



EL COLEGIO DE MÉXICO CENTRO DE ESTUDIOS ECONÓMICOS

LICENCIATURA EN ECONOMÍA

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN ECONOMÍA

**EL ACUERDO PARA MODIFICAR LOS LINEAMIENTOS
PARA LA ADQUISICIÓN DE CERTIFICADOS DE
ENERGÍAS LIMPIAS Y SUS CONSECUENCIAS PARA
LOS PRODUCTORES DE ENERGÍA RENOVABLE.**

MICHELLE BOTELLO MOLINA

PROMOCIÓN 2016-2020

ASESOR:

DR. JAIME SEMPERE CAMPELLO

ABRIL 2021



Agradecimientos.

A mis padres, que son la forma en la que Dios se hace presente en mi vida. Gracias por apoyarme incondicionalmente en todas y cada una de mis decisiones de vida, y por siempre buscar lo mejor para mí. Gracias por ser mi mayor fuente de inspiración. Sin ustedes no hubiese podido ser escrita ninguna de las palabras contenidas en este trabajo.

A mis hermanas por su apoyo y empatía, y por siempre creer en mí. Son las mejores amigas que he podido tener.

A mi asesor de tesis, el Dr. Jaime Sempere, por haberme permitido recurrir a él como guía durante este proceso. Gracias por sus consejos, su apoyo y su invaluable asesoría.

A Don Beto, un guerrero que luchó contra el cáncer hasta el final. Maestro de vida, mi mejor consejero y quien siempre buscó sacarme una sonrisa aún en los momentos más difíciles.

A Doña Adelina, quien siempre está dispuesta a escucharme y con quien tengo las mejores pláticas de mi vida. Me llenas el corazón, abue.

A mis amigos, quienes me han apoyado académica y personalmente. A Charles y a Vic Delgado por involucrarse para ayudarme a sacar esto adelante.

A la Dra. Diana Terrazas por sus comentarios y valiosas aportaciones para la elaboración de este trabajo.

Y a El Colegio de México por haber confiado en mí y haberme permitido conocer a los excelentes docentes del Centro de Estudios Económico. Por haberme dado la oportunidad de formarme en una institución de calidad y rodeada de un profesorado excepcional.

Resumen.

Este trabajo presenta un modelo secuencial que toma en cuenta los elementos del mercado eléctrico oligopolístico y los elementos básicos de un mercado de certificados verdes negociables, en el cual se fija una cuota anual obligatoria a los suministradores y la generación de electricidad limpia equivale a la producción de certificados. El fin no es comparar dos esquemas de incentivos ni obtener la caída exacta en el precio de los CELS. Con la solución del modelo y un ejercicio de estática comparativa se busca entender cuál es el mecanismo mediante el que las modificaciones en los lineamientos para adquirir CELs afectan a los productores privados de energía limpia, tanto en el mercado eléctrico como en el de certificados, tomando en cuenta las características del mercado eléctrico mexicano.

Se encuentra que las modificaciones en los lineamientos implican un incremento en la oferta de CELs, lo que provoca una caída en el precio de los mismos, se reduce la producción de electricidad limpia, y hasta puede causar que las empresas renovables cierren y salgan del mercado. Así, el cambio regulatorio desvirtúa los incentivos al desarrollo de tecnologías renovables y tiene resultados contrarios a los esperados de la implementación del mecanismo de certificados verdes.

Índice

1. Introducción	4
2. La industria eléctrica mexicana y el mercado de CELs	6
2.1. México y la energía eléctrica	6
2.2. Estructura de la industria eléctrica en México	8
3. Experiencias internacionales relacionadas con el cambio en la oferta de certificados	11
3.1. Certificados de Energías Renovables en el Consejo de Coordinación de Electricidad del Oeste, Estados Unidos	11
3.2. Italia	13
3.3. Rumanía	14
3.4. Polonia	15
3.5. Reino Unido	16
4. Modelo del mercado eléctrico oligopolístico con un sistema de cuotas basado en certificados verdes	17
4.1. El modelo general	18
4.2. Resolución del modelo	21
4.2.1. El mercado eléctrico	21
4.2.2. El mercado de certificados	23
4.2.3. Elementos de comparación con el planteamiento realizado por Ciarreta et. al (2017)	25
4.3. Estática comparativa: un aumento en la oferta de certificados	28
5. Discusión: Implicaciones de política económica	29
6. Conclusión	32

1. Introducción

En las últimas décadas, las preocupaciones por las consecuencias de la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles se han convertido en un tema importante tanto en el discurso público como en la literatura. Estas preocupaciones van desde las dificultades para alcanzar la seguridad energética, hasta los daños medioambientales y en la salud pública. Dichas inquietudes han sido clave para el desarrollo y la implementación de políticas cuyos objetivos son reducir el impacto medioambiental y promover la generación eléctrica a partir de fuentes de energía renovable (Perez y col., 2016). Una de ellas, por ejemplo, es el sistema de cuotas, un mecanismo basado en el mercado. Generalmente, este esquema consiste en que una autoridad reguladora fija una cuota obligatoria de energía renovable que debe ser cubierta por los generadores, suministradores o consumidores. Por su parte, los productores de esta electricidad limpia reciben títulos que certifican que dicha energía fue generada a partir de fuentes renovables. Asimismo, estos certificados funcionan como activos que pueden venderse en un mercado especializado, para que quienes son sujetos a la cuota puedan comprarlos y cumplir los objetivos establecidos. En caso de que las obligaciones no se cumplan, los participantes sujetos a la regulación pueden enfrentar multas importantes (Blaga, 2017; Jiménez, 2011; Poputoaia & Fripp, 2008). Este instrumento de política ha sido utilizado en diversas regiones del mundo. De hecho, en México, en diciembre de 2013 se aprobó la reforma energética. En materia eléctrica, dicha reforma permite el acceso de actores privados en la generación y comercialización de energía eléctrica, y se implementa un sistema de cuotas basado en un mercado de certificados verdes. Mediante el mecanismo de Certificados de Energías Limpias (CELs)¹, la Secretaría de Energía (SENER) fija la cuota anual de electricidad que debe producirse a partir de fuentes renovables y se acredita el cumplimiento de las metas de generación mediante la compra y venta de los mismos (Gobierno de México, 2015). Sin embargo, hacia finales de 2019 el gobierno publicó el acuerdo por el que se modifican las fracciones I y II de los Lineamientos que establecen los criterios para el otorgamiento de Certificados de Energías Limpias de 2014. Dicho cambio implica un aumento repentino en la oferta de CELs, debido a que algunas Centrales Eléctricas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ahora pueden emitir CELs sin importar su fecha de inicio de operación o si realizaron algún proyecto para aumentar su producción de energía

¹La fracción VIII del artículo 3 de la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) define un CEL como un "título emitido por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) que certifica la producción de un monto determinado de energía eléctrica a partir de Energías Limpias y que sirve para cumplir los requisitos asociados al consumo de los Centros de Carga" (LIE, 2020).

limpia.

Este trabajo presenta un modelo secuencial que toma en cuenta los elementos del mercado eléctrico oligopolístico y los elementos básicos de un mercado de certificados verdes negociables, donde se fija una cuota anual obligatoria a los suministradores y la generación de electricidad limpia equivale a la producción de certificados. El fin no es comparar dos esquemas de incentivos ni obtener la caída exacta en el precio de los CELS². Con la solución del modelo y un ejercicio de estática comparativa se busca entender cuál es el mecanismo mediante el que las modificaciones en los lineamientos para adquirir CELs afectan a los productores privados de energía limpia, tanto en el mercado eléctrico como en el de certificados, tomando en cuenta las características del mercado eléctrico mexicano. Se encuentra que las modificaciones en los lineamientos implican un incremento en la oferta de CELs, lo que provoca una caída en el precio de los mismos, reduce la producción de energía renovable, y hasta puede causar que las empresas renovables cierren y salgan del mercado. Así, el cambio regulatorio desvirtúa los incentivos al desarrollo de tecnologías renovables y tiene resultados contrarios a los esperados de la implementación del mecanismo de certificados verdes.

El sistema de cuotas no es el único mecanismo de apoyo directo a las energías renovables en el sector de la electricidad. También existen las Tarifas de Alimentación (FITs³ por sus siglas en inglés), un esquema que consiste en la compra de electricidad a los productores de energía limpia a un precio establecido por una autoridad, generalmente un precio por encima del mercado, durante un determinado periodo de tiempo. Muchas veces estos dos esquemas pueden complementarse con otras políticas de apoyo indirecto, tales como las subvenciones a la inversión, las exenciones fiscales, la facilitación de acceso a la red o los impuestos al consumo (An y col., 2019; Ciarreta y col., 2017; Perez y col., 2016; Poputoaia & Fripp, 2008; Wedzik y col., 2017). Las ventajas y desventajas de cada mecanismo pueden consultarse en Poputoaia & Fripp (2008), Abolhosseini (2014) y Jiménez (2011). La literatura no tiene un consenso sobre qué mecanismo es el mejor para la promoción de la electricidad verde. Las experiencias con estas políticas dependen mucho del marco legislativo y económico de cada país.

En la siguiente sección se explica con mayor detalle la forma en que está estructurado el sistema eléctrico mexicano y el mercado de CELs. En la sección 3 se discuten experiencias internacionales relacionadas con el incremento en la oferta de certificados verdes en el sistema

²Dado que algunas consultoras privadas, como Antuko, ya han trabajado en estos temas con información privada de algunas empresas y novedosas herramientas cuantitativas.

³Feed-in Tariffs.

de cuotas. En la sección 4 se presenta el modelo que permite entender las interacciones del mercado eléctrico con el mercado de certificados y, mediante la estática comparativa, se estudian las posibles consecuencias de un aumento en la oferta de CELs. En la sección 5 se discuten las implicaciones de política económica y, finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas del trabajo presente.

2. La industria eléctrica mexicana y el mercado de CELs

2.1. México y la energía eléctrica

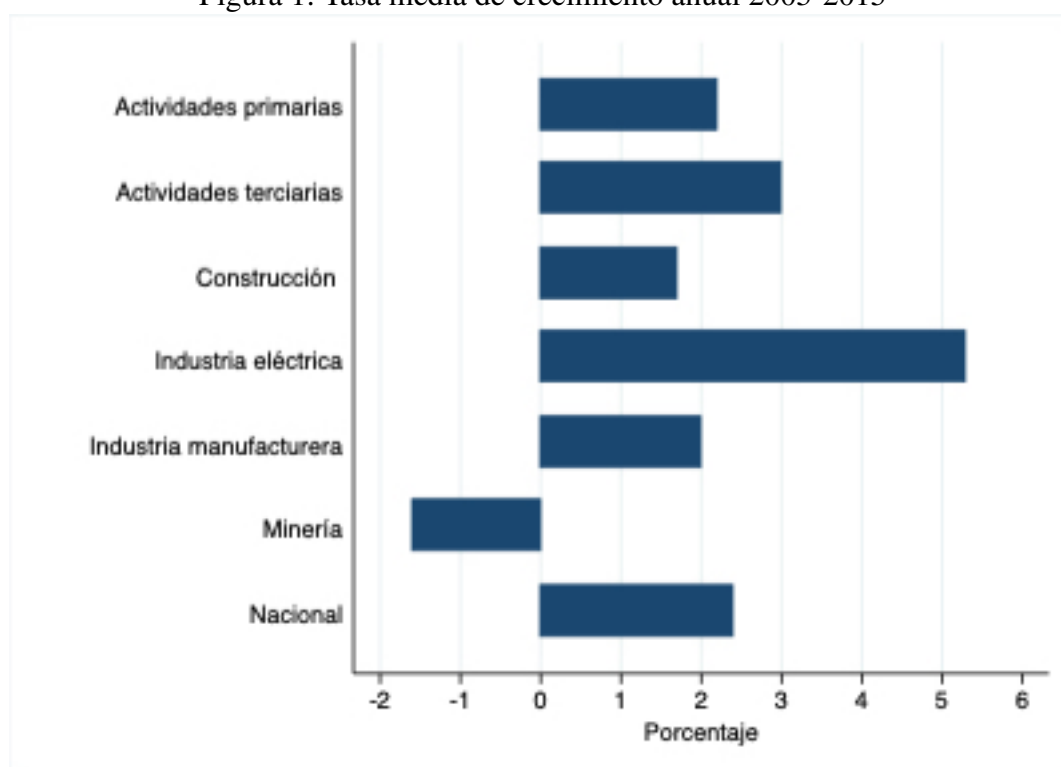
La energía eléctrica es importante debido a su doble papel, pues es tanto un insumo como un bien final. Suministrar la energía de forma eficiente y a precios competitivos permite más y mejores bienes y servicios que tienen un impacto en la calidad de vida de las personas (SENER, 2016). Por tanto, el sector eléctrico tiene un efecto directo sobre el crecimiento y el desarrollo económico de un país.

La industria eléctrica en México se ha expandido en las últimas décadas, convirtiéndose en una de las más dinámicas en toda la economía. De acuerdo con datos de la SENER (2016), esta industria ha tenido una de las mayores tasas de crecimiento del 2005 al 2015 (Figura 1). De hecho, esta tasa ha sido superior a la del crecimiento del PIB nacional durante el mismo periodo, ¿A qué se debe esta expansión?

No solo la industria eléctrica se expande, el consumo de energía eléctrica también va en aumento. Se estima que de 2018 a 2019 el consumo de energía eléctrica aumentó entre un 3 y 4 %, y se espera que, una vez se supere la crisis por la pandemia del coronavirus de este año, estas tendencias continúen, o bien, se superen. De hecho, la SENER (2016) pronostica que entre 2016 y 2030 el crecimiento medio anual del consumo de energía eléctrica será de aproximadamente 3.4 %, cifra congruente con las tasas de crecimiento de los últimos años. Esto podría ser un buen indicador del progreso social y económico de la población mexicana; sin embargo, también puede representar un grave problema cuando, por el lado de la oferta, las líneas de transmisión crecen a penas 1 %.

Así, el problema no solo reside en que el consumo de electricidad crece a mayor tasa que su suministro, sino también en la alta dependencia en combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica. En 2018, se produjeron 317,278 GWh (Figura 2), de los cuales el 51 % se generó a partir de ciclo combinado, 13.2 % de forma térmica convencional, 10.2 % de forma

Figura 1: Tasa media de crecimiento anual 2005-2015



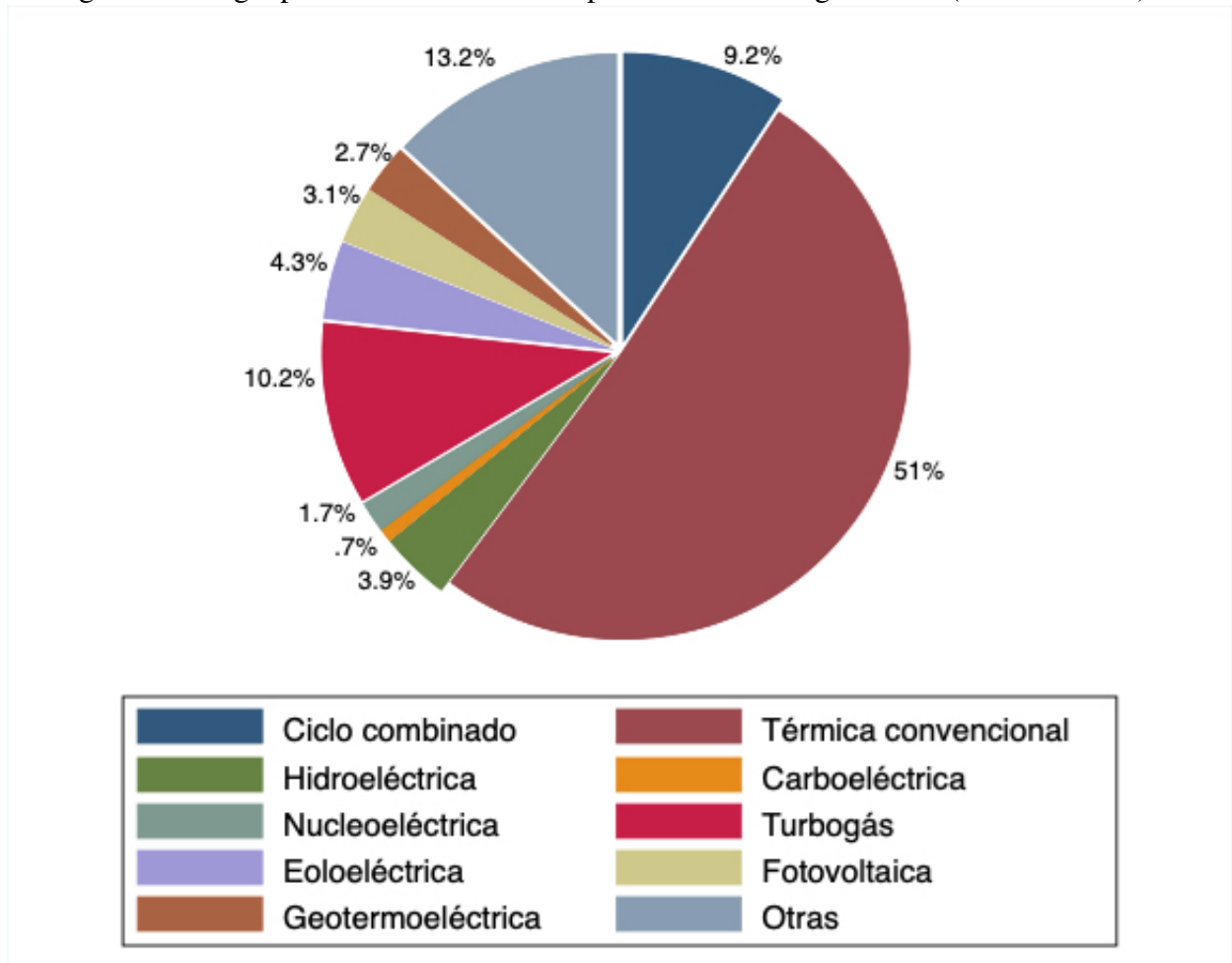
Fuente: Información de SENER (2016) obtenida a partir de datos del BIE, INEGI (2015)

hidroeléctrica, 9.2 % carboeléctrica, 4.3 % nucleoeeléctrica, 2.7 % con turbogás y el resto con tecnologías fotovoltaicas, geotermoeléctricas, eoloeléctricas, entre otras (Centro Nacional de Control de Energía, 2019). Como es posible ver, la mayor parte de la electricidad en México se produce a partir de ciclo combinado, esto es, se transforma la energía térmica del gas natural en electricidad. Si bien es cierto que este tipo de tecnología es más eficiente en comparación al uso del carbón, petróleo y derivados, ya que produce más electricidad con menos insumos primarios y emite menos kilogramos de CO₂ por MWh; no es precisamente la opción más limpia.

Por el lado ambiental, el ciclo combinado aumenta las emisiones de metano, uno de los principales gases que componen el efecto invernadero. Algunos se refieren a él como el hermano gemelo del CO₂. Además, esta tecnología utiliza grandes cantidades de agua. Por el lado económico, el ciclo combinado supone mayor dependencia en las importaciones de gas. En una conferencia de prensa, Ramsés Pech, analista en la industria de la energía y la economía, explicó que la producción nacional de gas natural ha disminuido, en parte, porque el precio internacional del gas hace que las actividades de extracción no sean rentables para PEMEX (Nava, 2019). El resultado de esto es que gran parte del gas que consumimos es importado.

Ante este escenario, México tiene dos grandes retos: garantizar la seguridad energética, es

Figura 2: Energía producida durante 2018 por modalidad de generador (317 278 GWh)



Fuente: Centro Nacional de Control de Energía, 2018

decir, incrementar la eficiencia y la distribución de la electricidad a precios competitivos; y fomentar la transición energética a una más sustentable, esto es, cumplir la promesa de mayor bienestar para la población sin descuidar los objetivos ambientales.

2.2. Estructura de la industria eléctrica en México

Antes de 2013, la industria eléctrica mexicana consistía en un monopolio público integrado verticalmente. Este monopolio se encargaba del suministro eléctrico en todo el país y, aunque tenía sus propios parques de generación, también compraba cantidades importantes a los Productores Independientes de Energía (PIEs). Así, dado que CFE se encargaba de la compra y suministro de electricidad para fines del servicio público, esta Empresa Productiva del Estado (EPE) era, al mismo tiempo, un monopolio y un monopsonio (Rodríguez, 1994).

Esta estrategia tuvo algunos aciertos: aumentó la cobertura en varias regiones del país, las

tecnologías empleadas en la generación de electricidad fueron modernizándose, aumentó el margen de reserva para responder a las necesidades de la demanda, se fomentó el uso de fuentes de energía renovable y el costo de la electricidad adquirida por la CFE fue más competitivo debido a las licitaciones. Naturalmente, tenía sus propios problemas, pero estaban más relacionados con su diseño institucional. Sin embargo, aún había espacio para aumentar la inversión, mejorar el desempeño de toda la cadena de suministro y evitar que la CFE pudiera privilegiar la electricidad que ella misma generaba.

En diciembre de 2013 se aprobó la forma energética, que fija como uno de sus principales objetivos disminuir los precios de la energía eléctrica y garantizar estándares internacionales de eficiencia, calidad y confiabilidad del suministro energético (Gobierno de México, 2015). El nuevo modelo regulatorio de la industria eléctrica tiene como bases más relevantes los siguientes puntos:

- La CFE y los generadores particulares podrán generar electricidad de forma libre, pero regulada.
- El Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), que formaba parte de la CFE, será un órgano público descentralizado que se encargará del control operativo del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), además de garantizar a los generadores el acceso abierto a la red nacional de transmisión.
- Se permite la participación de Productores Independientes de Energía en la generación y comercialización de la electricidad, manteniéndose como áreas estratégicas del Estado la planeación y el control del SEN, y el servicio público de transmisión y distribución de energía eléctrica.
- Adicionalmente, se incluye un esquema de Certificados de Energías Limpias. La SENER determinará el porcentaje de energía que debe generarse cada año a partir de fuentes limpias. El cumplimiento de esto se acreditará mediante la compra de CELs.

La industria eléctrica tienen seis actividades principales: la generación, la transmisión, la distribución y la comercialización de energía eléctrica, la planeación y el control del SEN, y la operación del Mercado Eléctrico Mayorista. La introducción de la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) pone en un régimen de libre competencia las actividades de generación y comercialización (Gobierno de México, 2015), mientras que el resto de las actividades y el manejo de la energía nuclear continúan como monopolios naturales del Estado.

En el MEM se intercambian los productos necesarios para el funcionamiento del SEN. En él se encuentran cinco productos:

- Energía, que cuenta con un mercado spot y subastas de mediano y largo plazo.
- Servicios conexos, con un mercado spot.
- Potencia, que tiene un mercado de balance de potencia y subastas de mediano y largo plazo.
- Derechos Financieros de Transmisión, que se asignan con contratos legados y subastas.
- CELs, que se comercializan en subastas anuales y de largo plazo.

Con este nuevo mercado se inicia la implementación de un sistema de cuotas basado en certificados verdes negociables. Estos certificados se llaman CELs. La fracción VIII del artículo 3 de la LIE define un CEL como un "título emitido por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) que acredita la producción de 1 MWh de energía eléctrica limpia". Las tecnologías que se consideran limpias son: el viento, la radiación solar, la energía oceánica, los bioenergéticos, la energía nucleoelectrica y la proveniente de centrales hidroeléctricas, y las tecnologías consideradas de bajas emisiones de carbono conforme a los estándares internacionales, entre otras⁴ (CRE, 2016).

El CEL funge un papel muy importante debido a que permite a los generadores de energía limpia obtener ingresos adicionales para poder cubrir sus costos, que, en un mercado emergente de energías renovables como lo es el mexicano, son mayores a los de la generación a partir de combustibles fósiles. De ello se desprende la siguiente pregunta: ¿Quién tiene derecho a recibir CELs y quién tiene la obligación de adquirirlos?

Los lineamientos que establecen los criterios para el otorgamiento de Certificados de Energías Limpias y los requisitos para su adquisición, publicado en 2014 en el Diario Oficial de la Federación (DOF), establecen que tendrán derecho a recibir CELS por un periodo de veinte años:

1. Las Centrales Eléctricas Limpias que entren en operación con posterioridad al 11 de agosto de 2014;

⁴Para más información véase el artículo 3 de la LIE

2. *Las Centrales Eléctricas que ya generaban energía eléctrica a partir de Energías Limpias antes del 11 de agosto de 2014, siempre y cuando hayan realizado un proyecto para aumentar su producción de Energía Limpia y;*
3. *Las Centrales Eléctricas Limpias que cuenten con capacidad que se haya excluido de un Contrato de Interconexión Legado a fin de incluirse en un Contrato de Interconexión en los términos de la Ley.*

Por otra parte, según el artículo 123 de la LIE, quienes están obligados a adquirir estos certificados son 1) los Suministradores; 2) los Usuarios Calificados Participantes del Mercado; 3) los Usuario Finales que se suministren por el abasto aislado y, 4) los titulares de los Contratos de Interconexión Legados que incluyan Centros de Carga que no cubran su consumo en su totalidad por Energías Limpias. Sin embargo, la vía obligatoria no es la única manera de acceder a los CELs, pues algunas entidades pueden registrarse como Entidades Voluntarias dentro del sistema para adquirir y comercializar los certificados de forma voluntaria.

Los CELs funcionan como incentivos para la inversión en tecnologías de generación limpia y son instrumentos fundamentales para la inclusión de energía renovable en la matriz energética. Sin embargo, este mecanismo puede desvirtuarse y tener efectos contraproducentes si la política no está correctamente diseñada o bien, si sufre cambios que pongan en riesgo la estabilidad del mercado de certificados.

3. Experiencias internacionales relacionadas con el cambio en la oferta de certificados

A continuación, se ofrece la descripción de algunos casos internacionales que están relacionados con el incremento en la oferta de certificados verdes. El objetivo es conocer experiencias previas en la materia e identificar fallos y herramientas de solución.

3.1. Certificados de Energías Renovables en el Consejo de Coordinación de Electricidad del Oeste, Estados Unidos

Los Créditos de Energía Renovable (RECs, por sus siglas en inglés) son herramientas financieras que acreditan la producción de electricidad a partir de tecnologías de generación limpia.

Un REC acredita la producción de un megavatio-hora (MWh) limpio y puede comercializarse como una mercancía. Mediante este sistema de certificados comercializables las empresas pueden seguir cumpliendo con la cuota obligatoria establecida por los Estándares de Cartera Renovable (RPS), es decir, si no alcanzan la cuota mínima de generación a base de tecnologías limpias limpias, pueden comprar RECs en un mercado especial. Existen dos tipos de RECs: agrupados y desagrupados. Los primeros necesitan la entrega de la energía subyacente al estado, mientras que los segundos, no. Cada estado define sus propias restricciones respecto al tipo de RECs que permite.

Mediante un modelo de planificación que optimiza las inversiones en transmisión y generación, Pérez et al. (2016) cuantifican los efectos económicos de un incremento en el comercio de RECs entre los estados de la WECC con el fin de cumplir sus objetivos renovables. Esto se analiza mediante una flexibilización en el uso de RECs que provienen de recursos de fuera del estado.

Se comparan, principalmente, dos casos. El caso donde hay un grado de flexibilización igual al 0 %, donde no se permite ningún REC que provenga de fuera del estado, lo que es equivalente a suponer que los costos de transacción son tan altos, de tal manera que no vale la pena permitir la entrada de los RECs que no se originan en el estado. Y el caso que representa el escenario más flexible de la regulación RPS (100 %), es decir, cuando la región no restringe la cantidad de RECs negociados. Este escenario permite que un estado pueda alcanzar su objetivos de RPS utilizando RECs provenientes de otros estados.

Los autores encuentran que cuando se aumenta la flexibilidad de 0 a 25 % se consigue una reducción en los costos anualizados, y en nuevas inversiones en generación y transmisión. Una ampliación en la flexibilidad más allá del 25 % genera muy pequeñas reducciones en los costos. Además, no se aumentan ni disminuyen las emisiones de CO₂ de forma significativa y los precios medios de la energía varían significativamente entre los estados de la WECC.

Así, se estudia el efecto de una sobre oferta de estos títulos, mediante un aumento en la flexibilidad para intercambiar RECs entre estados. Los resultados son significativos y consistentes en el análisis de sensibilidad: el incremento en la oferta de RECs disminuye la inversión en generación y transmisión, y modifica la matriz energética favoreciendo tecnologías como la hidroeléctrica y el gas.

3.2. Italia

En 1999, con el fin de incentivar un mayor desarrollo de fuentes de energía renovables, Italia introdujo un sistema de Certificados de Energía Verde (GEC, por sus siglas en inglés). El decreto por el cual se introdujo este mecanismo⁵, privatizó la importación, exportación y producción de electricidad, mientras que el despacho, la transmisión y el control de las líneas de electricidad se mantuvieron bajo la dirección del Estado (Farinosi y col., 2012).

El sistema consistía en que los importadores o productores de energía debían suministrar una cuota obligatoria de energía renovable. La forma de cumplir esta cuota era produciendo directamente esta energía, o bien, comprando certificados verdes en el mercado. De esta forma, los productores de energía limpia se beneficiaban tanto de la venta directa de electricidad, como de los ingresos obtenidos a partir de la venta de certificados. El número final de certificados que obtenían dependía de la cantidad producida, y del tamaño y el tipo de tecnología renovable (Wedzik y col., 2017). Al principio, cada certificado tenía un año para ser comercializado, pero con el tiempo esto cambió a tres años.

El sistema se modificó tres veces en menos de ocho años y en 2009 se produjo un cambio importante: la obligación de suministrar energía eléctrica pasó a manos de los despachadores de energía; sin embargo, esta disposición solo duró un año. En 2010, se produjeron una serie de modificaciones que al final del día disminuían la demanda de certificados. La obligación ahora aplicaba únicamente para la producción o importación de energía superior a 100 GWh. Además, también estarían exentos los productores a partir del carbón de las minas nacionales y la cogeneración; el bombeo de agua y la electricidad para el auto consumo (Farinosi y col., 2012). Así, se creó una sobre oferta de certificados en el mercado de GECs. Como puede verse, esto no se originó por un incremento en la emisión de certificados, sino por una reducción en la demanda de los mismos.

Pronto, el precio de los GECs empezó a caer, lo que puso en riesgo muchos proyectos de energía renovable, y perjudicó a pequeñas y medianas empresas productoras de energía limpia. Ante esta situación tan crítica, el gobierno intervino fijando un precio para los certificados y, por tanto, desvirtuó el libre funcionamiento del mercado de GECs. De esta forma, el sistema de cuotas se convirtió más bien en un mecanismo de subvenciones indirectas.

Estas subvenciones a la energía renovable generaban un costo adicional para los consumidores, lo que hizo que el precio de la electricidad incrementara con el tiempo. Según Wedzik

⁵El Decreto Bersani

(2017), el precio de la electricidad en Italia llegó a ser uno de los más altos en todo Europa. Con el principal objetivo de reducir los precios de la electricidad, el decreto legislativo del 28 de marzo de 2011 marca el fin del sistema GEC en Italia. Con esto, se optó por eliminar gradualmente el sistema de certificados entre 2012 y 2015. Así, a partir de 2015 el mecanismo de apoyo utilizado sería el sistema FIT (Wedzik y col., 2017).

3.3. Rumanía

Un Certificado Verde (GC) es un activo que ampara que 1 MWh de electricidad ha sido producido a partir de una fuente de energía renovable. Este activo es comercializable y su precio representa un ingreso adicional para los productores de energía limpia (Raluca, 2017).

En 2008, Rumanía introdujo un mecanismo de certificados verdes comercializables (TGCs). Entre 2009 y 2011 la cuota de energía renovable que se alcanzó fue inferior a la cuota establecida legalmente, es decir, no había certificados suficientes para cubrir la demanda. En 2012 se acercó mucho y en 2013, se superó. La nueva situación, donde la oferta era mayor a la demanda, originó una caída en los precios de los TGCs, que pasaron de 55 euros por certificado entre 2009 y 2012 a 42 euros por certificado en 2013 (Raluca, 2017). Ante esta situación, en el verano de 2013, una Ordenanza de Emergencia impuso restricciones como la suspensión temporal del número de certificados concedidos a algunas tecnologías, la limitación de la capacidad instalada para ciertas tecnologías, barreras comerciales al mercado de TGCs, entre otras. Fue así como el Gobierno rumano modificó el régimen para ayudar a los productores de electricidad limpia, pues una reducción en el número de certificados verdes haría que el precio de estos se volviera a nivelar (Dragomir y col., 2016).

En 2014, con el objetivo de aliviar las presiones a la alza en los precios de la energía eléctrica, se recalculó la cuota anual obligatoria de energía renovable, disminuyéndola del 15 al 11.9%. Este cambio trajo consigo un excedente de certificados verdes no vendidos en el mercado, lo que afectó aún más el precio de los certificados, que ya bastante afectado estaba, reduciéndolo a 26 euros por certificado. El desarrollo y la implementación de los proyectos de energía limpia quedaron varados y muchas empresas quebraron. La situación era tan grave que, en marzo de ese mismo año, en el mercado de certificados únicamente se vendieron 5 mil TGCs de más de 1,7 millones que estaban en oferta.

De acuerdo con Raluca (2017), en 2017 la misma Ordenanza de Emergencia modificó el marco legislativo del sistema de certificados verdes, asegurando, ahora sí, una demanda de

TGCs:

- Con el fin de garantizar la demanda, se introdujo un nuevo método para recalcular las cuotas anuales obligatorias, ahora estos números se revisan cada dos años y se pueden modificar dependiendo el dinamismo del mercado de TGCs.
- Se extendió el periodo de validez de los certificados verdes.
- Hubo modificaciones en el régimen de comercio y se diseñó un nuevo mercado centralizado para el comercio de los TGCs.
- Se modificó la forma de registrar los certificados en el sistema contable.

El gobierno rumano se dio cuenta que su intervención por el lado de la oferta en el mercado de TGCs había sido catastrófica, por lo que después intentó mediar desde la demanda. Este caso evidencia la importancia del papel del gobierno, en específico, en la promoción de políticas para el fomento de tecnologías de generación limpia, y en la creación de un entorno cuyas condiciones políticas y económicas favorezcan el cumplimiento de los objetivos medioambientales (Dragomir y col., 2016).

3.4. Polonia

El sector energético polaco experimentó numerosas modificaciones cuando el país se incorporó a la Unión Europea. El cambio más importante fue la creación de un mercado de energía a partir de fuentes renovables basado en el sistema de cuotas de TGCs. El desempeño de las tecnologías renovables, en especial de la eólica, fue relativamente bueno; sin embargo, Polonia no alcanzaba las metas ni los compromisos adquiridos a inicios del 2000. Debido a que los objetivos planteados eran muy ambiciosos para Polonia, en 2009 se modificó la legislación, ampliando el rango de oportunidades para perseguir los objetivos establecidos. La intención de estos cambios era crear competencia entre los productores de energía renovable y mejorar la eficiencia económica (Wedzik y col., 2017).

Entre 2006 y 2012, el precio del TGC fue relativamente estable. La principal tecnología del sector renovable, la eólica, incrementó de forma exponencial su capacidad instalada; sin embargo, este crecimiento fue haciéndose menor hacia el inicio de la década de 2010.

En 2012 se produjo la primera crisis en el sector de la energía renovable. A inicios de este año, el precio del TGC comenzó a caer y a inicios de 2013 estuvo en el nivel más bajo.

Los actores más afectados fueron las pequeñas y medianas empresas cuyos ingresos cayeron drásticamente y, en muchos casos, llegaron a ser menores que sus costos de producción. Esto cuestionó la rentabilidad de muchos proyectos de tecnologías renovables. Pero, ¿Cómo puede explicarse esta repentina caída en el precio de los certificados verdes negociables?

Wedzik (2017) argumenta que de 2009 al 2011, entre el 2 y el 11 % de los certificados que se expidieron anualmente fueron acumulados, lo que afectó el volumen total acumulado de TGCs, que no tenían una fecha de expiración. De esta forma, las reservas fueron creciendo cada año, y empezaron a tomar dimensiones peligrosas después de 2009. La acumulación de TGCs se debía a su buen precio, por lo que los participantes del mercado empezaron a acumularlos formando una especie de burbuja especulativa: "estaban esperando los mejores tiempos para sacarlos al mercado"(Wedzik y col., 2017). Así, para 2011 se formó un exceso de oferta. Finalmente, en 2012 la burbuja de reservas estalló con la caída en el precio de los certificados. Este desbordamiento de TGCs, a su vez, deprimió aún más el precio del certificado.

3.5. Reino Unido

En 2002, con el fin de impulsar proyectos a grande escala de energía renovable, en Inglaterra, Gales y Escocia, se implementó un sistema de Obligaciones Renovables (RO por sus siglas en inglés), que fungió como un instrumento económico basado en un sistema de certificados verdes con una cuota anual obligatoria. Posteriormente, en 2005, Irlanda del Norte se unió a la implementación de dicha política. En 2010, para los proyectos de generación limpia de pequeña escala se introdujo como principal mecanismo de apoyo el esquema de feed-in tariffs (Bryan y col., 2015; Wedzik y col., 2017).

La obligación requería que una parte de la electricidad que los suministradores abastecían a los clientes finales se generara a partir de fuentes de energía renovable. Para ello, se le permitía a los proveedores elegir entre comprar Certificados de Obligación Renovable (ROCs⁶), o bien, pagar una multa por incumplimiento. Los ingresos obtenidos a partir de estas multas se distribuían entre los productores de energía renovable, lo que compensaba por los certificados no vendidos (Farinosi y col., 2012).

El número de certificados que cada generador recibía dependía de la cantidad producida y el tipo de tecnología renovable utilizada. Entre 2002 y 2011, el precio de mercado de un ROC fluctuaba alrededor de 45£ por MWh, con un mínimo de 37£ por MWh y un máximo de 54£

⁶Renewable Obligation Certificates

por MWh en 2008 (Bryan y col., 2015).

Sin embargo, este régimen fue víctima de su propio éxito. El Departamento de Energía y Cambio Climático (DECC) decidió que, debido al gran crecimiento del sector de las energías renovables y los grandes costos que esto suponía para el gobierno, el sistema de ROCs debía suspenderse (Hewitt y col., 2015). El apoyo a este mecanismo sería opcional hasta 2017 y se reemplazaría gradualmente con contratos FIT (Wedzik y col., 2017); sin embargo, más tarde, en octubre de 2014 se apresuró la decisión. Ese año se emitió una orden de cierre en la que se determinó que después del 31 de marzo de 2015 no se emitirían ROCs para nuevos proyectos o ampliaciones de capacidad. Así, a partir de abril de 2015 se haría vigente un nuevo régimen de Contratos por Diferencias (CFD).

4. Modelo del mercado eléctrico oligopolístico con un sistema de cuotas basado en certificados verdes

Para la propuesta de modelo de este texto se toman en cuenta dos planteamientos relevantes en la literatura de la evaluación de los esquemas de certificados verdes. Por un lado, An et al. (2019) proponen un modelo de dos etapas basado en la teoría del equilibrio oligopolístico de la competencia. Esto hace posible analizar los comportamientos estratégicos en cada fase y tomar en cuenta los problemas de poder de mercado asociados a la energía renovable en los mercados oligopolísticos de electricidad y de certificados verdes. El modelo se plantea como un problema de equilibrio sujeto a restricciones y se resuelve utilizando el método de inducción hacia atrás, y el enfoque de complementariedad no lineal. En la primera etapa las empresas de energía renovable determinan la cantidad de TGCs que venderán en el mercado de certificados. En la segunda, todas las empresas de generación, tanto las renovables como las basadas en combustibles fósiles, compiten a la Cournot para vender electricidad en el mercado eléctrico. Todos los generadores están sujetos a la cuota obligatoria.

Por el otro lado, Ciarreta et al. (2017) también modelan las interacciones entre el mercado eléctrico mayorista y el mercado de certificados verdes. Los autores diseñan un modelo secuencial en el que consideran que cada generador posee una planta de producción renovable y m plantas de no renovable. En la primera fase los generadores deciden la función de oferta de electricidad, los minoristas establecen la demanda por energía eléctrica y cada subperiodo se liquida en el mercado al contado. Conforme los productores generan energía verde reciben

TGCs, lo que forma la oferta en el mercado de certificados. En la segunda etapa los minoristas deben comprar certificados verdes para cumplir con las obligaciones establecidas por el regulador. De este modo, los suministradores deciden la demanda de TGCs. Por simplicidad, los autores ignoran las diferencias entre costos, tecnologías y valor agregado.

Nótese que en ambos modelos la oferta de certificados verdes se obtiene a partir de la decisión de producción de electricidad, es decir, desde que se determina la función de oferta. Por tanto, la hipótesis de que la producción de electricidad limpia coincide con la oferta de certificados en el mercado, se mantiene sin importar el tipo de competencia que se considere en el mercado eléctrico, es decir, es un supuesto estándar de la literatura. De esta forma, tomar en cuenta las interacciones que existen entre los dos mercados permite obtener una visión más completa sobre cómo funciona un mercado eléctrico mayorista con incentivos a las tecnologías renovables, en este caso, mediante un mecanismo de certificados verdes.

4.1. El modelo general

El modelo que se plantea en esta sección retoma elementos de los planteamientos descritos anteriormente. Por un lado, de la propuesta de Ciarreta et. al (2017) se mantiene que la cuota obligatoria fijada por el regulador se impone a los suministradores, y no a los generadores como en An et. al (2019). Esto va en línea con lo establecido en el artículo 123 de la LIE. Por otro lado, de An et. al (2019) se mantiene el tomar en cuenta los problemas de poder de mercado asociados a la energía renovable en el mercado oligopolístico de la electricidad.

Supuestos:

- Hay N empresas que generan energía a base de combustibles fósiles

$$(G_{f,1}, G_{f,2}, \dots, G_{f,N})$$

- Hay R empresas que generan electricidad a base de fuentes renovables

$$(G_{r,1}, G_{r,2}, \dots, G_{r,R})$$

- α es la cuota obligatoria establecida por la autoridad para el cumplimiento de los suministradores, donde $\alpha \in [0,1]$.

- Por simplicidad, se asume que un MWh de energía verde producido genera un certificado de energía limpia⁷

$$1MWh = 1CEL$$

- Los costos de combustible de las energías renovables son cero.

El modelo está compuesto por dos mercados: el eléctrico mayorista y el de CELs. En el mercado eléctrico mayorista las empresas generadoras de electricidad, tanto renovables como de combustibles fósiles, compiten a la Cournot y determinan la función de oferta de electricidad. Si bien se puede considerar que la generación y comercialización de electricidad en México son actividades potencialmente competitivas (Carreon, 2010), la realidad es que no están bajo una situación de competencia perfecta debido a que unas cuantas compañías eléctricas se encargan de generar la mayor parte de la electricidad consumida⁸ y existen algunas barreras a la entrada, como los fuertes costos iniciales. Es por ello que se considera una situación oligopolística en el mercado. Los minoristas, por el otro lado, compran electricidad y determinan la función de demanda de CELs.

La función de costos de una empresa de combustibles fósiles depende de los costos fijos y los costos variables, últimos que a su vez dependen del nivel de producción:

$$a_{f,i} + c_{f,i}(q_{f,i}) \quad (1)$$

De la misma forma, la función de costos de una empresa de energía renovable, a diferencia de la empresa de combustibles fósiles, no enfrenta costos de combustible debido a que no hay un precio por utilizar los recursos en sí mismos (el viento, el sol, etc.); sin embargo, enfrenta costos de generación, operación, mantenimiento, etc.

$$b_{r,j} + c_{r,j}(q_{r,j}) \quad (2)$$

Debido a los altos costos iniciales de instalar una nueva planta de energía limpia en un mercado emergente, podemos suponer que $b > a$.

Para un periodo determinado, la demanda inversa de electricidad en el mercado mayorista

⁷Aunque en realidad esto puede variar según el tipo de tecnología renovable.

⁸En particular, según datos del PRODESEN, en 2018 CFE se encargó de producir el 54 % de la energía eléctrica de México.

es:

$$p(Q) = p\left(\sum_{i=1}^N q_{f,i} + \sum_{j=1}^R q_{r,j}\right) \quad (3)$$

Las empresas maximizan sus beneficios compitiendo a la Cournot. Así, el problema de maximización de la empresa de combustibles fósiles se deriva de las ganancias producidas por la venta de electricidad en el mercado eléctrico mayorista menos los costos de generación:

$$\max_{q_{f,i}} \pi_{f,i} = p\left(\sum_{i=1}^N q_{f,i} + \sum_{j=1}^R q_{r,j}\right)q_{f,i} - (a_{f,i} + c_{f,i}(q_{f,i})) \quad (4)$$

De igual forma, la empresa de energía renovable maximiza sus ganancias, las cuales se derivan de la venta de electricidad más la venta de CELs en el mercado de certificados, menos sus costos de generación

$$\max_{q_{r,j}} \pi_{r,j} = p\left(\sum_{i=1}^N q_{f,i} + \sum_{j=1}^R q_{r,j}\right)q_{r,j} - (b_{r,j} + c_{r,j}(q_{r,j})) + p^{CEL}q_r \quad (5)$$

En este modelo se mantendrá el supuesto estándar de la literatura en el que la producción de electricidad de las empresas renovables coincide con la oferta de CELs en el mercado de certificados, de tal manera que:

$$q_R = x_s^{CEL} \quad (6)$$

Es posible conservarlo debido a que se asume un control exacto del regulador y la no existencia de pérdidas de energía. Esto significa que la regulación establecida permite una contabilización exacta de certificados en el mercado por parte del regulador. Además, si las pérdidas de energía no existen, la cantidad total de electricidad que se genera es la misma que llega al lugar de consumo (Molina, 2017) y, dado que 1 CEL ampara la producción de 1 MWh de energía limpia, la cantidad de CELs emitidos en el mercado equivale a la oferta de electricidad que proviene de fuentes de energía renovables.

Después de resolver los problemas de maximización dados por las ecuaciones (4) y (5), se obtienen las producciones de equilibrio para cada empresa. Una vez que los suministradores han negociado esta cantidad de electricidad en el mercado eléctrico, ahora demandan CELs para cumplir con la cuota obligatoria establecida. Tal y como Ciarreta et. al (2017) lo hacen, se asume que en caso de no cumplir con la obligación, se les penalizará en función de qué tan lejos estén del objetivo. Esta penalización es una función cuadrática que figura una demanda

decreciente de CELs (Ciarreta et. al 2017):

$$\beta(\alpha q_N - x^{CEL})^2 \quad (7)$$

donde β es un parámetro de la función de penalización, q_N es la cantidad de electricidad negociada en el mercado eléctrico y x^{CEL} es la cantidad de CELs comprados en el mercado de certificados.

El suministrador k maximizará sus beneficios, que dependen de la cantidad de electricidad vendida a los usuarios finales menos los costos de adquirir CELs y los costos de no cumplir con la cuota, fijando la cantidad de CELs que va a comprar

$$\begin{aligned} \max_{x^{cel}} \quad & \pi_{S,k} = q_N(z - p^e) - x^{CEL}p^{CEL} - \beta(\alpha q_N - x^{CEL})^2 \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq x^{CEL} \leq \alpha q_N \end{aligned} \quad (8)$$

donde z es el precio al que la electricidad es vendida a los usuarios finales y p^e es el precio al que los generadores venden la electricidad. La restricción indica que, dado que los CELs tienen un precio, los suministradores nunca comprarán más de la cuota establecida y dicha cantidad será mayor o igual a cero.

Se asume que los suministradores son tomadores de precios en el mercado de CELs, por lo que en la ecuación (8) el precio de los certificados, p^{CEL} , se considera como dado. De la condición de primer orden del problema anterior se obtiene la cantidad óptima de CELs que cada empresa demanda, x_D^{CEL} .

Por último, para llegar al equilibrio es necesario establecer la condición de vaciado del mercado de CELs, donde la demanda de certificados es igual a la oferta $x_D^{CEL} = x_S^{CEL}$.

4.2. Resolución del modelo

4.2.1. El mercado eléctrico

Para resolver el modelo anterior y obtener un resultado simple y directo se asume que solo hay dos productores que compiten en el mercado eléctrico, el productor que usa fuentes de energía renovable y el que utiliza combustibles fósiles:

$$N = 1$$

$$R = 1$$

Para un periodo, la función de demanda inversa lineal de electricidad por parte de los suministradores es

$$p(Q) = 1 - Q$$

donde Q es la cantidad total de electricidad, es decir, la suma de la producción renovable y la no renovable:

$$p(Q) = 1 - q_f - q_r$$

Se asumen también costos marginales constantes para ambas empresas, de tal forma que las funciones de costos para cada firma son las siguientes:

$$a_f + c_f q_f$$

$$b_r + c_r q_r$$

Tomando en cuenta estos elementos, ambos productores compiten en cantidades maximizando los beneficios para su empresa, esto es, compiten a la Cournot. De esta forma, el problema de maximización de la empresa de combustibles fósiles es:

$$\max_{q_f} \pi_f = (1 - q_f - q_r)q_f - (a_f + c_f q_f) \quad (9)$$

De la condición de primer orden se obtiene:

$$1 - q_r - 2q_f - c_f = 0$$

$$q_f = (1 - c_f - q_r)/2 \quad (10)$$

De la función de reacción obtenida para la empresa de combustibles fósiles es posible notar que la cantidad de electricidad ofertada es una función estrictamente decreciente con respecto a q_r y c_f . De igual manera, la empresa de energía renovable maximiza sus ganancias:

$$\max_{q_r} \pi_r = (1 - q_f - q_r)q_r - (b_r + c_r q_r) + p^{CEL} q_r \quad (11)$$

Igualmente, de la condición de primer orden se obtiene la función de reacción, que es estrictamente decreciente en q_f y c_r , y creciente en p^{CEL} :

$$1 - q_f - 2q_r - c_r + p^{CEL} = 0$$

$$q_r = (1 - c_r - q_f + p^{CEL})/2 \quad (12)$$

Para obtener las cantidades de equilibrio se sustituye q_r en q_f :

$$q_f = (1 + c_r - 2c_f - p^{CEL})/3 \quad (13)$$

Ahora que se conoce el valor de q_f , este puede ser sustituido directamente en (12) para obtener la producción de la empresa de renovables:

$$q_r = (1 + c_f - 2c_r + 2p^{CEL})/3 \quad (14)$$

Así, las ecuaciones (13) y (14) constituyen la producción de equilibrio en el mercado de electricidad.

4.2.2. El mercado de certificados

Una vez que la cantidad de electricidad ha sido negociada, es hora de ver qué pasa en el mercado de certificados. En este mercado se asume que hay k suministradores, quienes maximizan sus beneficios escogiendo la cantidad de CELs que comprarán. Por simplicidad, se asume que $\beta = 1$:

$$\begin{aligned} \max_{x_d^{CEL}} \quad & \pi_{s,k} = q_N(z - p^e) - x_d^{CEL}p^{CEL} - (\alpha q_N - x_d^{CEL})^2 \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq x_d^{CEL} \leq \alpha q_N \end{aligned} \quad (15)$$

De la condición de primer orden se obtiene la cantidad óptima de CELs que demanda el suministrador k :

$$-p^{CEL} - 2(\alpha q_N - x_d^{CEL})(-1) = 0$$

$$x_d^{CEL} = \alpha q_N - (p^{CEL}/2) \quad (16)$$

De esta forma, la demanda agregada de certificados de los k suministradores es:

$$x_D^{CEL} = \alpha q_N - (p^{CEL}/2) \quad (17)$$

donde

$$x_D^{CEL} > 0$$

si

$$\alpha q_N - (p^{CEL}/2) > 0$$

De este resultado se desprende la siguiente proposición:

Proposición 1. La demanda de CELs será mayor a cero siempre y cuando $p^{CEL} < 2\alpha q_N$.

Del razonamiento anterior es posible notar que la función de demanda de CELs es estrictamente creciente con respecto a la cuota anual obligatoria y estrictamente decreciente con respecto al precio de los CELs.

Por la condición de vaciado de mercado, donde $x_D^{CEL} = x_S^{CEL}$, el supuesto de equivalencia entre oferta de certificados y oferta de electricidad limpia de la ecuación (6) y la ecuación de demanda agregada de CELs (17), se tiene que

$$\alpha q_N - (p^{CEL}/2) = q_r$$

Despejando para el precio de los CELs:

$$p^{CEL} = 2(\alpha q_N - q_r)$$

Como q_N es la cantidad de electricidad que se negoció en el mercado eléctrico y proviene tanto de energías limpias, como de las "sucias"; se tiene que $q_N = q_r + q_f$, de tal modo que

$$p^{CEL} = 2(\alpha q_f + (\alpha - 1)q_r) \quad (18)$$

Finalmente, para encontrar el precio de equilibrio de los CELs hay que sustituir las produccio-

nes de equilibrio encontradas en el mercado eléctrico (ecuaciones 13 y 14) en (18):

$$p^{CEL} = 2(\alpha[(1 + c_r - 2c_f - p^{CEL})/3] + (\alpha - 1)[(1 + c_f - 2c_r + 2p^{CEL})/3])$$

Despejando para p^{CEL} y simplificando:

$$p^{CEL} = [(2/3)\alpha(2 - c_r - c_f) - (2/3)(1 + c_f - 2c_r)]/[(7/3) - (2/3)\alpha] \quad (19)$$

De esta última ecuación se obtiene la siguiente proposición:

Proposición 2. En el equilibrio, el precio de los CELs es una función que depende exclusivamente del parámetro α y de los costos asociados a la producción de electricidad. El precio de equilibrio de los CELs depende positivamente de la cuota anual obligatoria.

4.2.3. Elementos de comparación con el planteamiento realizado por Ciarreta et. al (2017)

Antes de avanzar a la siguiente sección es útil analizar algunos elementos de comparación entre el planteamiento presente y el modelo en el que está basado, en específico el de Ciarreta et. al (2017), empezando por la función de demanda de CELs. Los autores encuentran, mediante un problema de maximización similar, que la demanda de certificados de un minorista es

$$x_R = \alpha q_N - (p^{CEL}/f)$$

si

$$p^{CEL} \leq \alpha f q_N$$

O bien,

$$x_R = 0$$

si

$$p^{CEL} \geq \alpha f q_N$$

Así, asumiendo que hay K minoristas, la demanda agregada de certificados es:

$$X_R = \alpha Q_N - (p^{CEL}/F)$$

si

$$p^{CEL} \leq \alpha F Q_N$$

O bien,

$$X_R = 0$$

si

$$p^{CEL} \geq \alpha F Q_N$$

De igual forma, de la ecuación de demanda de CELs (17) se obtiene que esta es estrictamente creciente con respecto a la cuota y estrictamente decreciente con respecto al precio de los CELs. El resultado del planteamiento en el texto presente es similar al de Ciarreta et. al (2017), porque el problema de maximización de beneficios del minorista de este modelo está basado en la propuesta la propuesta de estos autores. Así, para asegurar únicamente una demanda positiva se impone la condición

$$x_D^{CEL} > 0$$

si

$$\alpha q_N - (p^{CEL}/2) > 0$$

De lo que se deriva que la demanda de CELs será positiva siempre y cuando

$$p^{CEL} < 2\alpha q_N$$

Esto es, mientras el precio de los CELs sea menor que la multa a pagar por el incumplimiento de las obligaciones.

En general, estos resultados se mantienen similares en ambos modelos. Se decide preservar este aspecto debido a que la descripción del mercado de certificados de estos autores se acerca mucho a la realidad del caso mexicano: los suministradores son tomadores de precios en el mercado de CELs, debido a que la oferta se fija en el mercado eléctrico y la demanda está dada por la imposición regulatoria de la cuota anual. Ante esto, los suministradores nada pueden hacer, por sí mismos, para influir en el precio de mercado de los certificados de energía limpia. Lo único que pueden hacer es decidir si comprar CELs o pagar la multa, en función de los costos de cada alternativa.

Por lo que respecta al precio de equilibrio en ambos modelos, en la propuesta del documento presente se obtienen la ecuación (19) y la proposición 2, que definen que, en el equilibrio, el precio de los CELs depende positivamente de la cuota anual obligatoria y, al mismo tiempo, es una función de los costos de producción de electricidad (tanto renovable como no renovable). De tal forma que si la cuota obligatoria aumenta, incrementa también el precio de los mismos. Lo mismo pasa con la energía a base de combustibles fósiles. Mientras más energía “sucia” se produzca en el mercado eléctrico, el precio del CEL va a incrementar debido a que, por las funciones de reacción obtenidas en el mercado eléctrico oligopolístico, esto conlleva a una disminución en la cantidad de energía renovable que se produce en el mercado, lo que actúa como una reducción por el lado de la oferta de CELs. Asimismo, mientras más energía limpia se produzca, hay una mayor oferta en el mercado de certificados, lo que presiona a la baja los precios de los mismos.

Esto último tiene sentido si se recuerda que el mecanismo de certificados verdes negociables funciona como un incentivo para la incorporación de las tecnologías de generación limpia en la matriz energética. De hecho, en la sección 2 es posible notar que naciones como Reino Unido e Italia lo utilizaron para la incorporación de fuentes limpias, pero más tarde lo reemplazaron por sistemas de tarifas de alimentación.

Por su parte, Ciarreta et. al (2017) encuentran que el precio de equilibrio de los certificados tiene una estructura similar al de la ecuación (18); sin embargo, la diferencia reside en cómo se eligieron las cantidades de electricidad limpia y de electricidad a base de combustibles fósiles. Los autores suponen que los generadores se encuentran en una situación de competencia perfecta y que cada uno cuenta con m plantas a base de combustibles fósiles y una de tecnología limpia. De las condiciones de primer orden para cada productor se obtiene que la cantidad de electricidad “sucia” que se genera depende del precio de la electricidad y de sus costos de generación y, al mismo tiempo, la cantidad de energía limpia depende de los costos de generación y del precio de la electricidad más el precio del certificado.

Dichos niveles de producción son distintos a la forma en que se deciden en un mercado oligopolístico, donde no solamente se incorporan los costos de generación propios, sino también los de la empresa contra la que se compete. Además, no se toman los precios de la electricidad como dados y se contempla la producción de la empresa contrincante, lo que genera funciones de reacción donde los niveles de producción de cada tipo de electricidad responden a los cambios en diversos factores.

Por último, respecto al papel de los CELs como incentivos, en un esquema de mercado competitivo, Ciarreta et. al (2017) encuentran en las condiciones de primer orden que, en efecto, los certificados proveen incentivos para la producción de electricidad limpia en comparación con la electricidad basada en el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, en el modelo de este texto se encuentra que el precio de los certificados afecta explícitamente a ambas producciones. Esto se debe a la interacción de las funciones de reacción para la constitución de un equilibrio en un mercado eléctrico oligopolístico.

4.3. Estática comparativa: un aumento en la oferta de certificados

La modificación en los lineamientos para adquirir CELs es equivalente a una disminución en la cuota obligatoria establecida, por lo que el incremento en la oferta de certificados puede ser estudiado suponiendo una disminución en α .

De la ecuación de demanda agregada de CELs (17) puede verse que α está relacionado positivamente con x_D^{CEL} , por lo que si α disminuye, la cantidad de CELs demandados por los suministradores también se reducirá. Adicionalmente, la caída de α presiona los precios de los CELs hacia abajo (ecuación 19), lo que hace que el incentivo a la producción de energía renovable se vea afectado negativamente. Por ende, si la cuota establecida disminuye, el ingreso marginal de la empresa renovable también lo hará (vía la afectación en el precio del CEL); de tal modo que mientras más caiga el precio del CEL, puede llegar a suceder dicha firma detenga su producción y decida salir del mercado.

De lo anterior se desprende otra cuestión relevante: Se puede estudiar el comportamiento de la producción de la empresa de energía limpia ante variaciones en la cuota anual α . Se utilizan las producciones de electricidad (13 y 14) y el precio de equilibrio de los certificados (19) para encontrar las producciones de equilibrio en función de los costos y del parámetro α .

Así, sustituyendo el precio de equilibrio de los CELs en (13), se obtiene la producción de equilibrio de la electricidad a base de combustibles fósiles:

$$q_f = (2\alpha(c_f - 1) - 4c_f + c_r + 3)/(7 - 2\alpha) \quad (20)$$

Del mismo modo, sustituyendo (19) en (14), se obtiene la cantidad de equilibrio de electricidad limpia:

$$q_r = [2(3c_f + c_r - 4)/(2\alpha - 7)] + c_f - 1 \quad (21)$$

Para analizar cómo se comporta la producción de electricidad limpia ante cambios en la cuota obligatoria, hay que derivar q_r de (21) con respecto a α .

$$\partial q_r / \partial \alpha = -(4(3c_f + c_r - 4) / (2\alpha - 7)^2) \quad (22)$$

Debido a la forma de la función inversa de demanda ($P(Q)=1-Q$) los costos de producción van a ser siempre menores a uno, de tal manera que como $(3c_f + c_r) < 4$, entonces $(3c_f + c_r) - 4 < 0$. Lo anterior indica que la derivada de q_r con respecto a α es positiva. Esto quiere decir que si la cuota obligatoria disminuye, la producción de electricidad limpia en el mercado eléctrico también lo hará.

Proposición 3. La derivada positiva de q_r con respecto a α obtenida en (22) demuestra que una reducción en la cuota obligatoria tiene como consecuencia una caída en la producción de electricidad limpia.

5. Discusión: Implicaciones de política económica

En octubre de 2019, el gobierno publicó el acuerdo por el que se modifican los lineamientos que establecen los criterios para el otorgamiento de Certificados de Energías Limpias y los requisitos para su adquisición. De acuerdo con la modificación publicada en el Diario Oficial de la Federación, ahora tendrán derecho a recibir CELs por un periodo de hasta por veinte años:

1. *Las Centrales Eléctricas Limpias que hayan entrado en operación con posterioridad al 11 de agosto de 2014;*
2. *Las Centrales Eléctricas Legadas, previstas en la Ley de la Industria Eléctrica que generen energía eléctrica a partir de fuentes de Energía Renovable;*
3. *Las Centrales Eléctricas Limpias que cuenten con capacidad que se haya excluido de un Contrato de Interconexión Legado a fin de incluirse en un Contrato de Interconexión en los términos de la Ley.*

El cambio en la fracción II implica que un número importante de centrales eléctricas ahora pueden emitir CELs sin importar su fecha de inicio de operación o si realizaron algún proyecto para aumentar su producción de Energía Limpia (Zarco, 2019). Esto beneficia directamente a algunas centrales eléctricas de CFE.

Ante dicha modificación es importante recordar que en 2019 la CFE fue penalizada por el incumplimiento de las obligaciones con una multa de alrededor de dos mil millones de pesos. El motivo de la multa fue que esta Empresa Productiva del Estado solo adquirió poco más del 50 % de los certificados que debía adquirir, pues de acuerdo con la norma legislativa, la CFE Suministro Básico (SSB) es un participante obligado a adquirir CELs. La empresa cubre cerca del 70 % del consumo eléctrico del país y dentro de su portafolio están la central de energía eléctrica nuclear de Laguna Verde y las centrales hidroeléctricas. Con el cambio en la regulación, estas centrales eléctricas podrán acreditar CELs y entregarlos directamente a CFE SSB (Antuko, 2019).

La principal consecuencia de los cambios promulgados en 2019 es que habrá un incremento representativo en la cantidad de CELs ofertados en el mercado de certificados. Dado que la cuota obligatoria establecida por la SENER no se incrementó al mismo tiempo, esto conlleva a una sobre oferta de CELs (Antuko, 2019).

De acuerdo con los comunicados de la SENER (2016 y 2017), en la subasta de largo plazo de 2015, el precio promedio combinado de MWh + CEL fue de 47.7 dólares. En 2016 fue de 33.5 dólares y en 2017, de 20.57 dólares, uno de los más bajos a nivel internacional. Aún así, Antuko (2019) proyecta que este incremento en la oferta de certificados provocará que, dentro de los próximos quince años, el precio de los mismos caiga entre 50 y 60 %.

Una forma de estudiar el impacto de estos cambios es tomando en cuenta que la modificación en los lineamientos para adquirir CELs es equivalente a una disminución en la cuota obligatoria establecida, por lo que el incremento en la oferta de certificados puede ser estudiado suponiendo una disminución en α .

De la ecuación de demanda agregada de CELs (17) puede verse que α está relacionado positivamente con x_D^{CEL} , por lo que si α disminuye, la cantidad de CELs demandados por los suministradores también se reducirá. Adicionalmente, la caída de α presiona los precios de los CELs hacia abajo (19), lo que hace que el incentivo a la producción de energía renovable se vea afectado negativamente mediante dos vías. Por un lado, hay una reducción directa en la producción de electricidad verde de equilibrio. Por el otro, la disminución en el precio castiga el ingreso marginal del productor, de tal forma que si los costos marginales empiezan a exceder el ingreso marginal, puede decidir salir del mercado.

El resultado del cambio en el parámetro alpha, es decir, la cuota obligatoria establecida, es consistente con lo que sucedería en el modelo de Ciarreta et. al (2017), donde este parámetro

también se encuentra explícito únicamente en el problema de maximización del suministrador en el mercado de certificados. De igual forma, una reducción en la cuota obligatoria establecida afecta la demanda de certificados y el precio de los mismos.

Los autores de dicho planteamiento además realizan una calibración de su modelo teórico con datos del sector eléctrico español de 2008 a 2013. Con ello buscan comparar los resultados de un sistema de certificados verdes y de un sistema de tarifas de alimentación para el sistema eléctrico de España. Encuentran que un sistema FIT es siempre menos costoso que el de certificados verdes para 2008, independientemente de los objetivos establecidos de energía limpia. Sin embargo, este mismo sistema empieza a volverse más costoso para España hacia el 2010. Concluyen que con una cuota menor al 60 % de energías limpias, el sistema de certificados verdes negociables funciona mejor como incentivo a las energías renovables, pese a que ambos sistemas enfrentan costos muy elevados. Aunque, como se mencionó al inicio, el fin de este trabajo no es comparar dos esquemas de incentivos ni obtener la caída exacta en el precio de los CELS, sino entender cuál es el mecanismo mediante el cual las modificaciones en los lineamientos para adquirir CELs afectan a los productores privados de energía limpia, sería interesante calibrar este modelo para el caso del sector eléctrico mexicano. Si los resultados son congruentes con los obtenidos para el sector eléctrico español, es posible que incrementar la cuota obligatoria de certificados sea una alternativa para evitar que los precios de los certificados caigan bruscamente afectando al sector de las energías limpias.

El cambio en la legislación ha causado incertidumbre entre los generadores de energía limpia. El auto-abastecimiento de CELs por parte de la CFE castiga los precios de los certificados y reduce la demanda de los mismos. Esto implica que desaparece el ingreso extra para los productores de energía limpia y con ello el incentivo económico a la inversión en tecnologías de generación renovable.

Otra cuestión relevante es que estas modificaciones generan desconfianza no solo en este sector sino en toda la economía en general, pues si los lineamientos y las leyes se están cambiando constantemente, a los inversionistas no se les puede otorgar una garantía que haga sus inversiones seguras y menos riesgosas.

6. Conclusión

El sistema de cuotas basado en el uso de certificados de energía limpia es un mecanismo que se ha utilizado en diversas regiones del mundo con el fin de impulsar un mayor desarrollo de fuentes de energía renovable. La implementación de un sistema como este en México puede ser una buena oportunidad para incentivar la inversión privada en proyectos de energía renovable. Las experiencias en otros países demuestran que este mecanismo no es simple. En muchos casos hay éxito y en otros, fracasos (sustitución por esquemas de feed-in tariffs). Algunos creen que esta herramienta debería usarse únicamente en mercados maduros de tecnologías renovables (Abolhosseini & Heshmati, 2014; Jiménez, 2011); mientras que otros, como el gobierno de Polonia y Reino Unido, lo han utilizado para fomentar un rápido crecimiento en el del sector de las energías renovables.

En este trabajo se ha planteado un modelo que toma en cuenta los elementos del mercado eléctrico oligopolístico y sus interacciones con el mercado de CELs. Estudiar estas relaciones ofrece una visión más completa sobre el mercado eléctrico y los incentivos a las tecnologías de generación renovable. De la resolución del modelo se derivan tres resultados importantes: El primero es que la función de demanda de CELs es estrictamente creciente con respecto a la cuota y estrictamente decreciente con respecto al precio de los CELs. El segundo es que el precio de equilibrio de los CELs tiene una relación positiva con la cuota obligatoria y está en función de los costos de producción de electricidad. Por último, el incremento en la oferta de certificados produce una disminución en la producción de electricidad generada con base en fuentes de energía renovables.

Por tanto, la modificación en los lineamientos para la adquisición de CELs i) disminuye la cantidad de CELs demandados por los suministradores; ii) presiona los precios de los CELs hacia abajo, lo que castiga el incentivo a la producción de energía limpia; iii) provoca una reducción en la cantidad de electricidad generada por los productores de energía renovable, y iv) las empresas renovables pueden sufrir afectaciones negativas en sus ingresos y decidir salir del mercado.

El modelo planteado en este texto permite conocer el mecanismo mediante el cual los productores de energía limpia se ven afectados ante las nuevas modificaciones en los lineamientos para adquirir CELs tomando en cuenta las características del mercado eléctrico mexicano. Sin embargo, sería relevante estudiar cuáles podrían ser otros aspectos peligrosos ahora que el mayor suministrador es parte de una gran empresa que originalmente no podía emitir CELs y

ahora puede. Futuras investigaciones deben tomar en cuenta que es posible que el mercado que se consideraba competitivo (el mercado de certificados) ahora deje de serlo, dado que la nueva clasificación modifica los incentivos para utilizar las plantas de CFE que antes no eran acreedoras de CELs. A este reto se suma uno aún más grande relacionado con cambios en la Ley de la Industria Eléctrica en 2021: ¿Cómo la reforma a la LIE de “iniciativa preferente” afectaría el esquema de incentivos estudiado en este documento? En particular, ¿Cuál sería el efecto sobre el sistema de certificados verdes de dar prioridad para despachar la electricidad de CFE primero y dejar al último la de las compañías privadas?, ¿Importa que las primeras en despachar sean las hidroeléctricas de CFE?, ¿Cómo se (des)incentiva la protección y promoción de energías limpias y renovables? Estas son cuestiones que están fuera del alcance de este documento. Harán falta estudios e investigaciones que permitan una mejor comprensión sobre el futuro de las energías renovables en el sector eléctrico mexicano.

Por ahora México tiene dos grandes retos: garantizar la seguridad energética, es decir, incrementar la eficiencia y la distribución de la electricidad a precios competitivos; y fomentar la transición energética a una más sustentable, esto es, cumplir la promesa de mayor bienestar para la población sin descuidar los objetivos ambientales. Para enfrentar estos desafíos es necesario mejorar el esquema actual de incentivos a la energía limpia, o bien, formular otra herramienta que, de forma eficiente y con los menores costos posibles para las finanzas públicas, logre incorporar fuentes de energía renovable a la matriz energética.

Acrónimos

Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) Certificados de Energías Limpias (CELS)
Comisión Federal de electricidad (CFE) Comisión Reguladora de Energía (CRE) Empresa Productiva del Estado (EPE) Ley de la Industria Eléctrica (LIE) Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) Plan Nacional de Desarrollo (PND) Productores Independientes de Energía (PIE) Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) Secretaría de Energía (SENER) Sistema Eléctrico Nacional (SEN) Sistema Interconectado Nacional (SIN) Subastas de Largo Plazo (SLP).

Referencias

- Abolhosseini, S. & Heshmati, A. (2014). The main support mechanisms to finance renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 876-885. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.013>
- An, X., Zhang, S., Li, X. & Du, D. (2019). Two-stage joint equilibrium model of electricity market with tradable green certificates. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41(6), 1615-1626. <https://doi.org/10.1177/0142331217718619>
- Antuko. (2019). Impacto de la Modificación a los Lineamientos para el Reconocimiento de Certificados de Energía Limpia en México. I. <https://petroquimex.com/PDF/NovDic19/Antuko-CELS.pdf>
- Blaga, L. (2017). Accounting Changes on Green Certificates in Romania. *Ovidius University Annals, Economic Sciences Series*, 17(2), 644-648.
- Bryan, J., Lange, I. & MacDonald, A. (2015). Estimating the Price of ROCs. *Electricity Journal*, 28(1), 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2015.01.003>
- Carreon, V. G. (2010). La arquitectura de mercado del sector eléctrico mexicano. *CIDE*, (499), 40.
- Centro Nacional de Control de Energía. (2019). Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Electro Mayorista. PRODESEN 2019-2033, 576. <https://www.cenace.gob.mx/Docs/Planeacion/ProgramaRNT/Programa%20de%20Ampliacion%20y%20Modernizacion%20de%20la%20RNT%20y%20RGD%202019-202033.pdf>
- Ciarreta, A., Espinosa, M. P. & Pizarro-Irizar, C. (2017). Optimal regulation of renewable energy: A comparison of Feed-in Tariffs and Tradable Green Certificates in the Spanish electricity system. *Energy Economics*, 67(2017), 387-399. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.08.028>
- CRE. (2016). Preguntas Frecuentes sobre los Certificados de Energías Limpias.
- De la Garza, E. (1994). *Historia de la industria eléctrica en México*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Dragomir, G., Şerban, A., Năstase, G. & Brezeanu, A. I. (2016). Wind energy in Romania: A review from 2009 to 2016. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 129-143. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.080>

- Farinosi, F., Carrera, L., Mysiak, J., Breil, M. & Testella, F. (2012). Tradable certificates for renewable energy: The Italian experience with hydropower. *9th International Conference on the European Energy Market, EEM 12*, (May). <https://doi.org/10.1109/EEM.2012.6254695>
- Galalae, C. (2011). Comparative Analysis of Emerging Green Certificate Markets from a Computable General Equilibrium Perspective. *Economia : Seria Management*, 14(2), 392-398.
- Gobierno de México. (2015). Resumen ejecutivo de la Reforma Energética. *Diario Oficial de la Federación*, 23.
- Hewitt, B. J., Ceeney, R. & Feb-, M. D. (2015). Analysis : Early closure of the ROCs regime ruled lawful. <https://www.realestatelegalupdate.com/2015/02/articles/real-estate-uk/real-estate-development-real-estate-uk/analysis-early-closure-of-the-rocs-regime-ruled-lawful/>
- Jiménez, S. (2011). Energía renovable no convencional: políticas de promoción en Chil. *Liber-tad y Desarrollo*, 60.
- Marchenko, O. V. (2007). Mathematical modelling of electricity market with renewable energy sources. *Renewable Energy*, 32(6), 976-990. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.004>
- Marchenko, O. V. (2008). Modeling of a green certificate market. *Renewable Energy*, 33(8), 1953-1958. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.026>
- Molina, A. (2017). Estructura de la industria eléctrica mexicana: El Modelo de Comprador Único. *Economía teoría y práctica*, (46), 71-95. <https://doi.org/10.24275/etypuam/ne/462017/molina>
- Montgomery, W. D. (1972). 395 1972. *Journal of Economic Theory*, 8, 395-418.
- Morthorst, P. E. (2000). The development of a green certificate market. *Energy Policy*, 28(15), 1085-1094. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00094-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00094-X)
- Nasser, H. (2010). A green certificate market may result in less green electricity. <http://desertec-mediterranee.over-blog.com/article-a-green-certificate-market-may-result-in-less-green-electricity-42986618.html>
- Nava, D. (2019). 90 % del gas que se consume en México ya es importado. <https://elfinanciero.com.mx/economia/90-del-gas-que-se-consume-%20en-mexico-ya-es-importado>
- Novoa, E. (1974). *Nacionalización y recuperación de recursos naturales ante la ley interna-cional*. Fondo de Cultura Económica.

- Ovalle, J. (2007). La nacionalización de las industrias petrolera y eléctrica. *Boletín Mexicano de Derecho Comparado*, (118), 169-191.
- Perez, A. P., Sauma, E. E., Munoz, F. D. & Hobbs, B. F. (2016). The economic effects of inter-regional trading of Renewable Energy certificates in the U.S. WECC. *Energy Journal*, 37(4), 267-295. <https://doi.org/10.5547/01956574.37.4.aper>
- Poputoaia, D. & Fripp, M. (2008). European Experience with Tradable Green Certificates and Feed- in Tariffs for Renewable Electricity Support, 5-42. <https://www.academia.edu/1017216/European Tradable Green Certificates and Feed-In Tariffs for Renewable Electricity Support?auto=download>
- Raluca, S. (2017). Accounting Changes on Green Certificates in Romania. *“Ovidius” University Annals, Economic Sciences Series*, 17(2), 5.
- Ramírez, V. (2019). Sector Eléctrico Mexicano: entre el futuro y el pasado. <https://www.nexos.com.mx/?p=43338>
- Rodríguez, G. (1994). *Evolución de la industria en México* (D. Reséndez, Ed.). Fondo de Cultura Económica.
- SENER. (2016). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2016-2030* (inf. téc.). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/98308/PRODESEN-2016-2030%7B%5C_%7D1.pdf
- Sigler, E. (2019). Sener y CFE festejan el 'madruguete' que le dieron al mercado de energía limpia. <https://expansion.mx/empresas/2019/10/29/sener-y-cfe-celebran-madruguete-20mercado-de-energias-limpias>
- Wedzik, A., Siewierski, T. & Szypowski, M. (2017). Green certificates market in Poland – The sources of crisis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (75), 490-503.
- Wilson, R. (2002). ARCHITECTURE OF POWER MARKETS 1 By Robert Wilson 2. *Power*, 70(4), 1299-1340.
- Zarco, J. (2019). Expertos y su visión sobre los Certificados de Energía Limpia. <https://www.pv-magazine-mexico.com/2019/10/29/expertos-y-su-vision-sobre-los-certificados-de-energia-electrica/>
- Zubrinich, P. (2019). Expertos y su visión sobre los Certificados de Energía Limpia. *pv magazine*.

Índice de figuras

1. Tasa media de crecimiento anual 2005-2015 7
2. Energía producida durante 2018 por modalidad de generador (317 278 GWh) . 8