológico.

Mardones , C., & Lipski, M. (2020). A carbon tax on agriculture? A CGE analysis for Chile. *Economic Systems Research*, 262-277.

Mardones, C., & Brevis, C. (2021). Constructing a SAMEA to analyze energy and environmental policies in Chile. *Economic Systems Research*, 576-602.

Marriot, J. (2007). An Electricity-focused Economic Input-output Model: Life-cycle Assessment and Policy Implications of Future Electricity Generation Scenarios. *(PhD Thesis Dissertation, Carnegie Mellon University, Pittsburgh)*.

Miller, R. E., & Blair, P. D. (2009). *Input–Output Analysis: Foundations and Extensions.* Cambridge university press.

Moreno, B., García-Álvarez, M., Ramos, C., & Fernández-Vázquez, E. (2014). A General Maximum Entropy Econometric approach to model industrial electricity prices in Spain: A challenge for the competitiveness. *Applied Energy*.

OBTREN MX. (Febrero de 2022). *Observatorio de la Transición Energética en México*. Obtenido de obtrenmx.org: https://obtrenmx.org/generacion_sen

OCDE. (2019). *Estudios Económicos de la OCDE: México 2019. Reformas de políticas recientes.* Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.

Oosterhaven, J. (1996). Leontief versus Ghoshian Price and Quantity Models. *Southern Economic Journal*, 750-759.

Ortiz, B. L. (2011). Análisis de requerimientos de energía con la metodología Insumo-Producto para el caso mexicano 1971-2007. *Econ. Inf*, 43-51.

Oswald, Ú. (2017). Seguridad, disponibilidad y sustentabilidad energética en México. *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales*, 155-196.

Park, C.-G., & Lee, K. (2013). An e-SAM Approach to the Analysis of Energy Consumption and CO 2 Emissions in Korean Industry. *Journal of Environmental Policy*, 101-123.

Park, H.-C., & Eunnyeong , H. (2006). The direct and indirect household energy requirements in the Republic of Korea from 1980 to 2000—An input–output analysis. *Energy Policy*, 2839–2851.

PEMEX. (Octubre de 2021). *Anuario Estadístico 2019.* Obtenido de www.pemex.com: https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Anuario%20Estadistico%20Archivos/anuario-estadistico_2019.pdf

PRODESEN. (2018). *Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmición y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista.* Centro Nacional de Control de Energía.

PRODESEN. (2019). *Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmición y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista.* Centro Nacional de Control de Energía.

PRODESEN. (2022). *Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmición y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista.* Centro Nacional de Control de Energía.

Pyatt, G., & Round, J. I. (1985). *Social accounting matrices : a basis for planning.* The World Bank.

Rasmussen, N. P. (1957). Studies in Inter-sectoral Relations. *Amsterdam: North-Holland*.

Roland-Holst, D. W., & Sancho, F. (1995). Modeling prices in a SAM structure. *The Review of Economics and Statistics*, 361-371.

Roland-Holst, D. W., & Sancho, F. (1995). Modeling Prices in a SAM Structure. *The Review of Economics and Statistics*.

Round, G. P. (1979). Accounting and Fixed Price Multipliers in a Social Accounting Matrix. *Economic Journal*.

Ruiz Nápoles, P. (2012). *Low carbon development strategy for Mexico: an input–output analysis. Final report.* Ciudad de México: United Nations Environment Program, Agence Française de Développement and Universidad National Autonoma de Mexico.

Santillán Vera, M., de la Vega Navarro, A., Rodríguez Peña, I., & García Manrique, L. (2023). Drivers of Electricity GHG Emissions and the Role of Natural Gas in Mexican Energy Transition. *Energy Policy*, 113-316.

Santillán Vera, M., de la Vega Navarro, A., & Islas Samperio, J. (2021). Climate change and income inequality: An I-O analysis of the structure and intensity of the GHG emissions in Mexican households. *Energy for Sustainable Development*, 15–25.

Santos, S. G. (2004). Portuguese net borrowing and the government budget balance: A SAM approach. *Journal of Policy Modeling*, 703-717.

SENER. (2018). *Informe pormenorizado sobre el desempeño y las tendencias de la industria eléctrica nacional 2017.* Ciudad de México: Secretaría de Energía.

SENER. (2020). *Informe pormenorizado sobre el desempeño y las tendencias de la industria eléctrica nacional 2018.* Ciudad de México: Secretaría de Energías.

Stone, R. (1981). *Aspects of Economic and Social Modelling.* Librairie Droz.

Stone, R. (1981). Aspects of Economic and Social Modelling. *Librairie Druz*, 126.

Topcuoğlu , A., & Oral, O. I. (2020). Importance of Energy for Industries and Role of the Energy Sector in Turkey's Economy. En *Dynamics of Energy, Environment and Economy* (págs. 39-63). Springer.

Turner, K., Allan, G., McGregor, P. G., & Swales, J. K. (2007). Impact of Alternative Electricity Generation Technologies on the Scottish Economy: An Illustrative Input–Output Analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 243–254.

Vaca Serrano, J. M., & Kido Cruz, A. (2021). Estrategia de eficiencia en el consumo de energía eléctrica y mitigación en la estructura productiva de México. *Contaduría y Administración*, 1-22.

Vaca Serrano, J. M., Kido Cruz, A., & Nuñez Rodriguez, G. (2018). Industria eléctrica y su relevancia en la estructura productiva de México. *Economía, Sociedad y Territorio*, 825-851.

Vaca, J., Núñez, G., & Kido, A. (2019). Análisis multisectorial del incremento de precios de la electricidad en la economía de México. *Revista Problemas del Desarrollo*, 167-189.

Valdivia, G. G., & Domínguez, S. C. (2008). La crisis del petróleo en México. *Tecnologico de Monterrey. Foro consultivo tecnológico*.

van Leeuwen, E. S. (2010). Town-hinterland relations: A social accounting matrix approach. *In Urban-Rural Interactions*, 79-113.

Wiedmann, T. O., Suh, S., Feng, K., Lenzen, M., Acquaye, A., Scott, K., & Barrett, J. R. (2011). Application of Hybrid Life Cycle Approaches to Emerging Energy Technologies - The Case of Wind Power in the UK. *Environmental science & technology*, 5900-5907.

Wolsky, A. M. (1984). Dissaggregating Input-Output Models. *The Review of Economics and Statistics*, 283-291.

Xie, J. (2000). An Environmentally Extended Social Accounting Matrix. *Environmental and Resource Economics*, 391–406.

Zhang, L., Hu, Q., & Zhang, F. (2014). Input-Output Modeling for Urban Energy Consumption in Beijing: Dynamics and Comparison. *PloS one*, e89850.

Zhang, Y.-J., Bian, X.-J., Tan, W., & Song, J. (2015). The indirect energy consumption and CO2 emission caused by household consumption in China: an analysis based on the inputeoutput method. *Journal of Cleaner Production*, 1-15.