



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD ZACATENCO**

**PROGRAMA DE DESARROLLO CIENTÍFICO Y
TECNOLÓGICO PARA LA SOCIEDAD**

**“Análisis de políticas públicas del sector
energético en la innovación y en la capacidad
instalada del sector fotovoltaico”**

TESIS

Que presenta

CARLOS NORBERTO REYES

Para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS

**EN DESARROLLO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO
PARA LA SOCIEDAD**

Directores de Tesis

Dra. Claudia Noemi González Brambila

Dr. Yasuhiro Matsumoto Kuwabara

Ciudad de México

Junio, 2016

Resumen

El presente trabajo de investigación se enfoca en el análisis de determinantes de innovación y de capacidad instalada en el sector fotovoltaico (FV). Con una muestra de 15 países asociados a la Agencia Internacional de Energía y una base de datos de 1992 a 2011. Los resultados del análisis de determinantes de la innovación, considerando como medida de innovación al número de patentes en el sector FV, muestran que la aplicación de los instrumentos de política: tarifa de retroalimentación, los subsidios directos al capital y los fondos de inversión promueven la innovación en el sector. Además, la variación de precios del módulo FV muestra una correlación inversa con el número de patentes. Por otro lado, los resultados obtenidos del análisis de los factores determinantes de la capacidad anual instalada sugieren que los factores que favorecen el despliegue de los sistemas fotovoltaicos son el consumo neto de electricidad renovable, la existencia de una tarifa de retroalimentación, la existencia de requerimientos de construcción sustentable y la publicación científica, este último factor requiere de un apoyo a largo plazo. También, los resultados obtenidos sugieren que las variables que muestran una correlación inversa con el despliegue FV son las reservas de petróleo y las emisiones de dióxido de carbono derivadas del consumo de energía.

Abstract

This research focuses on the analysis of determinants of innovation and installed capacity in the photovoltaic (PV) sector. It was used a sample of 15 IEA countries and a database from 1992 to 2011. In the analysis of determinants of innovation, considering innovation as a measure of the number of patents in the PV sector, the results show that the application of the policy instruments: feed-in tariff, direct capital subsidies and investment funds promote innovation in this sector. In addition, the decrease of the PV module price shows an inverse correlation with the number of international patents. On the other hand, the results of the analysis of the determinants of annual installed capacity suggest that the factors promoting the deployment of PV systems are the net consumption of renewable electricity, the existence of a feed-in tariff and sustainable building requirements, as well as the quantity of scientific publications that requires long-term support. Meanwhile, the variables that negatively correlate with the PV deployment are oil reserves and the carbon dioxide emissions from energy consumption.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV) por el apoyo a esta investigación.

A los codirectores de tesis, Dra. Claudia Noemi González Brambila y Dr. Yasuhiro Matsumoto Kuwabara, por su compromiso, dedicación, paciencia y enseñanzas.

A los sinodales de tesis, Dr. David Elías, Dr. Miguel Á. Pérez, Dr. Carlos G. Pacheco, Dr. Rafael Baquero, Dr. Jaime Álvarez, Dra. Hortensia Gómez, y Dra. Claudia T. Edwards, por su participación y observaciones para mejorar el trabajo de tesis.

A todo el personal que integra el programa DCTS; En especial al Dr. Eduard de la Cruz.

Al Centro de Investigaciones Económicas, Administrativas y Sociales, por las facilidades brindadas para complementar mi preparación en asignaturas de la Maestría en Política y Gestión del Cambio Tecnológico. En especial a la Dra. Hortensia Gómez Viquez y al Dr. Humberto Merritt Tapia.

A la Escuela Superior de Economía, Sección de Posgrado e Investigación, por las facilidades de ingreso a curso regular en la Maestría en Ciencias Económicas. En especial al Dr. Gerardo Angeles Castro y al M. en C. José Luis Romero Espejel.

A la Universidad Nacional Autónoma de México en su Sección de Posgrado de Investigación de Operaciones e Ingeniería Industrial y al Dr. Juan Manuel Estrada Medina.

"¹Give me the splendid silent sun with all his beams full-dazzling...

²Keep your splendid silent sun,

Keep your woods O Nature, and the quiet places by the woods"

Walt Whitman.

ÍNDICE

Índice general	7
Índice de tablas y gráficas	10

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1

Introducción	13
1.1 Contexto general	14
1.2 Justificación	22
1.3 Definición del problema	26
1.4 Objetivo	29
1.5 Resumen de capítulos	31

CAPÍTULO 2

Análisis de factores de la innovación en el sector fotovoltaico	35
2.1 Introducción	36
2.2 Literatura relacionada	39
2.3 Datos y métodos	44
2.4 Resultados	49
2.5 Discusión	53

CAPÍTULO 3

Análisis sistémico de factores que afectan el despliegue de la tecnología solar fotovoltaica	59
3.1 Introducción	60
3.2 El sistema FV en el sector energético y revisión de estudios previos	63
3.2.1 Energía renovable en el sector eléctrico	63
3.2.2 Tecnología FV y políticas de fomento	65
3.2.3 Estudios previos	72
3.2.3.1 Estudios previos relacionados con evaluación de políticas	72
3.2.3.2 Estudios relacionados con el sistema socio-técnico y la transición tecnológica en el sector energético	75
3.3 Datos y métodos	78
3.4 Resultados	86
3.5 Discusión	91

CAPÍTULO 4

Conclusiones	97
4.1 Conclusiones y observaciones generales	98
4.2 Líneas de investigación	103
4.3 Resumen de actividades académicas	105
4.3.1 Productos generados	105
4.3.2 Movilidad académica	105

BIBLIOGRAFÍA	109
APÉNDICE A. Búsquedas para patentes y artículos	117
APÉNDICE B. Correlaciones entre variables	119
APÉNDICE C. Listados de acrónimos para las variables por capítulo	122

ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICAS

Tabla 1.1	Ejemplos de determinantes en energía renovable en estudios previos consultados	23
Tabla 2.1	Variables para el modelo de regresión	47
Tabla 2.2	Agrupación de variables cuantitativas y binarias	48
Tabla 2.3	Correlaciones entre variables (se muestran las variables significativas)	49
Tabla 2.4	Estadísticas básicas de las variables	51
Tabla 2.5	Resultados de la regresión	52
Tabla 3.1	Agrupación de fuentes de energía renovable	64
Tabla 3.2	Proporción de generación de electricidad en el mundo por combustible en 2013	66
Tabla 3.3	Producción de electricidad a partir de fuentes no hidráulicas en países de la OCDE en 2012	66
Tabla 3.4	Tasa de crecimiento anual de la producción de electricidad de fuentes renovables no hidráulicas (1990-2012)	67
Tabla 3.5	Clasificación general de los tipos de celdas y sus eficiencias de sub-módulo	68

Tabla 3.6	Instrumentos de apoyo para el despliegue FV en países de la IEA (1992-2012)	70
Tabla 3.7	Los cinco regímenes ST y sus variables asociadas para el modelo de efectos fijos	81
Tabla 3.8	Variables dependiente y de control para el modelo de efectos fijos, y agrupación por tipo de variable (cuantitativa o binaria).	82
Tabla 3.9	Correlaciones entre variables (únicamente para las variables que se muestran en la Tabla 3.10)	88
Tabla 3.10	Resultados de regresión (coeficientes de regresión y resultados de pruebas a los modelos)	90
Tabla B.1	Correlación entre la variable dependiente “ <i>PCumInstPV</i> ” y variables de control del modelo de regresión no significativas (excepto “ <i>ppatent</i> ” y “ <i>ppaper</i> ”)	119
Tabla B.2	Correlación entre la variable dependiente “ <i>PCumInstPV</i> ” y las variables de control “ <i>ppatent</i> ” y “ <i>ppaper</i> ”, se muestran los distintos rezagos de las variables probadas en el modelo de regresión	120
Gráfica 1.1	Capacidad total mundial solar fotovoltaica 1995-2011	15
Gráfica 1.2	Tendencia del precio de los módulos fotovoltaicos 1980-2014	17
Gráfica 1.3	Producción de módulos fotovoltaicos en países de la IEA 2006-2013	18

Capítulo 1

Introducción

1.1 Contexto general

Uno de los puntos de inflexión para la atención a la diversificación energética mundial fue la crisis mundial petrolera en los 70s. La tecnología fotovoltaica (FV), junto con otras energías renovables como la nuclear, despuntan como fuentes energéticas alternativas que pudieran sustituir paulatinamente a los hidrocarburos. El objetivo principal es dar solución a los diversos problemas relacionados con la explotación de los hidrocarburos para generar energía. Por ejemplo, aunado a las crisis económicas que se producen por los excesos o bajas en la producción de hidrocarburos, también es latente el problema de los límites de las reservas mundiales de estos, así como los retos tecnológicos para su extracción en nuevos yacimientos; otra preocupación son las externalidades por el uso de hidrocarburos, entre las cuales se encuentra el fenómeno del calentamiento global.

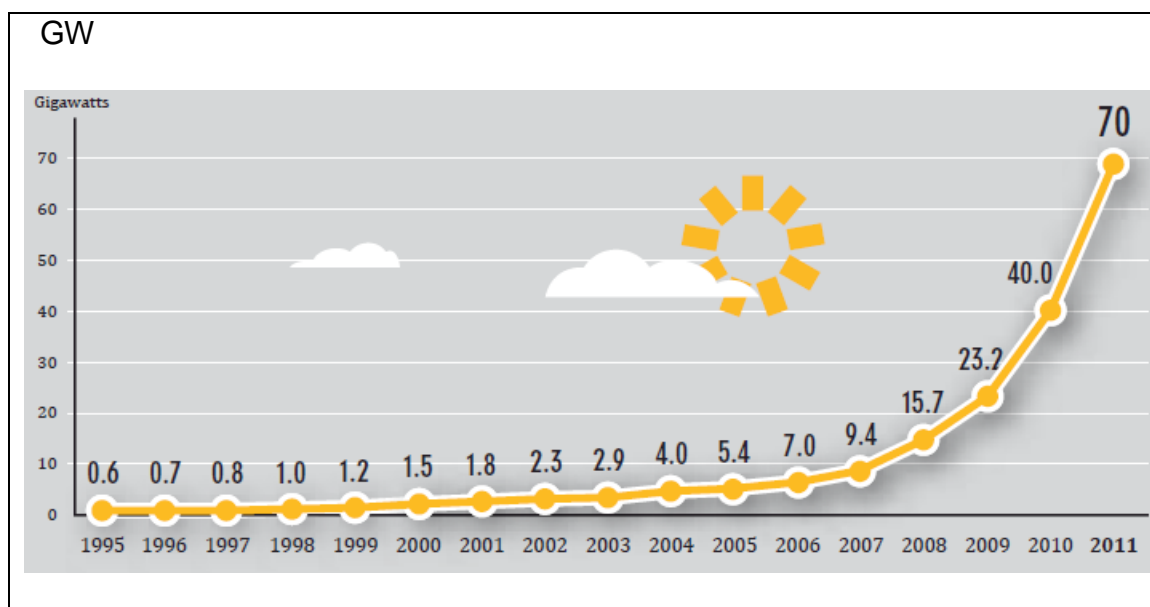
Aunque la dependencia en combustibles fósiles, sus problemas y externalidades asociadas, así como la demanda creciente de energía han conducido a la necesidad de una transición a nivel global hacia sistemas sustentables de energía, la participación mundial de la energía renovable (ER) en la producción de energía primaria en 2013 alcanzó solo el 18.6% (IEA, 2015:6), en tanto que el 81.4% restante lo cubren los hidrocarburos (IEA, 2015:6). El sector en donde la ER presenta mayor avance es en la generación de electricidad. La producción mundial total de electricidad en 2013 fue de 23 322 TWh (Tera Watt-hora) [IEA, 2015:24] de la cual el 32.6% fue participación de ER (IEA, 2015:24).

En lo que respecta a tecnología fotovoltaica, como fuente en la generación de electricidad, esta registró una capacidad mundial anual instalada de 40.13 GW (Giga Watt) en 2014 (EPIA, 2015:10), alcanzando una capacidad mundial acumulada de 178.39 GW (EPIA, 2015:12) en ese año. Una participación aun pequeña si se considera el potencial de generación del recurso solar.

Es a partir de mediados de los 90s que la capacidad fotovoltaica acumulada global presenta un comportamiento de crecimiento exponencial. La tendencia de crecimiento de la capacidad anual instalada ha sido muy regular, aunque se presentó un repunte en el crecimiento en el 2011, este se niveló rápidamente al año siguiente. La capacidad acumulada instalada en ese 2011 fue de 70 GW (gráfica 1). Considerando los 178.39 GW en 2014, la capacidad acumulada registró un crecimiento cercano a 250% en tres años, que es una muestra de la dinámica de esta fuente de energía en el sector energético en los últimos años.

Gráfica 1.1

Capacidad total mundial solar fotovoltaica 1995-2011



Fuente: "Renewables 2014, Global Status Report". Renewables Energy Policy Network for the 21st Century, 2014; p.48.

El efecto fotovoltaico es uno de los medios de conversión de la energía solar para la diversificación energética. La Tierra recibe una gran cantidad de energía del Sol, mediante celdas fotovoltaicas (también llamadas celdas solares) se logra obtener electricidad a través de convertir la energía que se capta de la irradiación solar.

Una de las técnicas mediante las cuales se lleva a cabo la conversión de energía solar a electricidad en el mercado eléctrico es a través de los sistemas fotovoltaicos (SFVs). Dependiendo del tipo de arreglo y aplicación, estos sistemas pueden incluir algunos de los siguientes procesos: captación, conversión, regulación, distribución, y almacenamiento de energía. Las eficiencias de conversión de los módulos fotovoltaicos son una de las referencias de estos sistemas pues los módulos son un encapsulado que contienen varias celdas fotovoltaicas.

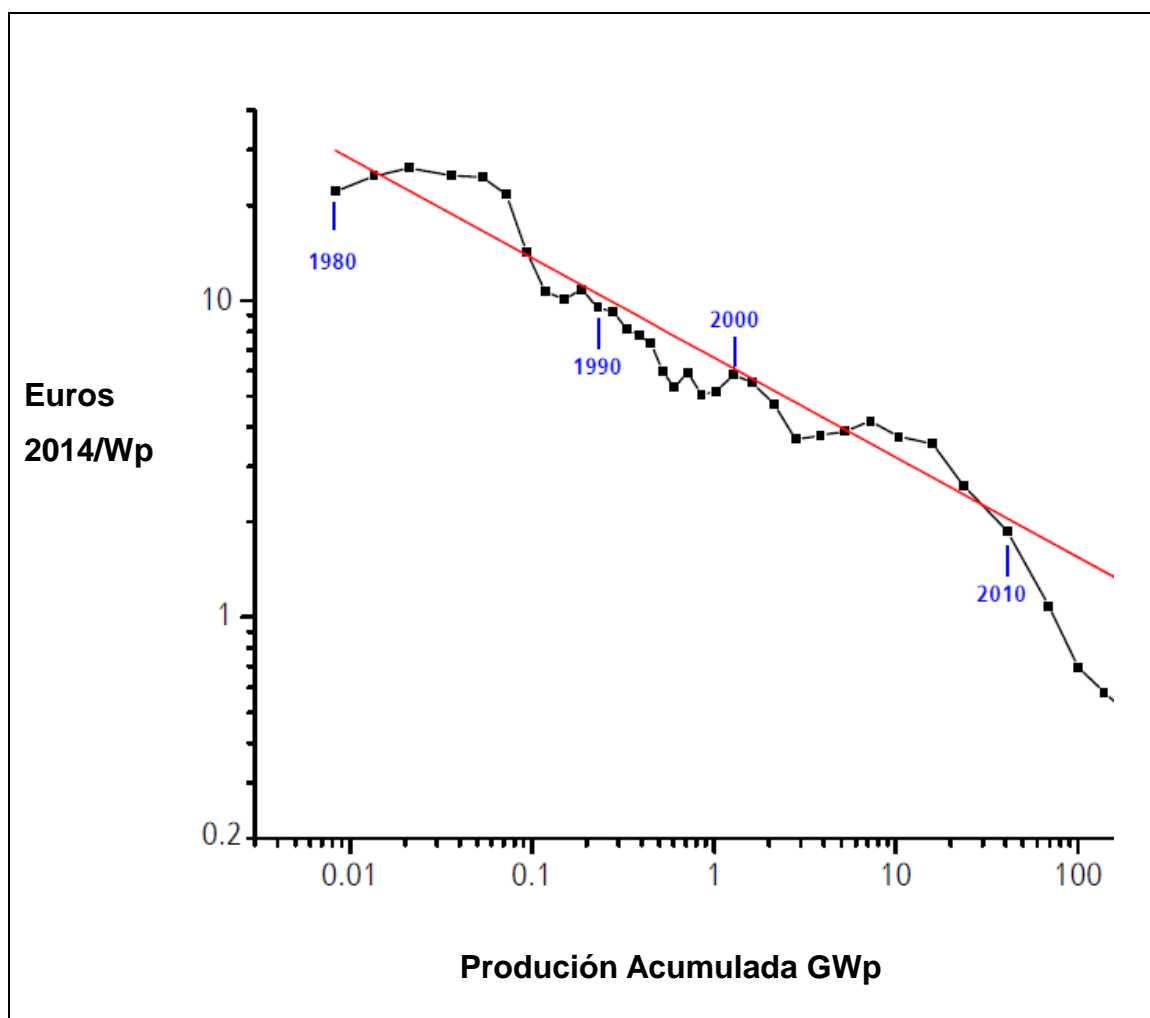
Las eficiencias de conversión de las celdas solares han mejorado en comparación con las eficiencias en las primeras generaciones (Green, 2014). Sin embargo, las mejoras en la eficiencia de conversión es aun uno de los factores que puede favorecer aún más la expansión de la tecnología FV en el mercado energético, porque su impacto es favorable en los costos (Masoudi, 2015), existe una relación inversa entre la eficiencia de conversión y el área necesaria para la generación de energía requerida; en tanto que se tiene una relación directa entre el área requerida para la conversión y los costos de inversión.

Por otro lado, un inconveniente que puede ocurrir con la conversión de energía mediante SFVs es la generación intermitente de energía. Se puede tener una diferencia con las demandas pico de energía porque se requiere de la irradiación solar para la generación de electricidad, las demandas pico dependen del área geográfica de ubicación, la época estacional del año y la hora del día. También puede darse casos, en determinadas ocasiones, en los cuales la distribución de la electricidad generada por el SFV presente una dificultad por la localización de los puntos de generación y consumo. Sin embargo, uno de los factores principales que impacta de manera desfavorable en la competitividad de la tecnología FV en el sector energético es el costo de inversión inicial asociado a los SFVs.

Si bien, la caída de los precios de los módulos fotovoltaicos (gráfica 2) ha sido favorable para hacer a los SFVs más competitivos que en años anteriores (UNEP, 2011:212), al grado que en algunos casos particulares ha alcanzado paridad con fuentes convencionales (REN21, 2014:48; EPIA, 2015:7), en general, el costo nivelado de energía de los SFVs aún está por encima del costo de las fuentes convencionales de energía (carbón, combustóleo y gas) [UNEP, 2011:213].

Gráfica 1.2

Tendencia del precio de los módulos fotovoltaicos 1980-2014

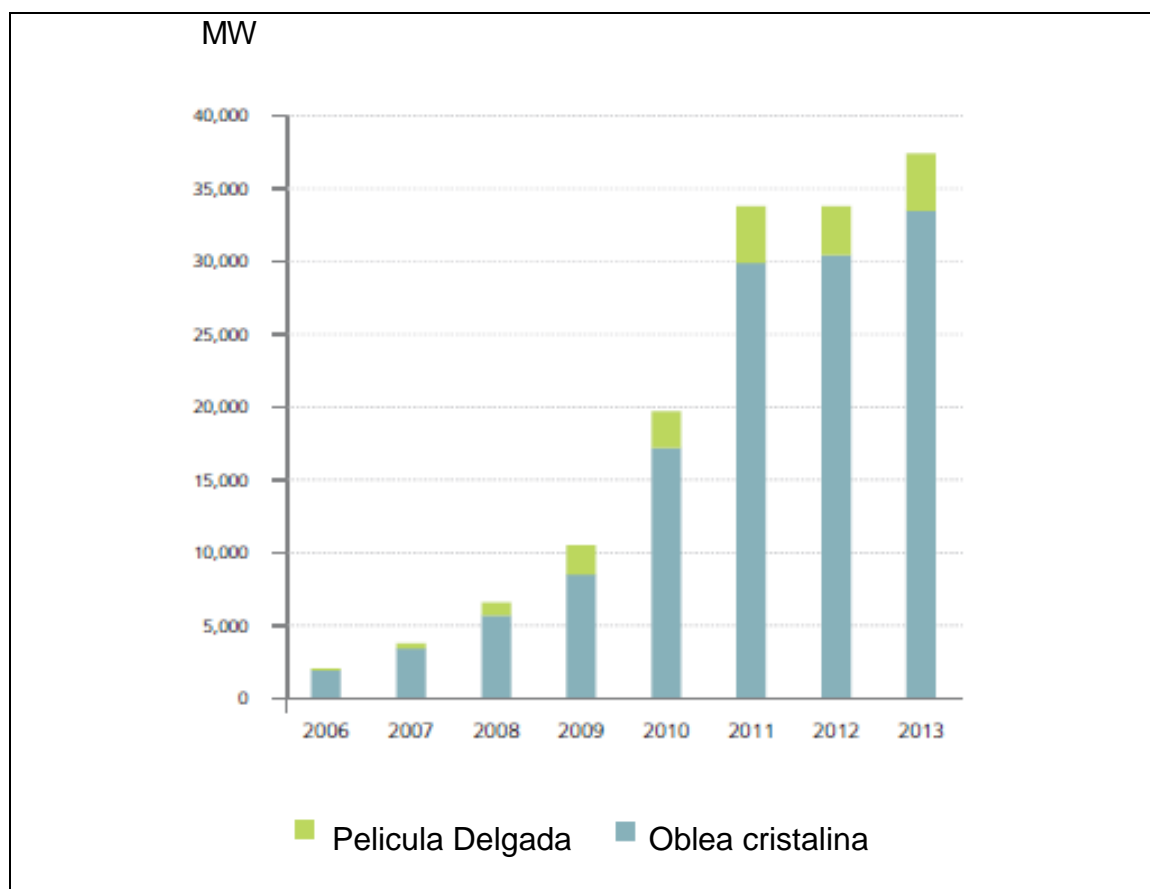


Fuente: Adaptado de "Photovoltaic Report". Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, 2016; www.ise.fraunhofer.de.

La caída en los precios de los módulos fotovoltaicos se relaciona con las curvas de aprendizaje en producción, el incremento de la competencia en el mercado eléctrico y el desarrollo tecnológico en tecnología fotovoltaica (Fraunhofer, 2016; Masoudi, 2015). En cuanto al desarrollo de la tecnología, la producción científica relacionada a la tecnología FV, así como el número de patentes en este sector han mantenido un crecimiento constante desde los 70s aunque también han mostrado repuntes, en especial en el caso de las patentes (Peters et al., 2012; Liu et al. 2011).

Gráfica 1.3

Producción de módulos fotovoltaicos en países de la IEA 2006-2013



Fuente: "Trends 2014 in Photovoltaic Application. Survey reports of selected IEA countries 1992 and 2013". International Energy Agency, 2014; p46.

Otros factores que también pueden ser elementos que dificultan la expansión de la explotación del recurso solar pueden ser por ejemplo, variación en los precios de los energéticos, reestructuración en los instrumentos de apoyo al despliegue fotovoltaico, así como una saturación temporal del mercado fotovoltaico (por ejemplo, por nuevos proyectos y/o exceso de producción de módulos). La gráfica 1.3 muestra la tendencia de producción de módulos en países de la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés). En cuanto a las proyecciones a futuro de la participación de tecnología FV en la generación de electricidad, los análisis de la “*European Photovoltaic Industry Association*” (EPIA) son optimistas para el crecimiento de esta tecnología en el sector energético, ya que muestran que la tecnología FV mantendrá una tendencia de crecimiento similar a la que ha mostrado en el pasado (EPIA, 2015:14-15).

Por otro lado, para apoyar y fomentar el despliegue de la tecnología FV, diversos instrumentos de política pública se utilizan para combatir la falta de competitividad en el mercado energético de los SFVs (IEA; 2013a:40-44). Estos apoyos pueden incidir en los costos iniciales de inversión (en producción o instalación), o también pueden aplicarse en forma de compromisos de adquisición y precios preferenciales para los productores de energía.

Dos aspectos en la política pública son factores relevantes que motivan la búsqueda para sostener y/o acelerar la participación de ER en el portafolio energético. Por un lado, las metas de los diversos países en reducción de emisiones de gases de efecto invernadero; además, de las metas de participación por tecnología renovable en la generación de energía (REN21, 2014:111-117, 121). Sin embargo, los diversos esfuerzos que se realizan en apoyo al despliegue fotovoltaico requieren de monitoreo y análisis constante. Una de las formas de análisis es la exploración de determinantes de innovación, que es un medio útil para el análisis de la política pública en ER.

En lo que respecta a la producción científica son escasos los estudios de determinantes de innovación por tecnología renovable individual y en específico sobre el sector fotovoltaico. Estudios previos sobre determinantes de innovación en ER (por ejemplo: Chen y Su, 2014; Muhammad-Sukki et al., 2014; Carley, 2009; Khan et al., 2014) comúnmente tratan a la producción total de ER, como una sola variable sin diferenciar por tipo de tecnología. Es común en estos estudios el análisis por país, por región, o por grupos de países. Además, se realizan ya sea por el lado de la demanda de tecnología, o por el lado de la oferta de tecnología. Son recientes y muy escasos los análisis del desarrollo tecnológico que integren ambos aspectos de la innovación tecnológica (oferta y demanda) [Kern, 2012; Stephens y Jiusto, 2009, Verbong y Geels, 2006], aunque han mostrado su utilidad para evaluar las políticas públicas antes de implementar estas (Kern, 2012).

Entre los resultados de los estudios previos relacionados a determinantes en ER se encuentra la observación de Shrimali y Kniefel (2011) respecto a la variación de los efectos de los instrumentos de política pública sobre las diferentes tecnologías renovables. Además, estudios específicos en tecnología FV, como el trabajo de Chen y Su (2014) en el mercado fotovoltaico Chino, muestra que estos brindan mayor información sobre los impactos que se están sucediendo respecto a una tecnología en específico de los determinantes analizados, en comparación con los estudios que manejan a toda la producción de energía renovable como una sola variable integrada.

También, estudios previos no han sido concluyentes. Por ejemplo, Carly (2009) sugiere que el precio de electricidad es significativo para el despliegue de la ER en Norte América (EUA) mientras que Shrimali y Kniefel (2011) sugieren que dicho precio no es significativo, estudio realizado también sobre EUA. Ambos resultados provienen de explorar relaciones causales entre las políticas públicas sobre ER y el porcentaje de generación de electricidad renovable.

Por otro parte, existe un área de análisis en la cual se considera como medida de innovación al número de patentes generadas por país o industria. La competitividad en los precios de los módulos fotovoltaicos, derivados en parte por el desarrollo de la tecnología en este sector, converge en la necesidad de mantener el crecimiento en el número de patentes. Para ello, también es necesario analizar y conocer que determinantes están detrás de la innovación en este sector.

Sin embargo, los análisis específicos sobre determinantes de innovación en tecnología FV, considerando al número de patentes como indicador de innovación son escasos (por ejemplo: Liu et al, 2011). Es más factible encontrar producción científica relacionada a determinantes de innovación con análisis que manejan el total de patentes en renovables integradas como una sola variable (Bayer et al, 2013; Cheon y Urpelainen, 2012; Bointner, 2014; Nesta et al, 2014). Además, también son escasos los estudio que realizan análisis por grupos de renovables en donde se considera a las patentes por cada tecnología (Braun, 2010; Diaz, 2013).

Entre los resultados de los estudios previos con patentes, por ejemplo, se encuentra que la innovación se caracteriza de manera diferenciada en las tecnologías renovables (Braun, 2010); Por lo que es complicado observar el impacto o los impactos sobre la innovación en una tecnología en particular si se considera como una sola variable al total de patentes en renovables.

Si bien, estos estudios que no separan las patentes por tecnología son útiles, pues son un primer indicio de los diversos factores detrás del número de patentes en renovables, es necesario ampliar el análisis de los impactos en la innovación por tecnología de los instrumentos de política pública. Como es el caso del estudio de Liu (2011) en donde muestra correlaciones entre las variables de control y las patentes en fotovoltaico.

1.2 Justificación

Entre los objetivos centrales de la transición energética global se encuentra disminuir la dependencia en hidrocarburos, evitar el aumento de la temperatura terrestre y mantener el suministro de energía (sustentabilidad y seguridad energética). La diversificación del portafolio energético se encuentra en las agendas políticas de la mayoría de los países, con metas concretas a futuro en porcentajes de participación de ER (REN21, 2014:111-117,121). En particular, la tecnología FV ha mostrado un crecimiento más rápido con respecto a otras tecnologías renovables (IEA, 2013: 40) y el potencial solar aún tiene mucho por ofrecer en la generación de energía. Para ello, son varios los Instrumentos de política pública de los cuales se hace uso para fomentar el despliegue fotovoltaico. La evaluación del desempeño de los instrumentos permite hacer más eficientes los esfuerzos a través de mejoras o ajustes a las políticas aplicadas.

Los estudios sobre determinantes de una variable de control son utilizados para evaluar los resultados de políticas públicas en ER. Estos estudios pueden mostrar correlaciones entre las políticas aplicadas y los resultados obtenidos de estas. Por ejemplo, en tabla 1.1 se resume algunos de los resultados obtenidos en estudios previos sobre determinantes de ER. El presente trabajo se enfoca en esta línea de investigación en ER, enfocando el estudio con una perspectiva sectorial, en una tecnología en específico, y con una perspectiva de integración de la oferta y demanda de tecnología, buscando conocer determinantes de innovación tecnológica en el sector fotovoltaico. Uno de los aspectos esenciales que diferencian al presente estudio es una perspectiva sistémica de integración de la oferta y demanda tecnológica mediante la teoría de sistemas socio-técnicos. Además del estudio de determinantes de innovación, medido por el número de patentes en fotovoltaico, examinando políticas públicas y apropiación tecnológica.

Tabla 1.1

Ejemplos de determinantes en energía renovable en estudios previos consultados

Estudio	Lugar	Políticas significativas	Políticas no significativas
Carley (2009)	-EUA	-Instituciones políticas -Recursos naturales -Desregulación (del mercado eléctrico) -PIB -Precio de electricidad -Consumo de electricidad por persona	
Shrimali y Kniefel (2011)	-EUA	-Cartera de renovables (RPS) -Opciones de generación verde -Fondos de energía limpia	-Precio de electricidad -Precio del gas natural -PIB -Adquisición de energía verde -Portafolio voluntario de ER
Marques y Fuinhas (2011)	-Países Europeos		-Precio de combustibles fósiles -Ingresos por combustibles fósiles -Conciencia sustentable -Mitigación cambio climático
Alagappan et al. (2011)	-EUA -Canada -Europa	-Tarifa de retroalimentación (Feed-in tariff) -Planificación anticipada -Absorción del costo de interconexión de transmisión	

Fuente: Elaboración propia con información de artículos publicados (Carley, 2009; Shrimali y Kniefel, 2011; Marques y Fuinhas, 2011; Alagappan et al., 2011).

Los estudios sobre determinantes de innovación brindan información que puede ser útil y relevante sobre el ajuste de la política pública. Por ejemplo, Carley (2009) muestra que la implementación de una cartera de renovables (Renewable Portfolio Standard - RPS por sus siglas en inglés) en EUA no predice significativamente el porcentaje de generación de electricidad renovable mientras que en el estudio de Shrimali y Kniefel (2011), también en EUA, se sugiere que el impacto del programa RPS varía dependiendo del tipo de fuente renovable. Es decir, de los resultados se puede enfocar el programa RPS a aquellas tecnologías renovables a las cuales este programa impacta significativamente, en tanto que se necesitaría buscar otro tipo de instrumento para el resto de las tecnologías a las cuales la cartera de renovables no favorece.

También, lo anterior sugiere que se debe profundizar en los impactos que produce una política para el fomento de renovables en lo individual para cada tecnología, porque los impactos derivados de estos apoyos pueden no ser los mismos. Además, como se observa en la tabla 1.1 también puede encontrarse divergencias en los resultados obtenidos (Carly, 2009; Shrimali y Kniefel, 2011) por lo que se requiere explorar diversas metodologías y así poder contrastar resultados.

La evaluación en el avance de la ER es preponderante por la necesaria transición de los sistemas de energía. Las metas de los países alrededor del mundo con respecto a generación con ER, así como las metas por tecnología son una oportunidad para el fomento de ER y la transición de los sistemas energéticos. Para ello, se requiere de la evaluación de los impactos de las políticas públicas sobre las diversas tecnologías renovables, de tal manera que se pueda contar con información adicional para la toma de decisiones en la implementación de instrumentos o programas eficaces para el despliegue de ER.

Las diversas dificultades relacionadas a las energías renovables son factores a considerar al momento de las inversiones en fuentes de energía. Además, la ER se enfrenta a una dependencia en hidrocarburos que es aun superior al 80% en la producción de energía primaria (IEA, 2015:6). En cuanto a la tecnología fotovoltaica en específico, los pocos estudios relacionados con determinantes en este sector es una oportunidad para explorar esta tecnología de manera sectorial, tanto por las proyecciones favorables sobre crecimiento, así como por el gran potencial de energía solar que recibe el planeta.

1.3 Definición del problema

Un elemento esencial para la vida en general es la energía, la cual permite realizar procesos físicos o químicos, por ejemplo algún tipo de movimiento o generar calor. Actualmente, la principal fuente de energía primaria para la humanidad son los hidrocarburos (carbón, gas y petróleo) [IEA, 2015:6]. Sin embargo, cubrir la demanda global de energía con sistemas que se basan en combustibles fósiles enfrenta dificultades, debido a la naturaleza de estos combustibles y por las externalidades que genera su uso.

Por ejemplo, entre los problemas se encuentra que las reservas de hidrocarburos no son infinitas y se presenta una creciente dificultad para su extracción, además la explotación de nuevos yacimientos demanda retos tecnológicos que pueden poner en riesgo la viabilidad financiera de los proyectos. También, la quema de hidrocarburos ha contribuido con el incremento de cantidad de gases de efecto invernadero que se arrojan a la atmósfera, lo que se asocia con el incremento del calentamiento global. Si este fenómeno no se detiene o se desacelera, el clima terrestre cambiaría con impactos muy negativos tanto para la humanidad como para la biodiversidad.

Por otro lado, la variabilidad de los precios de los hidrocarburos y/o el exceso o escasez de su producción pueden provocar inestabilidad y crisis económica, además la relación entre las reservas de hidrocarburos y la demanda de energía puede conducir a dependencia energética. En respuesta a estas dificultades, a nivel global se realizan diversos esfuerzos (por ejemplo: en desarrollo tecnológico, en regulación ambiental, en política internacional o regional) en busca de una transición a sistemas sustentables de energía, que sean bajos en carbono.

Además, dicha transición debe sustentar el gradual crecimiento poblacional y el constante desarrollo de las sociedades (IEA, 2015a:84, 127); es decir, debe cubrir la demanda de energía que mantiene un crecimiento constante. Por ello, la transición se está presentando como una diversificación del portafolio energético, en donde se incluye tanto a la ER como a la energía no renovable (hidrocarburos).

Si bien, la ER presenta ventajas que permiten afrontar los problemas derivados del uso de los hidrocarburos, no se encuentra exenta de dificultades; por ejemplo, en las eficiencias de la conversión de energía, el problema de la intermitencia en la generación de energía o de la transmisión de ésta para su consumo. Además de los costos aun elevados para proyectos de inversión en ER (en la mayoría de los casos) aunado a la escases de crédito o financiamiento específicos para estos proyectos. Sin embargo, aun con las dificultades relacionadas a la generación de ER, la necesidad de la transición ha llevado a una tendencia en el crecimiento del porcentaje en generación, ya sea en energía primaria o secundaria; tanto en el sector residencial como en los diversos sectores productivos.

El reto aun es incrementar la diversificación del portafolio energético pues este es aún modesto con respecto al potencial de generación con ER (IEA, 2015:6). Para ello, se busca conocer cómo hacer más eficientes y eficaces los esfuerzos que se realizan tanto del lado de la oferta como del lado de la de demanda de tecnología renovable (Chen y Su, 2014; Muhammad-Sukki et al., 2014; Carley, 2009; Khan et al., 2014; Sanz-Casado et al., 2014; Alagappan et al., 2011; Shrimali y Kniefel, 2011; Peters et al., 2012; Luo et al., 2013). La generación de información, su procesamiento y análisis crítico son elementos esenciales e indispensables para la instrumentación de políticas públicas que brinden los resultados deseados.

Existen análisis de determinantes de innovación en ER que pueden auxiliar en la instrumentación de estas políticas. Parte de los resultados obtenidos de los estudios existentes de determinantes muestran que los instrumentos de política pública pueden impactar de manera diferenciada a las diversas tecnologías renovables (Shrimali y Kniefel, 2011). Por ello, es necesario incluir más estudios de determinantes de innovación pero específicos por tecnología renovable debido a que estos son muy escasos, tal que permitan estudiar el comportamiento de una tecnología específica a las políticas aplicadas. Por otro lado, existen estudios específicos por renovable pero enfocados al desarrollo o avance de la tecnología en sí, dejando de lado su desarrollo o impacto en el mercado o los factores correlacionados con el desarrollo mismo de la tecnología. Lo cual representa una carencia para el análisis desde la perspectiva de la demanda de tecnología o de los determinantes de la oferta de ésta; análisis necesarios para el avance en el desarrollo de políticas públicas. Considerando la teoría de innovación tecnológica, para la instrumentación de política pública se requiere el análisis de ambos aspectos tanto de la oferta y de la demanda de tecnología. Empiezan a aparecer estudios sobre el sector energético con una perspectiva de integración de demanda y oferta de tecnología pero estos trabajos son recientes y muy escasos.

En resumen se aborda el problema de las evaluaciones de la política pública de ER, ya que se realizan sobre el total de energía renovable lo que dificulta observar los impactos por cada tecnología. Además, las sociedades han aplicado diversos apoyos para el fomento de la tecnología fotovoltaica en la generación de electricidad, con el objeto de una transición a sistemas energéticos bajos en carbono, sin embargo su participación en la producción es aún incipiente, por lo que se aborda el problema de diagnosticar qué factores fomentan la innovación en el sector. También, se propone el análisis de la innovación del sector de manera sistémica para equilibrar las políticas de oferta y de demanda de tecnología.

1.4 Objetivo

El objetivo general del presente trabajo de tesis es estimar el impacto de políticas públicas del sector energético en la generación de energía eléctrica mediante tecnología fotovoltaica, considerando dos indicadores de innovación, patentes y capacidad instalada.

El porcentaje de mercado de la tecnología a nivel global es aún incipiente, y sin embargo con un gran potencial de generación de energía eléctrica sustentable. Un problema en los estudios previos es que estos se han enfocado a la evaluación de factores determinantes de innovación respecto a la generación total de energía renovable. Es necesario conocer los factores determinantes por tecnología renovable debido a que se presenta variabilidad de los impactos de la política pública de renovables respecto a las diversas tecnologías renovables que se pretende impulsar en diversos países.

El periodo de estudio es de 1992 al 2011 con base en una muestra de 15 países que reportan información del entorno fotovoltaico a la Agencia Internacional de Energía. El conocimiento derivado del presente estudio puede aplicarse cuando se desarrollen o se ajusten políticas públicas en donde se busque un impulso específico de tecnología fotovoltaica. Se pretende alcanzar el objetivo con el desarrollo de los siguientes estudios:

- a) Considerando a las patentes como indicador de innovación.
 - Se presenta un análisis de determinantes de innovación en el sector fotovoltaico. Con la finalidad de :
 - Analizar políticas de fomento de energía renovable.
 - Analizar la apropiación tecnológica medida por el precio de los módulos fotovoltaicos.

b) Considerando al despliegue fotovoltaico como resultado del proceso de innovación tecnológica.

- Se presenta un análisis de determinantes de capacidad instalada fotovoltaica con una perspectiva sistémica. Con la finalidad de :
 - Examinar el despliegue fotovoltaico con una perspectiva de integración de oferta y demanda, mediante el concepto socio-técnico.
 - Analizar factores por régimen socio-técnico.
 - Establecer un modelo de análisis.

1.5 Resumen de capítulos

El presente trabajo está compuesto de cuatro capítulos, la introducción conforma el capítulo 1 en donde se presenta el contexto general del objeto de estudio y la definición del problema que se aborda, también se describe la justificación y el objetivo del trabajo de investigación. En este primer capítulo se encuentran breves extractos de la revisión de la literatura relacionada al trabajo de tesis, la revisión de estudios previos por cada estudio realizado se puede encontrar en los siguientes capítulos. Lo anterior porque en los capítulos siguientes se encuentran dos análisis que se realizaron durante el curso del programa doctoral, cada análisis incluye en el capítulo respectivo, marco teórico y revisión de publicaciones científicas relacionadas, la metodología del estudio aplicada, así como los resultados obtenidos y una discusión de estos.

En el capítulo 2 se expone uno de los dos estudios realizados, este es un análisis de determinantes de la innovación en el sector fotovoltaico. En este estudio se examinan factores tales como políticas adoptadas para el fomento de ER a través de su impulso o despliegue (con impacto en el sector fotovoltaico), además de la apropiación tecnológica e indicadores que influyen en la política pública con respecto a ER. Se considera como medida de innovación al número de patentes en el sector fotovoltaico y se realiza el estudio con una selección de países pertenecientes a la IEA con una muestra de 15 países y datos de 1992 al 2011.

En este primer estudio se identifica que la aplicación de los instrumentos de política: tarifa de retroalimentación (“feed in tariff”), los subsidios directos al capital y los fondos de inversión promueven la innovación en el sector fotovoltaico. Además, la variación de precios de los módulos fotovoltaicos muestra una

correlación inversa con el número de patentes. Dicho de otra forma, se tiene evidencia de que el decremento que han experimentado los precios de los módulos fotovoltaicos en el periodo analizado ha favorecido la innovación en este sector (este efecto presenta un periodo de rezago de dos años).

Por otro lado, en el capítulo 3 se presenta un análisis de los factores determinantes de la capacidad anual instalada de energía fotovoltaica. Con base en datos de 1992 a 2011, los resultados obtenidos sugieren que en los 15 países estudiados, que formaban parte de la IEA durante el periodo de estudio, los factores que favorecen el despliegue de los SFVs son el consumo neto de electricidad renovable, la existencia de una tarifa de retroalimentación (feed-in tariff), la existencia de requerimientos de construcción sustentable y la publicación científica.

Además, el análisis de este segundo estudio muestra que el despliegue de la energía fotovoltaica requiere de un apoyo a largo plazo de la investigación en este sector. También, los resultados obtenidos sugieren que las variables que muestran una correlación inversa con el despliegue fotovoltaico son las reservas de petróleo y las emisiones de dióxido de carbono derivadas del consumo de energía. Finalmente en el capítulo 4 se encuentran las conclusiones de este trabajo de investigación.

Capítulo 2

Análisis de factores de la innovación en el sector fotovoltaico

2.1 Introducción

Desde la crisis del petróleo en 1973, la economía global ha discutido la necesidad de replantear su dependencia energética en el petróleo. Entre las causas por las cuales es necesaria la transición a un sistema energético de bajo carbono se encuentran, por ejemplo, las externalidades negativas tales como el calentamiento global y sus efectos a los diferentes ecosistemas. Estas externalidades se relacionan con la explotación de hidrocarburos, que además son recursos naturales finitos, para la generación de energía. Las innovaciones tecnológicas permiten ampliar la oferta de medios de generación de energía, por ejemplo con el desarrollo de diversas opciones de energías renovables [ERs] (Stephens y Jiusto 2010; Bointner, 2014). Además, la innovación favorece la reducción de costos en los productos o en los procesos de estas tecnologías. Aunque, las innovaciones también ofrecen opciones para afrontar las externalidades negativas manteniendo la quema de hidrocarburos con tecnologías como la de captura y almacenamiento de carbono (Stephens y Jiusto, 2009).

La tecnología fotovoltaica (FV) es una de las opciones de generación de ER para la transición del sistema energético, esta puede permitir el aprovechamiento de energía solar a través de una conversión a energía eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas, comúnmente agrupadas en módulos fotovoltaicos [MFVs] (Sánchez, 2011:59-106; Vigil, 2011:199-205). La instalación de los MFVs usualmente es bajo el esquema de un sistema fotovoltaico (SFV), en ocasiones también como sistemas de energía híbrido (Vigil, 2011:263-273). Esta alternativa tecnológica se ha posicionado como un medio principal de generación de energía limpia dentro del sector eléctrico, además de otras tecnologías como la eólica e hidráulica (REN21, 2014: 25). También, se le considera una tecnología madura al existir una cadena de valor consolidada (Vigil, 2011:215-254; Sahu, 2015).

La innovación ha sido particularmente importante en el avance de la tecnología FV; por ejemplo, el desarrollo tecnológico en las celdas fotovoltaicas ha mejorado las eficiencias de conversión de los MFVs (Vigil, 2011:34-36; Sahu, 2015), que se refleja en la mejora de sus costos de producción. En cuanto al avance de la innovación en este sector, Peter (2012) ilustra en una gráfica el crecimiento de patentes e inversión en fotovoltaico, en el periodo de 1974 a 2009. En esta se puede apreciar por ejemplo que la inversión en investigación y desarrollo (I+D) recibió un fuerte impulso de 1974 a 1985. En tanto que el número de patentes relacionadas con tecnología FV crece con una tendencia exponencial a partir de mediados de los 1990s (Peter, 2012).

Resultados de estos previos (Braun, 2010; Bointner, 2014) muestran que la I+D en ER y el aumento de los precios del petróleo en el sector energético son factores que han favorecido la innovación en las tecnologías renovables. Sin embargo, son escasos los estudios que muestren los determinantes de la innovación de forma sectorial de la tecnología FV. Generalmente, los estudios de determinantes de innovación en ER se presentan considerando el total de patentes en ER, en conjunto, lo que dificulta observar el impacto de los apoyos por tecnología (Cheon, 2012; Bayer, 2013; Bointner, 2014; Nesta, 2014).

Aunque se han realizado algunos estudios con grupos de tecnologías renovables para evaluar el impacto diferenciado que ocurre entre ellas (Braun, 2010; Popp, 2011; Diaz, 2013), estudios sectoriales de innovación por tecnología pueden contribuir a mejorar el conocimiento sobre los determinantes específicos de cada una de ellas, sus impactos o su comportamiento. Por ejemplo, Liu (2011) muestra que el periodo aproximado que ha tomado a una patente relacionada con la tecnología FV alcanzar su comercialización es de diez años (patentes registradas en la Oficina de Marcas y Patentes de los Estados Unidos -USPTO, por sus siglas en inglés-, en el periodo 1976-2007).

Entonces, en este capítulo se presenta un estudio que pretende contribuir al análisis de los determinantes de la innovación en el sector FV por la importancia en su desarrollo tecnológico (Liu, 2011, Vigil 2011:34-36; Sahu, 2015). Se examinaron factores como políticas adoptadas para el fomento de generación de ER, y de la apropiación tecnológica medida por el precio de los módulos fotovoltaicos, además de otros indicadores que influyen en la política pública de la ER. Se considera como medida de innovación, al número de patentes en el sector FV y se realiza el estudio con una selección de países pertenecientes a la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés). A diferencia de estudios anteriores, en este estudio se lleva a cabo una evaluación empírica que estudia los efectos en el número de patentes en el sector FV de las políticas de demanda aplicadas para el fomento de ER, así como del impacto de la variación del precio de los MFV.

En la sección 2.2 se presenta una revisión de la literatura relacionada. Después se presentan los datos y los métodos en la sección 2.3. Los resultados obtenidos se presentan en la sección 2.4, finalmente este capítulo termina con una breve discusión de los resultados obtenidos (sección 2.5).

2.2 Literatura relacionada

La inversión en I+D genera conocimiento que puede requerir algún tipo de protección intelectual (Cannuscio, 2009; Gerasimova y Khasuntsev, 2011; Nordhaus, 2011; Bointner, 2014). La patente es una forma de protección, que además es un instrumento de política pública para fomentar la I+D. La necesidad de este instrumento está en función, entre otros factores, de la inversión privada. Esta inversión se vuelve fundamental si se encuentra por debajo de los niveles óptimos de inversión en I+D, por las fallas de mercado (Gerasimova y Khasuntsev, 2011; Nordhaus, 2011; Bointner, 2014). Estas fallas de mercado se refieren a que la inversión en I+D en particular implica muchos riesgos; uno de ellos es que las empresas que la desarrollan no pueden apropiarse de todos los beneficios. Además, puede llevar varios años comercializar el conocimiento generado (Nordhaus, 2011; Bointner, 2014). Las patentes ofrecen a las personas que solicitan la cobertura, la posibilidad de gozar de un monopolio por un tiempo determinado, un propósito de esto es recuperar, en la medida de lo posible, la inversión realizada.

Actualmente, las patentes son una medida usada y aceptada del nivel de innovación (Watanabe, 2001) de un país o de una empresa, y también pueden ser una medida de innovación tecnológica (Popp, 2005; Watanabe, 2001; Bointner, 2012; Cheon, 2012; Bayer, 2013; Diaz, 2013). Por ejemplo, se ha evaluado el impacto de la política pública para la creación de nuevo conocimiento, o se evalúa el desarrollo tecnológico basado en patentes (Bointner, 2012; Peters, 2012). Además, las patentes han permitido analizar distribución geográfica o redes de conocimiento (Watanabe, 2001). Sin embargo, existen limitaciones del uso de patentes como indicador al valorar la innovación (Watanabe, 2001).

Entre las críticas a las patentes como indicador de innovación (Braun, 2010; Popp, 2011; Cheon, 2012) se encuentra por ejemplo el hecho de que no todas las patentes tienen valor comercial (lo anterior porque el proceso de innovación tecnológica implica una explotación comercial del conocimiento generado); además, se tienen opciones adicionales para la protección intelectual, muchas innovaciones se amparan bajo una forma distinta de protección, se tiene por ejemplo el secreto industrial (Cohen et al., 2000). Otro factor que puede influir para que se opte por la protección de la patente (Cohen et al., 2000) es el costo por esta cobertura, así como la cantidad de información que se requiere divulgar para tener la protección.

Por otro lado, se presentan complicaciones en los análisis con patentes. Por ejemplo, con el tipo de patentes a recopilar; se tienen patentes locales y patentes internacionales. También con la clasificación misma de la patente, en ocasiones los códigos locales no coinciden con los códigos internacionales (como el de la International Patent Classification - IPC). Otra dificultad puede estar en evaluar “la calidad” de la patente. Bayer (2013) menciona que una forma de evaluar la “calidad” es por la cobertura de mercado sobre la cual se decide amparar a la patente, así buscar una protección de tipo internacional se le relaciona con una mayor calidad de la patente. En tanto que en Nesta et al. (2014) consideran como “calidad” a la cantidad de oficinas de patentes a las cuales se solicita la protección.

Algunos ejemplos de estudios con patentes son los trabajos de Bayer et al. (2013), y de Cheon y Urpelainen (2012), ambos realizados con países pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). En el caso del estudio de Bayer et al. incorporaron una muestra de países que no pertenecen a la OCDE para realizar un análisis comparado de 74 países, en el periodo de 1990-2010. Bayer et al. exploraron los patrones globales de innovación en ER con el fin de analizar los determinantes económicos y políticos. Sus resultados muestran indicios de innovación inducida porque los altos precios del petróleo fomentan innovación en ER.

También Bayer et al. (2013) muestran que la innovación se favorece en un régimen democrático y que la capacidad eléctrica de ER tiene un efecto positivo considerable en la innovación en el grupo de países estudiados que no pertenecen a la OCDE. Por su parte, Cheon y Urpelainen (2012), mediante un análisis longitudinal de datos con 23 países industrializados, en el periodo 1989-2007, coinciden con Bayer et al. en que los altos precios del petróleo inducen la innovación en ER. También sugieren que esto está correlacionado positivamente con la efectividad del sistema de innovación, este medido con base a la proporción de generación eléctrica de fuentes renovables, y que los altos precios del petróleo fomentan el financiamiento público en I+D.

Por su parte Bointner (2014) explora la relación de I+D e innovación en el sector energético. A través de un análisis de un grupo de 14 países de la IEA (en el periodo de 1974-2013). Bointner muestra que son necesarias dos acciones: el apoyo a I+D y el fomento en el mercado de la nueva tecnología, porque esta combinación proporciona una adecuada penetración en el sector energético de las innovaciones. En este estudio se resaltan las complicaciones que surgen en el análisis de ER, ya sea por la escasez de datos o por lo incompleto de las bases disponibles. En otro estudio reciente, Nesta et al. (2014) exploran la relación entre las políticas ambientales, la competencia y la innovación en ERs. Sus resultados muestran que las políticas ambientales fomentan patentes de alta calidad mientras que la competencia en el mercado energético favorece patentes de baja calidad en ERs. La medición de “calidad” se evaluó considerando a la cantidad de oficinas de patentes a las cuales se solicitó la protección. El estudio sugiere complementar políticas ambientales con una apertura del mercado pues esta combinación favorece la innovación en renovables con patentes de alta calidad.

Braun (2010) estudió el impacto de la difusión del conocimiento a nivel industrial en el desarrollo tecnológico de las tecnologías eólica y solar para generación de energía, utilizando una función de producción de conocimiento. El número de patentes fue el indicador de innovación y las variables explicativas aquello que soporta la generación de ideas, como es el capital humano, el gasto en I+D, así como instrumentos diversos de política pública. El análisis incluye datos longitudinales de 21 países de la OCDE, en el periodo de 1978-2004. Los resultados sugieren que un factor relevante de innovación lo es la difusión del conocimiento, además encuentran evidencia de que la innovación se caracteriza de manera diferenciada entre las tecnologías analizadas.

Por su parte, Popp et al. (2011) estudiaron la relación entre el cambio tecnológico y la inversión en la capacidad de ER. El estudio considera una muestra de 26 países pertenecientes a la OCDE, en el periodo de 1991-2004, tomando en consideración las energías eólica, solar geotérmica y biomasa. Los resultados muestran que los países que invierten más en ER son los países más acaudalados, así como aquellos países que han ratificado el protocolo de Kyoto. Además, sugieren que la inversión en ER está determinada, no por la demanda, sino por la política en renovables, siendo las de mayor impacto aquellas que promueven bajas emisiones de carbono.

En otro estudio, Díaz (2013) relaciona las políticas de subsidios con el conteo de patentes en el sector energético. Con una muestra de países pertenecientes a la OCDE, en el periodo 1990-2006, se estudió cuatro ERs: eólica, solar, geotermia y biomasa. Díaz muestra que un ajuste en las políticas de reducción en subsidios de electricidad es un claro incentivo a la innovación, además de la apertura de la economía.

Por otro lado, Liu et al. (2011) analizaron la relación del precio del petróleo y el número de patentes en tecnología FV, en el periodo 1976-2000 (patentes registradas en la Oficina de Marcas y Patentes de los Estados Unidos -USPTO, por sus siglas en inglés-). Sus resultados muestran una correlación del índice de crecimiento de los precios del petróleo con el índice de crecimiento de las patentes, dicho impacto del precio se ve reflejado en las patentes con solo un año de retardo. Además, señalan que la tecnología solar se encuentra en su estado inicial del ciclo de vida. Otra aportación importante fue la evidencia de que la tecnología FV tarda por lo menos diez años en alcanzar su comercialización, esto con respecto a la tecnología de silicio (se estudió cinco grupos distintos acorde a distintas tecnologías fotovoltaicas).

Pocos estudios (Braun, 2010; Díaz, 2013) se han realizado con respecto al efecto que producen en la innovación las políticas de demanda aplicadas a renovables. Además, no es común encontrar estos estudios por tecnologías renovables individuales (Liu et al, 2011), se presentan más considerando a las renovables como un solo grupo (Cheon y Urpelainen, 2012; Bayer et al, 2013; Bointner, 2014; Nesta et al, 2014) o por grupos de tecnologías renovables seleccionadas (Braun, 2010; Díaz, 2013); esto dificulta observar los efectos particulares por renovable. Por otra parte, se observan dos grupos de análisis: en uno se maneja a las patentes como una referencia de medición de resultados (conteo de patentes) y otro grupo que trabaja con el desarrollo o tendencia que han seguido las patentes (ciclo de vida tecnológico).

Finalmente, en las siguientes secciones se expone el desarrollo de este estudio sobre determinantes de innovación en el sector FV. Se busca conocer los efectos de políticas aplicadas al fomento en ER en la innovación de la tecnología FV de manera individual, tomando como medida de innovación la actividad de patentes relacionadas con tecnología FV, considerando la variación del precio del MFV y de algunos indicadores de política pública, en un grupo seleccionado de países de la IEA.

2.3 Datos y métodos

Se consideró como medida de innovación al número de patentes anuales obtenidas por país relacionadas con el sector FV. El período de estudio fue de 1992-2011, las razones por las que se consideró este periodo son que durante estos años el crecimiento en este número de patentes tuvo un comportamiento exponencial (Peters, 2012; Liu, 2011), además de la disponibilidad de datos. Se reconoce que entre las limitaciones del estudio se encuentra la escasa información disponible sobre la evolución de los precios del MFV y el hecho que se evalúa solo un aspecto de los instrumentos de política, además de que se realizó una búsqueda robusta de patentes relacionadas con tecnología fotovoltaica.

La base de datos se conformó de tres fuentes de información: los informes "*Tendencias en aplicaciones fotovoltaicas*" de la IEA (IEA, 1995-2011), de donde se obtuvo la evolución del precio de los MFVs y la aplicación de las políticas públicas por país, además de la capacidad FV; la base de datos estadísticos de la OCDE, de donde se consultó las exportaciones de energía y las reservas de petróleo; y, la base de datos Patentscope (parte de la "World Intellectual Property Organization" - "Patent Cooperation Treaty" WIPO PCT) de donde se obtuvo el número de patentes anuales por país. Para la búsqueda de patentes se utilizó la clasificación del "WIPO's International Patent Classification –IPC (ver anexo A).

La selección de los países se realizó considerando en primer lugar dos listas de los reportes de la IEA, la primera trata sobre la capacidad instalada fotovoltaica acumulada por país y la otra trata sobre políticas aplicadas a tecnologías renovables (IEA, 1995-2011).

Además, se consideraron aquellos países identificados como actores relevantes en el sector fotovoltaico, esto acorde con los siguientes categorías del REN 21 en 2013: a) adiciones de capacidad anual de energía solar FV, b) inversión en nueva capacidad, c) capacidad total de la ER (no incluido hidroeléctrica), d) la capacidad

total de la energía solar fotovoltaica, y e) el total FV per cápita (REN_21, 2013:17). Finalmente se tiene la restricción de la disponibilidad de datos en las bases de la IEA y de la OCDE. La lista de países seleccionados fue: Alemania, Austria, Australia, Canadá, Francia, Israel, Italia, Japón, Corea, México, España, Suecia, Suiza, el Reino Unido y los Estados Unidos.

Con la base de datos se realizó un ajuste a un modelo de regresión binomial negativa. Al ser la variable dependiente el número de patentes anuales, el modelo binomial resulta apropiado por su aplicación a números enteros. La regresión binomial negativa es un modelo de datos de conteo el cual tiene como variable dependiente una variable discreta que toma valores no negativos. Esta regresión modela la distribución dado el conjunto de variables explicativas eligiendo una forma funcional que asegure valores positivos. Las variables predictoras pueden ser cuantitativas y/o categóricas. El modelo es útil para conteos que están sobredispersos porque permite que la varianza condicional sea mayor que la media (Greene, 2008; Davidson, 2004:467). Se espera con este método conocer que variables explicativas están correlacionadas con la variable dependiente.

En total se analizaron seis variables explicativas mostradas en la Tabla 2.1. Se probaron tres instrumentos de políticas aplicadas para el fomento de ER: la tarifa de retroalimentación, subsidios directos al capital y fondos de inversión (datos de IEA); dos variables de indicadores de política pública respecto a tecnologías renovables en el entorno energético: las reservas de petróleo y las exportaciones de energía eléctrica (datos de la OCDE); además, de la variable del precio de los MFVs (datos de IEA).

La selección de los instrumentos de política se realizó evitando en la medida de lo posible, la correlación entre variables. Se consideró a las reservas de petróleo porque en estudios previos no se ha observado directamente la influencia de las reservas en la innovación. También porque los precios del petróleo son precios internacionales y no reflejan la situación particular de cada país; sin embargo, las

reservas si pueden reflejar una situación energética particular. La disponibilidad de reservas influye en la política pública de renovables, y es probable que también influya en su innovación.

Por un lado, las reservas pueden influir negativamente en la innovación en el sector FV, si se considera que la tecnología dominante, con base en hidrocarburos, obstruye la entrada de nuevas tecnologías. Sin embargo, si se considera la necesidad del cambio de paradigma energético, por los problemas y externalidades derivados de una economía basada en carbono, también puede ser que la cantidad de reservas, asociada a una producción o una actividad económica considerable del país, influya favorablemente a la innovación en el sector.

Por otro lado, el comercio de energía eléctrica es un aspecto en el cual la tecnología FV puede tener un impacto favorable, y al mismo tiempo puede promover la innovación en este sector. Por ello se seleccionó las exportaciones de energía eléctrica, para evaluar si se ha observado influencia en la innovación FV, aunque es más probable que influya en concentración solar, que es otra variante de la tecnología solar.

También, se probó la influencia de la apropiación tecnológica en la innovación FV, medida a través de la variación del precio de los MFVs. Las mejoras en los procesos de fabricación y en las eficiencias de conversión (Sahu, 2015), así como de nuevos materiales y de la aceptación de la tecnología en el mercado eléctrico, se cree que han contribuido a la caída de los precios, lo que ha contribuido al despliegue FV.

En el modelo propuesto se asume que el número de patentes (*patent*) obtenidas, que están relacionadas con la tecnología FV del país i (15 países seleccionados) en el año de asignación t (1992-2011) están en función de las siguientes variables: variables de instrumentos de política, que son: tarifa de retroalimentación (*feedn*),

los subsidios directos al capital (*drcapsub*) y los fondos de inversión (*invfnd*); variables de política pública: las reservas de petróleo (*oilreserv*) y las exportaciones de energía eléctrica (*elexport*). Además de la variable de apropiación tecnológica: precios de los MFVs (*MdPRcUSD*) [ver tabla 2.1].

$$patent_{it} = f(MdPRcUSD_{it}, elexport_{it}, oilreserv_{it}, feedn_{it}, drcapsub_{it}, invfnd_{it})...$$

....Ecuación 1.

Tabla 2.1

VARIABLES PARA EL MODELO DE REGRESIÓN

Nombre de la Variable	Representa
<i>drcapsub</i>	Subsidios directos al capital
<i>elexport</i>	Exportaciones de energía eléctrica
<i>feedn</i>	Tarifa de retroalimentación
<i>invfnd</i>	Fondos de inversión
<i>MdPRcUSD</i>	Precios de los módulos fotovoltaicos
<i>oilreserv</i>	Reservas de petróleo
<i>patent</i>	Patentes

Fuente: Elaboración propia.

Las variables de los instrumentos de política (*feedn*, *drcapsub*, *invfnd*) son variables binarias; miden la aplicación, o no, del instrumento en un año determinado. Las variables cuantitativas (*oilreserv*, *elexport*, *MdPRcUSD*) se probaron con rezago de la variable hasta de tres años para monitorear sus efectos. No se realizó transformación alguna a las variables. El número asignado que se encuentra al final de una variable indica los años de rezago de la misma; por ejemplo, *elexport_2* es la variable *elexport* con rezago de 2 años (ver tabla 2.2). Para simplificar los resultados, solo se muestran las variables con sus respectivos rezagos que resultaron significativos en el ajuste.

Tabla 2.2

Agrupación de variables cuantitativas y binarias

Variable Explicada	Variables Explicativas	
	Cuantitativa	Binaria
Y_{it}	$X_{k,it}$	$d_{k,it}$
<i>patent</i>	<i>MdPRcUSD_2</i> <i>elexport_2</i> <i>oilreserv</i>	<i>feedn</i> <i>drcapsub</i> <i>invfnd</i>

Fuente: Elaboración propia.

Se ajustó a un modelo de regresión binomial negativa, de uso común para conteo de patentes (Bayer, 2013; Díaz, 2013), por medio del software STATA /SE13.0 (Estadísticas / análisis de datos) para Windows 32 bits (derechos de autor 1985-2013). La estimación de los parámetros es a través de máxima verosimilitud. Se presentan las regresiones para efectos fijos y efectos aleatorios. Contraste de significación, en el modelo un valor de significancia menor a 5% o 0.05 es estadísticamente significativa, aunque se pueden escoger valores de significancia al 10%. Lo anterior implica que la variable tiene una influencia significativa sobre la variable explicada (ver nota de la tabla 2.3). Razón de verosimilitud, significación de los coeficientes del modelo es aceptado un valor χ^2 pequeño (menor a 0.05) (statgraphics.net).

2.4 Resultados

La metodología propuesta, la información disponible y los requerimientos del modelo de regresión permitieron una base de datos con 179 observaciones. Las estadísticas básicas de las variables se presentan en la Tabla 2.4. Se observó que la diversidad de las características particulares de los diversos países en la muestra de países seleccionados tales como las diferencias entre la cantidad de reservas de petróleo o el número de patentes solicitadas se ve reflejado en las varianzas altas de las variables utilizadas.

Tabla 2.3

Correlaciones entre variables (se muestran las variables significativas)

Variables	<i>patent</i>	<i>MdPrcUSD_2</i>	<i>oilreserv</i>	<i>elexport_2</i>	<i>feedn</i>	<i>drcapsub</i>	<i>invfnd</i>
<i>patent</i>	1.0000						
<i>MdPrcUSD_2</i>	-0.2848	1.0000					
<i>oilreserv</i>	-0.0331	-0.1042	1.0000				
<i>elexport_2</i>	0.0494	-0.0634	0.2813	1.0000			
<i>feedn</i>	0.2889	-0.3277	0.0898	0.2285	1.0000		
<i>drcapsub</i>	0.3878	-0.1387	-0.1846	0.1313	0.4994	1.0000	
<i>invfnd</i>	0.3205	-0.1576	0.3312	0.4061	0.3053	0.0426	1.0000

Nota: El signo del valor indica una correlación positiva o negativa; La correlación más alta es 0.4994. En el apéndice B se muestran las correlaciones adicionales.

La correlación entre las variables se muestra en la Tabla 2.3, solo se muestran las variables significativas con el propósito de simplificar la información. La correlación más alta entre la variable dependiente y la variable explicada es de 0.3878 mientras que la correlación más alta entre las variables dependientes es de 0.4994. Se manejó como estándar la práctica en econometría de aceptar valores de

correlación menores a 0.5, esta práctica es aplicada por la escasez de variables. Aunque para este estudio también se manejó esta práctica considerando mantener los instrumentos de la política pública a evaluar.

Los resultados de la regresión se muestran en la Tabla 2.5. Las observaciones se ajustaron para los modelos de regresión binomial negativa, efectos aleatorios (Regression 1) y efectos fijos (Regression 2). No se observan diferencias significativas en los coeficientes de regresión de las variables explicativas en ambos modelos, ni tampoco se tienen diferencias en la significancia de los valores.

Los resultados obtenidos muestran que la presencia de los instrumentos de política aplicados: tarifa de retroalimentación (*feedn*), los subsidios directos al capital (*drcapsub*), y los fondos de inversión (*invfnd*), promueven la innovación en el sector FV. En el caso de las variables de indicadores de política pública respecto a tecnologías renovables, los resultados muestran que las reservas de petróleo (*oilreserv*) y las exportaciones de energía eléctrica con rezago de dos años (*lexport_2*) promueven la innovación en la tecnología FV.

En cuanto al precio medio de los MFV con rezago de dos años (*MdPRcUSD_2*), su signo en el coeficiente de regresión sugiere que el precio desincentiva la innovación en tecnología FV. Es decir, que el decremento en los precios de los MFV ha favorecido el incremento de patentes.

Tabla 2.4

Estadísticas básicas de las variables

Variable		Media	Desviación Estándar
Patent	Overall	68.8062	174.9044
	Between		110.2147
	Within		138.4477
MdPrcUSD_2	Overall	5.0169	1.7999
	Between		0.8630
	Within		1.6078
Elexport_2	Overall	14.9876	20.3964
	Between		20.4515
	Within		4.7457
feedn	Overall	0.2625	0.4406
	Between		0.1586
	Within		0.4129
drcapsub	Overall	0.2718	0.4456
	Between		0.1750
	Within		0.4120
invfnd	Overall	0.1125	0.3164
	Between		0.1347
	Within		0.2882
oilreserv	Overall	8.8808	30.3419
	Between		21.5668
	Within		21.9821

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.5

Resultados de la regresión

Variable dependiente: Innovación en el sector FV (*patent*)

Ajuste: Modelo de regresión binomial negativa

Variables	Regresión 1 Random	Regresión 2 Fixed	Tipo de Variable	Especificación
<i>MdPrcUSD_2</i>	-0.1718 *** (0.0283)	-0.1688 *** 0.0284	continua	Precio del módulo FV con rezago de 2 años (USD 2005)
<i>lexport_2</i>	0.0174 *** (0.0044)	0.0190 *** (0.0044)	continua	Exportaciones de energía eléctrica con rezago de 2 años
<i>oilreserv</i>	0.0063 *** (0.0020)	0.0079 *** (0.0021)	continua	Reservas de petróleo
<i>feedn</i>	0.6817 *** (0.1092)	0.6752 *** (0.1083)	binaria	Tarifa de retroalimentación
<i>drcapsub</i>	0.6766 *** (0.1004)	0.6588 *** (0.996)	binaria	Subsidios directos al capital
<i>invfnd</i>	0.2893 ** (0.1208)	0.2577 ** (0.1202)	binaria	Fondos de inversión
Constant	1.1942 *** (0.2046)	1.1624 *** (0.2073)		Termino constante
Prob > χ^2	0.0000	0.0000		F-Test
Log likelihood	-824.25	-703.6246		
Número de Observaciones	179	179		

Notas: a) Los errores estándar robustos en paréntesis; b) El número al final del nombre de la variable indica el rezago en años de la misma; c) Significancia: *** 1%; ** 5%; * 10%.

2.5 Discusión

Una política pública que brinde el mejor resultado en la promoción del desarrollo tecnológico es aquella en la cual se toma en consideración la conjunción de políticas orientadas a la oferta y a la demanda de nuevas tecnologías (Crespi y Dutrénit, 2014:15-42; Valenti, 2008:57-92) Los resultados de este estudio sugieren que en el caso de la tecnología FV la aplicación de tres políticas orientadas a la demanda de energía renovable, tarifa de retroalimentación, los subsidios directos al capital, y los fondos de inversión, han sido favorables para el fomento de la innovación relacionada con tecnología FV.

Aunque no se consideró en este trabajo una medida de la “calidad” de las patentes, si atendemos a la calidad de la patente en base al tipo de cobertura que se solicita (Bayer, 2013), en la cual una patente internacional se identifica con una mayor calidad con respecto a una patente local (esta forma de clasificar a las patentes se basa en el interés o el impacto que puede generar un determinado conocimiento), entonces, los resultados sugieren que las patentes que fomentan la aplicación de los tres instrumentos de políticas analizados son patentes de alta calidad.

Bointner (2014) y Nesta et al. (2014) sugieren que el fomento del mercado es complementario y necesario para una adecuada penetración en el sector energético de las innovaciones tecnológicas. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que las políticas de demanda que se probaron influyen también en la promoción de patentes en el sector FV. El fenómeno es interesante pues puede implicar que estos instrumentos aplicados han manifestado una doble función, el apoyo en la penetración de los nuevos desarrollos en el mercado y la promoción de patentes.

El avance tecnológico puede presentarse por ejemplo en innovaciones de producto (eficiencias en celdas fotovoltaicas y/o mejoras en los montajes de los MFV-por ejemplo sistemas automatizados) o en el proceso de manufactura (nuevas técnicas de aplicación de película, o de soldadura, o de las capas protección de las celdas). Una de las características importantes para el mercado de la tecnología FV es la eficiencia de conversión que se encuentran aproximadamente entre el 10 y el 20% (Masoudi, 2015) dependiendo del tipo de materiales, esta eficiencia en los inicios de las celdas fotovoltaicas se encontraba por debajo del 5% y con un precio muy superior al actual del mercado, el desarrollo tecnológico ha favorecido la mejora de la eficiencia de conversión (Masoudi, 2015).

Considerando que el desarrollo tecnológico favorece la oferta de un bien al impactar, usualmente, la reducción en los costos de producción de dicho bien, entonces, se puede argumentar que los resultados obtenidos muestran que la economía de escala de la producción de MFV ha favorecido el desarrollo tecnológico en FV. Cabe mencionar que aparte del desarrollo tecnológico y la economía de escala, elementos comunes de ajuste del equilibrio de mercado como la competencia en el sector FV y en el sector energético en general también influye en los precios de los MFV.

Sin embargo, los precios de los MFV son solo una parte integral de un SFV, el cual es el que se requiere instalar para su funcionamiento y generación de electricidad. Es recomendable revisar el precio nivelado de la energía que varía por región (World Energy Council, 2013), ya que de manera global los rangos de precio nivelado de tecnologías FV como la de película delgada o la de silicio cristalino son rangos de mayor precio en comparación con los rangos de precio nivelado de tecnologías que utilizan carbón o gas natural, o tecnologías renovables como la tecnología eólica en tierra (UNEP, 2011:213).

Por lo anterior es importante seguir incrementando la eficiencia de conversión de celdas y de los MFV para mejorar la competitividad de la tecnología fotovoltaica. Pues la explotación del recurso solar aún puede cubrir más demanda de energía, tan solo la energía solar que recibe el planeta puede cubrir la demanda global de energía.

Una característica de las innovaciones es su alto riesgo financiero, los mercados financieros pueden soportar la inversión de la tecnología que aún dista de competir con otros bienes sustitutos. El financiamiento a la tecnología FV mediante los instrumentos de política que se analizaron muestra que su aplicación es recomendable para este sector porque tienen un doble efecto, por un lado promueve la inversión en esta tecnología mientras que al mismo tiempo fomentan la innovación en el sector.

Por otro lado, se podría esperar que existiera por lo menos una relación inversa entre el conteo de patentes relacionadas con FV y las reservas de petróleo, si se piensa en la necesidad de diversificar los recursos. Sin embargo, del resultado obtenido se puede argumentar que los países con grandes reservas son quienes pueden soportar la inversión para el fomento de patentes en el sector FV; basándose en el resultado de Popp et al. (2011) que identifica a los países más acaudalados como los que más invierten en renovables. Si bien, se debe aclarar que son el carbón y el gas, los hidrocarburos con mayor participación en la generación eléctrica.

Los resultados obtenidos de este ejercicio para la política pública en ER se pueden centrar en reforzar dos puntos: los apoyos orientados a la generación de conocimiento e instrumentos de fomento del mercado. Estos deberán estar alineados a los resultados esperados en el sector FV. Teniendo en consideración

la experiencia global en los últimos años, las políticas aplicadas de demanda pueden favorecer indirectamente a la innovación en el sector. El funcionamiento y/o efectividad de los apoyos puede ser evaluado monitoreando tanto la innovación como la capacidad FV resultante.

Por último, una crítica que surge a estos estudios de innovación es sobre el concepto mismo de innovación, es necesario tener en cuenta la diferencia entre hablar de patentes como indicador de innovación y el proceso mismo de innovación tecnológica. La patente como indicador de innovación es útil, como se mencionó en un inicio, para evaluar el resultado de innovación (Watanabe, 2001), aunque como se expuso en las limitaciones de las patentes, en cuanto a la comercialización de la tecnología el valor comercial de las patentes es cuestionado.

Sin embargo, considerando en su totalidad al proceso de innovación tecnológica, para el caso del sector fotovoltaico se puede asumir que la capacidad instalada fotovoltaica es un resultado medible del proceso de innovación tecnológica. Lo anterior porque aunque la tecnología fotovoltaica lleva tiempo en el mercado energético, esta se mantiene en constante desarrollo (como se expuso brevemente en este capítulo, la innovación es un factor correlacionado con el precio de los MFVs, mejorando la competitividad de esta tecnología). Entonces, en el siguiente capítulo se presenta un estudio en el que se exploran los determinantes de la capacidad instalada fotovoltaica. Asumiendo que esta capacidad es el resultado del proceso de innovación, adicionalmente, se pensó en utilizar un enfoque holístico (Geels, 2004), tal que se abarque desde el desarrollo, despliegue y uso de la tecnología.

Capítulo 3

Análisis sistémico de factores que afectan el despliegue de la tecnología solar fotovoltaica

3.1 Introducción

En el planeta, los cambios en los sistemas de energía están profundamente interrelacionados con el desarrollo social (Zeb et al., 2014; Omer, 2010). El consumo de electricidad, que en 2013 representó el 18% del total del consumo final de combustibles en el mundo (IEA, 2015:28), está altamente correlacionado con el crecimiento de las sociedades y su productividad. Mientras que la producción mundial de electricidad creció un 97,2%, la población creció un 34,8%, y el Producto Interno Bruto (PIB) aumentó un 82%, durante el período 1990-2013 (IEA, 2015a:84, 102, 127). Actualmente, el crecimiento de la demanda de electricidad aumenta el uso de combustibles fósiles, y la proporción de hidrocarburos en la producción mundial de electricidad fue de 67,9% en 2013 (IEA, 2015: 24).

Desafortunadamente, hay problemas graves relacionados con la explotación de los combustibles fósiles tales como su escasez, su cada vez más complicada extracción, la volatilidad en sus precios y el calentamiento global. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector energético, este altamente dependiente del combustible fósil, han impulsado el cambio climático antropogénico (Akhmat et al., 2014; Sachs, 2014: 34, 39). A nivel mundial, en 2013, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) de la energía renovable [ER] (nuclear, hidroeléctrica, geotérmica, solar, mareomotriz, eólica, biocombustibles y residuos) representó sólo el 1% (IEA, 2015a:9) de las emisiones antropogénicas de GEI. Sin embargo, la participación de fuentes renovables no hidráulicas en la producción de electricidad de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) fue tan sólo del 5,7% en el mismo año. Por lo que se necesitan mejores opciones para la producción de electricidad mediante combustibles asequibles y menos contaminantes.

De las tecnologías para la producción de electricidad renovable, excluyendo a la energía hidroeléctrica, la energía fotovoltaica (FV) tuvo la mayor tasa de crecimiento anual en el periodo 1990-2012 (IEA, 2013:40), y su capacidad instalada acumulada alcanzó los 178.391 MW en 2014 (EPIA, 2015:12). Sin embargo, su participación en la producción de electricidad a partir de fuentes no hidráulicas en los países de la OCDE en 2012 fue de 8,2% del total, en tanto que la energía eólica tuvo una participación del 48,2%, y la de los biocombustibles fue de 21,9% (IEA, 2013:40).

Como una tecnología relativamente nueva, la tecnología fotovoltaica aún necesita apoyo para entrar en el mercado eléctrico. Por ejemplo, Chen y Su (2014) estudiaron los instrumentos de apoyo utilizados en el sistema de la cadena de suministros FV en China. Sugirieron que los gobiernos deberían establecer una política de subsidios adecuada para proseguir con el desarrollo de la industria fotovoltaica. Aunque, son muchas las variables que pueden afectar el mercado fotovoltaico tales como la disponibilidad de recursos energéticos extraíbles, las políticas y las leyes sobre energía, las condiciones geográficas, los recursos humanos especializados así como la conciencia pública de la región sobre estos temas.

El trabajo académico relacionado con factores de impulso del sector fotovoltaico (Chen and Su, 2014; Muhammad-Sukki et al., 2014; Sanz-Casado et al., 2014; van Sark et al, 2014; Burnett et al., 2014; Karytsas and Theodoropoulou, 2014; Urbina, 2014) incluye análisis de políticas, estudios de capacidad FV instalada, y estudios de caso de la producción FV. Aunque hay un número creciente de estudios de casos relacionados con FV, la mayor parte de la literatura de los factores del despliegue de la energía se ha centrado en los impactos sobre la producción total de ER, cuando se observa variabilidad de los impactos de las variables de control en las distintas tecnologías renovables (Shrimali and Kniefel,

2011). Además, una perspectiva de integración de la producción, la difusión y el uso de tecnologías no se ha aplicado para analizar el despliegue FV aunque este método ha sido útil para estudiar la dinámica de la innovación en el sector energético (Kern, 2012; Stephens and Jiusto, 2009; Verbong and Geels, 2006). Además, los estudios previos muestran que hay sólo unos pocos de estos relacionados con los factores que impulsan el crecimiento en específico de cada ER o de los impactos de los instrumentos de política específicamente dirigidos al sector (Chen and Su, 2014; Muhammad-Sukki et al., 2014; Luo et al., 2013; Peters et al., 2012). Además, todavía hay discusión acerca de los factores que impulsan a la ER. Los resultados no han sido concluyentes; por ejemplo, Carley (2009) mostró que el precio de la electricidad es importante para el despliegue de ER, mientras Shrimali y Kniefel (2011) encontraron que el precio no fue significativo, a pesar de que ambos estudios analizaron el caso de los Estados Unidos (E.U).

Por lo tanto, todavía se necesitan más estudios con diferentes metodologías para el análisis de los factores determinantes del desarrollo y el despliegue de la energía FV. El presente estudio tiene como objetivo identificar los factores que han impulsado el despliegue de capacidad FV en su crecimiento exponencial mediante el uso del enfoque holístico de la teoría socio-técnica (ST) y los datos longitudinales de una muestra seleccionada de países. Las principales diferencias del estudio con los estudios previos son el enfoque integrador, la evidencia de que el trabajo académico sobre FV requiere un apoyo a largo plazo, y que algunos instrumentos de política no muestran ningún efecto estadísticamente significativo para el despliegue FV.

La sección 3.2 muestra brevemente el sistema FV en el sector energético y la revisión de la literatura relacionada. Los datos y los métodos se presentan en la Sección 3.3. En tanto que en la sección 3.4, se muestran los resultados y, finalmente, una discusión se presenta en la Sección 3.5 de este capítulo.

3.2 El sistema FV en el sector energético y revisión de estudios previos.

3.2.1 Energía renovable en el sector eléctrico.

La ER incluye a la energía nuclear y a las renovables [REN21, 2014:21] (ver tabla 3.1). Aunque la producción de ER está aumentando en todo el mundo, existe aún una gran dependencia mundial en los combustibles fósiles para el suministro de energía primaria. Por ejemplo, el porcentaje de participación de combustibles fósiles fue del 86,6% en 1973 y de 81,4% en 2013 (IEA, 2015:6). También, los hidrocarburos dominan la producción mundial de electricidad, con un porcentaje de participación del 67,9% en 2013; de los cuales el 41,3% correspondió a carbón, el 21,7% a gas natural y el 4,4% a derivados del petróleo (IEA, 2015:24). La escasez, la cada vez más difícil extracción, la volatilidad de los precios y el calentamiento global son algunos de los graves problemas relacionados con la explotación de los combustibles fósiles para la producción y uso de energía. Por otro lado, la característica de renovable y las bajas emisiones de GEI son algunos de los beneficios de la producción con ER.

Es ampliamente aceptado que el calentamiento global es una consecuencia del aumento significativo de la concentración atmosférica de CO₂. A nivel mundial, las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustible en 2013 fueron 32,189.7 millones de toneladas y la participación en porcentaje por combustible en las emisiones de CO₂ procedentes de la combustión durante la producción de energía primaria fueron: de carbón (46%), derivados del petróleo (33%), gas (20%), y de la ER (1 %) [IEA, 2015a:48, 9]. Por lo tanto, la diversificación de la producción de energía con ER puede reducir la huella de carbono del sector de la energía.

Sin embargo, la intermitencia en la generación de energía, costos elevados y una considerable inversión inicial son algunos de los problemas que frena el despliegue de ER en el sector eléctrico; También es importante mencionar que la dependencia de la trayectoria tecnológica en los hidrocarburos es otro factor crítico. Además, el despliegue de ER depende de empatar su capacidad de generación con el constante crecimiento de las economías, ya que la demanda de electricidad aumenta porque está ligada al crecimiento poblacional y a la productividad económica. La producción mundial de electricidad creció un 97,2% (de 11,826.1 a 23,321.6 TWh) durante el período 1990-2013 (IEA, 2015a:102). Durante el mismo período, la población creció un 34,8% (de 5,278.3 millones a 7,117.7 millones) y el PIB creció un 82% (de 30,998.9 millones a 56,519.0 millones de dólares, 2005 USD) [IEA, 2015a:84,127].

Tabla 3.1

Agrupación de fuentes de energía renovable

Fuentes renovables de energía	a) Energía nuclear		
	b) Renovables	i) Biomasa tradicional	- Hidráulica - Geotérmica - Solar - Mareomotriz - Eólica - Biocombustibles
		ii) Renovables modernas	

Adaptado de: “*Renewables 2014. Global Status Report*”. Renewables Energy Policy Network for the 21st Century, 2014; p.21.

Actualmente, la ER cubre una parte importante de la demanda de electricidad; en 2013, su participación fue del 32,6% de la generación total (IEA, 2015:24). La proporción estimada de generación de electricidad en el mundo en 2013 por combustible se muestra en el tabla 3.2, como puede observarse el porcentaje de combustibles fósiles fue de 67,4%. La Tabla 3.3 muestra la proporción de producción de electricidad a partir de fuentes no hidráulicas en los países de la OCDE en 2012, donde eólico, fotovoltaico y biocombustibles sólidos representaron el 78,3% del total; pero el porcentaje de FV fue de 8,2%. Aunque la producción de FV fue menor a la de eólico o de los biocombustibles sólidos, la producción FV tuvo la mayor tasa de crecimiento anual de la producción de electricidad no hidráulica, alcanzando el 46,9%, en el período 1990-2012 (véase la tabla 3.4).

3.2.2 Tecnología FV y políticas de fomento.

La tecnología FV tendrá un papel importante para la generación de energía en los próximos años debido a su potencial de generación, su fuente de combustible duradera y el hecho de que es una tecnología probada (Masoudi, 2015). Un sistema FV proporciona energía eléctrica, ya sea conectado a la red, o no conectado a la red. Su instalación permite varias formas, por ejemplo, sistemas aislados (doméstico / no-doméstico), sistemas conectados a la red (distribuidos / centralizado) o sistemas híbridos (con otras fuentes de energía). Por otro lado, el módulo fotovoltaico (un arreglo de celdas FV), con su estructura de montaje, un inversor y una forma de almacenamiento (batería o la red) son elementos del sistema FV basados en innovación constante. Se han hecho mejoras en las celdas FV y en los inversores para tener mejores eficiencias en la conversión de energía (véase la tabla 3.5); por su parte, para resolver el problema de la intermitencia en la generación, se han desarrollado mejores dispositivos de almacenamiento amigables con el medio ambiente.

Tabla 3.2

Proporción de generación de electricidad en el mundo por combustible en 2013

Fuentes de Combustible	Porcentaje
Hidrocarburos	67.4%
Energía Nuclear	10.6%
Energía Hidráulica	16.3%
Fuentes no-hidráulicas	5.7%

Fuente: "Key Word Energy Statistics".

International Energy Agency, 2015; p.24.

Tabla 3.3

Producción de electricidad a partir de fuentes no hidráulicas en países de la OCDE en 2012

Fuentes no-hidráulicas	Porcentaje
Eólico	48.2%
Biocombustibles solidos	21.9%
FV	8.2%
Biogás	7.3%
Geotérmico	6.0%
Desperdicio	4.0%
Biocombustibles líquidos	0.8%
Solar térmica y Mareomotriz	0.6%

Fuente: "Renewables Information". International Energy Agency, 2013; p.40.

Tabla 3.4

Tasa de crecimiento anual de la producción de electricidad de fuentes renovables no hidráulicas (1990-2012)

Fuentes no hidráulicas	Tasa de crecimiento
Eólico	23.1%
Biocombustibles solidos	2.7%
FV	46.9%
Biogás	13.3%
Geotérmico	2.2%
Desperdicio	5.7%

Fuente: “*Renewables Information*”. International Energy Agency, 2013; p.40.

Un módulo FV puede producir entre 50-300 Watts (IEA, 2013a:7) con una vida útil de hasta 20 años; la selección del tipo de celdas FV a usar depende de la eficiencia de la celda y de sus costos asociados. Aunque los semiconductores compuestos (basado en oblea) podrían ofrecer una mayor eficiencia al multicristal (véase la tabla 3.5), estos tienen mayores costos asociados (Masoudi, 2015). La participación en el mercado de las celdas basadas en la oblea es de aproximadamente 80% en los países de la IEA (IEA, 2013a:6), esto podría deberse a que las celdas del tipo multicristalino son las menos caras de producir (Masoudi, 2015).

Tabla 3.5

Clasificación general de los tipos de celdas y sus eficiencias de sub-módulo

Tipo de celda ^a		Eficiencia ^{b,c}	Material
<i>Oblea cristalina</i>	Monocristalino sc-Si	25.6%	Silicio
	Multicristalino mc-Si	20.4%	Silicio
	semi-conductores compuestos GaAs	18.4% - 28.8%	Silicio, Arseniuro de Galio
<i>Película delgada</i>	a-Si	11.8% - 13.4%	Silicio amorfo, micro-
	CdTe	19.6%	Telurio de Cadmio
	CIGS	18.7% - 20.5%	Cobre-Indio-galio-selenio
<i>Orgánicas</i>		6.8% - 10.7%	Semiconductores orgánicos

Fuente: a) Adaptado de “Trends 2013 in Photovoltaic Application. Survey reports of selected IEA countries 1992 and 2012. Photovoltaic Power Systems”; IEA; 2013. b) Adaptado de “Solar cell efficiency tables (version 44)”. Green. M, et al.; Progress in photovoltaics: research and application, 2014; 22:701–710. c) Eficiencias medidas bajo el espectro global AM1.5 (1000 W/m²) a 25°C, los porcentajes de variación de los valores fueron omitidos.

Por otro lado, la tecnología FV puede ser competitiva en el mercado eléctrico con o sin subsidios, dependiendo del país, ya que en algunos lugares los costos de fabricación se han reducido permitiendo una 'paridad en costo entre combustibles' (REN21, 2014:48; EPIA, 2015:7). El precio mundial promedio de módulos FV era alrededor de \$22 por watt en 1980, y para 2010, se había reducido a menos de \$1,5 por watt (UNEP, 2011:212), la caída en el precio podría ser el resultado de una combinación de factores entre los que se incluyen la investigación y el desarrollo, las economías de escala, el 'aprender-haciendo', y el aumento de la competencia. Sin embargo, el costo nivelado de la energía (LCOE, por sus siglas en inglés) para FV en 2011 fue el más alto (PNUMA, 2011: 213) entre las tecnologías renovables. El LCOE se utiliza para comparar diferentes métodos de generación de electricidad en términos de costo.

No obstante, la capacidad instalada acumulada FV a nivel mundial alcanzó los 178,391 MW en 2014 (EPIA, 2015:12), esta ha experimentado un crecimiento exponencial desde el final de la década de los 1990s (Peters et al., 2012; REN21, 2014; EPIA, 2015). Peters et al. (2012) identificaron tres períodos distintos del desarrollo FV. En la primera etapa, de 1970 a 1985, la inversión pública en investigación y desarrollo (I+D) resultó en un primer impulso de patentes FV, en tanto que la capacidad FV era prácticamente inexistente. Luego, entre 1985 y 1995, la inversión en I+D disminuyó y el número de patentes aumentó ligeramente. Sin embargo, se observó un segundo impulso importante (1995-2009), las patentes y la capacidad instalada experimentaron un crecimiento exponencial, mientras que la inversión aumentó sólo marginalmente.

Tabla 3.6

Instrumentos de apoyo para el despliegue FV en países de la IEA (1992-2012)

Instrumento	Descripción	Apoyado en...	Observaciones
<i>Tarifa de retroalimentación</i>	Pago de la electricidad producida e inyectada en la red a un precio predefinido con una garantía	Los contribuyentes o en un gravamen específico en las facturas de electricidad	Se puede presentar el problema de un mercado descontrolado
<i>Subsidios directos al capital</i>	Subsidio para reducir una inversión inicial alta	Gasto gubernamental	Restringido al presupuesto gubernamental
<i>Cartera de renovables</i>	Regulación por una autoridad que define una cuota de ER que debe cubrir el productor	Mercado eléctrico competitivo	La cuota se puede producir, o cubrir mediante compra de certificados
<i>Créditos fiscales</i>	Subsidio para reducir una inversión inicial alta	Gasto gubernamental	Restringido al presupuesto gubernamental
<i>Requerimientos de construcción sustentable</i>	Regulación por una autoridad de los requerimientos para nuevos desarrollos de construcción	Tecnología FV competitiva	Se puede aplicar también en ventas de propiedades
<i>Esquema de compensación</i>	Compensación al flujo de energía y al flujo financiero sobre lo que un productor inyecta en la red eléctrica	Mercado eléctrico competitivo	También llamados como auto-consumo, o 'net-metering'

Fuente: "Trends 2013 in Photovoltaic Application. Survey reports of selected IEA countries 1992 and 2012. Photovoltaic Power Systems"; IEA; 2013.

Peters et al. (2012) observaron que Japón y E.U. obtuvieron el mayor número de patentes, mientras que Alemania tenía la mayor capacidad instalada, y China era el principal productor de celdas en el año 2009. La teoría de la innovación sugiere una combinación adecuada de políticas de oferta y demanda para apoyar la creación y la utilización del conocimiento (Valenti, 2008: 57-92; Crespi y Dutrénit, 2014).

De acuerdo con un informe anual reciente del REN21 (2014:76), objetivos de política pública respecto al despliegue de ER fueron reportados por 144 países en 2014, para promover la capacidad instalada o la generación de energía. La mayoría de esos apoyos enfocados al sector eléctrico. Estas políticas pueden ser en forma de regulaciones, incentivos fiscales o mecanismos de financiación, aplicadas de forma individual o a través de apoyos combinados, además pueden ser aplicadas a nivel nacional o local. En el caso particular de la tecnología FV, a pesar de que cada vez es más competitiva, las políticas de apoyo siguen siendo necesarias para su despliegue en el mercado eléctrico.

Teniendo en cuenta que el objetivo principal es reducir la brecha entre los costos asociados a FV y los de sus bienes sustitutos. Algunos instrumentos de apoyo al sector FV fueron recogidos y analizados en un reporte sobre países de la IEA en 2012 (IEA, 1995-2012) [ver tabla 3.6]. De acuerdo con los resultados de la encuesta (IEA, 2012; 41), la proporción de los instrumentos de fomento en el mercado en 2012 fueron: 12% tanto para el autoconsumo y la FV competitiva; 61% de las tarifas de retroalimentación; 21% para ambos subsidios directos y reducciones de impuestos; 4% para la Cartera de Energía Renovable (RPS-por sus sigla en inglés) y sistemas similares; y 2% para 'net metering'. Debe tenerse en cuenta que los instrumentos de apoyo que se muestran en la tabla 3.6 no están orientados exclusivamente al impulso del despliegue FV, más bien, tienen como objetivo apoyar la capacidad instalada y/o generación de ER.

3.2.3 Estudios previos.

3.2.3.1 Estudios previos relacionados con evaluación de políticas.

En la revisión de estudios previos sobre el despliegue FV, se observa que ha habido un interés creciente en la identificación de las políticas exitosas que impulsan la tecnología FV (Chen and Su, 2014; Muhammad-Sukki et al., 2014; Luo et al., 2013; Peters et al., 2012). Sin embargo, hay más estudios sobre el impacto de las políticas en la producción total de ER que los que tienen la intención de medir el impacto de las políticas sobre tecnologías renovables específicas. La mayor parte de los casos de estudio comparan a un grupo de países seleccionados (Chen and Su, 2014; Karytsas and Theodoropoulou, 2014; Luo et al., 2013) mientras que otros sólo centran su atención en países de manera individual o en regiones geográficas (Zeb et al., 2014; Sanz-Casado et al., 2014; Khan et al., 2014).

Chen and Su (2014) estudiaron la coordinación de la cadena de suministros FV y a los consumidores estratégicos en China, en el periodo 2008-2012. Encontraron que las políticas usadas para coordinar contratos funcionaban bien con los compradores estratégicos. Estos instrumentos se centran en una tasa de descuento, en los costos de producción y en la reducción de costos de módulos que benefician a la cadena de suministros FV.

Muhammad-Sukki et al. (2014) también exploró el impacto de la política gubernamental. Se estudió el potencial de la energía FV en Japón mediante la evaluación de la aplicación de la tarifa de retroalimentación a través de un análisis financiero. Los resultados muestran que el período de recuperación económica en

Japón fue similar a la del Reino Unido, pero menor que en Alemania o Italia. Mientras que la ganancia total en Japón no fue tan alta como en Italia o el Reino Unido. El rendimiento promedio anual de la inversión fue bastante similar en todos los países que fueron estudiados, a excepción de Alemania, donde fue el más bajo.

Otro ejemplo de estudio sobre instrumentos de política es el trabajo de Carly (2009). Este estudio evalúa la eficacia de los programas de gobierno en la promoción del desarrollo y despliegue de ER en los Estados Unidos y se prueba el vínculo entre la aplicación del RPS y el porcentaje de generación de electricidad renovable. Carly mostró que las instituciones políticas, los recursos naturales, la desregulación, el PIB, así como los precios de la electricidad y el consumo de electricidad por persona se relacionan significativamente, estadísticamente hablando, con el despliegue de la ER. Sin embargo, la implementación de un RPS no predice significativamente el porcentaje de generación de electricidad renovable.

Shrimali and Kniefel (2011) buscaron vínculos causales entre las políticas del gobierno y las nuevas fuentes de generación de electricidad renovable en los E.U., durante el período 1991-2007. Se encontró que variables económicas tales como el precio de la electricidad, el precio del gas natural y el PIB no afectan significativamente el despliegue de ER, sin embargo, tres tipos de políticas fueron eficaces: el RPS, opciones de energía verde y los fondos de energía limpia. En este estudio se hace hincapié en la variabilidad de los efectos de las variables de control sobre las diferentes tecnologías; por ejemplo, el impacto de la implementación de un RPS varía dependiendo del tipo de fuente renovable. Además, muestran que los programas de gobierno, tales como la compra de energía verde por parte del estado o las carteras voluntarias de ER no habían tenido éxito.

Un ejemplo de un estudio regional es el trabajo de Khan et al. (2014). En donde los investigadores estudiaron una región del sur de Asia en el periodo de 1975 a 2011. Se buscó una relación causal entre el consumo de energía, el crecimiento económico, los precios relacionados, el desarrollo financiero y la inversión extranjera directa. Sus resultados sugieren que los efectos dependen de la co-integración de las variables que se estudiaron. Por ejemplo, el consumo de energía y el crecimiento económico se ven afectados entre sí. También encontraron una relación bidireccional entre la inversión extranjera directa y el precio relativo de la energía.

También, Zeb et al. (2014) estudiaron a un grupo de países, en este caso de la Asociación del Sur de Asia para la Cooperación Regional en el período 1975-2010. Los resultados mostraron que la producción de electricidad a partir de ER tiende a reducir las emisiones de carbono. Se analizaron las relaciones causales a corto y largo plazo entre la producción de electricidad a partir de fuentes renovables, las emisiones de CO₂, el PIB y la pobreza. Vínculos positivos causales se encontraron entre estas variables analizadas, y la relación de largo plazo entre ellas

Por otro lado, Marques and Fuinhas (2011) examinaron los datos de 24 países europeos entre 1990 y 2006. Estudiaron los indicadores relacionados con el medio ambiente y estaban interesados en la identificación de indicadores relacionados con el compromiso a producir energía a partir de fuentes renovables. Un hallazgo empírico interesante de este estudio fue que el mercado europeo no impulsa a la ER. Tampoco los ingresos y el precio de los combustibles fósiles impulsan el despliegue de ER. Además, sus resultados respaldan la tesis de que la conciencia sobre la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático no han sido suficientes para motivar una transición energética.

Alagappan et al. (2011) analizaron 14 mercados en los E.U., Canadá y Europa. Las políticas en observación fueron: la estructura del mercado, el uso de la tarifa de retroalimentación, la planeación de la transmisión y el costo de interconexión de la transmisión. Sus resultados mostraron que los instrumentos de apoyo exitosos para el despliegue de ER fueron la tarifa de retroalimentación, una planeación anticipada y la absorción del costo de interconexión de transmisión.

3.2.3.2 Estudios relacionados con el sistema socio-técnico y la transición tecnológica en el sector energético.

Existen dos enfoques generales para el estudio de la producción y el uso de la tecnología FV (Chen and Su, 2014; Muhammad-Sukki et al., 2014; Carley, 2009; Khan et al., 2014; Sanz-Casado et al., 2014; Luo et al., 2013; Peters et al., 2012; Alagappan et al., 2011; Shrimali and Kniefel, 2011). Un método consiste en estudiar la producción o la creación de conocimiento (por ejemplo, mediante el análisis de patentes o la cadena de producción), y otro es el estudio de la apropiación de la tecnología, por ejemplo, el estancamiento de la tecnología (Luo et al., 2013).

Sin embargo, hay un enfoque holístico para estudiar el desarrollo de tecnologías que puede ser aplicado, la perspectiva multi nivel (MLP – por sus siglas en ingles) y el concepto de sistema socio-técnico (Geels, 2004). Este enfoque integra las perspectivas de la producción, difusión y uso de las tecnologías. Lo que permite el análisis de las configuraciones de las tecnologías, las infraestructuras, las prácticas sociales, las instituciones y los mercados que determinan el desarrollo de tecnologías (Kern, 2012; Geels, 2004). Aunque este método ha sido útil para estudiar la transición tecnológica en otros sectores, ha sido escasamente aplicado en los estudios sobre el sector energético (Kern, 2012; Stephens and Justo, 2009, Verbong and Geels, 2006).

Por ejemplo, Stephens y Jiusto (2009) exploran la dinámica de la innovación en la captura y almacenamiento de carbono (CCS-por sus siglas en ingles) y en los sistemas geotérmicos mejorados (EGS-por sus siglas en inglés) a través del concepto de sistema ST. Estas tecnologías emergentes requieren de varios recursos, por lo que se estudió la dinámica de la innovación para contribuir a la formulación de políticas. Encontraron que la CCS es una respuesta innovadora al sistema dominante de generación con carbón en los E.U. y que la CCS en sí se convirtió en un promotor de nuevas plantas a base de carbón. En el caso de los EGS, la inquietud está relacionadas con la rentabilidad, ya que los EGS requieren condiciones geológicas favorables. Sus resultados también ponen de relieve algunos problemas; por ejemplo, sugirieron que la red de apoyo de los actores no es lo suficientemente fuerte, y la conciencia de esta tecnología entre los científicos y los ecologistas es limitada. Ambas tecnologías se basan en el financiamiento gubernamental y/o en la asociación pública-privada para su implementación.

Otro ejemplo es el trabajo de Kern (2012), donde se utilizó a la MLP para evaluar una iniciativa de política pública que promueve la transición hacia una economía baja en carbono en el Reino Unido. Kern mostró que la MLP es útil para estudiar las políticas y su evaluación de impacto *ex-ante*. El estudio encontró que la iniciativa 'Carbon Trust' está bien orientada para estimular el desarrollo de nichos tecnológicos y que ha ayudado a cambiar las prácticas de regímenes, influyendo en procesos específicos. Otro estudio fue realizado por Verbong y Geels (2006) en el sistema eléctrico holandés con el objetivo de analizar *"el progreso técnico, cambios en las normas y en las visiones, y las redes sociales que apoyan, y las que se oponen, a las opciones renovables"*, encontraron que estos factores han influido en la dinámica de algunos nichos tecnológicos tales como en el eólico, la biomasa y el FV. También apoyaron la tesis de que la transición energética actual no se basa en aspectos ambientales.

Por último, la revisión de la literatura muestra resultados no concluyentes y todavía hay discusión acerca de los factores que impulsan el despliegue de tecnologías de ER. Por ejemplo, Carly (2009) encuentra que el precio de la electricidad fue significativo para el despliegue de ER, mientras que Shrimali y Kniefel (2011) encontraron que el precio de la electricidad no fue significativo; ambos estudios se realizaron respecto al caso de los E.U. Además, los estudios empíricos se centran principalmente en la producción total de ER (Shrimali and Kniefel, 2011; Marques and Fuinhas, 2011; Carley, 2009). En nuestro conocimiento, los estudios previos no han realizado una evaluación empírica de los factores que impulsan el desarrollo de la energía fotovoltaica, controlando por país y teniendo en consideración los parámetros de la teoría ST. Este enfoque parece ser adecuado, ya que diferentes estudios en la revisión de la literatura han tenido en cuenta las variables de la teoría ST sin integrarlos de manera sistémica. A parte de que la teoría ST ha sido útil para el análisis de políticas de desarrollo tecnológico en los sistemas de energía.

3.3 Datos y métodos

Los datos utilizados en este estudio fueron recolectados a partir de cuatro fuentes de información: los reportes "*Trends in photovoltaic applications*" de la IEA, que son un conglomerado de datos fotovoltaicos de varios países (IEA, 1995-2012); la base de datos estadísticos de la OCDE; la base de datos de Scopus; y finalmente, la base de datos del Pantescopio de la "*World Intellectual Property Organization - Patent Cooperation Treaty*" (WIPO PCT). El período de análisis fue de 1992 a 2011. Para las patentes y artículos académicos, el período estudiado fue de 1982 a 2011. El límite para patentes y artículos académicos se desplazó diez años más considerando posibles rezagos de su impacto.

Algunas restricciones se presentaron en la recolección de datos. La primera de ellas fue la disponibilidad de los reportes de las encuestas de la IEA (IEA, 1995 a 2012). El último reporte disponible era la edición de 2012. Estos reportes han reunido la tendencia FV de 1992 al 2011, periodo que cubre en buena medida la tendencia exponencial de la capacidad FV instalada (Peters et al., 2012; EPIA, 2015). Otra restricción fue los datos incompletos en los mismos reportes de la IEA. En algunos casos, determinada información no está disponible en estos reportes o no se informó en el país.

Por otro lado, se necesitó información que estaba fuera del alcance de los reportes de la IEA; por ejemplo, la cantidad tanto de patentes como de artículos publicados. Esta información se accedió para ajustarse al concepto de sistema ST. En el caso de las patentes, se utilizó la clasificación de la "International Patent Classification (IPC)". Debe tenerse en cuenta que para las patentes, la consulta se llevó a cabo mediante la búsqueda de información relacionada con FV (ver Apéndice A).

El sistema ST sugiere una meta-coordinación (Geels, 2004), de los diferentes grupos que están involucrados en el desarrollo de una tecnología. Esta coordinación es necesaria para desarrollar, comercializar y utilizar las innovaciones (Geels, 2004:902). Un régimen ST depende de las

interdependencias de los siguientes cinco regímenes: el tecnológico, el de ciencia, el de política, el sociocultural, y el de usuario-y-mercado (Geels, 2004). Las interdependencias de estos regímenes impulsa la ruta tecnológica del régimen ST.

Consideramos que el uso de este enfoque puede ser una ventaja, ya que se centra en la co-evolución de la tecnología y la sociedad (Geels, 2004:902). En el régimen dominante de la teoría MLP, los diferentes regímenes de unos sistemas están alineados hacia el sistema tecnológico actual (la tecnología que domina el mercado). Sin embargo, la alineación de los cinco regímenes cambia para permitir que nuevas tecnologías entren en el sistema. En este estudio en particular, medimos el incremento de capacidad FV dentro del régimen dominante de combustibles fósiles. Nuestra hipótesis es que la cantidad de capacidad FV es el resultado de los cambios en los cinco regímenes del sistema ST, los cuales están relacionados con el desarrollo de la tecnología FV (ecuación 1).

$$\Delta\text{Capacidad FV} = \Delta\text{tecnológico} + \Delta\text{ciencia} + \Delta\text{política} + \Delta\text{socio-cultural} + \Delta\text{usuario-y-mercado} \\ \dots(\text{ecuación 1})$$

Cada país tiene su configuración particular que ha permitido un incremento específico de capacidad FV. Por lo tanto, se estudió una muestra de 15 países por medio de una estructura de panel econométrico, ya que permite el análisis de datos longitudinales a nivel de país. Los países seleccionados fueron Alemania, Australia, Austria, Canadá, Corea, España, los Estados Unidos, Francia, Israel, Italia, Japón, México, el Reino Unido, Suecia, y Suiza. La selección de los países se restringió a la lista de países en los reportes de la IEA (IEA, 1995-2012), ya que estos informes muestran medidas implementadas que han impulsado el despliegue mundial de la tecnología FV.

Siete países (Alemania, Canadá, España, los Estados Unidos Francia, Italia y Japón) se consideraron por estar en cinco listados del 2012 del REN 21 (REN21="Renewables Energy Policy Network for the 21st Century"). La selección de los listados es la siguiente: a) Incremento anual de capacidad solar FV; b) Inversión en nueva capacidad (renovable); c) Capacidad total de ER (no incluye la energía hidroeléctrica); d) Capacidad total de tecnología FV; y e) FV total per cápita (REN21, 2013: 17). Creemos que estas listas muestran los actores clave en FV y en RE.

Otros países fueron seleccionados teniendo en cuenta que son parte de los países de la OCDE (Australia, Austria, Corea, Israel, México, el Reino Unido, Suecia, y Suiza). Lamentablemente, otros países que son fundamentales en el despliegue FV no se consideraron en este estudio debido a la falta de información sobre ellos. Por ejemplo, la posición de China en los rankings del REN 21 revela que este país es un modelo clave en el despliegue FV sin embargo este no está incluido en los informes de la IEA (IEA, 1995-2012). Además, su información sobre sus sistemas FVs es reciente, lo que puede acortar el período de estudio del panel econométrico. Por lo tanto, no se incluyó en este estudio.

Las variables fueron seleccionadas teniendo en cuenta el régimen ST, de manera tal que al menos una variable representa a uno de los regímenes. La Tabla 3.7 resume las variables y a sus régimen afín. Asumimos que el incremento de la capacidad FV ($PCumInstPV$) es una función de nueve variables explicativas (véase la tabla 3.7 y la tabla 3.8). Para el régimen tecnológico, que se refiere a la especificación del producto, la variable es el número de patentes ($ppatent$), que es una medida aceptada de la actividad de innovación (con datos de la WIPO). Para el régimen de ciencia, que se refiere a la actividad de investigación, la variable es el número de artículos científicos ($ppaper$) [con datos de Scopus].

Tabla 3.7

Los cinco regímenes ST y sus variables asociadas para el modelo de efectos fijos

Régimen ST	Corresponde a:	Representado por:	Variable
<i>Tecnológico</i>	Especificación de producto	* número de patentes	* <i>ppatent</i>
<i>Ciencia</i>	Actividad de investigación	* artículos publicados	* <i>ppaper</i>
<i>Política</i>	Regulación formal de la tecnología	* Consumo neto de electricidad renovable * Emisiones de CO ₂ por consumo de energía	* <i>Prnweleconsu</i> * <i>Pco2enrcons</i>
<i>Sociocultural</i>	Significado simbólico de la tecnología	* Reservas de petróleo	* <i>Poilreserv</i>
<i>Usuario-y-mercado</i>	Construcción del mercado mediante reglas y leyes	* Tarifa de retroalimentación * Net metering * Créditos fiscales * Requerimientos de construcción sustentable	* <i>feedn</i> * <i>netmetr</i> * <i>taxcrd</i> * <i>buldngreq</i>
<i>Régimen-ST</i>	Incremento de capacidad FV	* Capacidad acumulada instalada FV	* <i>PCumInstPV</i>

Para el régimen de política, que se refiere a las reglas formales de la tecnología, se consideraron dos variables; una es el consumo neto de energía eléctrica renovable (*Prnweleconsu*), y la otra es las emisiones de CO₂ por consumo de energía (*Pco2enrcons*). Estas variables pueden representar los resultados de la política energética de la muestra de países con respecto a ER; retrasos de hasta cuatro años se utilizaron para observar la influencia de estas políticas en el tiempo.

Para el régimen sociocultural, que se refiere al significado simbólico de la tecnología, la variable es las reservas de petróleo (*Poilreserv*), asumiendo que los países se clasifican en función de sus reservas de petróleo. La cantidad de reservas permite la evaluación de la independencia energética y la seguridad energética de un país determinado (para el régimen sociocultural y de política, los datos proceden de la base de datos de la OCDE)

Tabla 3.8

Variables dependiente y de control para el modelo de efectos fijos, y agrupación por tipo de variable (cuantitativa o binaria).

Variable dependiente	Variables de control	
Cuantitativa una variable	Cuantitativa cinco variables	Binaria cuatro variables
Y_{it}	$X_{k,it}$	$d_{k,it}$
<i>PCumInstPV</i>	<i>Ppatent</i> <i>ppaper</i> <i>Prnweleconsu</i> <i>Pco2enrcons</i> <i>Poilreserv</i>	<i>feedn</i> <i>netmetr</i> <i>taxcrd</i> <i>buldngreq</i>

Por último, para el régimen usuario-y-mercado se consideraron cuatro instrumentos de apoyo: la tarifa de retroalimentación (*feedn*), el net metering (*netmetr*), los créditos fiscales (*taxcrd*), y los requerimientos de construcción sustentable (*buldnreq*). Estas son variables binarias (véase la tabla 3.8) y representan si un instrumento en cuestión se ha implementado, o no, en un año determinado, para un determinado país (datos de la IEA). Para abordar el problema de la autocorrelación, se utilizó el cambio porcentual anual de las variables (a excepción de las variables binarias). Las correlaciones entre las variables se muestran en el Apéndice B.

La herramienta de análisis utilizado fue la regresión de efectos fijos por mínimos cuadrados ordinarios. Se utilizó un panel de datos, que es una colección de observaciones en el tiempo (también conocido como datos de series de tiempo longitudinal o transversal) [Mátiás and Sevestre, 2008:47; Wooldridge, 2002:442]. El modelo de efectos fijos (MEF) permite evaluar el efecto de una variable de control sobre la variable dependiente cuando las otras variables de control quedan fijas. En el MEF, el efecto no observado se considera y el estimador se basa en los promedios en el tiempo de las variables (Wooldridge, 2002:409). Ejemplos de aplicaciones similares son los estudios de Shrimali and Kniefel (2011), Carley (2009) y el de Marques and Fuinhas (2011). Aunque hay datos que faltan, el panel resulto balanceado.

Se asume que la capacidad FV es una función de las variables de control que varían en el tiempo t (1992-2011) y por país i (muestra de 15 países).

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_k X_{k,it} + \gamma_k d_{k,it} + a_i + u_{it} \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde:

- Y_{it} es la variable dependiente (i = país and t = tiempo.)
- β_0 representa al término constante.
- $X_{k,it}$ representa a las variables cuantitativas de control
- β_k representa a los coeficientes de regresión para las variables de control
- a_i son los efectos no observados o la heterogeneidad no observada
- u_{it} es el termino de error (error variable en el tiempo)
- $d_{k,it}$ representa a las variables binarias de control (dummies)
- γ_k representa a los coeficientes de regresión de las variables binarias

Los coeficientes a obtener en la regresión son β_0 , β_k and γ_k para cada variable k. Los factores no observados por país son los a_i los cuales representan todos los factores que afectan el despliegue FV que no cambian con el tiempo.

Algunas de las variables cuantitativas tienen números a un costado de ellas, que indican el número de años de rezago de la variable (por ejemplo, “*ppaper_8*” es la variable de control “*paper*” con un rezago de 8 años). El paquete de software STATA /SE13.0 se utilizó para obtener los resultados. Se realizó el siguiente proceso general para el modelado: cargar la base de datos, comprobar la correlación entre las variables, probar la significancia de las variables explicativas (el estadístico t y el p-valor), obtener un modelo adecuado (la R^2 , el estadístico F), y por último, se probó la autocorrelación de los datos de panel.

El modelo de panel de datos es apropiado por las observaciones de varios individuos en el tiempo pues es una combinación de corte transversal y de serie de datos en el tiempo, además esta forma es muy utilizada para análisis de políticas y/o evaluación de programas (Wooldridge, 2002:434). Permite variables cuantitativas y/o categóricas. El modelo de efectos fijos puede ser estimado si el tamaño de la muestra longitudinal es pequeño.

Generalidades de las pruebas del modelo:

- Contraste de significación. En el modelo un valor de significancia menor a 5% o 0.05 es estadísticamente significativa, aunque se pueden escoger valores de significancia al 10%. Lo anterior implica que la variable tiene una influencia significativa sobre la variable explicada (ver nota de la tabla 3.10).
- Estadístico F. Contraste de significación de más de dos variables es aceptado un valor menor a 0.05, lo que indica que se acepta el modelo.
- Coeficiente de determinación R^2 . Una vez ajustada la recta de regresión la R^2 mide la bondad del ajuste realizado, valores comprendidos en el intervalo $0 \leq R^2 \leq 1$.
- Prueba de multicolinealidad. Cuando las variables explicativas están correlacionadas la R^2 es cercana a 1.
- Ausencia de autocorrelación. La covarianza de los términos de error es cero, lo que indica que son independientes.
- Homocedasticidad. La varianza del término de error es constante y finita, una regresión robusta ajusta todas las varianzas.

La tabla 3.10 se muestra que la prueba Wooldridge concluye no autocorrelación en los modelos, aunque este no es problema que se presente generalmente en paneles pequeños. También, se utilizó un ajuste a un modelo de efectos fijos robusto para hacer frente a la heteroscedasticidad.

3.4 Resultados

El número de observaciones fue de 211, y el número de grupos fue de 15. Las correlaciones entre las variables sugieren que no hay colinealidad entre las variables (véase la Tabla 3.9 y en el Apéndice B). Se observó que la diversidad de las características particulares de los diversos países en la muestra de países seleccionados tales como las diferencias entre la cantidad de reservas de petróleo o el número de patentes solicitadas se ve reflejado en las varianzas altas de las variables utilizadas.

La correlación más alta entre la variable dependiente y la variable explicada es de 0.4046 mientras que la correlación más alta entre las variables dependientes es de 0.5219. Se desconoce la razón de correlaciones altas entre las variables podría ser debido a su naturaleza como instrumentos de fomento de energía renovable aunque la explicación se encuentra fuera del alcance de este estudio. Se manejó como estándar la práctica en econometría de aceptar valores de correlación menores a 0.5, esta práctica es aplicada por la escasez de variables. Aunque para este estudio también se manejó esta práctica considerando mantener los instrumentos de la política pública a evaluar. Para el caso de los instrumentos de política pública con correlación alta se manejó ver el comportamiento en el modelo de estas variables de manera individual y en conjunto, como se observa en la tabla 3.10, en el caso de las patentes se omitió en el modelo 1 al resultar la variable como no significativa.

En la tabla 3.10, en donde se muestran seis modelos, se resume los resultados obtenidos. En la tabla, los espacios en blanco, en las columnas de los modelos, indican que se omitió la variable correspondiente en la regresión de ese modelo. En general, los modelos de regresión fueron altamente significativos ($\text{Prob} > F = 0.0000$), la prueba Wooldridge no detectó autocorrelación en ningún de ellos.

Los resultados muestran que las primeras tres variables, las reservas de petróleo con un rezago de cuatro años (*Poilreserves_4*), el consumo neto de energía eléctrica renovable (*Prnweleconsu*) y las emisiones de CO₂ por consumo de energía con un año de rezago (*Pco2enrcons_1*), son estadísticamente significativas. Sus signos y sus respectivos coeficientes de regresión (RC) son consistentes en los seis modelos. *Poilreserves_4* y *Pco2enrcons_1* presentan una correlación negativa con el incremento de capacidad FV, mientras *Prnweleconsu* presenta una correlación positiva.

La variable para el régimen de ciencia con un rezago de ocho años (*ppaper_8*) es significativa al 10% sólo en el modelo 1, aunque su coeficiente y signo son consistentes en todos los modelos. Lo que sugiere que la productividad científica puede promover el incremento de capacidad FV. La variable que representa a la innovación (*ppatent*) no fue significativa en ninguno de los seis modelos. Es necesario señalar que estas dos variables de control (*ppaper_8* y *ppatent*) se probaron con diferentes rezagos durante un período de 10 años, sólo se muestra los resultados en los que alguna de ellas resulto significativa.

Las variables de control para el régimen de usuario-y-mercado, la tarifa de retroalimentación (*feedn*) y los requerimientos de construcción sustentable (*buldngreq*), fueron significativas, para *feedn* en los modelos de 1, 2 y 6, mientras que para *buldngreq* sólo en el modelo 3. El signo y el RC de *feedn* fueron consistentes en todos los modelos en los que aparece, incluso cuando todos los demás instrumentos del mercado se pusieron a prueba al mismo tiempo. En tanto que *buldngreq* fue significativa sólo cuando se omitieron los otros instrumentos de política. Ambos instrumentos (*feedn* y *buldngreq*) tienen un impacto positivo hacia el incremento de capacidad FV. Por otra parte, las variables de control que representan el net metering (*netmetr*) y los créditos fiscales (*taxcrd*) fueron estadísticamente no significativas en todas las regresiones, tanto en conjunto con otros instrumentos y cuando otros instrumentos se omitieron.

Tabla 3.9

Correlaciones entre variables (únicamente para las variables que se muestran en la Tabla 3.10)

Variable	<i>PCumInstPV</i>	<i>Prnweleconsu</i>	<i>Pco2enrcons_1</i>	<i>Poilreserv_4</i>	<i>ppatent</i>	<i>ppaper_8</i>	<i>feedn</i>	<i>netmetr</i>	<i>taxcrd</i>	<i>buldngreq</i>
<i>PCumInstPV</i>	1.00000									
<i>Prnweleconsu</i>	0.4046	1.0000								
<i>Pco2enrcons_1</i>	-0.1516	0.0431	1.0000							
<i>Poilreserv_4</i>	-0.0232	-0.0215	0.0284	1.0000						
<i>Ppatent</i>	-0.0101	-0.0949	0.0428	0.1528	1.0000					
<i>ppaper_8</i>	0.0205	0.0067	0.1320	-0.0600	-0.0606	1.0000				
<i>Feedn</i>	0.2905	0.1028	-0.1330	0.0850	0.0105	-0.0897	1.000			
<i>Netmetr</i>	-0.0006	-0.0569	-0.0547	0.0942	-0.0318	-0.1143	0.4094	1.0000		
<i>Taxcrd</i>	0.0599	-0.0619	-0.0875	0.1191	0.0034	-0.1269	0.2124	0.3970	1.0000	
<i>Buldngreq</i>	0.0867	-0.0229	-0.0477	0.1465	0.0167	-0.0418	0.5219	0.4021	0.2471	1.0000

Nota: El signo de los valores indica la correlación positiva o negativa; la correlación más alta es de 0.5219.

Por lo tanto, los resultados sugieren que las variables que promueven el despliegue FV son el consumo neto de energía eléctrica renovable (*Prnweleconsu*), la tarifa de retroalimentación (*feedn*), los requerimientos de construcción sustentable (*buldngreq*) y los artículos científicos con un rezago de ocho años (*ppaper_8*). Aunque la política pública para aumentar la cartera de ER, medida por el consumo neto de energía eléctrica renovable, es el factor de mayor impacto (361%), el uso de las tarifas de retroalimentación también es muy relevante (112%). Además, los datos muestran que las tarifas de retroalimentación promueven la instalación de FV más que los requerimientos de construcción sustentable (63.7%).

Por otra parte, las variables con un impacto negativo con el despliegue FV son las reservas de petróleo con un rezago de cuatro años (*Poilreserv_4*) y las emisiones de CO₂ por consumo de energía con un año de rezago (*Pco2enrcons_1*). La variable *Pco2enrcons_1* tiene el efecto negativo más alto de todos los factores estudiados (700%). Aunque este resultado es consistente con el impacto negativo de las reservas de petróleo, por el contrario el RC de la última variable es bajo (2,9%).

Por último, uno de los resultados más interesantes es que el impacto positivo de la publicación científica hacia el despliegue de la capacidad FV instalada es evidente sólo después de un tiempo de rezago de al menos ocho años. Sorprendentemente, las patentes no resultaron significativas en ninguno de los períodos más cortos de diez años. Otro hallazgo interesante fue que los únicos instrumentos de política que promueven el despliegue mundial de energía fotovoltaica son la tarifa de retroalimentación y los requerimientos de construcción sustentable.

Tabla 3.10

Resultados de regresión (coeficientes de regresión y resultados de pruebas a los modelos)

Variable Dependiente: Capacidad FV acumulada (*PCumInstPV*). Modelo Efectos Fijos (Robusto)

Variable	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Especificación	Régimen
<i>Poilreserv_4</i>	-0.0294 *** (0.0067)	-0.0346*** (0.0084)	-0.0225** (0.0077)	-0.0162** (0.0065)	-0.0196** (0.0086)	-0.03431*** (0.0085)	Reservas de petróleo con rezago de 4 años	Sociocultural
<i>Prnweleconsu</i>	3.6100 *** (0.9810)	3.7042*** (0.9542)	3.7538*** (0.9592)	3.8108*** (0.9504)	3.7398*** (0.9719)	3.6590*** (0.9722)	Consumo neto de electricidad renovable	Política
<i>Pco2enrcons_1</i>	-7.0057 *** (2.1924)	-7.1371*** (2.2171)	-8.4422** (3.0035)	-8.6472** (2.9496)	-8.5286*** (2.7583)	-7.0769*** (2.2205)	Emisiones de CO ₂ por consumo de energía con rezago de 1 año	
<i>ppaper_8</i>	0.1558 * (0.0773)	0.1582 (0.819)	0.1311 (0.0748)	0.1373 (0.0694)	0.1562 (0.0959)	0.1675 (0.0936)	Artículos con rezago de 8 años	Ciencia
<i>ppatent</i>		0.1185 (0.1450)	0.0655 (0.1527)	0.0702 (0.1512)	0.0561 (0.1513)	0.1129 (0.1419)	Patentes	Tecnológico
<i>feedn</i>	1.1259 *** (0.3176)	1.1446*** (0.3167)				1.2724** (0.4482)	Tarifa de retroalimentación	Usuario-y- Mercado
<i>buldngreq</i>			0.6375** (0.2657)			-0.2526 (0.5690)	Requerimientos de construcción sustentable	
<i>netmetr</i>				0.3512 (0.2404)		-0.2344 (0.3690)	Net metering	
<i>taxcrd</i>					0.6635 (0.5682)	0.3659 (0.5491)	Créditos fiscales	
<i>Constante</i>	0.3311 *** (0.1111)	0.2843** (0.1243)	0.6095*** (0.9167)	0.6076*** (0.0865)	0.5544*** (0.1575)	0.2670 (0.1401)	Termino constante	
R ² (within)	0.2172	0.2202	0.1829	0.1778	0.1846	0.2248	Coeficiente de determinación	
R ² (between)	0.6580	0.6624	0.5732	0.5198	0.5182	0.6919		
R ² (overall)	0.2474	0.2502	0.2032	0.1928	0.1984	0.2585		
Prob > F	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	Estadístico F	
Wooldridge Autocorrelación Prob>F	0.2667	0.2139	0.2019	0.2006	0.2054	0.2051	Autocorrelación	

Notas: - a) Diferentes rezagos para *ppatent* y *ppaper* fueron probados (rezagos de 1 a 10 años). b) El error estándar en paréntesis.

c) Nivel de significancia: *** 1%; ** 5%; * 10%.

3.5 Discusión.

Se probaron varios factores que impulsan el crecimiento exponencial de la capacidad FV utilizando los cinco regímenes del sistema ST. La teoría ST y la MLP apoyan la tesis de que los nichos tecnológicos, como la tecnología fotovoltaica, necesitan políticas con un enfoque holístico (que actúen sobre la oferta y la demanda) con el fin de competir con un mercado establecido (como el caso del mercado de los combustibles fósiles). Los regímenes de ciencia y tecnología están relacionadas con la oferta mientras que los regímenes de política, el sociocultural, y el de usuarios-y-mercados están relacionadas con la demanda.

Para el régimen tecnológico, no se esperaba encontrar que la producción de patentes FV (*ppatent*) no promuevan significativamente la capacidad FV instalada acumulada, al menos no en el período de tiempo considerado (rezagos de hasta diez años). Si tenemos en cuenta que los nichos tecnológicos irrumpen en un régimen dominante mediante la innovación, podría ser que el impacto a la capacidad FV instalada de las patentes relacionadas a FV requieran más tiempo que el período de análisis que se manejó en el estudio. Sin embargo, para el régimen de ciencia, nuestros resultados sugieren que los artículos científicos impactan el despliegue FV con un rezago de ocho años. Una de las razones por las que el régimen de ciencia impulsa el despliegue FV podría ser el hecho de que el trabajo relacionado con la investigación prepara recursos humanos altamente calificados, y este tipo de personal apoya el despliegue del mercado FV mediante la transferencia de tecnología (Luo et al., 2013). Nuestros resultados de las políticas de oferta sugieren evidencia robusta de que el despliegue FV ha requerido políticas de oferta de largo plazo en el grupo de estudio y que la producción de conocimiento ha sido importante, pero no es suficiente para impulsar el despliegue FV como Peters et al. (2012) sugieren, ellos mencionan que se requiere también un apoyo a la parte de la producción y a la instalación.

Por otro lado, para el régimen de política, la correlación negativa entre las emisiones de CO₂ en el sector energético (*Pco2enrcons_1*) y la capacidad FV instalada (*PCumInstPV*), la cual se considera cero emisiones, es consistente con los resultados de otros estudios (Zeb et al., 2014). Sin embargo, esto no quiere decir que todas las reducciones en las emisiones de CO₂ resultan de los incrementos en instalación FV. De hecho, la energía eólica y los biocombustibles son también fuentes para la reducción de emisiones que compiten fuertemente con FV. Políticas tales como los programas de eficiencia energética además de nuevas tecnologías como la de captura y secuestro de carbono también deben tenerse en cuenta (Stephens y Jiusto, 2009).

No obstante, el efecto estadístico de las emisiones de CO₂ en la capacidad FV acumulada podría interpretarse como una evidencia robusta de que las políticas de bajo carbono, en el grupo que fue estudiado, han sido favorables para el despliegue FV. De hecho, las políticas tales como objetivos de cuotas de ER en energía primaria y final, así como los objetivos en materia de ER instalada se consideran como factores de impulso críticos de ER (REN 21, 2014: 76). Sin embargo, hay que decir que una política de Estado respecto a ER podría tener un impacto diferente en cada tecnología renovable (Shrimali y Kneifel, 2011). Por ejemplo, la correlación positiva entre el consumo neto de energía eléctrica renovable (*Prnweleconsu*) y el crecimiento de la capacidad fotovoltaica (*PCumInstPV*) no significa que la energía fotovoltaica es la única opción renovable. La evidencia empírica sugiere que la capacidad FV instalada aumenta en gran medida por una política de Estado que fomenta el consumo de electricidad renovable.

El régimen sociocultural se examinó con las reservas de petróleo de los países (*Poilreserv_4*). Los resultados sugieren una correlación negativa hacia el crecimiento de la energía FV (*PCumInstPV*). Las reservas de petróleo es un

indicador de que no se había probado con anterioridad con respecto a ER en otros estudios, que en cambio han utilizado los precios del petróleo como un indicador.

Se presentó un impulso en la búsqueda de fuentes de energía renovables después de la crisis del petróleo de la década de 1970s, pero la producción mundial de energía todavía depende en gran medida de los combustibles fósiles (IEA, 2015; Schäfer et al, 2012). La evidencia sugiere que los niveles de las reservas de petróleo impactan con un rezago de cuatro años en las políticas de ER que fomentan el despliegue de FV. Aunque la búsqueda de opciones de energía de los países no ha sido constante en el tiempo (Salomón y Krishna, 2011), la evidencia sugiere que el incremento exponencial de la capacidad FV se ha visto favorecida. Las características de sustentabilidad y de seguridad energética que permiten los sistemas FV (Masudi, 2015) podrían ser algunas explicaciones de la correlación negativa con respecto a las reservas de petróleo.

Los instrumentos de apoyo de ER o el mercado FV son usualmente el centro de análisis en estudios previos. Nuestros resultados sugieren que dos instrumentos para promover ER parecen particularmente relevantes para el crecimiento de la capacidad FV instalada. Un instrumento es la tarifa de retroalimentación (*feedin*) que es un instrumento de política que ha demostrado su utilidad hacia el mercado FV. La relevancia de la tarifa de alimentación se ha observado en otros trabajos académicos, como por ejemplo Alagappan et al. (2011) y Muhammad-Sukki et al. (2014). Si bien este instrumento parece ser un gran éxito, no ha estado exento de problemas. Este instrumento proporciona pagos garantizados para generar electricidad; sin embargo, los problemas han aparecido en recibir el pago o se han producido algunos retrasos en los reembolsos. Otra opción favorable es instituir requerimientos de construcción sustentable, lo que también favorece el despliegue FV, pero en un grado menor en comparación con la tarifa de retroalimentación.

Por otro lado, un resultado interesante es que en nuestra muestra, la presencia de instrumentos de mercado, tales como el net metering (*netmeter*) y los créditos fiscales (*taxcfd*) no promueven significativamente el despliegue FV. El resultado de los créditos fiscales fue inesperado ya que se podría asumir que una alta inversión inicial es un factor que frena el despliegue FV, sin embargo, la evidencia sugiere que este subsidio no ha sido especialmente eficaz. Para el caso del net metering (*netmetr*), que es un mecanismo diseñado para un mercado competitivo de la electricidad, su eficacia podría cambiar en cuanto los precios de FV alcancen una 'paridad plena en los precios de combustibles'.

Capítulo 4

Conclusiones

4.1 Conclusiones y observaciones generales.

Los estudios que se presentan en este trabajo permitieron identificar determinantes de innovación bajo dos enfoques. El primer estudio titulado “análisis de factores de la innovación en el sector fotovoltaico” (que se presenta en el capítulo 2) continúa con la línea de investigación sobre patentes como un indicador de innovación. Esta primera exploración de determinantes se realizó con un estudio empírico de los impactos de la política pública en la innovación en el sector fotovoltaico. La idea surge de estudios previos en los que se identifica que la política pública para el impulso de la energía renovable afecta de manera diferenciada a las distintas tecnologías renovables, y en la revisión de la literatura sobre el tema se observó que son escasos los estudios sobre determinantes de innovación, medido por el número de patentes, en el sector fotovoltaico. A diferencia de estudios previos, el estudio incorpora la apropiación tecnológica en el sector, en este caso medida por el precio de los módulos fotovoltaicos.

El segundo estudio titulado “systematic analysis of factors affecting solar PV deployment” (que se presenta en el capítulo 3) es una propuesta de exploración de determinantes de innovación utilizando un enfoque sistémico. Para ello, se utilizó el concepto de sistemas socio-técnicos, la selección de variables se llevó a cabo con este enfoque. Este concepto permite que el análisis del desarrollo de la tecnología se amplíe a lo largo del proceso de innovación tecnológica, y se consideró como el resultado final del proceso a la capacidad instalada fotovoltaica. Son pocos los estudios previos en donde, utilizando la perspectiva multinivel y el concepto de sistema socio-técnico, se aborden casos de desarrollo tecnológico en el sistema energético, ninguno respecto a tecnología fotovoltaica. Se puede decir que el estudio que se realizó es una continuidad a los pocos estudios empíricos que exploran determinantes en el sector fotovoltaico y, a diferencia de estos, con una perspectiva de integración de oferta y demanda de tecnología.

A continuación se presentan las conclusiones derivadas de los estudios y observaciones sobre la tesis en general. Se podrá observar que las conclusiones están separadas por estudio con el fin de facilitar su lectura. Cabe recordar, en concreto, que el objetivo central de este trabajo de investigación es el análisis de determinantes de innovación y de capacidad instalada en el sector fotovoltaico.

En lo que respecta al estudio titulado “Análisis de factores de la innovación en el sector fotovoltaico”, que se expuso en el capítulo 2, se concluye lo siguiente:

- El estudio permitió tener evidencia de factores que tiene un impacto en la innovación en el sector fotovoltaico, considerando como medida de innovación a la variación en el número de patentes.
- En resumen, se identificaron los siguientes determinantes: la presencia de la tarifa de retroalimentación, de subsidios directos al capital, y de fondos de inversión (instrumentos de fomento de demanda). Además de las reservas de petróleo, las exportaciones de energía eléctrica así como el precio de los módulos fotovoltaicos.
- Los instrumentos de política pública de fomento de demanda tecnológica en el sector fotovoltaico, tarifa de retroalimentación, subsidios directos al capital y fondos de inversión, han favorecido a la innovación en este sector.
- La innovación en el sector fotovoltaico presenta una relación inversa con respecto al precio de los módulos fotovoltaicos, el impacto se observa con un rezago de dos años. O dicho de otra forma, la apropiación tecnológica en el sector fotovoltaico, medida ésta por la disminución de los precios de los módulos fotovoltaicos, tiene una relación directa con el fomento de la innovación en el sector fotovoltaico.
- Los instrumentos de política pública utilizados para el fomento de la demanda en energía renovable pueden presentar algún impacto adicional a lo largo del proceso de innovación tecnológica; por ejemplo, en la innovación en el sector. Por ello, es recomendable monitorear el resultado que se espera de los instrumentos, así como de un probable impacto en el resto del proceso de innovación tecnológica.

- El análisis de determinantes de innovación por tecnología renovable es una forma de retroalimentación entre la instrumentación de la política pública en ER y los resultados derivados la instrumentación en la tecnología en observación.

Por otro lado, del estudio titulado “Análisis sistémico de factores que afectan el despliegue de la tecnología solar fotovoltaica”, que se expuso en el capítulo 3, se concluye lo siguiente:

- El estudio permitió tener evidencia de factores que tiene un impacto en la capacidad instalada fotovoltaica, considerando esta capacidad como el resultado del proceso de innovación tecnológica.
- Los determinantes que se identificaron son: las reservas de petróleo (con un rezago de 4 años), el consumo neto de electricidad renovable, las emisiones de CO₂ por consumo de energía (con un rezago de un año), las publicaciones científicas (con un rezago de ocho años), así como la presencia de la tarifa de retroalimentación y de requerimientos de construcción sustentable.
- Desde la perspectiva del sistema socio-técnico, la evidencia empírica muestra que el régimen de ciencia, el régimen de política y el régimen de usuarios-y-mercados favorecen la entrada de la tecnología fotovoltaica en el régimen dominado por los combustibles fósiles.
- Sorprendentemente, no se encontró evidencia, en el periodo de análisis, del impacto del régimen tecnológico sobre la capacidad instalada fotovoltaica.
- El análisis con el concepto de sistema socio-técnico permite observar los impactos de las políticas públicas correlacionadas a lo largo del proceso de innovación tecnológica, esto por los regímenes que abarca el concepto. Esto puede mejorar la explicación del fenómeno observado, aunado a que puede favorecer o enriquecer el diseño, ampliación o modificación de las políticas públicas en ER y en específico en el sector fotovoltaico.

- Cuando se consideran variables de desarrollo tecnológico, como es el caso de las variaciones en el número de patentes o en el número de publicaciones científicas, es necesario tener en cuenta el periodo de tiempo que tomara a estas variables manifestar algún impacto sobre la variable de control. Pues este retardo en el impacto puede ser a muy largo plazo.
- El estudio se puede ampliar mediante la búsqueda y selección de variables adicionales para cada régimen socio-técnico.

Observaciones generales

- En estudios de innovación es recomendable tener en cuenta las acepciones para el término de innovación. Por ejemplo, el termino innovación puede hacer referencia a un indicador del número de patentes de un país o empresa; o, este término puede hacer referencia al proceso de innovación tecnológica. Un elemento fundamental que diferencia a estas dos acepciones es el proceso de comercialización o uso de la tecnología. Mientras que el proceso de innovación integra esta fase, en el caso de la patente es una de las críticas que esta recibe como indicador de innovación.
- Las bases de datos de acceso público referentes a energía renovable puede ser el caso de que estén incompletas o que el periodo de captura sea distinto por región o por agrupación de países. Es recomendable mantener el monitoreo, la captura y actualizar las bases de datos disponibles, además de acordar mediciones estandarizadas.
- La efectividad de la aplicación de políticas mixtas (oferta y demanda de tecnología) es un aprendizaje de finales del siglo pasado. Sin embargo, el monitoreo por sector productivo es necesario pues no es suficiente con aplicar estas políticas también se requiere afinarlas para garantizar su eficiencia y eficacia. Además, es necesario considerar un elemento adicional en el caso de la diversificación energética que es la política ambiental que responde a la coevolución de la tecnología, la sociedad y el medio ambiente.

- Es necesario mencionar que los estudios econométricos son muy utilizados en diferentes ámbitos de la investigación (por ejemplo, en economía, en biología o en energía). Es una herramienta que permite aplicar diferentes análisis en los cuales se pueden estudiar el comportamiento entre distintas variables. Además, pueden ser muy útiles cuando se requieren pronósticos a corto plazo. Sin embargo, su aplicación en la metodología de los estudios presentados en este trabajo es de carácter exploratorio, es decir no se puede hablar de causalidad entre variables derivados de los resultados.
- Lo que se observa en los estudios presentados en este trabajo es la experiencia de los países en la innovación y en el despliegue de la tecnología fotovoltaica. Se tiene la dificultad de no contar con un grupo de control que pudiera complementar los datos observados.
- Los estudios que se realizaron están restringidos a la información del estado de la tecnología fotovoltaica recabada en reportes de la IEA, con información adicional complementaria de otras bases de datos. Sin embargo, es necesario señalar que existen diferencias en los diversos países con respecto a sus sistemas energéticos y políticos que influyen en su portafolio de energías. Por ejemplo, la liberalización del mercado energético, la estrategia energética, deuda y/o acceso a financiamiento, el estado de derecho, entre otros.
- Los estudios se realizaron con bases de datos de acceso libre. Aunque existen estudios de mercado del sector fotovoltaico, estos cuentan con acceso restringido a suscripción.
- Las sociedades necesitan afrontar los diversos problemas derivados de la explotación de los hidrocarburos y sus externalidades. Los resultados obtenidos de los presentes estudios pueden colaborar con la eficiencia de las políticas públicas en las que se desea impulsar a la tecnología fotovoltaica, tal que se oriente al beneficio de la sociedad, al cambiar a sistemas energéticos bajos en carbono que mejoren la sustentabilidad y la seguridad energética de las diversas economías.

4.2 Líneas de investigación

El sistema energético global aún depende en gran medida de fuentes fósiles, lo que lo aleja de una diversificación energética que disminuya los problemas y los riesgos relacionados con el uso de hidrocarburos. El poder público es un actor principal en la promoción de esta diversificación, sin embargo esta no es una tarea simple pues son diversos los elementos que se deben considerar al momento de la construcción de políticas públicas para el fomento de energía renovable. Entre otros, se tiene por ejemplo: el diagnóstico de los recursos energéticos (no renovables y renovables) con los que cuenta la región, la demanda de energía que es necesario garantizar, la distribución de la demanda de energía, el recurso humano capacitado en el sector, los recursos financieros o fuentes de financiamiento disponibles, la capacidad tecnológica para el desarrollo de las tecnologías y de los proyectos, un estado de derecho que respalde las inversiones en este tipo de proyectos, instituciones que regulen el sector, así como conocimiento de los impactos tanto sociales como ambientales de las diversas tecnologías.

Ante esta dificultad que se afronta en el desarrollo de políticas públicas, los estudios de determinantes de innovación en el sector energético son una evaluación y una retroalimentación de la aplicación de las políticas. En este sentido, el presente estudio aporta conocimiento sobre determinantes de la innovación y de la capacidad instalada en el sector fotovoltaico. Lo cual puede servir como una orientación en la estructuración de proyectos de intervención o revisión de políticas públicas en donde el fomento de la capacidad instalada fotovoltaica sea un objetivo. Además, la construcción del modelo propuesto en el capítulo dos puede ser una base para elaborar análisis similares que tengan por objeto estudiar el desarrollo de otras tecnologías.

Por tanto, en base al resultado del presente trabajo se propone la siguiente línea de investigación:

- Análisis de desarrollo tecnológico aplicando en conjunto el concepto de sistema socio-técnico y el análisis econométrico.

Además, considerando el entorno energético mexicano se propone los siguientes proyectos:

- Estudio con patentes del desarrollo tecnológico en el sector fotovoltaico mexicano, conocer la dinámica de innovación de las distintas tecnologías en este sector.
- Estudio de caso del Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar, conocer su dinámica de innovación así como los alcances y dificultades que enfrenta la red virtual.
- Estudio de los Mercados Eléctricos Mayoristas en países con condiciones similares al mexicano (como Brasil, algunos estados de la Unión Americana, Argentina, Chile, Rumania) así como casos de mercados exitosos. Conocer su conformación legal, sus estructuras, las políticas públicas derivadas y conocer los impactos en la diversificación de sus sistemas de energía así como los impactos en la innovación en el sector, tal que se pueda hacer un análisis comparado con el Mercado Eléctrico Mayorista Mexicano y poder evaluar posibles escenarios sobre resultados en la diversificación energética y en el desarrollo de las tecnologías renovables.

Finalmente, también se sugiere dar continuidad a las siguientes líneas de investigación:

- Estudios sectoriales de innovación tecnológica por tecnología renovable con perspectiva de integración para el análisis y desarrollo de políticas públicas.
- Modelado de sistemas para pronósticos a corto plazo de política pública en el fomento de tecnologías renovables o portafolios de energías por país.

4.3 Resumen de actividades académicas

4.3.1 Productos generados

De los estudios realizados se publicó el siguiente artículo en una revista internacional, arbitrada e indizada:

- Título: *“Systemic analysis of factors affecting solar PV deployment”*
 Autores: Carlos Norberto, Claudia N. González-Brambila, y Yasuhiro Matsumoto
 Publicación: Journal of Energy Storage 6 (2016) 163-172. Elsevier.
 Aceptado: el 8 de abril del 2016.

En tanto que el siguiente artículo se encuentra en revisión:

- Título: *“Análisis de factores de la innovación en el sector fotovoltaico”*
 Autores: Carlos Norberto, Claudia N. González-Brambila, y Yasuhiro Matsumoto
 Publicación: Revista SABER. Universidad de Oriente, Venezuela.
 Estado: En revisión.

4.3.2 Movilidad académica

Materias optativas

- Materia: Econometría
 - Nivel: Maestría en Ciencias Económicas
 - Escuela Superior de Economía
- Materia: Innovación en actores no empresariales
 - Nivel: Maestría en Política y Gestión del Cambio Tecnológico
 - Centro de Investigaciones Económicas Administrativas y Sociales
- Materia: Clústers de Innovación
 - Nivel: Maestría en Política y Gestión del Cambio Tecnológico
 - Centro de Investigaciones Económicas Administrativas y Sociales

Cursos Especializados

- Diplomado en Econometría Aplicada (Escuela Superior de Economía)
 - Módulo I. Probabilidad y Estadística.
 - Módulo II. Fundamentos de Econometría.
 - Módulo III. Series de Tiempo.
 - Módulo IV. Modelos VAR.
 - Módulo V. Panel de datos.
- Taller de evaluación de impacto de programas de ciencia, tecnología e innovación (Foro Consultivo Científico y Tecnológico).

Bibliografía

Publicaciones Académicas

- Akhmat G, Zaman K, Shukui T, Sajjad F. (2014). Does energy consumption contribute to climate change? Evidence from major regions of the world. *Renew Sustain Energy Rev* 36:123–34.
- Alagappan L, Orans R, Woo CK. (2011). What drives renewable energy development? *Energy Policy* 39:5099–104.
- Bayer P. et. al. (2013). Global patterns of renewable energy innovation, 1990–2009. *Energy for Sustainable Development* 17:288–295.
- Bointner R. (2014). Innovation in the energy sector: Lessons learnt from R&D expenditures and patents in selected IEA countries. *Energy Policy* 73:733-747.
- Braun F. et al. (2010). Innovative Activity in Wind and Solar Technology: Empirical Evidence on Knowledge Spillovers Using Patent Data. German Institute for Economic Research, No. 993.
- Burnett D, Barbour E, Harrison GP. (2014). The UK solar energy resource and the impact of climate change. *Renew Energy* 71:333-43.
- Carley S. (2009). State renewable energy electricity policies: An empirical evaluation of effectiveness. *Energy Policy* 37:3071-81.
- Chen Z, Su S-II. (2014). Photovoltaic supply chain coordination with strategic consumers in China. *Renew Energy* 68:236-44.
- Cheon A. and Urpelainen J. (2012). Oil prices and energy technology innovation: An empirical analysis. *Global Environmental Change* 22:407-417.
- Cohen, Nelson and Walsh. (2000). Protecting their intellectual assets: appropriability conditions and why U.S. manufacturing firms patent (or not). The National Bureau of Economic Research (NBER). Working Paper 7552.
- Diaz A. y Beers C. (2013). Energy subsidies, structure of electricity prices and technological change of energy use. *Energy Economics* 40:495-502.

- Gan P, y Li Z. (2015). Quantitative study on long term global solar photovoltaic market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 46: 88-99
- Geels FW. (2004). From sectoral systems of innovation to socio-technical systems insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. *Research Policy* 33:897-920.
- Green M, Emery K, Hishikawa Y. (2014). Solar cell efficiency tables (version 44). *Progress in photovoltaics: research and application* 22:701–710
- Greene W. (2008). Functional forms for the negative binomial model for count data. *Economic Letters, Elsevier* 99:585-590.
- Karytsas S, Theodoropoulou H. (2014). Socioeconomic and demographic factors that influence publics' awareness on the different forms of renewable energy sources. *Renew Energy* 71:480-85.
- Kern F. (2012). Using the multi-level perspective on socio-technical transitions to assess innovation policy. *Technological Forecasting & Social Change* 79:298–310.
- Khan MA, Khan MZ, Zaman K, Irfan D. (2014). Questioning the three key growth determinants: Energy consumption, foreign direct investment and financial development in South Asia. *Renew Energy* 68:203-15.
- Liu J et al. (2011). Photovoltaic technology development: A perspective from patent growth analysis. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95:3130–3136.
- Luo S, Lovely ME, Popp D. (2013). Intellectual returnees as drivers of indigenous innovation: evidence from the Chinese Photovoltaic Industry. *NBER Working Paper* 19518.
- Marques CA, Fuinhas JA. (2011). Drivers promoting renewable energy: A dynamic panel approach. *Renew Sustain Energy Rev* 15:1601-08.
- Masoudi R. (2015). A survey on performance of Photovoltaic Systems in Iran. *Iranica Journal of Energy & Environment* 6(2):77-85.
- Muhammad-Sukki F, Abu-Bakar SH, Munir AB, Yasin SHM, Ramirez-Iniguez R, et al. (2014). Feed-in tariff for solar photovoltaic: The rise of Japan. *Renew Energy* 68:636-43.

- Nesta, L. et al. (2014). Environmental policies, competition and innovation in renewable energy. *Journal of Environmental Economics and Management* 67: 396-411.
- Norberto C. Gonzalez-Brambila C, Matsumoto Y. (2016). Systemic analysis of factors affecting solar PV deployment. *Journal of Energy Storage* 6:163-172.
- Omer AM. (2010). Sustainable energy: challenges of implementing new technologies. *Global J Technology & Optimization* 1:17-23.
- Peters M, Schneider M, Griesshaber T, Hoffmann VH. (2012). The impact of technology-push and demand-pull policies on technical change - Does the locus of policies matter?. *Research Policy* 41:1296-308.
- Popp D. (2011). Technology and the diffusion of renewable energy. *Energy Economics* 33:648-662.
- Sahu B. K. (2015). A study on global solar PV energy developments and policies with special focus on the top ten solar PV power producing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43:621-634
- Sanz-Casado E, Lascurain-Sánchez ML, Serrano-Lopez AE, Larsen B, Ingwersen P. (2014). Production, consumption and research on solar energy: The Spanish and German case. *Renew Energy* 68:733-44.
- Schäfer M, Jaeger-Erben M, Bamberg S. (2012). Life Events as Windows of Opportunity for Changing Towards Sustainable Consumption Patterns?. Results from an Intervention Study. *J. Consumer Policy* 35:65-84.
- Shrimali G, Kniefel J. (2011). Are governments policies effective in promoting deployment of renewable electricity resources?. *Energy Policy* 39:4726-41.
- Stephens JC, Jiusto S. (2009). Assessing innovation in emerging energy technologies: Socio-technical dynamics of carbon capture and storage (CCS) and enhanced geothermal systems (EGS) in the USA. *Energy Policy* 38:2020-31.
- Solomon BD, Krishna K. (2011). The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook. *Energy Policy* 39:7422-31.

- Urbina A. (2014). Solar electricity in a changing environment: The case of Spain. *Renew Energy* 68:264-69.
- van Sark WGJHM, Muizebelt P, Cace J, de Vries A, de Rijk P. (2014). Price development of photovoltaic modules, inverters, and systems in the Netherlands in 2012. *Renew Energy* 71:18-22.
- Verbong G, Geels F. (2006). The ongoing energy transition: Lessons from a socio-technical, multi-level analysis of the Dutch electricity system (1960–2004). *Energy Policy* 35:1025–37.
- Watanabe C. (2001). Patent statistics: deciphering a ‘real’ versus a ‘pseudo’ proxy of innovation. *Technovation* 21:783–790
- Zeb R, Salar L, Awan U, Zaman K, Shahbaz M. (2014). Causal links between renewable energy, environmental degradation and economic growth in selected SAARC countries: Progress towards green economy. *Renew Energy* 71:123-32.

Libros

- Crespi G, Dutrénit G. (2014). *Science, Technology and Innovation Policies for Development: The Latin American Experience*. Springer International Publishing; p.15-42, 297.
- Davidson, R. and MacKinnon, J. G. (2004). *Econometric Theory and Methods* Oxford University Press; p. 750.
- EPIA-European Photovoltaic Industry Association (2015). *Global Market Outlook, For Solar Power 2015-2019*. EPIA; p.7, 10, 12, 14-15.
- IEA-International Energy Agency (1995-2012). *Trends in Photovoltaic Application. Survey reports of selected IEA countries. Photovoltaic Power Systems*; IEA; p.5, 34.
- IEA-International Energy Agency (2013). *Renewables Information. IEA Statistics*; p.39, 40.

- IEA-International Energy Agency (2013a). Trends 2013 in Photovoltaic Application. Survey reports of selected IEA countries 1992 and 2012. Photovoltaic Power Systems; IEA; p.6, 7, 40-44.
- IEA-International Energy Agency (2014). Trends 2014 in Photovoltaic Application. Survey reports of selected IEA countries 1992 and 2013. Photovoltaic Power Systems; IEA; p.46.
- IEA-International Energy Agency (2015). Key Word Energy Statistics; IEA; p.6, 24, 28.
- IEA-International Energy Agency (2015a). CO₂ emissions from fuel combustion. Highlights. IEA Statistics; p.9, 48, 84, 102,127.
- Mátyás L, Sevestre P. (2008). The Econometrics of Panel Data. Fundamentals and Recent Developments in Theory and Practice. Advanced Studies in theoretical and applied econometrics 46. Third Edition; Springer; p.47.
- REN 21-Renewables Energy Policy Network for the 21st Century (2013). Renewables 2013. Global Status Report; REN 21; 2013; p.17.
- REN 21-Renewables Energy Policy Network for the 21st Century (2014). Renewables 2014. Global Status Report; REN 21; 2014; p.21,48,76
- Sachs J. (2014). The Age of Sustainable Development. Columbia University Press; 2014; p.34, 39.
- Sánchez, M. A. (2011). Energía solar fotovoltaica. Limusa; p.314.
- UNEP-United Nations Environment Programme (2011). Renewable Energy. Investing in energy and resource efficiency; UNEP; p.212-13.
- Valenti G. (2008). Ciencia, tecnología e innovación. Hacia una agenda de política pública. FLACSO México; p.57-92, 352.
- Vigil, O. et al. (2011). Fotovoltaicos: Fundamentos y Aplicaciones. Primera edición; Instituto Politécnico Nacional; p. 287.
- Wooldridge J. (2002). Introductory Econometrics: A Modern Approach. Second Edition: Wouth-Western College Pub; p.409, 442, 896.
- World Energy Council (2013). World Energy Perspective, Cost of Energy Technologies. World Energy Council; p.42.

Sitios web

- IEA-International Energy Agency. Photovoltaic Power Systems Program (<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=3>) [Acceso 01.03.2014].
- International Energy Statistics
- <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=6&pid=117&aid=12&cid=regions&syid=1991&eyid=2012&unit=BKWH>; (Acceso 22 y 23.05.2014).
- OECD (<http://www.oecd-ilibrary.org.access.biblioteca.cinvestav.mx/statistics;jsessionid=1fbgq7atbk7pe.x-oecd-live-01>) [Acceso 01.04.2014].
- Scopus (<http://www.scopus.com.access.biblioteca.cinvestav.mx/>) [Acceso 01.04.2014]
- WIPO PATENTSCOPE (World Intellectual Property Organization) (<http://patentscope.wipo.int/search/en/search.jsf>) [Acceso 01.04.2014].
- WIPO PATENTSCOPE (<http://web2.wipo.int/ipcpub/#refresh=page>) [Acceso 01.04.2014].
- <https://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf> [acceso 08.04.2016]
- statgraphics.net (<http://www.statgraphics.net/wp-content/uploads/2011/12/tutoriales/Regresion%20Binomial%20Negativa.pdf>) [acceso 17.05.2016]

Ponencias

- Fraunhofer (2016). Photovoltaic Report. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE. www.ise.fraunhofer.de.

Apéndice A

Búsquedas para patentes y artículos

- Para patentes: en WIPO PCT, la búsqueda se realiza anual.

Secciones consultadas en “the International Patent Classification (IPC)”.

- ✓ Section C (chemistry, metallurgy)
- ✓ Section F (lighting, heating, ranges ventilating)
- ✓ Section G (physics)
- ✓ Section H (electricity)

AADC: __ and PD:[_____ TO _____] and (IC:"H01L 27/142" OR "H01G 9/20" OR "H02N 6/00" OR "H01L 27/30" OR "H01L 25/00" OR "H01L 25/03" OR "H01L 25/16" OR "H01L 25/18" OR "H01L 31/042" OR "C01B 33/02" OR "C23C 14/14" OR "C23C 16/24" OR "C30B 29/06" OR "G05F 1/67" OR "F21L 4/00" OR "F21S 9/03" OR "H02J 7/35" OR "H01G 9/20" OR "H01M 14/00" OR "F24J 2/00" OR "F24J 2/54" OR "F24J 2/06" OR "G02B 7/183" OR "H01L 31/00" OR "H01L 31/02" OR "H01L 31/0203" OR "H01L 31/0216" OR "H01L 31/0224" OR "H01L 31/0232" OR "H01L 31/0236" OR "H01L 31/024" OR "H01L 31/0248" OR "H01L 31/0256" OR "H01L 31/0264" OR "H01L 31/0272" OR "H01L 31/028" OR "H01L 31/0288" OR "H01L 31/0296" OR "H01L 31/0304" OR "H01L 31/0312" OR "H01L 31/032" OR "H01L 31/0328" OR "H01L 31/0336" OR "H01L 31/0352" OR "H01L 31/036" OR "H01L 31/0368" OR "H01L 31/0376" OR "H01L 31/0384" OR "H01L 31/0392" OR "H01L 31/04" OR "H01L 31/041" OR "H01L 31/042" OR "H01L 31/043" OR "H01L 31/044" OR "H01L 31/0443" OR "H01L 31/0445" OR "H01L 31/045" OR "H01L 31/046" OR "H01L 31/0463" OR "H01L 31/0465" OR "H01L 31/0468" OR "H01L 31/047" OR "H01L 31/0475" OR "H01L 31/048" OR "H01L 31/049" OR "H01L 31/05" OR "H01L 31/052" OR "H01L 31/0525" OR "H01L 31/053" OR "H01L 31/054" OR "H01L 31/055" OR "H01L 31/056" OR "H01L 31/058" OR "H01L 31/06" OR "H01L 31/061" OR "H01L 31/062" OR "H01L 31/065" OR "H01L 31/068" OR "H01L 31/0687" OR "H01L 31/0693" OR "H01L 31/07" OR "H01L 31/072" OR "H01L 31/0725" OR "H01L 31/073" OR "H01L 31/0735" OR "H01L 31/074" OR "H01L 31/0745" OR "H01L 31/0747" OR "H01L 31/0749" OR "H01L 31/075" OR "H01L 31/076" OR "H01L 31/077" OR "H01L 31/078" OR "H01L 51/42" OR "H01L 51/44" OR "H01L 51/46" OR "H01L 51/48")

- Para artículos: en Scopus

AFFILCOUNTRY(_____) AND KEY(*photovoltaic module*) OR KEY(*solar cells*)
OR KEY(*solar concentration*) OR KEY(*photovoltaic*) AND PUBYEAR > 1979 AND
PUBYEAR < 2013

Apéndice B

Correlaciones entre variables

Tabla B.1

Correlación entre la variable dependiente *PCumInstPV* y variables de control del modelo de regresión no significativas (excepto *ppatent* y *ppaper*)

	PCumIn~V	Prnwel~u	Pco2en~s	Poilre~v	feedn	netmetr	taxcrd	buldng~q
PCumInstPV	1.0000							
Prnwleconsu	0.3908	1.0000						
Pco2enrcons	-0.0991	-0.1170	1.0000					
Poilreserv	-0.0067	-0.0197	0.0629	1.0000				
feedn	0.3132	0.1120	-0.1599	-0.0378	1.0000			
netmetr	0.0228	-0.0298	-0.1624	-0.0357	0.4070	1.0000		
taxcrd	0.0729	-0.0441	-0.0824	-0.0351	0.2245	0.3858	1.0000	
buldngreq	0.1119	-0.0092	-0.1109	-0.0211	0.5385	0.4011	0.2542	1.0000

Tabla B.2

Correlación entre la variable dependiente “*PCumInstPV*” y las variables de control “*ppatent*” y “*ppaper*”, se muestran los distintos rezagos de las variables probadas en el modelo de regresión

	PCumIn~V	ppaper_1	ppaper_2	ppaper_3	ppaper_4	ppaper_5	ppaper_6	ppaper_7	ppaper_8
PCumInstPV	1.0000								
ppaper_1	-0.0267	1.0000							
ppaper_2	-0.0493	-0.2928	1.0000						
ppaper_3	-0.0706	-0.0651	-0.2924	1.0000					
ppaper_4	-0.0172	0.0676	-0.0245	-0.3068	1.0000				
ppaper_5	-0.0715	-0.0272	0.0651	-0.0302	-0.2907	1.0000			
ppaper_6	-0.0197	-0.0537	-0.0645	0.0431	-0.0344	-0.2921	1.0000		
ppaper_7	-0.0087	0.0527	-0.0912	0.0487	0.0264	-0.0454	-0.2399	1.0000	
ppaper_8	-0.0022	0.0521	0.0635	-0.1031	0.0109	-0.0005	-0.0859	-0.2526	1.0000
ppaper_9	-0.0667	-0.0699	0.0889	0.0637	-0.0810	0.0325	-0.0197	-0.0212	-0.2565
ppaper_10	-0.0884	0.0782	-0.0923	0.1248	0.0396	-0.0749	0.0261	-0.0024	-0.0124
ppatent_1	0.0325	-0.0944	-0.0282	0.1460	-0.1172	0.0782	0.0632	-0.0728	0.0168
ppatent_2	0.0504	0.0259	-0.1023	0.0250	0.1133	-0.0562	0.0414	-0.0108	-0.0718
ppatent_3	0.0704	0.1151	0.0459	-0.1363	0.0060	0.0946	-0.1087	0.0033	-0.0082
ppatent_4	0.1373	-0.1211	0.1036	0.0179	-0.1276	0.0566	0.0932	-0.1006	-0.0111
ppatent_5	-0.0593	0.0873	-0.1230	0.1063	0.0770	-0.1648	0.0758	0.1099	-0.0621
ppatent_6	0.0867	-0.0518	0.0816	-0.1349	0.1340	0.0397	-0.1350	-0.0098	0.1586
ppatent_7	0.0368	0.0582	-0.0911	0.0930	-0.1564	0.1409	0.1206	-0.1099	-0.0320
ppatent_8	-0.0309	0.1536	0.0456	-0.1085	0.1114	-0.1947	0.1910	0.1169	-0.0952
ppatent_9	-0.0378	-0.0978	0.1171	0.0849	-0.1075	0.1422	-0.1762	0.3302	0.0766
ppatent_10	-0.0671	0.1459	-0.1165	0.0892	0.0354	-0.0674	0.1717	-0.2121	0.2727

Tabla B.2 (continuación)

	ppaper_9	ppape~10	ppaten~1	ppaten~2	ppaten~3	ppaten~4	ppaten~5	ppaten~6	ppaten~7
ppaper_9	1.0000								
ppaper_10	-0.2616	1.0000							
ppatent_1	-0.0862	-0.0255	1.0000						
ppatent_2	0.0033	-0.0564	-0.2446	1.0000					
ppatent_3	-0.0796	0.0016	0.0185	-0.2846	1.0000				
ppatent_4	-0.0057	-0.0644	0.1326	0.0347	-0.2727	1.0000			
ppatent_5	-0.0056	-0.0023	-0.0520	0.1338	0.0199	-0.3039	1.0000		
ppatent_6	-0.1063	0.0092	-0.0303	0.0168	0.0938	0.0137	-0.2873	1.0000	
ppatent_7	0.0786	-0.0807	-0.0144	0.0286	-0.0239	0.0230	-0.0783	-0.2202	1.0000
ppatent_8	-0.0477	0.0782	0.0741	-0.0297	0.0085	-0.0041	0.0549	-0.0747	-0.2701
ppatent_9	-0.0661	-0.0483	-0.0272	0.1100	-0.0659	0.0426	-0.0143	-0.0033	-0.0730
ppatent_10	0.0463	-0.0787	0.0558	-0.0510	0.0771	-0.0864	0.0381	-0.0111	0.2004

Figure B.2 (continuación)

	ppaten~8	ppaten~9	ppate~10
ppatent_8	1.0000		
ppatent_9	-0.2538	1.0000	
ppatent_10	-0.1175	-0.2363	1.0000

Apéndice C.

Listados de acrónimos para las variables por capítulo.

Capítulo 2	
Nombre de la Variable	Representa
<i>drcapsub</i>	Subsidios directos al capital
<i>elexport_2</i>	Exportaciones de energía eléctrica
<i>feedn</i>	Tarifa de retroalimentación
<i>invfnd</i>	Fondos de inversión
<i>MdPRcUSD_2</i>	Precios de los módulos fotovoltaicos
<i>oilreserv</i>	Reservas de petróleo
<i>patent</i>	Patentes

Capítulo 3	
Nombre de la Variable	Representa
<i>buldngreq</i>	Requerimientos de construcción sustentable
<i>feedn</i>	Tarifa de retroalimentación
<i>netmetr</i>	Net metering
<i>Pco2enrcons</i>	Emisiones de CO ₂ por consumo de energía
<i>PCumInstPV</i>	Capacidad instalada FV
<i>Poilreserv</i>	Reservas de petróleo
<i>ppatent</i>	Patentes asignadas
<i>ppaper</i>	Artículos publicados
<i>Prnweleconsu</i>	Consumo neto de electricidad renovable
<i>taxcrd</i>	Créditos fiscales