

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA ECONÓMICAS, A.C.



ESTRUCTURA, DISEÑO Y REGULACIÓN DEL MERCADO DE CERTIFICADOS DE
ENERGÍA LIMPIA

TESINA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN ECONOMÍA

PRESENTA

FELIX ORDOÑEZ MARTINEZ

DIRECTOR DE LA TESINA: DR. JUAN ROSELLÓN

Mis logros personales son la suma de todas sus contribuciones positivas y un poco de esfuerzo, a mi familia: Cata, Memos, Caty, Fili y a ti, Sofía.

Agradecimientos

Quiero agradecer a:

Quien siempre me inspiró y puso todo su esfuerzo y amor para verme alcanzar este logro, Sofía.

A mi familia, quienes con su afecto y apoyo construyeron lo que soy y me dieron las herramientas para afrontar la vida.

Al Dr. Juan Rosellón, quien me ha ayudado a descubrir mi camino dentro de esta nueva rama del conocimiento, que al inicio era tan ajena para mí.

Al Dr. David Heres, por sus atinados comentarios que indujeron en mí un sentido de autocrítica.

Y a todos los alumnos de la Maestría en Economía generación 2018, especialmente a los "prros" Irving, Iván, Aarón, Omar, Alex, Yarim, Eduardo y Jhony; quienes fueron en uno solo el mejor equipo de estudio, fútbol, fiesta y terapia psicológica.

Resumen

En este trabajo abordamos tópicos de microeconomía teórica y aplicada, específicamente la economía pública, con la creación de un mercado de derechos de contaminación para mitigar los efectos de externalidades, usamos esta herramienta para modelar al Mercado de Certificados de Energía Limpia (CELS). Describimos a los Participantes del Mercado y, con base en esto, definimos a los individuos que darán lugar al Mercado. Logramos una completa representación de todos los Participante del Mercado. El alcance del modelo nos permite justificar la creación de títulos que avalan la generación limpia y que, además, se alinean con el objetivo de las políticas. Asimismo, este modelo representa un instrumento que crea incentivos a la inversión en generación limpia, pues los CELs incentivan la creación de nuevas plantas generadoras de energía limpia. La creación de un modelo teórico nos ha facultado para describir la interacción entre los agentes que dan origen al mercado, y con esto, adquirir la posibilidad de tomar decisiones respecto al alcance y la dirección de estas políticas. La creación de un modelo teórico permite tener un panorama más amplio del mercado. Debemos hacer énfasis en la importancia de tener los medios adecuados para resolver las irregularidades naturales que nacen de la obligación nacional de proveer de energía eléctrica a todos los usuarios, el modelo que logramos construir avala la decisión de crear los CELs y nos permite estudiar los ajustes o cambios óptimos que deban realizarse a este mercado.

Palabras clave:

CEL, Externalidades, Equilibrio Óptimo, Políticas ambientales, Regulación, Mercado.

Contenido

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introducción. | 1 |
| 1.1 | Origen y sustento legal de los CELs. | 3 |
| 1.2 | Descripción del Mercado de CELs | 4 |
| 1.3 | Externalidades. | 7 |
| 1.4 | Evaluación del Mercado de CEL | 9 |
| 2 | Modelo Teórico | 12 |
| 2.1 | Problema del Planificador Benevolente con presencia de externalidades. | 12 |
| 2.2 | Equilibrio Competitivo de Propiedad Privada en ausencia de Regulador | 14 |
| 2.3 | Modelo con dos externalidades y dos mercados de derechos de contaminación . | 16 |
| 2.3.1 | Consumidores. | 17 |
| 2.3.2 | Central sucia. | 18 |
| 2.3.3 | Central limpia. | 19 |
| 2.4 | Fusión de los mercados en un modelo con dos externalidades. | 21 |
| 2.5 | Porcentaje de obligación. | 23 |
| 3 | Resultados Teóricos | 25 |
| 3.1 | Interpretación de los resultados. | 25 |
| 4 | Conclusiones | 29 |
| A | Fundamentos teóricos | 31 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| A.1 | Caracterización teórica del bienestar social. | 31 |
| B | Solución completa al problema social con presencia de externalidades. | 33 |
| C | Datos e Información del Mercado de Certificados de Energía Limpia | 37 |
| | Referencias | 40 |

Lista de figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Esquema de obligaciones de CEL establecidos a corto y mediano plazo. Fuente: elaboración propia con datos de SENER y LGCC. | 4 |
| 1.2 | Esquema de la estructura básica del mercado de CELs. Fuente: elaboración propia con información de la LIE. | 7 |
| 1.3 | CELs otorgados en 2018 y 2019. Fuente: elaboración propia con datos de la CRE. | 10 |
| C.1 | Datos de 2018 a 2020 de la capacidad eléctrica instalada en México. Fuente: PRODESEN 2018-2032. | 38 |

Lista de tablas

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Cantidad de CEL entregadas a las centrales limpias en el año de apertura del mercado de CEL (2018), además del segundo año de operación (2019). Fuente Sitio de internet del sistema de CEL, S-CEL. Fuente: elaboración propia con datos de la CRE. | 11 |
| C.1 | Lista de Centrales Generadoras Limpias 2018-2019. Fuente. elaboración propia con datos de la CRE obtenidos en el Sistema de CEL (S-CEL). | 39 |

Lista de Abreviaturas

- Centro Nacional de Control Energético = CENACE
- Certificado(s) de Energía Limpia = CEL(s)
- Comisión Reguladora de Energía = CRE
- Ley de la Industria Eléctrica = LIE
- Ley General de Cambio Climático = LGCC
- Participante del Mercado = PM
- Secretaría de Energía = SENER
- Suministrador de Servicios Básicos = SSB
- Suministrador de Servicios Calificados = SSC
- Suministrador de Último Recurso = SUR
- Usuarios Calificados = UC
- Usuarios Finales de Abasto Aislado = UFAA

Capítulo 1

Introducción.

El presente trabajo de investigación comprende un análisis teórico que fundamenta la creación del mercado de Certificados de Energía Limpia, así mismo, aborda un análisis multidimensional del funcionamiento de este. Por una parte, analizamos la aportación de los CEL en el cumplimiento de las metas ambientales pactadas por México en el acuerdo de París, y por otra parte, ilustramos como la entrega de CEL a generadores limpios aumenta la inversión en energía limpia, pues incentivan la creación de nuevas centrales eléctricas limpias¹.

A raíz de la reforma energética, promulgada en agosto de 2014, el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) Mexicano ha enfrentado un periodo de transición². La transición a una nueva estructura de mercado eléctrico implica un monitoreo constante y exhaustivo, Ibarra-Yunez (2015) realizó una proyección sobre el desempeño del nuevo Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) y encontró como fuentes principales de complicaciones a dos problemas, en primer lugar, una deficiente coordinación normativa y política debido a un exceso de participación de las entidades reguladora. Y en segundo lugar, pero con la misma relevancia, la asignación sesgada o discriminatoria de los contratos de cumplimiento, así como de la entrada de nuevos participantes en todas las facetas del MEM.

¹La Secretaría de Energía con el afán de incentivar la transición a energías limpias crea los CEL y los introduce como una parte fundamental en el nuevo MEM.

²Los beneficios del nuevo MEM están medidos en cuanto a la disminución de las tarifas a los consumidores residenciales, así como el desarrollo del SEN y la disminución del efecto de externalidades generadas por contaminación.

Uno de los objetivos principales de la Reforma Energética es encaminar al sector energético a una estructura independiente de los combustibles fósiles, adoptando una ideología inclinada a la generación limpia. Al respecto, Pischke, *et. al.* (2019) miden la presencia histórica y la calidad de las políticas ambientales en el continente Americano. De México destacan que la presencia de políticas muestran una alta densidad e intensidad, sin embargo, estas políticas son catalogadas con niveles bajos en calidad. Argumentan que las políticas ambientales tienen un cambio de dirección en el foco de sus objetivos cuando hay un cambio en la administración federal, debido a que las políticas han sido centralizadas.

En el mismo sentido, el alcance con las políticas ambientales ha sido el punto central del debate energético-ambiental. Así, Sarmiento, *et. al.* (2019) realizan simulaciones numéricas para mostrar que, tomando como base al modelo Global Energy System Model (GENeSYS-MOD), la política ambiental adoptada en México lleva a un subóptimo social, es decir, cumplir con el 50% de participación en la generación de energía limpia en el año 2050 es una meta intrascendente, pues ambiental y económicamente no consigue un impacto suficientemente importante. La comparación es realizada con un conjunto de situaciones hipotéticos, o contrafactuales, que incluyen la situación en la que el sistema carece de regulación, la meta del 100% y una serie de escenarios con porcentajes entre cero y cien. Concluyen que la decisión política óptima corresponde al 80% de producción limpia.

El presente trabajo de investigación está alineado con los siguientes objetivos:

- Construir un modelo teórico que consiga modelar al mercado de CEL. Es decir, que incluya a todos los Participantes del Mercado que intervienen en la compra y venta de CEL.
- Extraer información del modelo que sea útil para fines de estructura y diseño del mercado, es decir, conseguir reproducir teóricamente los objetivos de creación de los CELs.
- Mostrar económicamente que una política ambiental de mayor alcance genera un beneficio en el bienestar social.

1.1 Origen y sustento legal de los CELs.

Los fundamentos normativos y teóricos de los Certificados de Energía Limpia (CEL) serán presentados a lo largo de esta sección, el foco del análisis es el contenido de la Ley de la Industria Eléctrica respecto a los Participantes del Mercado (PM) que desempeñan un papel dentro del mercado de CELs.

La Ley de la Industria Eléctrica (LIE) en su artículo tercero, fracción VIII define a los Certificados de Energía Limpia (CEL) como títulos emitidos por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) que acreditan la producción de un monto determinado de energía eléctrica a partir de fuentes renovables o tecnologías limpias y que sirve para cumplir los requisitos obligatorios asociados al consumo de los Centros de Carga³. La correcta asignación de estos títulos depende del total cumplimiento de los lineamientos de otorgamiento y adquisición de CELs. Estos títulos son creados para incentivar el aumento de la participación de generación limpia, por esto los CELs son otorgadas exclusivamente a centrales limpias de nueva creación⁴.

La Ley General de Cambio Climático⁵ establece que México tiene la necesidad de crear bases para la generación limpia, dado que son indispensables para el cumplimiento del Acuerdo de París⁶.

Las metas ambientales tienen un objetivo a mediano plazo: alcanzar un 35% de participación mínima en la generación de energía eléctrica para el año 2024. El cumplimiento de la meta ocurrirá de manera progresiva, es decir, parten de un 20% de participación en la generación limpia (año 2014). De aquí parte la necesidad de recurrir a los CELs, pues cumplen un doble papel: asegurar la participación de la energía limpia en el suministro total, y financiar la inversión de más energía limpia.

Los requisitos para obtener un CEL los decide la SENER en el primer trimestre de cada

³Diario Oficial de la Federación (DOF) (2020). Ley de la Industria Eléctrica.

⁴Inicio de operaciones posterior a la fecha de promulgación de la reforma energética, específicamente después del 11 de agosto de 2014.

⁵Ley General de Cambio Climático, Sección VIII, del Artículo Segundo, del Capítulo Único

⁶Tiene entre sus objetivos mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C, con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir con los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1.5°C

año calendario⁷, y deben cumplir con un incremento progresivo, teniendo como meta a mediano plazo alcanzar un 14.9% de participación en la generación total, con lo que establece un 35% de participación neta. El panorama de mediano plazo ha sido bosquejado en la figura 1.1, que muestra los objetivos que han sido establecidos al día de la promulgación de la reforma.



Figura 1.1: Esquema de obligaciones de CEL establecidos a corto y mediano plazo. Fuente: elaboración propia con datos de SENER y LGCC.

El Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) es el organismo público descentralizado encargado de la operación del MEM y todos los submercados que de este derivan. Regido por la Ley de la Industria Eléctrica, el CENACE, tiene la obligación de operar el mercado de CELs al menos una vez al año, proveer estructuras de operación eficientes y asegurar la inclusión a todo potencial Participante que cumpla con los requisitos establecidos en los correspondientes reglamentos de operación.

1.2 Descripción del Mercado de CELs

La LIE en coordinación con las Bases del MEM (BMEM) describe a cada uno de los participantes del Mercado de CEL. El mercado queda compuesto por 5 Participantes del Mercado que

⁷Establecido en el Artículo 124 de la Ley de la Industria Eléctrica.

interactúan entre sí con el fin de cumplir con sus obligaciones legales:

- a) **Suministrador de Servicios Básicos (SSB)**: participante del mercado que representa a los Centros de Carga correspondientes que miden el consumo de los Usuarios del Suministro Básico⁸.
- b) **Suministrador de Servicios Calificados (SSC)**: participante del mercado que a los Centros de Carga correspondientes al consumo de los Usuarios Calificados que no participan directamente en el Mercado Eléctrico Mayorista⁹.
- c) **Suministrador de Último Recurso (SUR)**: participante del mercado que representa a Usuarios Calificados por tiempo limitado, con la finalidad de mantener la continuidad del servicio cuando un Suministrador de Servicios Calificados deje de prestar el Suministro Eléctrico¹⁰.
- d) **Generadores**. Permisos que cuentan con centrales eléctricas que generan más de 0.5 MW. Los Generadores participan directamente en el Mercado Eléctrico Mayorista, donde venden día a día su electricidad, o participando en contratos de Largo Plazo¹¹.
- e) **Usuarios de Servicios Básicos**. son todos aquellos usuarios que no están registrados ante la CRE como Usuarios Calificados. Los Usuarios Básicos no pueden participar en el Mercado Eléctrico Mayorista y, por lo tanto, requieren comprar su electricidad de los Suministradores de Servicios Básicos. El precio que pagan estos usuarios por la electricidad es un precio regulado¹².
- f) **Usuarios Calificados (UC)**: Es un Usuario Final que cuenta con el registro ante la CRE como Usuario Calificado y que puede adquirir el suministro eléctrico ya sea como Participante del Mercado o a través de un Suministrador de Servicios Calificados¹³.

⁸Sección XLVI del Artículo 3 de la Ley de la Industria Eléctrica.

⁹Sección XLVII del Artículo 3 de la Ley de la Industria Eléctrica.

¹⁰Sección XLVIII del Artículo 3 de la Ley de la Industria Eléctrica.

¹¹Sección XXIV del Artículo 3 de la Ley de la Industria Eléctrica.

¹²Sección LVI del Artículo 3 de la Ley de la Industria Eléctrica.

¹³Sección LV del Artículo 3 de la Ley de la Industria Eléctrica.

g) Usuarios finales de Abasto Aislado (**UFAA**): es un Usuario cuya energía eléctrica usada es generada y posteriormente suministrada sin que participe en este proceso la Red Nacional de Transmisión (RNT) o la Red General de Distribución (RGD).

Los diferentes Participantes del Mercado buscan cumplir con dos objetivos esenciales. Por un lado, la obligación ambiental –que puede ser cubierta con la cogeneración de energía limpia o con la adquisición de CELs– impuesta por la SENER a los generadores sucios, los SSB, los SSC y los SUR (Participantes Obligados). Por otro lado, cumplir con el estímulo de desarrollo de nuevas centrales de generación limpia y/o el desarrollo de tecnologías limpias.

La CRE revisa el cumplimiento de estas obligaciones, y en caso de incumplimiento aplicará multas que generen costos elevados a los Participantes Obligados (PO), además, no exoneran al Participante de la obligación. El pago recibido por la venta de CEL incentiva a las centrales generadoras de energía limpia a la construcción de nuevas plantas, estas plantas podrán recibir CEL y el proceso de aumento en la participación de generación habrá de cumplirse progresivamente.

Agrupamos a los Participantes del mercado de CELs en las dos caras de la economía. La oferta está compuesta por: Generadores Limpios, quienes reciben un CEL por cada Megawatt-hora generado y la Cogeneración eficiente, quienes reciben un CEL por cada 5 Megawatt-hora generados. Y la parte de la demanda está compuesta por: Generadores Sucios, Suministradores de Servicios Básicos, Suministradores de Servicios Calificados y Suministradores de Último Recurso. Esto podemos verlo de forma resumida en el esquema de la figura 1.2.

Ahora, tenemos que definir individuos de estudio que sean relevantes y representativos para el análisis económico. La división de los agentes en oferta y demanda será de mucha utilidad:

- **Central Sucia:** únicamente incluye a las centrales eléctricas que generan con medio convencionales, es decir, con el uso combustibles fósiles.
- **Central Limpia:** comprende a la Centrales generadoras de energía limpia (sin importar el tipo de tecnología del que provengan) y a las Centrales de cogeneración eficiente (Reciben CELs solo por la cantidad de energía limpia entregada y avalada por la CRE).

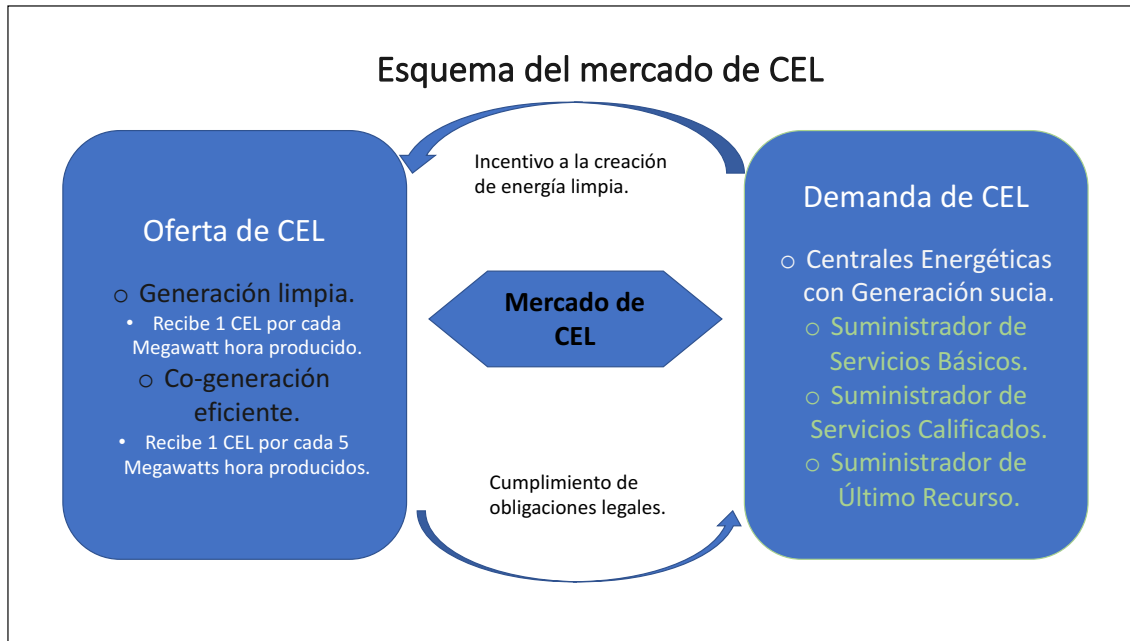


Figura 1.2: Esquema de la estructura básica del mercado de CELs. Fuente: elaboración propia con información de la LIE.

- **Consumidores:** debido a que no todos los consumidores pueden participar en el MEM, tomamos la demanda de energía para definir a este agente. Están incluidos los SSB, SSC, Usuarios Calificados y Usuarios finales de Abasto Aislado.

Entonces centramos el análisis ahora a tres únicos agentes: Consumidores, Centrales Sucias y Centrales Limpias.

1.3 Externalidades.

El objetivo de esta investigación es vincular al modelo de un mercado de derechos de contaminación, propio de la literatura sobre economía pública, con el Mercado de Certificados de Energía Limpia. Es nuestra tarea construir un modelo lo suficientemente general para ser abordado matemáticamente y, a su vez, lo suficientemente particular para poder aproximar el comportamiento real del mercado. En el apéndice A recopilamos definiciones y teoremas que pueden servir de apoyo para entender el desarrollo analítico del modelo que planteamos.

Definimos a las externalidades como el efecto indirecto causado por las decisiones de consumo o producción de los agentes¹⁴ sobre la utilidad, proceso productivo o los conjuntos de consumo/producción de otro agente. Estos efectos generan una pérdida de bienestar a nivel social y un hecho es que cuantos más agentes diferentes haya en una economía tantas más externalidades habrá. Por ejemplo, Armstrong *et. al.* (1994) sostienen que si la producción de electricidad genera lluvias ácidas, entonces esto implicará un costo en el bienestar social, que puede medirse en términos monetarios. Algunos casos de externalidades son los siguientes:

- **Efecto externo de un proceso productivo en el conjunto de consumo.** Existe una contracción o reducción en el conjunto de consumo, si $X^i \in \mathcal{R}^L$ es el conjunto de consumo original, entonces $x^i \in X^i$ es $x^i = (x_1^i, \dots, x_l^i, \dots, x_L^i)$, y es reducida a $x^{i'} \in X^{i'}$, con $x^{i'} = (x_1^i, \dots, x_{l-1}^i, x_{l+1}^i, \dots, x_L^i)$.¹⁵
- **Efecto de un proceso productivo sobre otro proceso productivo.** Existe un efecto en el proceso productivo de la empresa k debido únicamente a que la empresa j lleve a cabo su proceso productivo. Si la empresa j cumple con $y^j = f^j(y^1, \dots, y^{j-1}, y^{j+1}, \dots, y^J)$ entonces el proceso productivo y^k es afectado y por ello alcanza un nivel diferente de producción, el efecto puede ser negativo o positivo.
- **Externalidad sobre la función de utilidad.** Sean x^i, x^s las canastas de consumo de los individuos i, s respectivamente, modelamos esta externalidad como; $U^i(x^i, x^s)$, es decir, la utilidad del individuo i es afectada por el consumo del individuo s .
- **Externalidad productiva positiva mutua.** Los factores productivos de dos empresas intervienen positivamente en los factores productivos de otras empresas, es decir, cuando el conjunto de producción es $y^1, \dots, y^{j-1}, y^j, y^{j+1}, \dots, y^J$ y cumple que para la función de producción $f^j(y^1, \dots, y^{j-1}, y^j, y^{j+1}, \dots, y^J, x^1, \dots, x^I)$ que $\frac{\partial f^j}{\partial y^j} > 0$.

¹⁴Esta definición la tomamos del texto de Laffont (1988), no obstante existe consenso entre varios autores referentes en el tema.

¹⁵e. g. la presencia de una fábrica a orillas de un lago, los desechos contaminan el lago y reducen la cantidad de peses que pueden ser pescados, esto afecta el nivel de consumo de pescado de los consumidores.

Es fácil enunciar ejemplos de estos fenómenos económicos: una empresa productora genera contaminación sobre un río que surte de agua a una ciudad, esta contaminación afecta a los consumidores de agua potable pues los enferma. El aire contaminado que generan las industrias resulta en una externalidad para los habitantes que respiran ese aire contaminado. No obstante, estos ejemplos son muy comunes en la literatura debido a que son especialmente ilustrativos, en la realidad algunas externalidades no resultan tan evidentes, tal es el caso de nuestro estudio.

Centremos la discusión en nuestros tres agentes: por su parte, es un hecho que la contaminación de la generación sucia afecta negativamente a la sociedad. Además, la demanda de energía es la detonante de esta generación. Pongamos un ejemplo: en temporada navideña los hogares y, en cierta parte, las empresas aumentan su demanda de energía debido a los tradicionales alumbrados. Este aumento en la demanda de energía no puede ser despachado por la central limpia, la tecnología de producción limpia no es capaz de incrementar su generación de forma espontánea. En cambio, las centrales sucias tienen una respuesta casi instantánea y, si su capacidad lo permite, son las encargadas del abasto de este exceso de demanda.

En el SEN cada día ocurren situaciones como la comentada anteriormente, los picos de demanda diarios generan un costo ambiental a la sociedad. Por ello, las autoridades energética y ambiental coordinan planes de acción para mitigar los efectos de esta contaminación. La pregunta es ¿Cómo podemos mitigar los efectos de la contaminación debida a la generación sucia? La respuesta natural es: reducir la generación sucia. Para lograr esto el SEN debe respaldar su confiabilidad en la generación limpia, es decir, aumentar la participación de la Central Limpia en el abasto total.

1.4 Evaluación del Mercado de CEL

Para mostrar un poco las actividades de los Participantes del mercado de CELs presentamos la información que ha sido recabada en el primer año de operación (2018) y los preliminares del segundo año (2019). La figura 1.3 muestra los resultados de la asignación de CELs. Se aprecia

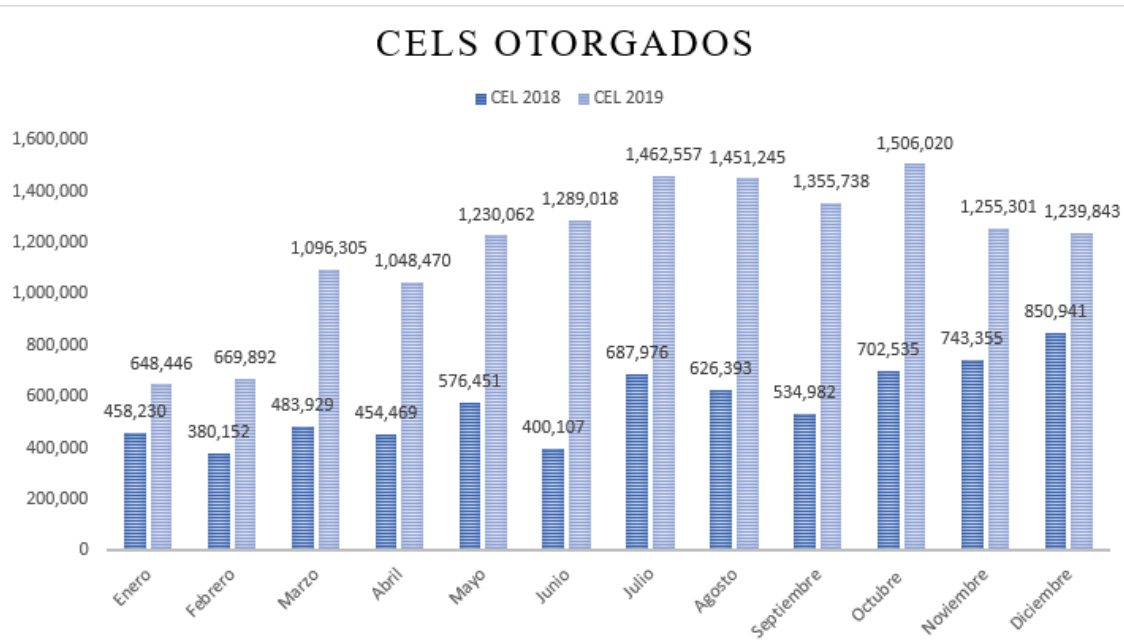


Figura 1.3: CELs otorgados en 2018 y 2019. Fuente: elaboración propia con datos de la CRE.

un incremento generalizado en 2019, respecto a 2018.

El aumento resulta esperado pues en 2019 el CENACE reportó un importante incremento en el registro de centrales que han sido avaladas como limpias, la tabla C.1 (En el Apéndice C) muestran las centrales que operaban en 2018 y las que iniciaron operaciones en 2019.

En la tabla 1.1 mostramos la información con la que elaboramos la figura 1.3, además de presentar un total anual. La inversión neta en energía limpia deriva de que fueron otorgados 6, 621, 697 CELs 2018, mientras que en 2019 fue de 14, 252, 879 CELs.

El desarrollo de capacidad y tecnología limpia genera un bienestar en muchos aspectos de la sociedad mexicana, nos interesa el análisis de la perspectiva ambiental. La creación, desarrollo y consolidación de un buen mercado de CELs será el primer paso para el cumplimiento de los acuerdos ambientales. Los beneficios económicos no quedan ahí, los costos variables de la generación limpia son significativamente menores a los costos de la generación sucia, esto beneficia a los consumidores pues enfrentan un menos precios por la energía.

El mercado de CELs al día de hoy carece de datos para su análisis debido a su corto periodo de existencia, aún así existen datos de las primeras subastas de largo plazo. En estas subastas

| Mes | CEL 2018 | CEL 2019 |
|------------|-----------|------------|
| Enero | 458,230 | 648,446 |
| Febrero | 380,152 | 669,892 |
| Marzo | 483,929 | 1,096,305 |
| Abril | 454,469 | 1,048,470 |
| Mayo | 576,451 | 1,230,062 |
| Junio | 400,107 | 1,289,018 |
| Julio | 687,976 | 1,462,557 |
| Agosto | 626,393 | 1,451,245 |
| Septiembre | 534,982 | 1,355,738 |
| Octubre | 702,535 | 1,506,020 |
| Noviembre | 743,355 | 1,255,301 |
| Diciembre | 850,941 | 1,239,843 |
| Total | 6,899,520 | 14,252,897 |

Tabla 1.1: Cantidad de CEL entregadas a las centrales limpias en el año de apertura del mercado de CEL (2018), además del segundo año de operación (2019). Fuente Sitio de internet del sistema de CEL, S-CEL. Fuente: elaboración propia con datos de la CRE.

comercian paquetes de energía limpia y CELs, en términos de inversión, la cantidad neta acordada ha sido de 4, 456, 817, 805.28 pesos en su primera celebración, con un precio promedio de 444.00 pesos por certificado. En la segunda subasta lograron una inversión de 6, 544, 807, 393.98 pesos, con un precio promedio de 375.27 pesos por CEL. Estos datos en conjunto a los CEL que ya han sido asignados en la tabla 1.1 nos dan un indicativo a favor del correcto funcionamiento del mercado, no obstante, debe asegurarse el funcionamiento óptimo del mercado. Para esto desarrollamos un modelo teórico que es presentado a continuación.

Capítulo 2

Modelo Teórico

La Economía Pública tiene como objetivo corregir las fallas de mercado que son generadas debido a diferentes aspectos propios del ambiente en el que está desarrollada la economía. La falla de mercado que abordamos en este trabajo de investigación son las externalidades. En este sentido, uno de los instrumentos que ha desarrollado de teoría es la creación de un mercado de derechos de contaminación.

En esta sección mostraremos que, a pesar de que la externalidad no permite alcanzar una asignación óptima bajo un Equilibrio Competitivo de Propiedad Privada, la creación de un mercado de derechos de contaminación (el cuál representará al Mercado de CEL's) obliga a los agentes a tomar las mismas decisiones que llevan al óptimo de Pareto que consigue un Planificador Benevolente.

2.1 Problema del Planificador Benevolente con presencia de externalidades.

Consideremos una economía con dos bienes de consumo (energía limpia y energía sucia), dos empresas productoras (centrales sucias y centrales limpias) y un consumidor (como lo hemos definido en la sección 1.2). En términos de la economía definida en la sección A.1 del apéndice

A, $I = 1$, $L = 2$ ($l = 1$ es la energía sucia y $l = 2$ es la energía limpia) y $J = 2$ ($j = 1$ es la central sucia y $j = 2$ es la energía limpia), x_l es el consumo del bien l y y_l^j es la producción del bien l por la empresa j .

El modelo incluye la presencia de dos externalidades, ambas afectan a la central limpia y corresponden a la producción de energía sucia y al consumo de la misma. Estas externalidades van a ser modeladas como efectos directos en la función de producción de la central limpia, esto con el fin de lograr un análisis ilustrativo. La asignación que lleva a un óptimo social será el resultado de resolver el siguiente programa, el cual corresponde a la asignación de los bienes de consumo por parte del Planificador Benevolente:

$$\underset{x_1^*, x_2^*}{Max} U(x_1, x_2) \quad (2.1)$$

$$\text{sujeto a } y_1^1 + y_1^2 + w_1 - x_1 \geq 0 \quad (2.2)$$

$$y_2^1 + y_2^2 + w_2 - x_2 \geq 0 \quad (2.3)$$

$$-y_1^1 + f^1(y_2^1) \geq 0 \quad (2.4)$$

$$-y_2^2 + f^2(y_2^1) \geq 0 \quad (2.5)$$

En el apéndice B resolvemos a detalle el problema de maximización, por lo que en esta sección nos concentramos en darle interpretación económica a los resultados. Las ecuaciones que determinan a las decisiones óptimas de los agentes están dadas por B.12 y B.14, que vamos a escribir y darle su correspondiente interpretación:

$$\frac{\frac{\partial U}{\partial x_1} + \frac{\partial U}{\partial x_2} \frac{\partial f^2}{\partial x_1}}{\frac{\partial U}{\partial x_2}} = - \frac{\partial f^2}{\partial y_1^2}, \quad (2.6)$$

La tasa marginal de sustitución del consumidor en ausencia de externalidades tiene la forma $\frac{\partial U / \partial x_1}{\partial U / \partial x_2}$, y es la tasa óptima a la que el consumidor sustituye consumo del bien uno por el bien

dos. Ahora analizando nuestra expresión notamos que la existencia del término $\frac{\partial f^2}{\partial x_1}$ nos indica que la producción de energía limpia está siendo afectada por el consumo de energía sucia.

Ahora para la tasa marginal de sustitución técnica:

$$-\frac{\partial f^2}{\partial y_1^2} = -\frac{1 + \frac{df^1}{dy_2^1} \frac{\partial f^2}{\partial y_1^1}}{\frac{df^1}{dy_2^1}}. \quad (2.7)$$

Aquí podemos decir que: si la central sucia usa una unidad más de energía limpia en su producción, consigue una producción extra igual a df^1/dy_2^1 , y por consecuencia genera un efecto negativo en la producción del bien 2 igual a $\frac{df^1}{dy_2^1} \frac{\partial f^2}{\partial y_1^1}$, en resumen, la expresión completa 2.7 corresponde a la tasa marginal de sustitución técnica de la sociedad. En ambos casos la relación que obtiene iguala beneficios marginales de producir o consumir, con los costos sociales que implica la externalidad en esta economía. En el problema resuelto por los agentes de forma individual no son considerados estos costos sociales, esto lo mostramos en la siguiente sección, es por ello que los encargados de la política buscan mecanismos que minimicen estos costos sociales.

2.2 Equilibrio Competitivo de Propiedad Privada en ausencia de Regulador

En la realidad los agentes resuelven un problema individual, el mercado eléctrico permite que los participantes busquen su propio desarrollo, traducir esto a un lenguaje económico significa resolver un Equilibrio Competitivo de Propiedad Privada (ECPP), a continuación mostramos los problemas de maximización bajo la estructura individualista:

Consumidor

El consumidor resolverá la maximización de su utilidad sujeto a su restricción presupuestal:

$$\begin{array}{ll} \underset{x_1^*, x_2^*}{Max} & \{U(x_1, x_2)\} \\ \text{sujeto a} & x_1 p_1 + x_2 p_2 = R. \end{array}$$

Resolver la maximización buscando el beneficio individual permite al consumidor ignorar los efectos que tiene el consumo de energía sucia, entonces la elección de consumo óptima no es perturbada por alguna decisión óptima en ausencia de externalidades;

$$\frac{\partial U / \partial x_1}{\partial U / \partial x_2} = \frac{p_1}{p_2}. \quad (2.8)$$

Central sucia

Esta central es la que genera la externalidad, pero no es afectada por la externalidad, maximiza sus beneficios sujetos a su tecnología de producción:

$$\begin{array}{ll} \underset{y_1^*, y_2^*}{Max} & \{p_1 y_1^1 + p_2 y_2^1\} \\ \text{sujeto a} & y_1^1 = f^1(y_1^1). \end{array}$$

La condición para la maximización de los beneficios es:

$$-\frac{1}{df^1/dy_1^1} = \frac{p_1}{p_2}. \quad (2.9)$$

Análogo al caso del consumidor, la central limpia, tampoco presenta un término que represente al pago por el daño generado por la contaminación proveniente de la generación sucia.

Central limpia

Para la central limpia tendremos el siguiente problema de maximización:

$$\begin{array}{ll} \underset{y_1^*, y_2^*}{Max} & \{p_1 y_1^2 + p_2 y_2^2\} \\ \text{sujeto a} & y_2^2 = f^2(y_1^2, \bar{x}_1, \bar{y}_1^1). \end{array}$$

La condición que define a la producción óptima es la siguiente:

$$-\frac{\partial f^2}{\partial y_1^2} = \frac{p_1}{p_2}, \quad (2.10)$$

Un rápido análisis de las CPO's obtenidas nos muestra que las decisiones respecto al equilibrio competitivo en la economía no consideran los efectos que las externalidades generan. Esta ineficiencia en la asignación óptima debe ser corregida por el regulador.

2.3 Modelo con dos externalidades y dos mercados de derechos de contaminación

El punto clave de este modelo es sentar las bases de la recuperación del óptimo en el sentido de Pareto para una economía distorsionada debido a la presencia de externalidades. Partimos de los supuestos sobre los agentes involucrados en la economía establecidos antes, y operamos con el fin de obtener las condiciones que caracterizan a un equilibrio competitivo de propiedad privada.

Las externalidades están reflejadas en la función de producción de la central limpia, de modo que esta sea afectada por la producción de energía sucia y por el consumo de esta energía. Matemáticamente estos efectos toman la forma de la siguiente expresión para la función de producción de la empresa limpia:

$$y_2^2 = f^2(y_1^2, y_1^1, x_1),$$

es decir, la producción de la central limpia está siendo afectada por el consumo y producción de energía sucia. Entonces, los problemas que enfrentan los tres agentes de nuestra economía son los siguientes:

2.3.1 Consumidores.

Nuevamente los consumidores enfrentan el problema de maximización de su utilidad, restringidos por su presupuesto. Como el daño que generan en la sociedad al afectar a la producción de la central limpia debe ser internalizado por el regulador, tenemos una restricción adicional que contiene dicho efecto. Esto da como resultado resolver el siguiente programa:

$$\underset{x_1^*, x_2^*}{Max} \quad \{U(x_1, x_2)\} \quad (2.11)$$

$$\text{sujeto a} \quad p_1 x_1 + p_2 x_2 + p_1^{12} x_1^{12} = R \quad (2.12)$$

$$x_1 = x_1^{12}, \quad (2.13)$$

Vemos en la ecuación que corresponde a la restricción presupuestaria que el término $-p_1^{12} x_1^{12}$ corresponde al gasto en el que debe incurrir el consumidor para adquirir derechos de contaminación, con el fin de subsanar el consumo de bien contaminante. El problema puede reducirse a resolver el siguiente Lagrangiano:

$$\mathcal{L} = U(x_1, x_2) + \lambda (R - p_1 x_1 - p_2 x_2 - p_1^{12} x_1) \quad (2.14)$$

las condiciones de primer orden que obtenemos luego de derivar el Lagrangiano son:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_1} = \frac{\partial U}{\partial x_1} + \lambda(-p_1 - p_1^{12}) = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_2} = \frac{\partial U}{\partial x_2} + \lambda(-p_2) = 0. \quad (2.16)$$

Eliminando al multiplicador de Lagrange, obtenemos la siguiente relación:

$$\frac{\partial U/\partial x_1}{\partial U/\partial x_2} = \frac{p_1 + p_1^{12}}{p_2}, \quad (2.17)$$

esta expresión la vamos a usar más adelante.

2.3.2 Central sucia.

Para la central sucia, análogamente al problema con una sola externalidad, los beneficios de esta central disminuyen por el pago que tiene que hacer a la sociedad para subsanar la externalidad que ya ha provocado:

$$\underset{y_1^1, y_2^1}{Max} \quad \{p_1 y_1^1 + p_2 y_2^1 - q_1^{12} y_1^{12}\} \quad (2.18)$$

$$\text{Sujeto a} \quad y_1^1 = f^1(y_2^1) \quad (2.19)$$

$$y_1^{12} = y_1^1 \quad (2.20)$$

Sustituir las restricciones en la función de beneficios nos lleva a resolver una optimización libre sobre la variable y_2^1 , es decir, el problema puede reducirse a resolver la siguiente maximización:

$$Max \quad \{p_1 f^1(y_2^1) + p_2 y_2^1 - q_1^{12}\} \quad (2.21)$$

Derivamos la ecuación anterior respecto de la variable de interés y obtenemos que:

$$p_1 \frac{df^1}{dy_2^1} + p_2 - q_1^{12} \frac{df^1}{dy_2^1} = 0, \quad (2.22)$$

Podemos reescribir esta ecuación de una forma más adecuada para los fines de nuestro análisis:

$$p_2 = \frac{df^1}{dy_2^1} (q_1^{12} - p_1) \quad (2.23)$$

En un principio esta expresión, así como la 2.17 no tienen un sentido económico, por ello debemos esperar a que todos los agentes resuelven sus respectivos problemas de optimización, aguardemos a las condiciones que nos da el problema de la central limpia y con ayuda del álgebra escribamos expresiones que podamos interpretar.

2.3.3 Central limpia.

La central generadora de energía limpia es el agente perjudicado en esta economía, es decir, su conjunto de producción es afectado debido a la presencia del proceso productivo y del consumo de la central sucia y del consumidor, respectivamente. Entonces el problema que resolverá la central limpia es:

$$Max \quad \{p_1 y_1^2 + p_2 y_2^2 + q_1^{12} \hat{y}_1^{12} + p_1^{12} \hat{x}_1^{12}\} \quad (2.24)$$

$$\text{sujeto a} \quad y_2^2 = f^2(y_1^2, y_1^1, x_1), \quad (2.25)$$

Aquí las cantidades $\hat{x}_1^{12}, \hat{y}_1^{12}$ corresponden a la parte de la oferta en el mercado de CELs, no obstante como supuesto para alcanzar una asignación óptima debemos asumir que los mercados cumplen la condición de vaciado, esto nos lleva a que $\hat{x}_1^{12} = x_1^{12}$ y $\hat{y}_1^{12} = y_1^{12}$. Sustituimos las restricciones en la función de beneficios y resolvemos la maximización libre;

$$Max \quad \{p_1 y_1^2 + p_2 f^2(y_1^2, y_1^1, x_1) + q_1^{12} y_1^1 + p_1^{12} x_1^{12}\} \quad (2.26)$$

Para este caso tenemos tres variables de interés, y por tanto calculamos tres condiciones de primer orden:

$$p_2 \frac{\partial f^2}{\partial y_1^2} + p_1 = 0 \quad (2.27)$$

$$p_2 \frac{\partial f^2}{\partial y_1^1} + q_1^{12} = 0 \quad (2.28)$$

$$p_2 \frac{\partial f^2}{\partial x_1} + p_1^{12} = 0. \quad (2.29)$$

Para obtener las condiciones que nos aseguran un óptimo, en términos de cantidades conocidas vamos a reducir las ecuaciones que hemos obtenido de resolver los problemas de maximización de los agentes, entonces de la ecuación 2.17 y en conjunto con la ecuación 2.29 nos permitirá escribir la condición óptima que define la decisión que maximizará la utilidad del consumidor:

$$\frac{\frac{\partial U}{\partial x_1} + \frac{\partial U}{\partial x_2} \frac{\partial f^2}{\partial x_1}}{\frac{\partial U}{\partial x_2}} = \frac{p_1}{p_2}, \quad (2.30)$$

Esta ecuación coincide con la caracterización de la asignación que resulta ser óptima en el sentido de Pareto, es decir, el hecho de añadir el mercado de CEL transforma al mercado energético compuesto por producción y consumo de energía sucia y limpia en un mercado eficiente y que consigue asignaciones óptimas por el lado del consumidor.

Ahora toca el turno de combinar las ecuaciones 2.28 y 2.23, para obtener la siguiente expresión:

$$1 + \frac{\frac{df^1}{dy_2^1} \frac{\partial f^2}{\partial y_1^1}}{\frac{df^1}{dy_2^1}} = \frac{p_1}{p_2}, \quad (2.31)$$

recordemos que el resultado anterior corresponde a la tasa técnica de sustitución. Aún no hemos usado el total de nuestras ecuaciones, por lo que tomamos la que queda 2.29 y decimos que:

$$-\frac{\partial f^2}{\partial y_1^2} = \frac{p_1}{p_2}. \quad (2.32)$$

Con esto tenemos completas las ecuaciones que describen a las decisiones óptimas de los agentes en la economía, fue creado un mecanismo que lleva a la igualdad entre los costos sociales generados por la presencia de externalidades y las decisiones definidas por las tasas marginal de sustitución y técnica de transformación.

2.4 Fusión de los mercados en un modelo con dos externalidades.

En esta sección vamos a hacer un cambio al modelo bajo la presencia de dos externalidades, una de consumo y una de producción. El cambio consta de la agregación de la demanda de CEL en un solo mercado, matemáticamente $\phi_{CEL} + y_{CEL} = \psi$. Estas cantidades representan a la demanda de CEL: ϕ_{CEL} la cantidad de CEL que demanda el consumo y y_{CEL} la demanda de la central sucia. ψ es la cantidad de CEL ofrecida por la central limpia. Esta ecuación representa a la condición única de vaciado de mercado. Entonces los problemas que resuelven los agentes son los siguientes:

$$\text{Consumidores:} \quad \underset{x_1^*, x_2^*}{Max} \quad \{U(x_1, x_2)\} \quad (2.33)$$

$$\text{sujeto a} \quad p_1 x_1 + p_2 x_2 + p_{CEL} \phi_{CEL} = R \quad (2.34)$$

$$\phi_{CEL} = x_1, \quad (2.35)$$

$$\text{Central sucia: } \underset{y_1^*, y_2^*}{Max} \{p_1 y_1^1 + p_2 y_2^1 - p_{CEL} y_{CEL}\} \quad (2.36)$$

$$\text{Sujeto a } y_1^1 = f^1(y_2^1) \quad (2.37)$$

$$y_{CEL} = y_1^1 \quad (2.38)$$

$$\text{Central limpia: } \underset{y_1^2, y_2^2}{Max} \{p_1 y_1^2 + p_2 y_2^2 + p_{CEL} \psi\} \quad (2.39)$$

$$\text{sujeto a } y_2^2 = f^2(y_1^2, y_1^1, x_1), \quad (2.40)$$

La solución a este modelo es análogo al anterior, los agentes maximizan su respectiva función de interés y obtienen condiciones óptimas sobre las cuales basan su decisión de consumo/producción. Las condiciones obtenidas son casi idénticas al modelo original, el cambio es que la distorsión generada por consumidores y centrales sucias tiene el mismo nivel. Esto lo vemos en las siguientes ecuaciones:

$$-\frac{\partial f^2}{\partial y_1^1} = \frac{p_{CEL}}{p_2} \quad (2.41)$$

$$-\frac{\partial f^2}{\partial x_1} = \frac{p_{CEL}}{p_2}. \quad (2.42)$$

Las demás condiciones óptimas siguen la misma regla de decisión establecida en las ecuaciones siguientes:

$$\frac{\frac{\partial U}{\partial x_1} + \frac{\partial U}{\partial x_2} \frac{\partial f^2}{\partial x_1}}{\frac{\partial U}{\partial x_2}} = \frac{p_1}{p_2} = - \frac{1 + \frac{df^1}{dy_2^1} \frac{\partial f^2}{\partial y_1^1}}{\frac{df^1}{dy_2^1}} \quad (2.43)$$

Aquí la deducción natural de política es establecer un mecanismo que genere un pago equitativo para los dos agentes que generan la externalidad en la economía.

2.5 Porcentaje de obligación.

Esta variación del modelo es la mas cercana a la realidad explicativa del Mercado de CEL, lo que añadimos ahora es la presencia de un parámetro que mide la obligación de participación en el consumo/producción de energía limpia. Si nos remontamos al marco legal recordaremos que ciertos Participantes adquieren una obligación de consumo/generación de energía limpia. Esa obligación está alineada con las metas ambientales, y aumenta año con año de acuerdo a las disposiciones establecidas en la Ley General de Cambio Climático, este parámetro α corresponde a la obligación de adquisición de CEL.

Los problemas de maximización que deben resolverse en esta variación del modelo son las siguientes:

$$\text{Consumidores: } \underset{x_1^*, x_2^*}{Max} \quad \{U(x_1, x_2)\} \quad (2.44)$$

$$\text{sujeto a } \quad p_1 x_1 + p_2 x_2 + p_{CEL} \phi_{CEL} = R \quad (2.45)$$

$$\phi_{CEL} = \alpha x_1, \quad (2.46)$$

$$\text{Central sucia: } \underset{y_1^*, y_2^*}{Max} \quad \{p_1 y_1^1 + p_2 y_2^1 - p_{CEL} y_{CEL}\} \quad (2.47)$$

$$\text{Sujeto a } \quad y_1^1 = f^1(y_2^1) \quad (2.48)$$

$$y_{CEL} = \alpha y_1^1 \quad (2.49)$$

$$\text{Central limpia: } \underset{y_1^{2*}, y_2^{2*}}{Max} \quad \{p_1 y_1^2 + p_2 y_2^2 + p_{CEL} \psi\} \quad (2.50)$$

$$\text{sujeto a } \quad y_2^2 = f^2(y_1^2, y_1^1, x_1), \quad (2.51)$$

Bajo el mismo significado de las correspondientes variables, las ecuaciones anteriores mues-

tran la interacción entre los agentes del mercado de CEL. Ilustramos la intervención de la política al castigar a los generadores de la externalidad, obligando a un pago directo a los afectados por la presencia de la externalidad. El pago ahora tiene una estructura diferente, los modelos anteriores nos enseñaron que el pago por unidad de energía limpia producida lleva a la economía a un nivel asignativo óptimo en el sentido de Pareto.

Analicemos el caso en el que el regulador impone una sanción a los generadores de la externalidad, pero únicamente por un porcentaje de su producción. Sabemos que en la realidad un castigo por cada unidad de energía sucia producida/consumida es un castigo demasiado fuerte pues el mercado nació a partir de un momento en el que la inercia productiva no contemplaba ningún tipo de remuneración por el daño indirecto que esta producía a la sociedad. Obtenemos las siguientes condiciones que definen al equilibrio:

$$\frac{\frac{\partial U}{\partial x_1} + \alpha \frac{\partial U}{\partial x_2} \frac{\partial f^2}{\partial x_1}}{\frac{\partial U}{\partial x_2}} = \frac{p_1}{p_2} = - \frac{1 + \alpha \frac{df^1}{dy_2^1} \frac{\partial f^2}{\partial y_1^1}}{\frac{df^1}{dy_2^1}} \quad (2.52)$$

El parámetro extra en la condición óptimas respecto a la condición deducida del modelo anterior, ecuación 2.43, tendrá un significado muy importante. De este parámetro α podremos obtener deducciones importantes para nuestros objetivos. Por lo mientras, podemos decir que el valor de α mide el grado en el que los causantes de la externalidad pagan por el daño que generan en la sociedad. En la siguiente sección realizamos un análisis más profundo del significado de los resultados obtenidos.

Capítulo 3

Resultados Teóricos

El objetivo principal de la tesina es representar mediante un modelo de derechos de contaminación en una economía con externalidades al mercado de CELs. Posteriormente, el objetivo es realizar un análisis más profundo de lo que está ocurriendo en el mercado y lo que falta por hacer. Con el fin de generar una capacidad analítica que permita dar sugerencias de política en los diferentes puntos de regulación de dicho mercado. Realizamos un análisis de las expresiones obtenidas en las condiciones óptimas del modelo para cada una de sus variaciones.

3.1 Interpretación de los resultados.

Vamos a analizar las diferentes condiciones óptimas que han resultado en cada uno de los modelos. Vamos a definir el flujo de los resultados de la implementación del modelo y las distintas modificaciones propuestas. En primer lugar buscamos la caracterización de una asignación que cumple con ser un óptimo social. Mostramos que la creación de un mercado de Derechos de Contaminación logra internalizar los efectos de las externalidades, haciendo que el equilibrio roto por la presencia de estas externalidades vuelva a cumplir con las condiciones impuestas por la asignación de Planificador Benevolente.

Las ecuaciones 2.30 y 2.31 representan a las decisiones óptimas de los agentes en el modelo original, estas condiciones provienen de un equilibrio competitivo de propiedad privada. El

resultado principal es que coinciden con las condiciones que provienen de la optimización del Planificador Benevolente, ecuaciones 2.6 y 2.7. Este resultado teórico es muy relevante, pues demuestra que la creación de mercados de derechos de contaminación es una política adecuada para la restauración de la eficiencia asignativa en la economía.

La importancia de este primer planteamiento del modelo es ilustrar la interacción entre los diferentes agentes que componen al mercado de CELs, y notar que los hemos incluido a todos. La creación de dos mercados de derechos de contaminación; uno entre las centrales limpias y las centrales sucias, y otro entre los consumidores y las centrales limpias. Ambos mercados quedan determinado por oferta y demanda, y no mantiene ninguna sobre el otro mercado.

El fenómeno al que representan las ecuaciones de vaciado de mercado no está apartado de la realidad, en verdad el precio de los CELs es determinado en el mercado mediante la oferta y la demanda. En las Reglas de Operación del Mercado los Participantes Obligados realizan posiciones de compra de CELs al mismo tiempo que los acreedores a CEL ofertan sus CELs. Los contratos de compra-venta ocurren en el punto de acuerdo mutuo en precio y cantidad.

La tarea del regulador en el mercado consta de tres actividades: la operación del mercado, asegurar un rango competitivo para el precio, y evitar las prácticas deshonestas entre los participantes del mercado. Fuera de esto, el mercado logra una auto-regulación y mantiene un desarrollo que busca el alcance del beneficio máximo para todos los participantes.

El flujo de los resultados nos lleva a las modificaciones realizadas al modelo, estas modificaciones nos nacen de la necesidad económica de acercarnos lo mejor posible a la descripción completa del mercado de CELs. Primero, justificamos la reducción de la economía a un solo mercado de derechos de contaminación (CEL): en la realidad los Participantes Obligados van al mercado único operado por el CENACE a cumplir con su obligación de adquisición de CELs. Entonces resulta necesario incluir esta información en el modelo que estamos perfeccionando.

El resultado de este cambio en el modelo lo podemos interpretar de las ecuaciones 2.41 y 2.42, debido a que ambos agentes participan en la misma medida en la externalidad, entonces deben aportar en el mismo nivel a la compensación a la central limpia, pues generan el mismo

daño al cumplir con sus actividades, y por lo tanto, la misma distorsión en la economía al momento de calcular las asignaciones.

El punto más importante de esta primera modificación al modelo es: mostrar que la creación de un solo mercado para toda la economía resulta también en una asignación óptima. Es importante señalar un punto muy importante, a estas alturas las restricciones que han sido impuestas sobre los niveles de consumo y producción que generan las externalidades cubren el total de unidades contaminantes, es decir, pagan por cada unidad generada/consumida de energía sucia.

Por un lado, la imposición de la obligación de pago por cada unidad generada/consumida es una buena política económicamente hablando, no obstante, parece ser un costo muy grande que pagar en el corto plazo. Por ello se busca un proceso para llegar a la política óptima de un pago completo por el daño generado. Ambiental y económicamente estaríamos en un óptimo.

La necesidad de transitar a un sistema eléctrico sostenible en cuanto a confiabilidad energética y ambiental obliga a la política a trabajar a marchas forzadas. Esto da lugar a nuestra última modificación, manteniendo todas las características del modelo con dos externalidades y un solo mercado, solo que ahora vamos a introducir el parámetro α , el cual representa a la obligación de adquisición CELs por parte de los Participantes Obligados.

Los resultados de la última modificación van más de la mano con la realidad, la creación de un mercado de derechos de contaminación que acerque a la economía a la asignación socialmente óptima. Por lo mientras hemos demostrado que la creación del mercado de CELs bajo la condición de pago por unidad generada/consumida llevaría a una sociedad. Ahora vamos a estudiar lo qué pasa con α y cómo es interpretable en el mercado real de CELs.

Definimos a α como la obligación ambiental, con $0 \leq \alpha \leq 1$. Donde, $\alpha = 0$ es el resultado de la solución del equilibrio competitivo de propiedad privada sin la introducción de un mercado de derechos de contaminación, es decir, el caso más lejano a una asignación socialmente óptima. Mientras que, $\alpha = 1$ corresponde al óptimo de Pareto con el mercado de derechos de contaminación y la condición de pago por unidad producida.

Ahora interpretamos a esta condición cuando $0 < \alpha < 1$ y vemos que no se alcanzan las

condiciones de óptimo de Pareto, pero es el mecanismo por el cual las dependencias reguladoras pueden acercar a la economía a ese nivel óptimo. Aquí la teoría se combina con la parte empírica y podemos obtener el resultado más importante de esta investigación: un nivel cada vez mayor de obligación llevará a la economía a un nivel asignativo óptimo, además este nivel representado por α cumple con la producción deseable socialmente de emisión de contaminantes iguales a cero.

La presencia del regulador es necesaria, de nada servirá mantener en un nivel muy bajo al parámetro de obligación pues este no generará un beneficio a la sociedad, ni siquiera reparará el daño hecho por la presencia de externalidades. En cuanto a la conjunción de la realidad y la teoría recordamos que de la Ley General de Cambio Climático podemos saber los objetivos de corto y mediano plazo, para los cuales el nivel de obligación van de acuerdo con la figura 1.1, no obstante, para los Participantes del Mercado es necesario que conozcan sus obligaciones pues esto evita un problema de incertidumbre. Puede existir un problema en el momento en que se de algún cambio en la dirección de las políticas, pues el incentivo para la generación limpia puede verse desmantelado y la economía regresaría a un estado lejano a un óptimo social.

Capítulo 4

Conclusiones

Los objetivos ambientales avanzan hacia una mayor participación verde en la generación y consumo total de energía eléctrica. El MEM está comprometido con estas fuentes de energía, pues resultan en un beneficio completo para México y los Participantes con inversión extranjera. Crear un mecanismo de incentivos a la inversión en este rubro es indispensable para el desarrollo adecuado del Sistema Eléctrico Nacional y el bienestar generalizado de los consumidores de energía eléctrica.

De esta forma nacen los Certificados de Energía Limpia y su correspondiente mercado. No obstante, la creación de un mercado desde cero en un ambiente ya establecido puede resultar en complicaciones que no fueron considerados al momento de diseñar el mercado, por ello abordamos el problema con fundamentos de la teoría económica y conseguimos representar en su totalidad y de forma teórica al Mercado de CELs. El objetivo de modelar al mercado de CELs es desarrollar una base para el análisis de futuras políticas: la incorporación de nuevos Participantes, los ajustes en las políticas de obligación, las multas por incumplimiento, o demás decisiones sobre diseño, estructura o regulación del mercado.

Un mercado de derechos de contaminación en sus fundamentos más básicos ha sido capaz de representar al mercado de CELs. El mercado real está en un proceso de consolidación, y por ello es útil estudiarlo y tratar de hacer predicciones sobre su comportamiento. Este trabajo de

investigación abre la puerta a futuras líneas sobre el Mercado de CELs y, en general, al análisis de incentivos para la generación de energía verde.

Una de las vertientes inmediatas es estudiar los efectos que podrían ocasionar la política de ampliación de las centrales limpias, podría existir una sobre-oferta y colapsar el precio de los CELs incluso a su nivel mas bajo permitido por los reguladores. Este problema reduce o inhibe el incentivo a la creación de nuevas plantas, y por lo tanto, genera una desaceleración en el crecimiento de los niveles de participación en la generación limpia, condenando a los usuarios a tarifas no competitivas y niveles menos sanos de contaminación.

Del modelo podemos obtener una conclusión directa: que el parámetro de obligación debe ser lo más pronto posible cercano a su nivel máximo, es decir, debemos transitar a una economía verde en el menor tiempo posible. Es evidente que esto es una tarea ardua, involucre un esfuerzo conjunto entre diferentes sectores económicos. Para tener una mayor participación limpia se requiere la capacidad instalada en centrales limpias. Esto representa una decisión de política acertada desde todos los ángulos con los que se vea, es una fuente de empleos muy grande, genera tarifas eléctricas más competitivas, genera un ambiente menos insalubre debido a la reducción de contaminación y posiciona a México como un país comprometido con las necesidades ambientales globales.

Hasta ahora los datos recabados en la sección 1.4 no dicen mucho respecto al cumplimiento de las metas ambientales pactadas, pero podemos ver que el primer paso a una participación verde se ha dado y los resultados vendrán junto al esfuerzo que los diferentes actores del mercado impriman, los Participantes desde su papel de agentes dentro de la economía, y las diferentes dependencias desde el papel de organizadores y reguladores del mercado.

Apéndice A

Fundamentos teóricos

A.1 Caracterización teórica del bienestar social.

En primer lugar, situémonos en el contexto de la economía pública, el texto de Jean-Jacques Laffont (1988) nos servirá como sustento de nuestro análisis. Sea una economía compuesta por: L bienes de consumo, $l = 1, \dots, L$; I consumidores, $i = 1, \dots, I$; y J productores, $j = 1, \dots, J$. Caracterizamos la participación de cada agente de la siguiente forma:

- X^i es el conjunto de consumo del consumidor i . Donde x_l^i es la cantidad x del bien l para el consumidor i , $x^i \in \mathbb{R}_{++}^L$. $U^i(\cdot)$ representa a las preferencias del consumidor i , esta función nace de la existencia de un preorden completo dentro de X^i , es decir, $x^{i1} R^i x^{i2} \iff U^i(x^{i1}) \succeq U^i(x^{i2})$. Posee además una dotación inicial $w^i \in \mathbb{R}_+^L$.
- Y^j es el conjunto de producción de la empresa j . Con y^j el vector de producción de la empresa j , $y^j = (y_1^j, \dots, y_L^j)$, los beneficios de las empresas son: $p \cdot y^j = \sum_{l=1}^L p_l y_l^j$, para $p \in \mathbb{R}_{++}^L$ el vector de precios. La convención nos dice que los insumos tienen signo negativo y los bienes producidos signo positivo. La tecnología de las empresas se define por la función de producción de cada bien j , $f^j(y^j) = 0$.

Un vector de precios $p^* \in \mathbb{R}_{++}^L$ junto a una asignación $(x^{1*}, \dots, x^{I*}, y^{1*}, \dots, y^{J*})$, que logren una maximización en las funciones de interés de los agentes, es decir, existen y^{*j} 's tales

que sean maximizados los beneficios $\forall j$, existen x^{*i} 's tales que determinen un máximo en las funciones de utilidad $U^i(x^{*i})$, $\forall i$; además de cumplirse la condición de vaciado de mercado $\sum_{i=1}^I x^{*i} = \sum_{j=1}^J y^{*j} + \sum_{i=1}^I w^i$, en conjunto estos parámetros definen a un *equilibrio competitivo de propiedad privada*.

Además es necesario conocer las condiciones que deben cumplirse para la existencia de un óptimo social, para ello abordamos la teoría del bienestar:

Definición 1. *Asignación factible*: es el conjunto $(x^1, \dots, x^I, y^1, \dots, y^J)$ que satisface las condiciones; $x^i \in X^i$, $y^j \in Y^j$ y $\sum_{i=1}^I x^i \leq \sum_{j=1}^J y^j + \sum_{i=1}^I w^i$, para todas $i = 1, \dots, I$, $j = 1, \dots, J$.

Definición 2. *Asignación óptima en el sentido de Pareto*: es una asignación factible, $(x^1, \dots, x^I, y^1, \dots, y^J)$, tal que, no existe otra asignación factible que da mayor utilidad a alguno de los consumidores sin afectar, al menos a uno de ellos.

Teorema 1. Primer Teorema de Bienestar Si $U^i(\cdot)$ es estrictamente creciente entonces la condición de equilibrio competitivo, si esta existe, resulta en una asignación óptima en el sentido de Pareto.

Teorema 2. Segundo Teorema de Bienestar Si $U^i(\cdot)$ es continua, cuasi-cóncava y estrictamente creciente en el conjunto de consumo, con $w_l^i > 0$. $\forall i, \forall l$ y, si Y^j es convexo $\forall j$, para una asignación $(x^{*1}, \dots, x^{*I}, y^{*1}, \dots, y^{*J})$ óptima en el sentido de Pareto, entonces existe un vector de precios $p^* \in \mathbb{R}_{++}^L$ tal que: los consumidores maximizan $U^i(\cdot)$ en el conjunto de consumo X^i y satisfaga su restricción presupuestaria, además y^{*j} maximiza los beneficios de las empresas en $Y^j \forall j$.

Apéndice B

Solución completa al problema social con presencia de externalidades.

Deducción completa de la condición óptima social, desde el punto de vista del planificador benevolente. El problema nace de la necesidad de encontrar una asignación que maximice la utilidad social, el problema se resuelve para el caso de una economía compuesta por dos bienes, dos productores y un consumidor. Describimos a los agentes participantes dentro de la economía a continuación:

- **Consumidor.** Describe sus preferencias con una función de utilidad $U^i(x^i)$, la cual representa a un preorden completo¹, $x^i = (x_1^i, \dots, x_L^i)$ es el vector de consumo para todos los bienes, en nuestra economía resulta en un vector $x^1 = (x_1, x_2)$. Posee una dotación inicial, $w^i = (w_1, w_2)$, y cumple con su restricción presupuestaria.
- **Productor.** Existen dos tipos de empresas que proveen a la economía de bienes, de tal forma que y_l^j es la cantidad producida por la empresa j del bien l , el fin de las empresas es maximizar sus beneficios sujeto a su tecnología, representamos a la tecnología con la función de producción $f^j(\cdot)$, en nuestra economía las funciones de producción tienen la

¹Una relación binaria dentro de un conjunto X es un preorden si cumple con la propiedad de reflexividad y transitividad, es decir, $x \succeq x, \forall x \in X$ y si $x \succeq y$ y $y \succeq z \rightarrow x \succeq z$. Además, este preorden es completo si se cumple para todos los elementos en el conjunto.

siguiente estructura;

- $y_1^1 = f^1(y_2^1)$,
- $y_2^2 = f^2(y_1^2, y_1^1, x_1)$.

Ambas son diferenciables y cóncavas. ²

Entonces dada la estructura de la economía vamos a buscar la asignación que nos lleve al óptimo de Pareto, que en este caso se obtiene de resolver el siguiente programa:

$$\underset{x_1^*, x_2^*}{Max} \quad U(x_1, x_2) \tag{B.1}$$

$$\text{sujeto a} \quad y_1^1 + y_1^2 + w_1 - x_1 \geq 0 \tag{B.2}$$

$$y_2^1 + y_2^2 + w_2 - x_2 \geq 0 \tag{B.3}$$

$$-y_1^1 + f^1(y_2^1) \geq 0 \tag{B.4}$$

$$-y_2^2 + f^2(y_1^2) \geq 0 \tag{B.5}$$

Para resolver este problema escribimos el lagrangiano asociado a la maximización:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\cdot) = & U(x_1, x_2) + \lambda_1 (y_1^1 + y_1^2 + w_1 - x_1) + \lambda_2 (y_2^1 + y_2^2 + w_2 - x_2) \\ & + \mu_1 (-y_1^1 + f^1(y_2^1)) + \mu_2 (-y_2^2 + f^2(y_1^2)). \end{aligned}$$

Los multiplicadores λ_1 , λ_2 , μ_1 y μ_2 son los multiplicadores de Kuhn-Tucker asociados a cada restricción en A.2–A.6, y calculamos las condiciones de primer orden, así como las condiciones de Kuhn-Tucker del lagrangiano:

²Recordemos que el fin del productor es maximizar sus beneficios, que en este modelo son $\sum_i p_i * y_i^j$ puesto que y es positivo cuando hablamos de productos y negativo cuando hablamos de insumos,

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\cdot)}{\partial x_1} = \frac{\partial U(x_1, x_2)}{\partial x_1} - \lambda_1 + \mu_2 \frac{\partial f^2}{\partial x_1} = 0 \quad (\text{B.6})$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\cdot)}{\partial x_2} = \frac{\partial U(x_1, x_2)}{\partial x_2} - \lambda_2 = 0 \quad (\text{B.7})$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\cdot)}{\partial y_1^1} = \lambda_1 + \mu_2 \frac{\partial f^2}{\partial y_1^1} - \mu_1 = 0 \quad (\text{B.8})$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\cdot)}{\partial y_2^1} = \lambda_2 + \mu_1 \frac{\partial f^2}{\partial y_2^1} = 0 \quad (\text{B.9})$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\cdot)}{\partial y_1^2} = \lambda_1 + \mu_2 \frac{\partial f^2}{\partial y_1^2} = 0 \quad (\text{B.10})$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}(\cdot)}{\partial y_2^2} = \lambda_2 - \mu_2 = 0 \quad (\text{B.11})$$

Estas ecuaciones son suficientes para resolver el problema de la asignación óptima, esto porque dadas las propiedades de las funciones de utilidad y de las funciones de producción, se cumple que los multiplicadores de Kuhn-Tucker están todos activados, es lo mismo decir que las restricciones saturan y se cumplen con igualdad, por la que podemos resolver las ecuaciones simultaneas para hallar las relaciones óptimas.

Ahora de la ecuación B.11 tenemos que $\lambda_2 = \mu_2$, además de B.7 tendríamos que $\lambda_2 = \mu_2 = \frac{\partial U}{\partial x_2}$, y si sustituimos esto en la ecuación B.6 obtenemos que:

$$\frac{\partial U}{\partial x_1} + \frac{\partial U}{\partial x_2} \frac{\partial f^2}{\partial x_1} = \lambda_1,$$

y si tomamos las ecuaciones B.11 y B.7 $\lambda_2 = \frac{\partial U}{\partial x_2} \frac{\partial f^2}{\partial y_1^2}$, si tomamos la expresión anterior y sustituimos el resultado obtenido en esta línea:

$$\frac{\partial U}{\partial x_1} + \frac{\partial U}{\partial x_2} \frac{\partial f^2}{\partial x_1} = - \frac{\partial U}{\partial x_2} \frac{\partial f^2}{\partial y_1^2}.$$

Reordenando la expresión anterior llegamos a la expresión que define a la tasa marginal de sustitución para el óptimo del consumidor:

$$\frac{\frac{\partial U}{\partial x_1} + \frac{\partial U}{\partial x_2} \frac{\partial f^2}{\partial x_1}}{\frac{\partial U}{\partial x_2}} = - \frac{\partial f^2}{\partial y_1^2}, \quad (\text{B.12})$$

Ahora vamos con las condiciones de primer orden que no hemos tomado en cuenta, de la ecuación B.10 tenemos que $\lambda_1 = -\mu_2 \frac{\partial f^2}{\partial y_1^2}$, y de la ecuación B.9 $-\mu_1 = \lambda_2 \left(\frac{df^1}{dy_2^1} \right)^{-1}$, al tomar estas dos expresiones y sustituirlas en la ecuación B.8 obtenemos:

$$\frac{\partial U}{\partial x_2} \frac{\partial f^2}{\partial y_1^2} = \frac{\partial U}{\partial x_2} \frac{\partial f^2}{\partial y_1^1} + \frac{\partial U}{\partial x_2} \left(\frac{df^1}{fy_2^1} \right)^{-1} \quad (\text{B.13})$$

Reordenando podemos obtener la condición óptima para la solución desde el punto de vista del planificador benevolente:

$$\frac{\partial f^2}{\partial y_1^2} = \frac{1 + \frac{df^1}{dy_2^1} \frac{\partial f^2}{\partial y_1^1}}{\frac{df^1}{dy_2^1}}. \quad (\text{B.14})$$

Las ecuaciones B.12 y B.14 definen a la tasa marginal de sustitución y a la tasa técnica de sustitución, respectivamente.

Apéndice C

Datos e Información del Mercado de Certificados de Energía Limpia

Uno de los avances más importantes del Mercado de CEL ha sido el aumento en la inversión en energía limpia, esto lo podemos ver en la figura C.1, donde se muestra la capacidad instalada por rubro y que hace evidente que existe en aumento en los niveles netos de participación de generación limpia/renovable.

| Descripción | Unidad | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|-----------------------------|--------|------|------|------------|------------|------------|
| Tecnología | | | | | | |
| Convencional | | N/D | N/D | 54,491.591 | 58,243.511 | 56,066.171 |
| Ciclo combinado | | N/D | N/D | 30,125.437 | 33,726.437 | 34,281.097 |
| Termoeléctrica convencional | | N/D | N/D | 11,711.570 | 11,711.570 | 8,295.570 |
| Carboeléctrica | | N/D | N/D | 5,378.360 | 5,507.090 | 5,507.090 |
| Turbogás | | N/D | N/D | 5,061.700 | 5,061.650 | 5,745.650 |
| Combustión Interna | | N/D | N/D | 1,634.524 | 1,656.764 | 1,656.764 |
| Lecho fluidizado | | N/D | N/D | 580.000 | 580.000 | 580.000 |
| Importación | | N/D | N/D | N/D | N/D | N/D |
| Limpia | | N/D | N/D | 25,007.356 | 29,192.755 | 31,902.755 |
| Renovable | | N/D | N/D | 20,453.250 | 24,637.650 | 27,347.650 |
| Hidroeléctrica | | N/D | N/D | 12,642.287 | 12,670.967 | 12,670.967 |
| Eólica | | N/D | N/D | 4,875.375 | 6,590.875 | 8,127.575 |
| Geotérmica | | N/D | N/D | 950.600 | 935.600 | 905.600 |
| Solar Fotovoltaica | | N/D | N/D | 1,970.988 | 4,426.208 | 5,629.508 |
| Termosolar | | N/D | N/D | 14.000 | 14.000 | 14.000 |
| Otras | | N/D | N/D | 4,554.106 | 4,555.105 | 4,555.105 |
| Nucleoeléctrica | | N/D | N/D | 1,608.000 | 1,608.000 | 1,608.000 |
| Bioenergía | | N/D | N/D | 1,009.986 | 1,009.986 | 1,009.986 |
| Cogeneración eficiente | | N/D | N/D | 1,929.510 | 1,930.509 | 1,930.509 |
| Frenos regenerativos | | N/D | N/D | 6.610 | 6.610 | 6.610 |
| Total | | N/D | N/D | 79,498.947 | 87,436.266 | 87,968.926 |

Fuente: PRODESEN 2018-2032.

Figura C.1: Datos de 2018 a 2020 de la capacidad eléctrica instalada en México. Fuente: PRODESEN 2018-2032.

| Central limpia 2018 | Central limpia nueva 2019 |
|---|--|
| CFE Generación III-Central Nucleoeléctrica Laguna Verde | 174 PG Torreón S. de R.L. de C.V. |
| PIASA Cogeneración | Ahumada IV Solar PV S.A. de C.V. |
| Eosol Energy de México S.A.P.I. de C.V. | AT Solar V S. de R.L. de C.V. |
| BioPappel Scribe | Avant Energías Renovables I S.A.P.I. de C.V. |
| Ammper Generación | B-Energy Industries S.A. de C.V. |
| Parque Solar Villanueva | BNB Villa Ahumada Solar S. de R.L. de C.V. |
| Parque Solar Villanueva 3 | CE G Sanborns S.A. de C.V. |
| Parque Don José | Bluemex Power I S.A. de C.V. |
| Generadora Fénix | Central Progreso S.A. de C.V. |
| Fortius Electromecánica S.A. de C.v. | EPS CFE Generación III |
| Energía Renovable del Istmo II, S.A. de C.V. | EPS CFE Generación V |
| Parras Cone de México, S. de R.L. de C.V. | EPS CFE Generación VI |
| Parque Ecológico Reynosa III, S.A.P.I. de C.V. | Compañía Cervecera de Coahuila S. de R.L. de C.V. |
| Solar Park Viborillas S. de R.L. de C.V. | EGP Magdalena Solar S.A. de C.V. |
| Servicios y Energía México SYEM, S.A.P.I. de C.V. | Energía Eléctrica de Chihuahua S.A. de C.V. |
| Fisterra Energy Santa María 1, S.A.P.I. de C.V. | Energía Sierra Juárez Holding S. de R.L. de C.V. |
| Fuerza y Energía Limpia de Tizimin S.A. de C.V. | Energía Solar San Ignacio S. de R.L. de C.V. |
| Operadora Tecnoambiental SEA, S.A. de C.V. | Energía Solar Sonorense S.A. de C.V. |
| Cubico Alten Aguascalientes Uno | Engie Eólica Tres Mesas 3 S.A. de C.V. |
| Cubico Alten Aguascalientes Dos | Eólica Mesa La Paz S. de R.L. de C.V. |
| | ESJ Renovable I S. de R.L. de C.V. |
| | ESJ Renovable II S. de R.L. de C.V. |
| | Fisterra Energy Orejana S. de R.L. de C.V. |
| | Fotovoltaica de Ahumada S.A. de C.V. |
| | FRV Potosí Solar S. de R.L. de C.V. |
| | FV Mexsolar I S.A.P.I. de C.V. |
| | FV Mexsolar II S.A.P.I. de C.V. |
| | Givaudan de México S.A. de C.V. |
| | Granjas Carroll de México S. de R.L. de C.V. |
| | Helios Generación S. de R.L. de C.V. |
| | Iberdrola Renovables Centro S.A. de C.V. |
| | Iberdrola Renovables Noroeste S.A. de C.V. |
| | Impulsora Azucarera del Trópico S.A. de C.V. |
| | Ingenio San Francisco Ameca S.A. de C.V. |
| | Ingredion México S.A. de C.V. |
| | La Trinidad Solar dos S.A.P.I. de C.V. |
| | La Trinidad Solar uno S.A.P.I. de C.V. |
| | Lamosa Energía de Monterrey S.A. de C.V. |
| | Parque Eólico el Mezquite S.A.P.I. de C.V. |
| | Parque Solitrillos S.A. de C.V. |
| | Pasteurizadora Maulec S.A.P.I. de C.V. |
| | Photoemeris Sustentable S.A. de C.V. |
| | Productora Yoreme S.P.R. de R.L. |
| | Rancho el Trece Solar S.A. de C.V. |
| | Recurrent Energy Mexico Development S. de R.L. de C.V. |
| | Recursos Solares PV de México IV S.A. de C.V. |
| | Ronal San Luis S.A. de C.V. |
| | Sobormex S.A. de C.V. |
| | Sky EPS Supply SM S.A. de C.V. |
| | Tai Durango I, II, III, IV y V S.A.P.I. de C.V. |
| | Tizayuca Textil Vuva S.A. de C.V. |
| | Torreñitos Solar S.A. de C.V. |
| | Tractebel Energía Monterrey S. de R.L. de C.V. |
| | Tuli Energía S.A. de R.L. de C.V. |
| | Tuto Energía II S.A.P.I. de C.V. |
| | Vega Solar S.A. de C.V. |
| | Villanueva Solar S.A. de C.V. |

Tabla C.1: Lista de Centrales Generadoras Limpias 2018-2019. Fuente. elaboración propia con datos de la CRE obtenidos en el Sistema de CEL (S-CEL).

Referencias

- Armstrong, M.; Cowan, S. & Vickers J. (1994). *Regulatory Reform: Economic Analysis and British Experience*. Cambridge: MIT Press.
- Congreso de la Unión. *Ley de la Industria Eléctrica*. Diario Oficial de la Federación (DOF). 11 de agosto de 2014.
- Congreso de la Unión. *Ley General de Cambio Climático*. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada en 13-07-2018.
- Congreso de la Unión. *Programa Nacional de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional*. 2018-2033 y 2019-2033.
- Ibarra-Yunez, Alejandro. Energy reform in Mexico: Imperfect unbundling in the electricity sector. *Utilities Policy* 35. (2015) 19-27.
- Erin, Pischkea, Barry Solomona, Adam Wellsteada, Alberto Acevedob, Amarella Eastmondc, Fernando De Oliveirad, Suani Coelhod, Oswaldo Lucond. From Kyoto to Paris: Measuring renewable energy policy regimes in Argentina, Brazil, Canada, Mexico and the United States. *Energy Research & Social Science* 50 (2019) 82–91.
- Laffont, Jean-Jacques. "Fundamentals of Public Economics," MIT Press Books, The MIT Press, edition 1, volume 1, number 0262121271, August 1988.
- Sarmiento, L.; Burandt, T.; Löffler, K.; Oei, P.-Y. Analyzing Scenarios for the Integration of Renewable Energy Sources in the Mexican Energy System—An Application of the Global

Energy System Model (GENeSYS-MOD). *Energies* 12, (2019), 3270.