



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Proyecto de central de  
generación eléctrica limpia  
en Jalapasco, Puebla.**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

JUAN PABLO MARTÍ TRESPALACIOS

**DIRECTOR DE TESIS**

ING. ENRIQUE BARRANCO VITE



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

**Carta de aprobación del tema**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DCG/SEAC/UTIT/009/18

Señor  
JUAN PABLO MARTÍ TRESPALACIOS  
Presente

En atención a esa solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. ENRIQUE BARRANCO VITE, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

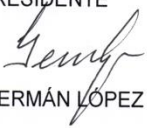
**“PROYECTO DE CENTRAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA LIMPIA EN JALAPASCO, PUEBLA”**

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. DESARROLLO
- III. CONCLUSIONES

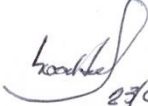
Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

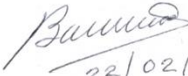
Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”  
Cd. Universitaria a 22 de febrero de 2018  
EL PRESIDENTE

  
M.I GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH\*kpc.

  
27/02/18

  
22/02/2018

  
73-02-18





**DEDICO ESTA TESIS:  
A mis padres y mis hermanos,  
que han estado apoyándome a  
mi lado desde el principio**

## **Agradecimientos**

Le agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México. Institución que me dio la oportunidad de cursar la licenciatura para mi formación como ingeniero y una parte importante en mi vida personal y profesional.

Al Ing. Enrique Barranco Vite, por ser mi director de tesis y mi guía a través del desarrollo de este documento y que aplicando su experiencia fue esencial para la terminación de esta tesis.

A los ingenieros Norma Legorreta Linares, Hugo Sergio Haaz Mora, Miguel Angel Rodríguez Vega y Marcos Trejo Hernández.  
Por acceder a ser sinodales y ser parte de mi examen profesional para conseguir la titulación como ingeniero civil.

En general, a todos los trabajadores, bibliotecarios, jardineros y profesores que son parte de la Universidad y que contribuyen a la formación de futuros profesionales.

En especial, a mis padres, Susana y Jesús, y mis hermanos, Ana Sofía y Ricardo, por todo su apoyo y por ser parte de mi vida personal y profesional.

# Índice

<b>Introducción</b> .....	<b>6</b>
<b>Objetivo</b> .....	<b>6</b>
<b>Alcance</b> .....	<b>6</b>
<b>1. Antecedentes</b> .....	<b>7</b>
<b>1.1. Importancia de las energías renovables</b> .....	<b>7</b>
<b>1.2. Energía solar</b> .....	<b>8</b>
1.2.1 Descripción.....	8
1.2.2. Antecedentes históricos.....	9
1.2.3. Fuentes de energía en México .....	11
<b>1.3. Tecnología fotovoltaica para recolección de energía solar</b> .....	<b>12</b>
<b>1.4. Ventajas y desventajas de la tecnología solar</b> .....	<b>13</b>
<b>2. Desarrollo (Capitulado)</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1. Proceso de evaluación de un proyecto</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2. Estudio técnico operativo</b> .....	<b>15</b>
2.2.1. Descripción del proyecto .....	16
2.2.2. Dimensionamiento del proyecto.....	19
2.2.3. Irradiación promedio en la zona .....	24
2.2.4. Proceso para la interconexión de la central a la red.....	25
<b>2.3. Estudio de mercado</b> .....	<b>26</b>
2.3.1. Demanda de energía eléctrica .....	26
2.3.2. Certificados de Energía Limpia (CEL).....	28
2.3.3. Subastas de Largo Plazo .....	29
2.3.4. Rangos de precios resultantes para la evaluación del proyecto.....	31
2.3.5. Requisitos para participar como ofertante en subastas de largo plazo.....	32
<b>2.4. Estudio económico</b> .....	<b>33</b>
2.4.1. Cotización de la central .....	33
2.4.2. Precio de energía para evaluación del proyecto.....	35
2.4.4. Costos operativos de la central fotovoltaica.....	36
2.4.5. Resultados de la evaluación económica .....	37
2.4.6. Resultados económicos del proyecto .....	38
<b>2.5. Estudio financiero</b> .....	<b>40</b>
<b>2.6. Estudio de impacto social y ambiental</b> .....	<b>44</b>
<b>2.7. Riesgos del proyecto y estrategias de mitigación</b> .....	<b>47</b>
<b>3. Conclusiones</b> .....	<b>48</b>

## Introducción

### Objetivo

La presente tesis tiene como objeto analizar la evaluación de un proyecto de venta al mercado de energía eléctrica generada mediante tecnología solar, esto ante las condiciones de precios y de tipo de cambio actuales a las que los inversionistas de este tipo de proyectos deben enfrentarse.

La evaluación servirá como base para entender el nivel de atractivo que existe en el desarrollo de este tipo de proyectos mediante las condiciones actuales, debido a la gran importancia de la aplicación de energías renovables para abatir el cambio climático y la contaminación ambiental además del atractivo económico para su realización.

### Alcance

La evaluación a realizar cubrirá todos estudios que un proyecto de energía solar debe cumplir para la venta de energía de manera competitiva en el mercado eléctrico.

Los elementos a considerar para la evaluación serán los precios de venta de energía eléctrica, los costos de la central solar (tanto de inversión como de operación/mantenimiento) y las condiciones bancarias reales para el crédito a las que se enfrentaría un proyecto de este tipo en el país (tasa anual, comisiones, periodicidad de pago, entre otros).

# 1. Antecedentes

## 1.1. Importancia de las energías renovables

Desde un punto de vista ambiental, el desarrollo sustentable significa satisfacer las necesidades actuales de la sociedad objetivo, sin afectar negativamente las posibilidades de desarrollo de las futuras generaciones. En otras palabras, es fundamental que para obtener recursos de la naturaleza y el desarrollo de las actividades de la sociedad, no se afecte el potencial ambiental del desarrollo futuro.

Esto implica, en el caso de las energías renovables, que la extracción de recursos naturales no vea excedida la capacidad de los ecosistemas para regenerar los recursos perdidos. En el diseño de producción de un país, esto debe tomarse en cuenta junto con múltiples elementos, como la oferta y demanda energética del país.

De acuerdo al World Energy Council (WEC), el desarrollo energético sustentable se genera a partir de tres elementos principales:

- **Seguridad energética**, la cual es definida como la capacidad de un país para satisfacer la demanda nacional de energía con suficiencia, oportunidad, sustentabilidad y precios adecuados, en el presente y hacia un futuro. Suele medirse a largo plazo (décadas).
- **Equidad social**, que se refiere a la accesibilidad y costo razonable de proporcionar energía a la población. La carencia de equidad social en esta materia se ha definido como "pobreza energética". A raíz de la crisis económica de 2008, el concepto de "pobreza energética" se ha incorporado a la agenda política de algunos países europeos. El problema del acceso a la energía, endémico en países del Tercer Mundo, se ha extendido también a los del Primer Mundo por las crecientes dificultades económicas de las familias para hacer frente a la tarifa energética.
- **Mitigación de impacto ambiental**, lo cual se refiere al estudio del posible impacto ambiental que algún proyecto pudiese ocasionar debido a su construcción o actividad diaria, y mediante esto generar alternativas y acciones para reducir el posible impacto en la mayor medida posible, con el fin de impactar de la menor manera posible en el balance natural de la zona.

## 1.2. Energía solar

### 1.2.1 Descripción

La energía solar es la energía producida por el sol y que es convertida a energía útil por el ser humano, ya sea como fuente de calor o para generar energía eléctrica (como sus principales aplicaciones).

Para conocer la intensidad y posible recolección de energía por medio de un dispositivo, es necesario considerar diferentes factores, como lo son:

- Día del año
- Hora
- Latitud
- Orientación del dispositivo

Además de ello, las características específicas del dispositivo de igual manera son esenciales para determinar su capacidad de recolección.

De acuerdo con estos factores, es posible determinar un Índice de Desempeño, el cual determina de cierta manera, el porcentaje de energía que puede recolectar un dispositivo sobre el total de su capacidad.

El índice de desempeño nunca llega a ser del 100%, aunque con las condiciones adecuadas y dispositivos con tecnologías más eficientes, es posible acercarse al total de la capacidad.

Algunos de los usos más comunes de la energía solar son los siguientes:

- Potabilización y calentamiento de agua
- Estufas solares
- Secado
- Evaporación
- Destilación
- Refrigeración



### 1.2.2. Antecedentes históricos

Para conocer el estado actual de generación de energía solar, es esencial mirar atrás y comprobar cómo ha sido utilizada la energía del sol en el pasado. Hasta llegar a las placas solares controladas por sensores que se conocen hoy en día, su desarrollo ha pasado por muchas fases y diseños buscando siempre aprovechar la gran cantidad de energía que el sol emana sobre el planeta.

La primera referencia histórica que se puede encontrar al uso de la energía solar se encuentra en la antigua Grecia, durante la época de Arquímedes. Durante la batalla de Siracusa en el siglo III a.C. que enfrentó a los romanos y los griegos, algunos escritos relatan la manera en que los griegos utilizaban unos espejos hexagonales hechos de bronce para reflejar los rayos solares concentrándolos en la flota romana, aprovechando así la energía del sol para destruir los barcos construidos en madera.

Muchos siglos más tarde, Leonardo da Vinci también concentró parte de sus estudios en el aprovechamiento del sol. En el año 1515 comenzó un proyecto relacionado al tema, aunque este sería un proyecto que nunca llegaría a concluir. Su idea era construir un concentrador de alrededor de 6 kilómetros de diámetro a base de espejos cóncavos, con el fin de ser utilizados para la producción de vapor y calor industrial.

A mediados del siglo XVIII, Georges-Louis Leclerc, conde de Buffon (Francia), fascinado por los relatos de la guerra de Siracusa y los espejos de Arquímedes, siguió investigando en ese mismo campo. Para comenzar, utilizó cristales de gafas con los que se percató de que fácilmente podía conseguir un fuego a más de 20 metros de distancia encendiendo un combustible compuesto de una mezcla de brea y polvo de carbón.

Tras construir aparatos más ambiciosos que consiguieron el mismo objetivo hasta 50 metros de distancia, creó un concentrador de energía solar definitivo con 360 piezas de cristal de 20 centímetros. Experimentando con ello se percató de que si concentraba 120 de los cristales en un combustible a 6 metros de distancia, este ardía inmediatamente. A esa misma distancia, con 45 espejos podía fundir una tinaja de arcilla y con 117 cristales podía fundir una viruta de plata.

En 1767 fue fabricado primer colector solar plano fue fabricado por el científico suizo Nicholas de Saussure, el cual estaba compuesto por una cubierta de vidrio y una placa metálica negra encerrada en una caja con su correspondiente aislamiento térmico. Este recolector solar se utilizó para cocinar alimentos que se introducían en su interior.

Posterior a esto, se llegaron a desarrollar diversos experimentos mediante el uso de la energía solar, aunque con poco éxito, debido al alto costo que representaba.

No fue sino hacia finales del siglo XIX que existía ya un cierto interés de la comunidad científica por la energía solar, gracias al gran auge de las diversas revistas científicas de la época.

A principios del siglo XX, la utilización de la energía solar tuvo especial interés en Estados Unidos, donde se hicieron algunos trabajos y estudios en colaboración con astrónomos, construyéndose algunos prototipos de grandes dimensiones. Sin embargo, el abaratamiento de los combustibles como consecuencia de la Primera Guerra Mundial, significó el fin del desarrollo de todos estos trabajos.

Posteriormente, en la década de los años 30, se popularizaron en Japón equipos que utilizaban energía solar y circulación natural para obtener agua caliente sanitaria con una capacidad de almacenamiento de 100-200 litros.

Después de la II Guerra Mundial este tipo de sistemas se extendió también en Israel, pero debido al bajo precio de los combustibles convencionales generado nuevamente tras la guerra, el uso de la energía solar quedó relegado a un segundo plano.

El resurgimiento definitivo de las investigaciones y desarrollo en materia de energía solar se produjo en 1953, cuando el químico estadounidense Farrington Daniels organiza en la Universidad de Wisconsin un Simposio Internacional sobre la utilización de la Energía Solar. Dos años más tarde, en Tucson (Arizona), se celebró otro simposio y se formó la Asociación para la Aplicación de la Energía Solar.

Como consecuencia de estos simposios se creó la revista “*Solar Energy*”, de muy alto nivel científico, que actualmente edita la Sociedad internacional de la Energía Solar con sede en Australia, entidad que sucedió a la Asociación para la Aplicación de la Energía Solar.

En esta misma época, en el año de 1954, se descubrió la fopila de silicio en los laboratorios de la compañía “Bell Telephone”. Gracias al reciente auge del estudio de este tipo de energía, la fopila recibió un fuerte impulso para su desarrollo.

En la década de los 60 se dio un gran acontecimiento en materia de energía solar con la construcción del horno solar de Odeillo (Francia), que actualmente continúa sus operaciones como centro de investigaciones especializado en radiación solar y comportamiento de materiales ante la exposición solar.

En 1973, como consecuencia de la cuarta guerra árabe-israelí, la OPEP decidió elevar enormemente los precios del petróleo y se produjo un fuerte interés mundial en la utilización de la energía solar, al poder ser ya competitiva con los nuevos y altos precios del petróleo y de los productos energéticos en general.

Tras estos acontecimientos, se ha visto un crecimiento moderado y sostenido de las aplicaciones de la energía solar, así como una reducción en los costos de producción y

operación, lo cual ha significado un creciente uso de la energía solar como alternativa a los combustibles fósiles en todo el mundo.

### 1.2.3. Fuentes de energía en México

Para hablar de fuentes de energía en nuestro país, es necesario considerar las energías no renovables, específicamente el petróleo y gas natural, los cuales han sido la fuente predominante de energía desde inicios del Siglo XX.

Actualmente, debido a los precios bajos que se han presentado, ha sido de vital importancia que el mercado energético del país comience a evolucionar, buscando fuentes de energía alternativas ya no sólo buscando una mayor autonomía y preservación ambiental, sino inclusive para generar beneficio en la generación de energía, ya que el rápido declive de los precios del petróleo hacen cada vez más delgada la línea entre ganancias y pérdidas para las empresas relacionadas con la extracción de petrolíferos.

El papel que juega el mercado del petróleo no debe ser subestimado, por lo que el país se ha visto obligado a transformar su mercado energético en caso de ver reducida la extracción de petrolíferos debido a su poco valor de mercado.

Además de esta problemática, las reservas probadas y probables de México, si bien abundantes, poseen un horizonte, en el mejor de los casos, de no más de treinta años a las tasas de explotación y consumo actuales.

A pesar de esto, la amplia variedad de tecnologías energéticas existentes y el fomento al desarrollo de energías renovables, consecuencia de una mayor concientización sobre el daño ecológico causado por el actual uso de ciertos energéticos que emiten contaminantes durante su obtención o consumo, permiten considerar un futuro energético razonable para el país.

Lo anterior será relevante, sólo en la medida en la que la investigación científica, gobierno, desarrolladores independientes y usuarios aporten al desarrollo mejoramiento y extensión del uso de tecnologías energéticas renovables, las cuales se convertirían verdaderamente en promotoras de un desarrollo sustentable.

En el caso de México, existen seis de los tipos de políticas que fomentan energías limpias:

- Metas de energías renovables o limpias**
  - La meta impuesta por el gobierno de México es que para finales de 2024, 35% de la generación de energía eléctrica en el país sea por medio de tecnologías limpias
- Medición neta**
  - Los medidores instalados por CFE tienen la capacidad de efectuar la medición neta entre la energía eléctrica entregada por el Suministrador y la energía eléctrica entregada por el Generador al Suministrador, pagando sólo el uso neto (diferencia)
- Certificados de energías renovables o limpias**
  - En el 2015 la SENER estableció el requisito de Certificados de Energía Limpia (ir a sección de CEL para más detalle) a ser cumplido de 5% en 2018 y de 5.8% en 2019 del total del consumo del Centro o Punto de Carga
- Licitaciones o subastas**
  - A partir de la apertura del mercado eléctrico, se establecieron subastas de largo y corto plazo, donde se podrá adquirir energía eléctrica, potencia y CEL (ir a sección de Reforma Energética para más detalle)
- Créditos fiscales a la inversión o producción**
  - En la Ley del ISR se establece las condiciones y características del incentivo para la reducción al 100% de los impuestos sobre la adquisición de maquinaria y equipo para generar y transformar energía a partir de fuentes de energía renovable

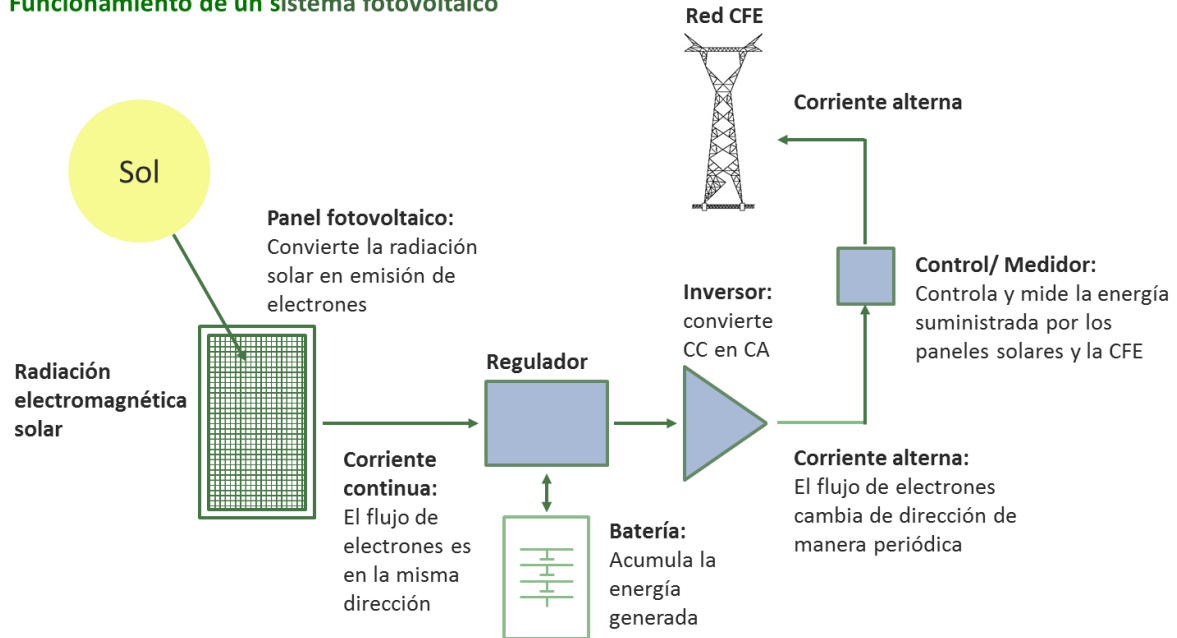
**Figura 1: Políticas en México para fomentar energía limpia**

### 1.3. Tecnología fotovoltaica para recolección de energía solar

Es viable aprovechar la intensidad de la iluminación solar para generar energía eléctrica en corriente alterna, con paneles fotovoltaicos.

Los sistemas fotovoltaicos convierten la radiación electromagnética solar en una emisión de electrones, cuya corriente pasa a través de un regulador y tras ser convertida a corriente alterna, puede ser inyectada a la red eléctrica (Como se muestra en la Figura 2 a continuación).

## Funcionamiento de un sistema fotovoltaico



**Figura 2: Funcionamiento de un sistema fotovoltaico**

### 1.4. Ventajas y desventajas de la tecnología solar

La alternativa de generación eléctrica mediante esta fuente conlleva a su vez de ciertas ventajas y desventajas ante sus contrapartes (carbón, petróleo, entre otras), por lo cual es esencial conocer los puntos fuertes y las limitaciones que una instalación solar pudiese implicar, y en lo posible aplicar medidas para mejorar las condiciones en las que las limitaciones se presenten lo menor posible, y que las ventajas de la tecnología se vean aprovechadas.

Se desarrolló una tabla enlistando las ventajas y desventajas más importantes de la tecnología, como una base para el estudio de esta fuente de energía y su evaluación.

Ventajas	Desventajas
Es una tecnología que no daña al medio ambiente, y no contribuye al cambio climático	Requiere de un gran desembolso al inicio para la compra de los paneles solares
Los paneles solares no emiten contaminación, la cual sólo se produce en las fábricas durante su producción	Muchos paneles solares sólo son capaces de almacenar energía durante el día
Es el tipo de energía que genera menor contaminación auditiva (ruido)	La contaminación en ciertas zonas puede provocar que el funcionamiento de los paneles solares no sea el correcto, reduciendo su eficiencia
Aprovecha la energía en sitios que no tienen ningún tipo de infraestructura eléctrica, como poblaciones marginadas y construcciones en playas	En ciertos lugares del planeta, la intensidad solar no es suficiente para un flujo de energía permanente, aunque es un problema que no se presenta en nuestro país
Las nuevas tecnologías permiten una gran eficiencia en la recolección de energía, con un buen funcionamiento incluso en días nublados	Para la construcción de grandes plantas solares es necesaria la utilización de grandes extensiones de terreno, lo cual sería una limitación en zonas muy pobladas
Los paneles pueden ser colocados en espacios que no son utilizados, como azoteas	
El uso combinado de energía solar con redes eléctricas permiten el acceso a tarifas preferenciales y otros beneficios	

## 2. Desarrollo (Capitulado)

### 2.1. Proceso de evaluación de un proyecto

La evaluación del proyecto tendrá como base la realización de los siguientes estudios:

- **Estudio de mercado:** Se debe analizar el comportamiento histórico de la demanda a abastecer, oferta y precios de energía bajo condiciones similares a las que el proyecto debe enfrentarse. Con esto, se estima la demanda potencial además de los precios esperados para el producto del proyecto.
- **Estudio técnico-operativo:** Se detallan y cuantifican los costos de inversión, mantenimiento y operación del proyecto de estudio. Además debe verificarse la opción para el suministro de equipamiento para el proyecto, para demostrar que la opción seleccionada es la adecuada.
- **Estudio económico:** Se determina la conveniencia económica de llevar a cabo el proyecto de estudio, bajo condiciones económicas reales y tomando en cuenta a detalle con los tiempos, montos e impuestos aplicables al mismo.
- **Estudio financiero:** Se detalla la información financiera resultante para el proyecto bajo las condiciones establecidas, además de desarrollar las sensibilidades necesarias para determinar la conveniencia del proyecto ante cambios en diversas condiciones financieras del proyecto, como el monto de inversión o la proyección de precios de venta.
- **Estudio de impacto ambiental:** A fin de asegurar la conveniencia del proyecto de energía limpia y mantener la seguridad ambiental del entorno tras la construcción del mismo, se deben analizar los posibles impactos que el proyecto puede provocar de diversas formas como contaminación (residual y auditiva) y afectación a la fauna y flora de la zona.

### 2.2. Estudio técnico operativo

Actualmente, el país pasa por un período de transición en materia energética, por lo que es fundamental desarrollar proyectos innovadores y que cumplan con los estándares de capacidad y reducción de contaminantes que han recibido su mayor apoyo en los últimos tiempos.

A pesar de los avances tecnológicos y el mayor énfasis en las energías limpias, el país aún se encuentra en los inicios de lo que promete ser una revolución energética, y proyectos energéticos como aquellos de energía solar que serán el catalizador de dicha revolución.

### 2.2.1. Descripción del proyecto

El proyecto consiste en la planeación y cotización de una granja de energía solar, su análisis de factibilidad económica y los esquemas recomendados de ejecución. Ser realizará mediante la investigación de información real y actualizada en materia de equipos de energía solar, capacidades técnicas y de la región en estudio, así como reglamentación necesaria para la ejecución de un proyecto de este tipo.

Mediante esto, se contará con la información necesaria para recomendar un proyecto de su tipo, así como una guía detallada de los pasos necesarios previos y durante su ejecución, buscando de esta manera apoyar iniciativas similares, que logren aplicar las conclusiones y recomendaciones en proyectos sustentables, innovadores y con una factibilidad económica comprobada.

El terreno a desarrollar se encuentra 80 kilómetros al Oeste de la ciudad de Puebla, en el municipio de Aljojuca, y a unos 20 kilómetros del Pico de Orizaba.

El terreno se encuentra a menos de 10 kilómetros de las poblaciones de Ciudad Serdán y Aljojuca, las cuales se encuentran integradas a la red eléctrica nacional, y el punto estimado de interconexión (subestación más cercana) al sistema para el proyecto.



**Figura 3: Ubicación del proyecto en el país**





**Figura 4: Vista aérea del terreno**

Como se puede observar, el terreno consiste en una chimenea del Pico de Orizaba, una depresión semi-circular en el cual se buscaría desarrollar el proyecto en el área plana encontrada en el centro del terreno:



**Figura 5: Vista aérea del área a desarrollar**

Considerando las pendientes del terreno, y por la presencia de árboles en la zona, se propuso el área siguiente para minimizar la tala de árboles y reducir prácticamente por completo las adecuaciones al terreno previas a la construcción:



**Figura 6: Detalle geométrico del área a desarrollar**

De esta forma, el área propuesta se conforma de dos figuras:

- Un rectángulo de 220 metros por 400 metros
- Un trapecio con base mayor de 400 metros, base menor de 200 metros y altura de 90 metros

Calculando el área de las figuras:

**Área del rectángulo =  $88,000 \text{ m}^2$  (8.8 hectáreas)**

**Área del trapecio =  $27,000 \text{ m}^2$  (2.7 hectáreas)**

**Área Total =  $115,000 \text{ m}^2$  (11.5 hectáreas)**

Por lo tanto, el área propuesta para el desarrollo del proyecto es de 11.5 hectáreas, las cuales se destinarán para dos fines:

- Colocación de los módulos fotovoltaicos
- Pasillos de acceso para la operación y el mantenimiento de los módulos

Para la colocación de los módulos, y en caso de necesitar retirar uno de ellos para su mantenimiento o reparación, es necesario que los pasillos de acceso tengan el ancho necesario para el paso de los vehículos, con lo cual se requería al menos 2 metros de ancho para el paso de una camioneta tipo pick-up.

Posterior a la obtención de esta información, es posible realizar un análisis de alternativas específicas para el proyecto, y encontrar el producto que se adecúe de mejor manera a las necesidades propias del proyecto.

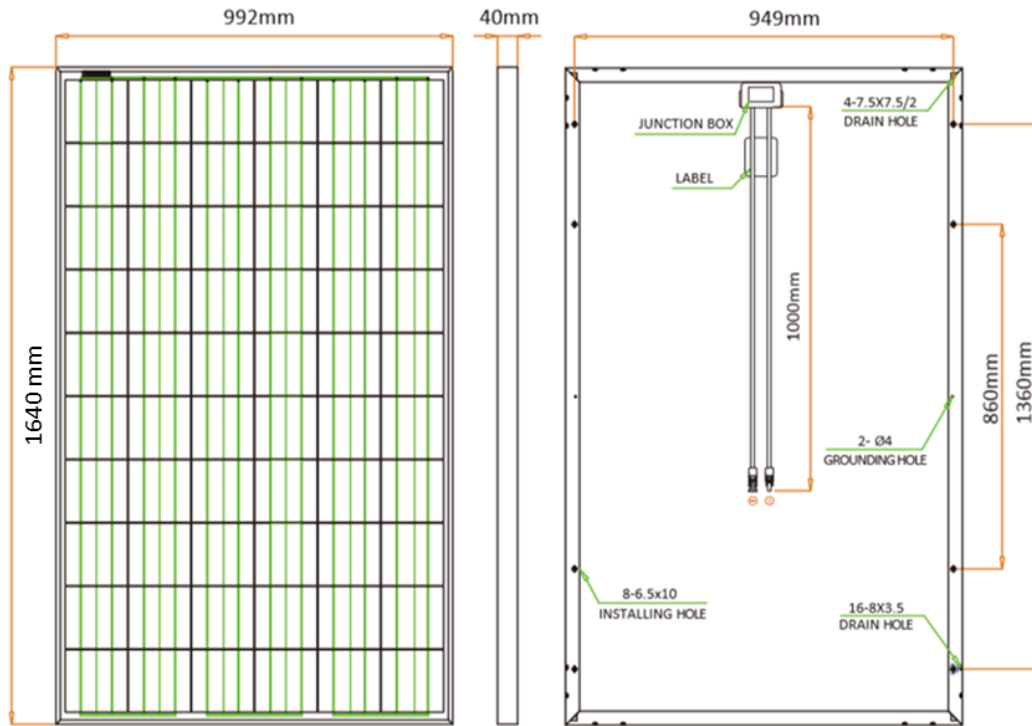
### 2.2.2. Dimensionamiento del proyecto

Debido a las características de la zona de estudio, se concluyó que los productos más económicos que ofrecen las empresas son suficientes para el desarrollo de este proyecto, debido a dos razones:

- Ya que el uso de los módulos no es residencial y su instalación se hará en el terreno firme de la zona, el peso de los módulos no es un impedimento para el proyecto, a diferencia de los módulos solares que utilizan materiales más livianos y costosos para evitar cargas importantes sobre las estructuras.
- Otra razón es debido al clima de la zona, los módulos no serían expuestos a condiciones extremas, lo cual representaría una mayor inversión en módulos con materiales más resistentes.

Los módulos elegidos que cumplen con los requerimientos del proyecto debido a la zona (poco viento, lluvia y humedad, pero mucho polvo) y que serán utilizado como base para la evaluación son similares al modelo Virtus II de la empresa Renesola, que cuenta con capacidades de hasta 260 MW por módulo. A continuación, se muestra la ficha técnica de los módulos.

## Dimensiones



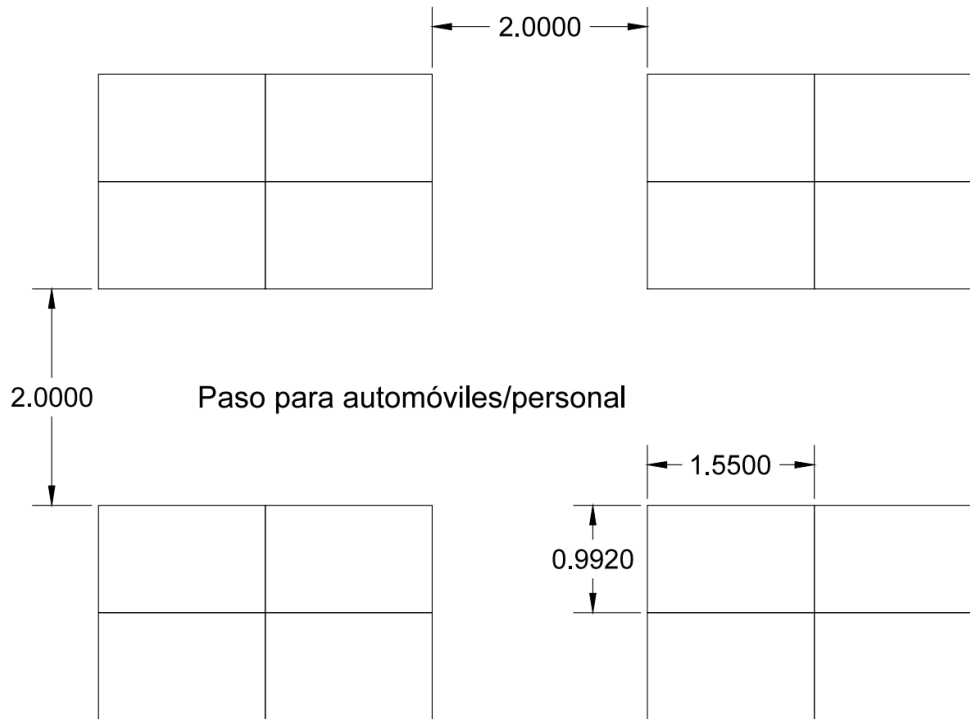
### Módulo elegido

Características eléctricas	JC250M-24/Bb	JC255M-24/Bb	JC260M-24/Bb
Potencia máxima	250 W	255 W	260 W
Eficiencia del módulo	15.4%	15.7%	16.0%

### Eficiencia según irradiación

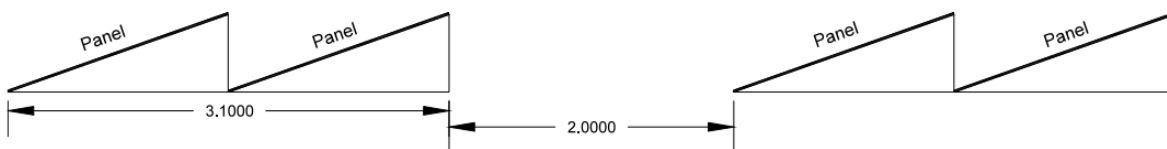
Irradiación	200W/m <sup>2</sup>	400W/m <sup>2</sup>	600W/m <sup>2</sup>	800W/m <sup>2</sup>	1000W/m <sup>2</sup>
Eficiencia	15.8%	16.2%	16.2%	16.1%	16.0%

Figura 7: Dimensiones del panel y ficha técnica



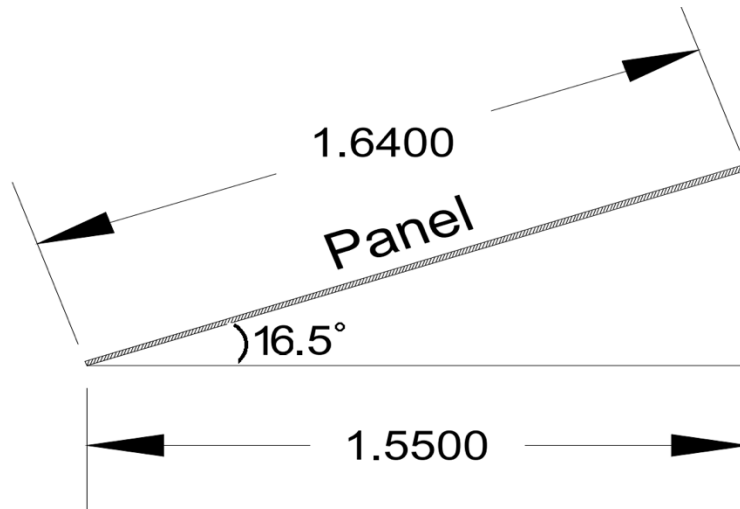
**Figura 8: Detalle superior de pasillos para mantenimiento**

Como se muestra en la (Figura 8), el proyecto considera el espacio de pasillos con un diámetro de 2 metros que serán suficientes para el paso de personal y automóviles para la operación y mantenimiento de la central (que principalmente consiste en retirar y colocar los paneles defectuosos).



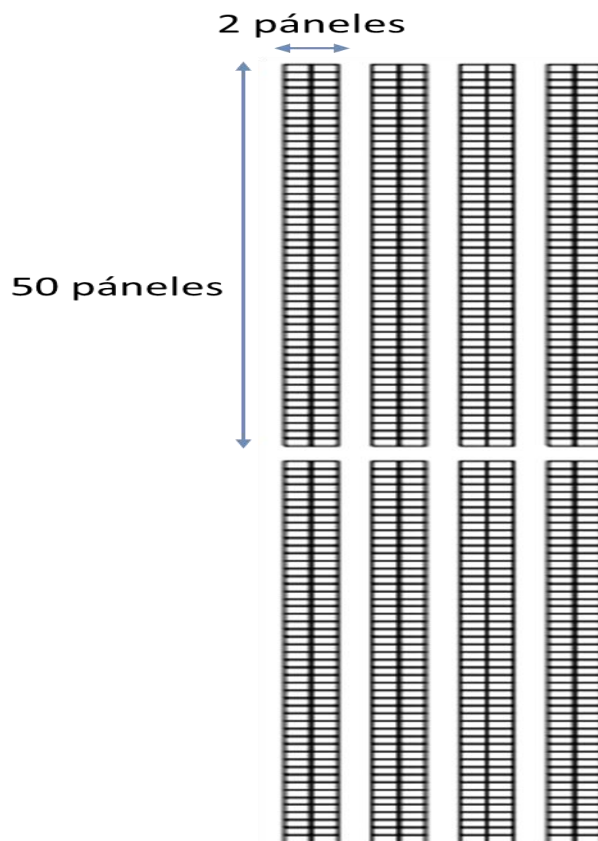
**Figura 9: Detalle lateral de paneles y pasillos de acceso**

En la (Figura 9) se muestra la vista lateral de los paneles colocados con inclinación, así como el pasillo requerido para el mantenimiento de los mismos. La colocación de los paneles será en grupos de dos para el fácil acceso desde los automóviles para su mantenimiento.



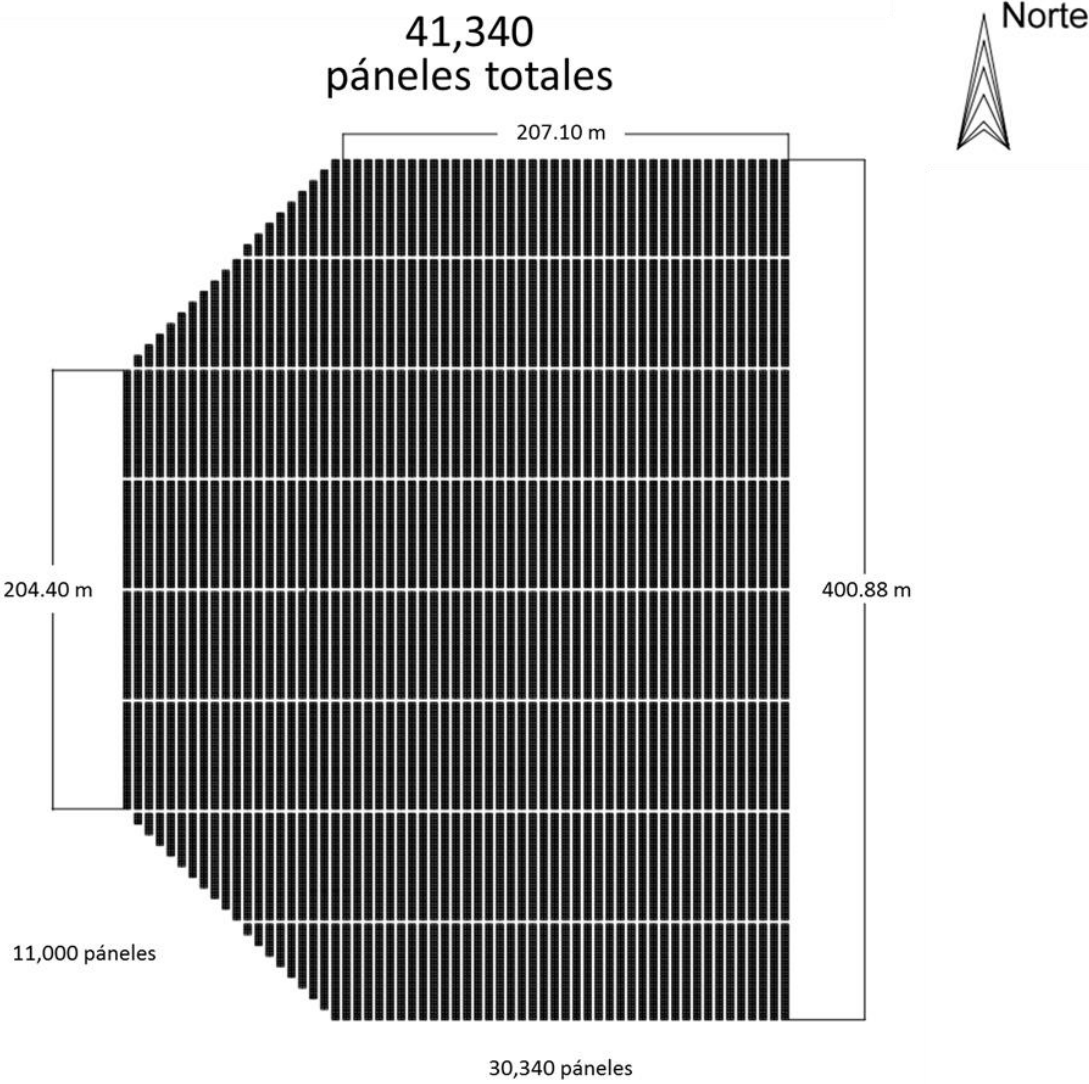
**Figura 10: Detalle lateral individual de paneles e inclinación**

En la (Figura 10) se muestra el detalle lateral de la colocación del panel, así como la inclinación recomendada para la mayor eficiencia de irradiación sobre los mismos (16.5 grados en la latitud de Puebla).



**Figura 11: Detalle superior del arreglo**

En la (Figura 11) se muestra el arreglo general de los paneles para la central, en grupos de 2 paneles por 50 paneles, para incluir accesos adicionales en otras direcciones para facilitar los movimientos de entrada y salida.



**Figura 12: Vista general superior de la central**

En la (Figura 12) se muestra el arreglo completo de la central eléctrica, que incluirá un total de 41,340 paneles que, de acuerdo con las dimensiones comerciales y los pasillos propuestos, utilizan un área total ligeramente menor al área dispuesta para el proyecto.

De acuerdo con el arreglo de paneles de manera eficiente dentro de la zona útil del proyecto, la capacidad pico instalada sería:

$$\begin{aligned} \text{Capacidad pico instalada} &= (\text{Capacidad por panel}) (\text{Número de paneles}) \\ \text{Capacidad pico instalada} &= (260 \text{ W/panel}) (41,340 \text{ paneles}) = \mathbf{10.748 \text{ MW}} \end{aligned}$$

### 2.2.3. Irradiación promedio en la zona

(W/m<sup>2</sup>)

Estado	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
Puebla	388	488	480	560	510	460	461	421	429	480	429	480	<b>461</b>

Fuente: Sagarpa - INIFAP (Estación meteorológica en el Seco, Puebla - 2016)

**Figura 13: Irradiación promedio mensual**

Por lo tanto, la irradiación promedio anual en la zona es de 461 W/m<sup>2</sup>, que es la irradiación solar que recibirán los paneles fotovoltaicos del sistema.

El cálculo de la generación eléctrica se realiza considerando las horas pico de sol que reciben los paneles para máxima generación (1000 W/m<sup>2</sup>) con la cual se genera el total de 260 W por panel (menos factor de funcionamiento).

Para esto, de acuerdo con la irradiación promedio en la zona, las horas pico diarias de generación son:

$$\begin{aligned} \text{Horas pico} &= (\text{Irradiación promedio} * 24 \text{ horas}) / (\text{Irradiación máxima}) \\ \text{Horas pico} &= (461 \text{ W/m}^2 * 24 \text{ horas}) / (1000 \text{ W/m}^2) \\ \mathbf{\text{Horas pico}} &= \mathbf{11.06 \text{ horas/día}} \end{aligned}$$

De acuerdo con las horas sol pico calculadas en la zona (11.06 horas/día), y suponiendo un factor de funcionamiento de 90% para los paneles fotovoltaicos (considerando pérdidas del sistema), la generación diaria por panel sería:

$$\begin{aligned} \text{Generación} &= (\text{Irradiación}) (\text{Área de panel}) (\text{Eficiencia del panel}) (\text{Horas Sol Pico}) \\ \text{Generación} &= (1,000 \text{ W/m}^2) (1.62688 \text{ m}^2) (16\%) (11.06 \text{ horas}) \\ \mathbf{\text{Generación por panel}} &= \mathbf{2,878.9 \text{ Wh/día} = 2.8789 \text{ kWh/día}} \end{aligned}$$



De acuerdo con la configuración realizada para la central suponiendo el área útil del terreno, la cual incluye 41,340 paneles en el diseño, la generación total supondría:

$$\begin{aligned} \text{Generación total} &= (\text{Generación por panel}) (\text{Número de paneles}) \\ \text{Generación total} &= (2.8789 \text{ kWh/día}) (41,340 \text{ paneles}) \\ \text{Generación total (año 1)} &= \mathbf{119,014 \text{ kWh/día} = 119.014 \text{ MWh/día}} \end{aligned}$$

#### 2.2.4. Proceso para la interconexión de la central a la red

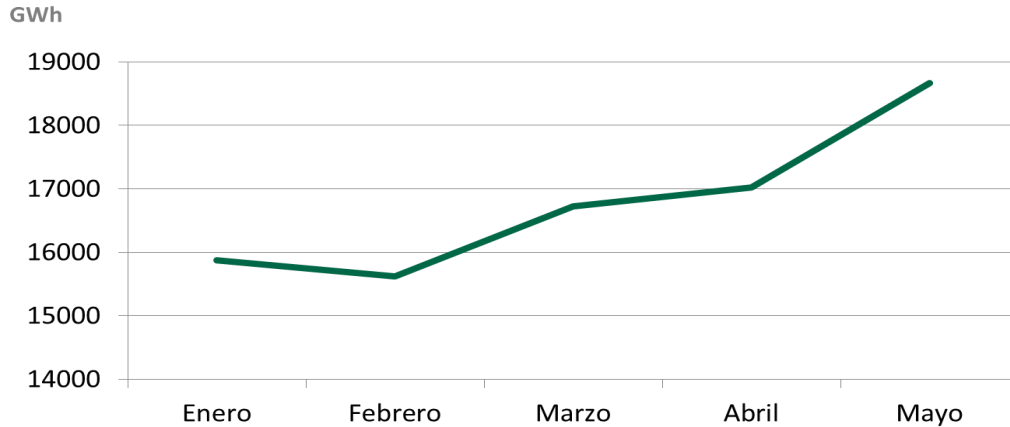
Para realizar la transmisión de energía eléctrica a los usuarios o clientes del proyecto, realizar la interconexión de la central fotovoltaica a la red eléctrica del país, mediante un proceso que a grandes rasgos consiste de los siguientes pasos:

1. **Solicitud de interconexión a la red:** Se acude a la agencia comercial de CFE más cercana llevando el formato de solicitud lleno. Se requiere presentar identificación oficial o en caso de una persona moral, la documentación que acredite la constitución de la sociedad.
2. **Número de solicitud:** Se entrega un número de solicitud, con el cual se puede dar seguimiento a la solicitud de conexión a la red eléctrica.
3. **Revisión de la instalación proyectada y requerimiento de obras:** Personal de CFE revisa que las instalaciones proyectadas cuenten con los requisitos técnicos correspondientes, tras lo cual CFE informa los resultados del análisis.
4. **Firma del contrato de conexión y pago:** Tras la aprobación técnica por parte de CFE, se debe acudir nuevamente a la agencia comercial de CFE a firmar el contrato de conexión a la red eléctrica y pagar el importe por los costos de medidores.
5. **Instalación del medidor bidireccional:** El personal técnico de CFE acudirá al sitio de la central a realizar la instalación del medidor bidireccional.
6. **Contrato de conexión a la red:** A partir de este momento, se formaliza y entrega el contrato de conexión a la red eléctrica con CFE.

## 2.3. Estudio de mercado

### 2.3.1. Demanda de energía eléctrica

Demanda de energía eléctrica en México (CFE Suministro), 2017

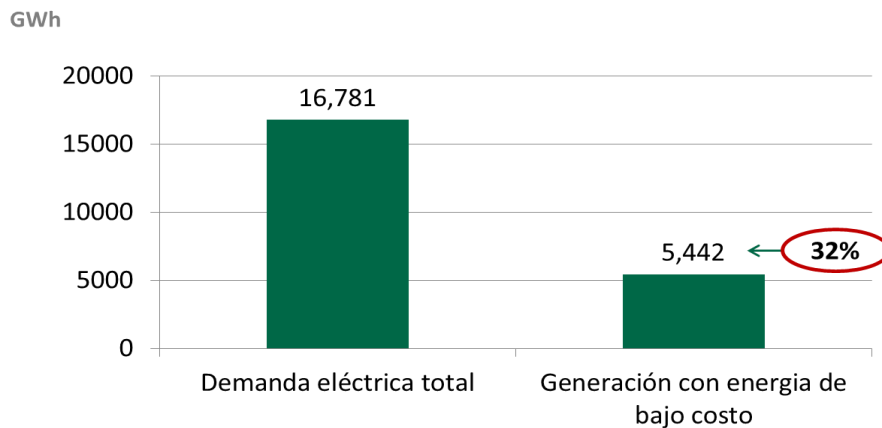


Fuente: Sistema de Información Energética, SENER

**Figura 14: Demanda mensual de energía eléctrica en México**

Como se puede observar en la (Figura 14), la demanda eléctrica mensual para CFE Suministro en el país se encuentra entre 16,000 y 19,000 GWh, la cual es abastecida por las centrales eléctricas instaladas a lo largo de la red eléctrica. Debido a que la tecnología fotovoltaica es de bajo costo, compite directamente con otras tecnologías de precios similares para abastecer esta demanda. Mientras la oferta de energía con tecnologías de bajo costo se encuentre por debajo de la demanda total, se asegura la venta de energía generada con tecnología fotovoltaica antes que con tecnologías más costosas.

Promedio de demanda eléctrica y generación con tecnologías de bajo costo\*, 2017



\* Incluye tecnologías geotérmicas, nucleares, hidroeléctricas y fotovoltaicas

Fuente: Sistema de Información Energética, SENER

**Figura 15: Demanda total de energía vs generación de bajo costo**

La demanda de energía eléctrica en México se encuentra actualmente por encima de la generación eléctrica total con fuentes limpias y otras tecnologías de bajo costo. Es por esto que en la curva de oferta-demanda, los proyectos de energía solar se encuentran dentro de la demanda estimada del país y debido a su bajo costo, es energía que tiene la facilidad de asegurar el 100% de su generación a la demanda nacional, siempre que sus costos se encuentren en los niveles promedio para su tecnología y no se vea desplazado fuera de la curva con proyectos de menor costo.

Un proyecto de energía solar tiene la posibilidad de vender la energía por dos vías principalmente:

- a) Contratos de compraventa directamente con los consumidores industriales
- b) Por medio del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), el cual realiza las transacciones de compraventa de energía limpia por medio de subastas de largo plazo donde los interesados pueden adquirir la energía (principalmente CFE Suministro).

Para el proyecto en estudio se toman en cuenta las condiciones ya observadas en las Subastas de Largo Plazo como un punto medio de los precios a los que podría venderse la energía del proyecto solar. Esto debido a que encontrar información de potenciales clientes privados requiere de negociaciones directas y otros elementos que no entran en el foco de este estudio.

La demanda de CFE Suministro Básico excede por mucho la oferta de energía del proyecto, por lo que mientras el precio de la energía del mismo se encuentre dentro de los rangos ganadores de otros proyectos en las Subastas, se tiene completa seguridad que la totalidad de oferta eléctrica tendrá una demanda que satisfacer. En caso de que los precios del proyecto sobrepasaran los rangos ganadores, significaría que el proyecto no sería atractivo para CFE Suministro y por lo tanto, no tendría una demanda que satisfacer excepto en casos de demanda excesiva o problemas en la generación de otros proyectos.

Por lo tanto, a continuación, se describen las primeras Subastas de Largo Plazo realizadas por el MEM y los precios resultantes de las mismas.

### 2.3.2. Certificados de Energía Limpia (CEL)

Las centrales de generación eléctrica limpia tienen la posibilidad de recibir Certificados de Energía Limpia (CEL), que son títulos emitidos por la CRE que promueven la generación de energía eléctrica limpia.

En 2012, la Ley General de Cambio Climático incluyó la meta a 2024 de generar el 35% de la energía eléctrica de México a través de fuentes limpias, con el siguiente aumento porcentual anualmente:

- 25% de generación limpia en 2018
- 30% de generación limpia en 2021
- 35% de generación limpia en 2024
- 45% de generación limpia en 2036
- 60% de generación limpia en 2050



**Figura 16: Funcionamiento de los CEL en el mercado mexicano**

### 2.3.3. Subastas de Largo Plazo

#### Primera Subasta de Largo Plazo

En marzo de 2016 ocurrió la primera subasta de largo plazo del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), en el que CFE Suministró compró energía, potencia y Certificados de Energía Limpia (CEL). La periodicidad de las subastas de largo plazo será anual; los contratos resultantes de la subasta son de 15 años para energía y potencia, así como 20 años para CEL, iniciando operación 2 años después de la subasta.

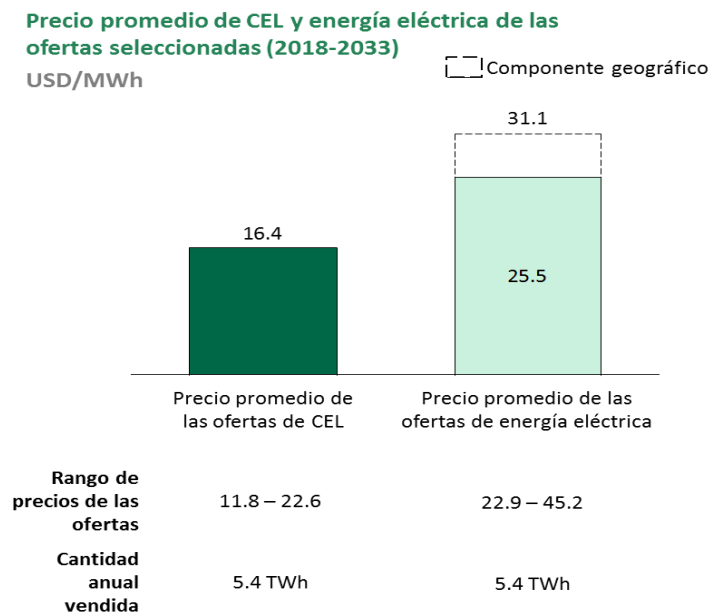
Adicionalmente existirán otras alternativas para comercialización de energía en México:

- Subastas de mediano plazo con una periodicidad anual, en las cuales la entrega de energía comenzará el 1º de enero del año próximo a la asignación de contrato
- Mercados de corto plazo, por hora para energía y anual para CEL y potencia

La demanda total de CFE Suministro en 2018 será de 188 TWh de energía, 9.4 TWh de CEL y 32 GW de potencia, los cuales podrá adquirir en subastas de largo y mediano plazo, así como mercado de corto plazo.

En la primera subasta participaron más de 100 ofertantes de energía eléctrica y fueron asignados contratos a 11 participantes de tecnologías solares (74%) y eólicas (26%).

El precio promedio de las ofertas de venta de CEL y de energía eléctrica fue de 16.4 USD/MWh y 25.5 USD/MWh (más un componente geográfico), respectivamente:



**Figura 17: Precio de CELs y energía en la Primera Subasta**

## Segunda Subasta de Largo Plazo

Entre abril y septiembre de 2016 se llevó a cabo la Subasta de Largo Plazo 1/2016. El 20 de junio de 2016 fueron publicadas las ofertas de compra de CFE Suministro Básico para esta subasta, por las siguientes cantidades:

- 10.6 TWh para energía eléctrica en el periodo 2018-2032
- 1,483 MW para potencia en el periodo 2018-2032
- 10.6 TWh para CELs en el periodo 2018-2037

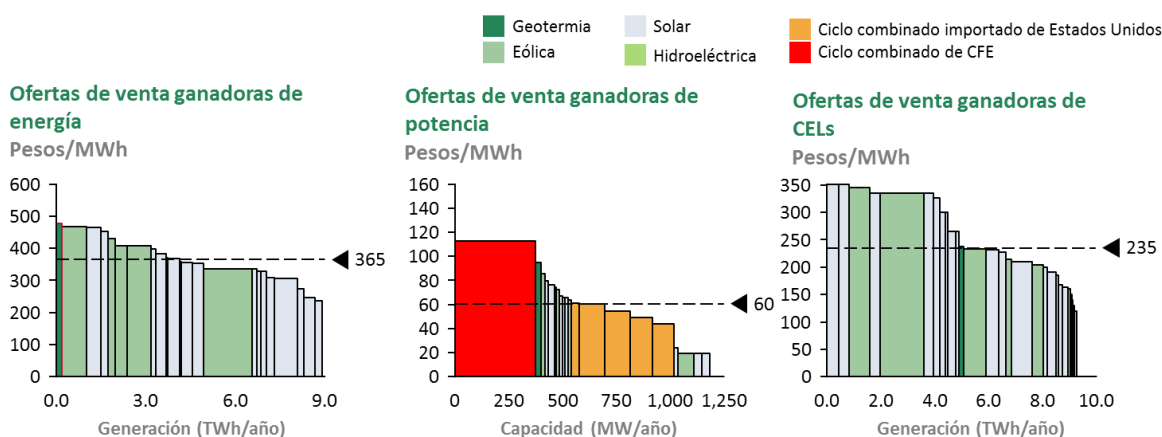
Las ofertas de venta fueron en pesos y tenían la alternativa de ajustar sus precios, durante la vigencia del contrato, mediante:

- 100% con inflación
- 30% con inflación y 70% indexado al tipo de cambio peso dólar

El tipo de cambio establecido durante la Subasta de Largo Plazo originalmente era de 18.76 pesos/dólar y posteriormente el CENACE ajustó las ofertas a un tipo de cambio de 19.52 pesos/dólar, por lo que, en caso de indexar los precios al tipo de cambio, esta sería la base para la actualización.

Debido a la volatilidad de la inflación en el país y del tipo de cambio ante el dólar debido a eventos recientes (próximas elecciones presidenciales en México y elecciones recientes en Estados Unidos, entre otros) la proyección de la inflación anual y el tipo de cambio es esencial para la evaluación de un proyecto y la elección correcta para el ajuste de precios en la vigencia del contrato.

Los precios promedio de las ofertas de venta ganadoras fueron de 365 Pesos/MWh en energía, 60 Pesos/MWh en potencia y 235 Pesos/MWh en CELs:



**Figura 18: Ofertas y precios ganadores por tecnología en la Segunda Subasta**

### Distribución por tecnología de ofertas ganadoras

	Energía	Potencia	CELS
Geotermia	2.2%	2.1%	2.1%
Eólica	43.5%	10.8%	41.3%
Solar	54.3%	15.5%	53.2%
Ciclo combinado	-	71.6%	-
Hidroeléctrica	-	-	3.4%

Fuente: CENACE (15 Oferta de Compra del Suministro de Servicios Básicos v2016 01 26)

**Figura 19: Distribución de ofertas ganadoras por tecnología**

Gran parte de las ofertas ganadoras de energía (44%) fueron para centrales de energía solar, debido a sus bajos costos de referencia (principalmente bajos costos de operación) con respecto a otras tecnologías.

Debido a que las centrales de energía solar tienen una utilización diaria reducida (pocas horas del día tienen generación de energía eléctrica), las ofertas de potencia para este tipo de tecnología fueron casi inexistentes.

#### 2.3.4. Rangos de precios resultantes para la evaluación del proyecto

Los rangos de precios para ofertas de energía solar, los cuales serán usados como escenarios para la evaluación del proyecto en estudio, fueron:

### Ofertas ganadoras de energía fotovoltaica en Subasta de Largo Plazo 2016 Pesos/MWh

	Oferta mínima	Promedio	Oferta máxima
Energía	335.03	345.35	632.01
CELS	167.01	259.13	300.21

Fuente: CENACE (15 Oferta de Compra del Suministro de Servicios Básicos v2016 01 26)

**Figura 20: Rangos de precios ganadores en la Segunda Subasta**

### 2.3.5. Requisitos para participar como ofertante en subastas de largo plazo

- Requisitos del participante
  - Registrarse como generador antes del inicio de la operación comercial
  - En caso de no ser propietario de la central, autorización del titular para representarlo y disponer de los productos
- Requisitos del proyecto
  - Proyecto básico de ingeniería que incluya:
    - Tecnología
    - Capacidad
    - Factor de planta esperado
    - Porcentaje de energía limpia
    - Compromisos previos de energía, potencia o CEL
  - Demostrar potencial de iniciar operación 2.5 años después de la subasta
- Requisitos económicos
  - 5,000 dólares para bases de licitación
  - 50,000 dólares para evaluación de la solicitud de precalificación
  - 5,000 dólares para oferta de venta
  - Carta de crédito como garantía por:
    - 300,000 dólares, sin importar la cantidad de ofertas a presentar
    - 65,000 dólares por MW/año de potencia
    - 30 dólares por MWh/año de energía
    - 15 dólares por MWh/año de CEL
- Requisitos de autorizaciones y acreditaciones
  - Autorización del representante legal de las ofertas al ser vinculantes e irrevocables
  - Capacidad de firmar el contrato dentro de los siguientes 30 días al fallo
  - Acreditación de capacidad de financiamiento y capital social suficiente
  - Acreditación de contar con contrato de interconexión y cumplimiento de los requerimientos técnicos para la interconexión de la central al sistema eléctrico nacional



## 2.4. Estudio económico

### 2.4.1. Cotización de la central

El primer costo que considerar para la central es el costo del terreno que debe adquirirse para el desarrollo del proyecto. Debido a la dificultad de encontrar el precio correcto en la zona, se procedió a realizar un estudio de mercado de terrenos en venta de las poblaciones cercanas al área de estudio.

Los terrenos en venta de la población de Tlalchichuca (vecina a Jalapasco) son los siguientes:

- 80,000 m<sup>2</sup> a 1'900,000 pesos = 23.75 pesos/m<sup>2</sup>
- 60,000 m<sup>2</sup> a 1'275,000 pesos = 21.25 pesos/m<sup>2</sup>

Considerando el promedio de precio por metro cuadrado de los terrenos, el precio estimado de terreno es de 22.50 pesos/m<sup>2</sup>, que se utilizará para la cotización del proyecto.



**Figura 21: Área del terreno a adquirir**

Como puede observarse, el terreno tiene una forma irregular. Si se considera adquirir un terreno equivalente a los lados principales del proyecto, el terreno total es de:

Lado A = 400 m

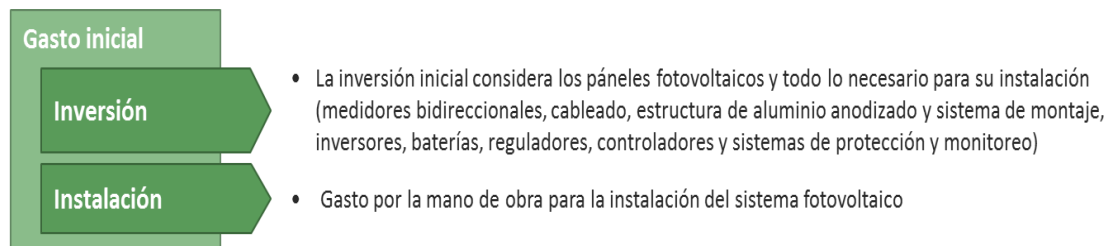
Lado B = 220 m + 90 m = 310 m

Área total = (400 m)(310 m) = 124,000 m<sup>2</sup>

Precio del terreno = (124,000 m<sup>2</sup>)(22.50 pesos/m<sup>2</sup>)

**Precio del terreno = 2'790,000 pesos**

La principal inversión en un proyecto fotovoltaico es en la infraestructura de la central, por lo que conseguir condiciones adecuadas de precio es esencial para la factibilidad económica del proyecto. Los elementos de inversión en el equipo e instalación de los mismos se detallan a continuación:



A partir lo anterior se calculó el costo estimado de inversión para el proyecto incluyendo permisos y estudios, es de 2,352 dólares/kW (Figura 21):

## Cotización de central fotovoltaica

Cantidad	Concepto
41,340	<ul style="list-style-type: none"> <li>Módulos Renesola de 260W</li> </ul>
41,340	<ul style="list-style-type: none"> <li>Instalación y conexión de módulos</li> <li>Estructura y soportes de aluminio anodizado para montaje</li> <li>Tornillería de acero inoxidable</li> <li>Tubería galvanizada a prueba de agua</li> <li>Conductores de cobre para alto voltaje</li> </ul>
1,723	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inversores Kaco 5.0TL (24 por módulo)</li> </ul>
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medidor bidireccional CFE</li> </ul>
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tramitología de CFE</li> <li>Convenios</li> <li>Inspecciones</li> <li>Aprobaciones</li> <li>Otros requisitos</li> </ul>
<b>Inversión total</b>	<b>22'082,677 dólares = 417'129,213 pesos</b>

**Figura 21: Costo de inversión estimado para la central eléctrica**

### 2.4.2. Precio de energía para evaluación del proyecto

Para la evaluación del caso de estudio, se considerará un precio de venta de la energía igual al promedio de las ofertas de venta ganadoras en la Subasta de Largo Plazo, un precio que realísticamente podría obtenerse en el mercado de manera competitiva con respecto a otros proyectos.

Por lo tanto, el precio de venta de energía eléctrica a la que se evalúa el proyecto es:

**Precio de energía a evaluar para proyecto fotovoltaico**  
Pesos/MWh

Concepto	Precio inicial (Pesos/MWh)
Energía	345.35
CELS	259.13

**Figura 22: Precios de energía y CELs supuestos para evaluar el proyecto**

### 2.4.3. Premisas de ajuste de precios a futuro

Para la evaluación económica del proyecto se considerará que como oferta de Subasta de Largo Plazo se elige indexar el precio a futuro 100% a la inflación de México (en lugar de la segunda opción, indexado 30% a la inflación y 60% al tipo de cambio con el dólar estadounidense).

De acuerdo con Banxico, la inflación se debería estabilizar alrededor de 3%, con lo cual se proyectará la inflación anual de 3% en el horizonte de evaluación del proyecto.

Proyección de inflación (inflación estabilizada establecida por Banxico)	<b>3.00% anual</b>
--	--------------------

Posteriormente se realizarán sensibilidades a los precios de energía a las partes altas y bajas de las ofertas de venta ganadoras, así como un ajuste indexado a la inflación y al tipo de cambio, debido al impacto actual de la depreciación del peso con respecto a la moneda de cotización de los proyectos (dólar estadounidense), para así para así analizar la posible factibilidad económica de un proyecto fotovoltaico de referencia bajo las condiciones actuales macroeconómicas y de mercado.

### 2.4.4. Costos operativos de la central fotovoltaica

Para mantener un funcionamiento óptimo de la central fotovoltaica, se llevan a cabo tres tipos de mantenimiento físico a las instalaciones:

- **Mantenimiento preventivo:**

Tiene por objetivo prevenir el funcionamiento ineficiente o incorrecto del sistema, manteniendo las condiciones óptimas de operación que existían inicialmente (en la puesta en marcha) y con ello minimizando el riesgo de aparición de averías y paros no programados. La operación relativa al mantenimiento preventivo de la instalación fotovoltaica debe realizarse siguiendo un programa previamente asignado de tareas de mantenimiento.

En todo mantenimiento preventivo se debe prestar una atención mayor a aquellos equipos e instalaciones que cuenten con mayor riesgo de averías (partes móviles, materiales sensibles, entre otros).

El mantenimiento que debe realizarse a los paneles fotovoltaicos es mínimo, ya que no tiene partes móviles sometidas a desgaste, no requiere cambio de piezas (salvo accidentes imprevistos) ni lubricación. Un aspecto a tener en cuenta para mantener el funcionamiento correcto de los paneles es mantenerlos limpios, aunque normalmente la lluvia se encarga de realizar la limpieza de los mismos.

Algunas actividades que realizar para mantenimiento preventivo son:

- Inspección visual de los paneles
- Limpieza de paneles
- Inspección del cableado eléctrico
- Inspección de las estructuras que soportan los paneles

- **Mantenimiento correctivo:**

Se trata de toda reparación de averías o defectos que puedan surgir en la central fotovoltaica. Normalmente estas actividades pueden corregirse con la sustitución de elementos dañados, aunque otras veces es necesario realizar reparaciones de las partes existentes por medio de personal especializado.

En este tipo de mantenimiento es fundamental el tiempo de respuesta y reparación, teniendo en cuenta que el tiempo perdido durante la reparación del sistema o de alguno de sus elementos incide directamente en la generación eléctrica de la central. Por esto un punto esencial es detectar las fallas de manera rápida y con esto, tener en posesión los repuestos necesarios para la reparación. El personal técnico especializado debe encargarse rápidamente de efectuar los trabajos de reparación (según la urgencia de los mismos) y un análisis de los efectos que el paro provoca en la generación de la central.

- **Mantenimiento predictivo:**

Consisten en la atención diaria de las contingencias que se presenten en la central fotovoltaica. Las acciones generalmente consisten en controlar las operaciones de arranque y paro del sistema, vigilancia y supervisión de la generación eléctrica, análisis de las alarmas y parámetros de la central y la adecuada intervención para evitar averías graves.

Actualmente la mayoría de los fabricantes de inversores ofrecen productos que registran, comparan y analizan parámetros que ayudan a garantizar el funcionamiento correcto de la central. Algunos datos que estos sistemas deben registrar y controlar son la tensión, intensidad de corriente y potencia.

#### 2.4.5. Resultados de la evaluación económica

## Supuestos para la evaluación:

### Supuestos macroeconómicos:

Inflación anual	3.00%
Tipo de cambio	18.98 pesos/USD (1/enero/2018)

### Supuestos generales:

Inicio del proyecto	1 - Junio – 2018
Tiempo de construcción	12 meses
Inicio de operaciones	1 - Junio – 2019
Periodo de evaluación	25 años
Fin de operaciones	31 - Mayo – 2044

### Supuestos del proyecto:

Costo del terreno	2'790,000 pesos
Costo de inversión	22'082,677 dólares
	419'129,213 pesos
Costo de operación	2'808,698 pesos/año

### Supuestos operativos:

Degradación de capacidad, año 1	2.00%
Degradación de capacidad, años 2+	0.50%
Generación eléctrica inicial	106.988 MWh/día

### Proyección de precios de energía eléctrica en el mercado (pesos/MWh):

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038
Energía	345	356	366	377	389	400	412	425	437	451	464	478	492	507	522	538	554	571	588	606	624	642
CELS	259	267	275	283	292	300	309	319	328	338	348	359	369	381	392	404	416	428	441	454	468	482

**Figura 23: Supuestos generales utilizados para la evaluación económica**

## 2.4.6. Resultados económicos del proyecto

Se realizó un modelo económico para la evaluación del proyecto de central solar en Excel, mediante el cual las premisas de entrada pueden ser ajustadas para realizar el cálculo automático de los flujos proyectados. Esta herramienta tiene gran utilidad para la actualización de escenarios según los últimos cambios (en materia macroeconómica, de precios de energía o de costos de generación con tecnología solar) y realizar una evaluación con bases firmes en cada momento.

El horizonte de evaluación del proyecto en estudio será de 25 años de operación más 12 meses (1 año) para la construcción y puesta en marcha de la central solar, esto acorde a los datos de los paneles de Renesola, los cuales tienen un factor de funcionamiento mayor a 80% hasta los 25 años de operación debido a la degradación a la que están expuestos.

Suponiendo una tasa de descuento de 10% anual (mínimo retorno anual que los inversionistas en este tipo de proyectos están dispuestos a pagar) y con las condiciones antes enlistadas, el resultado económico del proyecto ante las condiciones actuales es positivo, sin ser extremadamente atractivo.

Por esto mismo se puede observar que un proyecto de este tipo sería atractivo ante condiciones promedio de precios en el mercado eléctrico y de los actuales costos de inversión para centrales de energía solar.

### Resultados económicos de la central de energía fotovoltaica en Jalapasco, Puebla

Concepto	Monto
VPN <sub>después de impuestos</sub>	• -104'549,677 pesos
TIR <sub>después de impuestos</sub>	• 1.79%
Periodo de recuperación de la inversión	• N/D

**Figura 24: Resultados económicos del proyecto**

El proyecto fotovoltaico en el caso base no presenta resultados positivos ante los precios promedio del mercado y del tipo de cambio, por lo que su desarrollo no sería factible económicamente.

Esto puede deberse a diferentes razones:

- Costo de inversión alto para el proyecto: Debido a que el costo de inversión es tomado a partir de una cotización comercial, es posible que el precio se encuentre muy por encima de los que podrían conseguirse al mayoreo con grandes suministradores de paneles.
- Precios de energía bajos: Debido a que algunos de los proyectos que ingresaron a la Subasta de Largo Plazo tienen consideraciones especiales (costos hundidos, tratos especiales con suministradores de paneles o compradores de energía) es posible que los precios de la Subasta de Largo Plazo no reflejen los costos reales de un proyecto de este tipo
- Tipo de cambio actual: Debido al comportamiento del tipo de cambio en los últimos meses, es posible que los costos de inversión (cotizados en dólares) no representen a los precios actuales de energía (cotizados en pesos) por lo que puede ser una razón para empeorar los resultados económicos del proyecto.

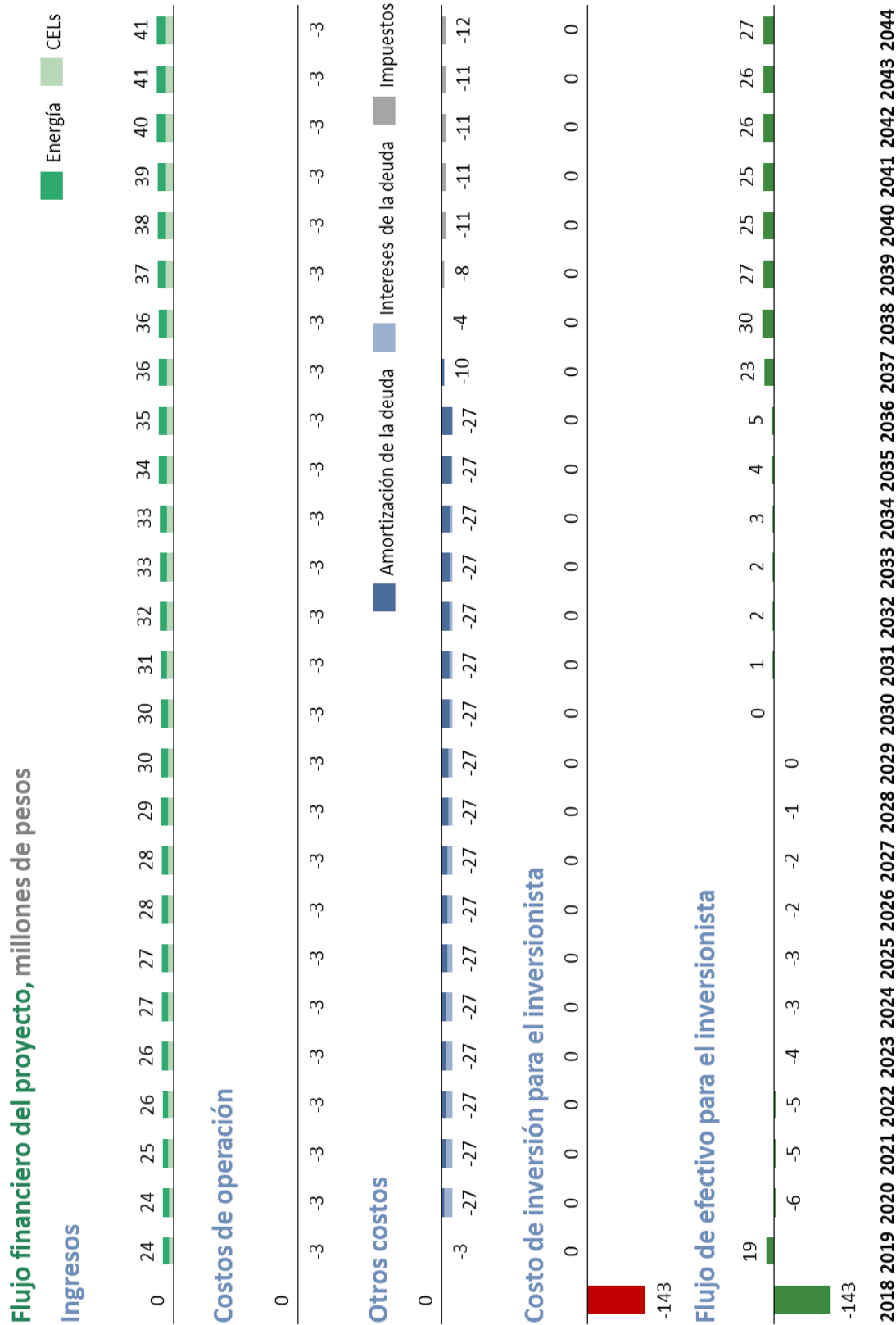
En la realidad, seguramente los resultados económicos negativos son a causa de una combinación de estas tres situaciones, por lo que para analizar los resultados reales de un proyecto de este tipo en el mercado mexicano, es necesario realizar sensibilidades a estas tres variables y comprobar el comportamiento del proyecto ante el cambio.

## 2.5. Estudio financiero

El proyecto obtiene resultados financieros negativos y constantes a lo largo del periodo de operación bajo el escenario de precios establecido, por lo que en caso de continuar con el proyecto bajo estas premisas se prevé que se presentarían problemas financieros en caso de mantenerse la proyección de precios establecida en este escenario.

A continuación, se muestran los flujos financieros para el proyecto (Figura 25):





**Figura 25: Proyección de flujos financieros del proyecto**

## Sensibilidad a los precios de energía eléctrica

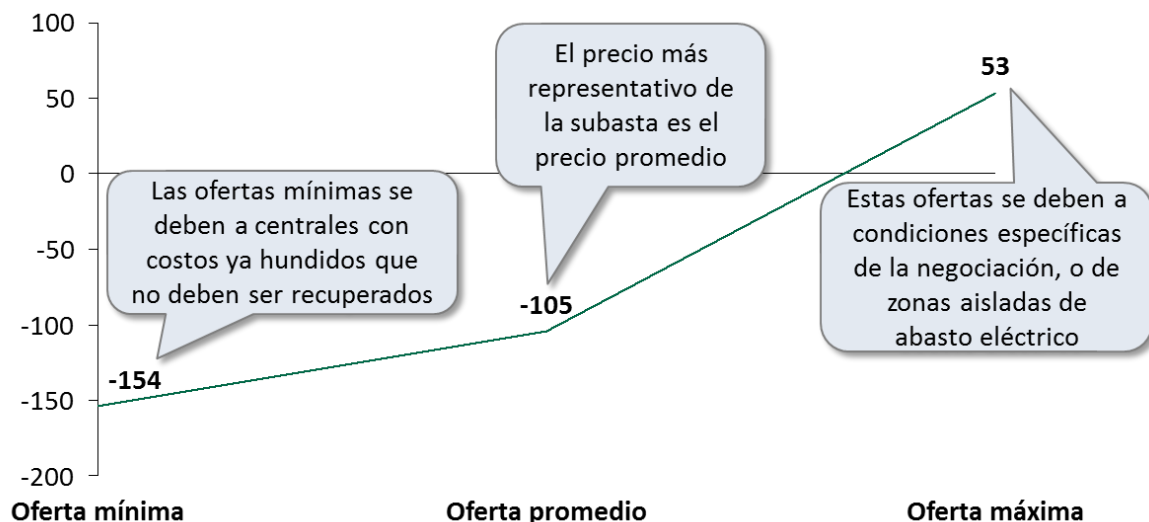
Para encontrar una situación favorable en la que el proyecto sería factible y demostrar que es un escenario realista ante la situación actual, es necesario analizar el comportamiento económico del proyecto, por lo que se proponen dos escenarios alternos de precios de energía eléctrica (a la alta y baja del establecido en el caso base), con el fin de establecer el rango de precios bajo los cuales el proyecto mantendría resultados económicos positivos que hacen viable el desarrollo del mismo.

Existen extremos de precios con fundamentos para presentarse en la proyección:

1. Precios mínimos de energía eléctrica de la subasta de largo plazo
2. Precios máximos de energía eléctrica de la subasta de largo plazo

## Rentabilidad del proyecto de energía fotovoltaica ante escenarios de precios de mercado

Valor Presente Neto, millones de pesos



**Figura 26: Sensibilidad de VPN a los precios de venta de energía**

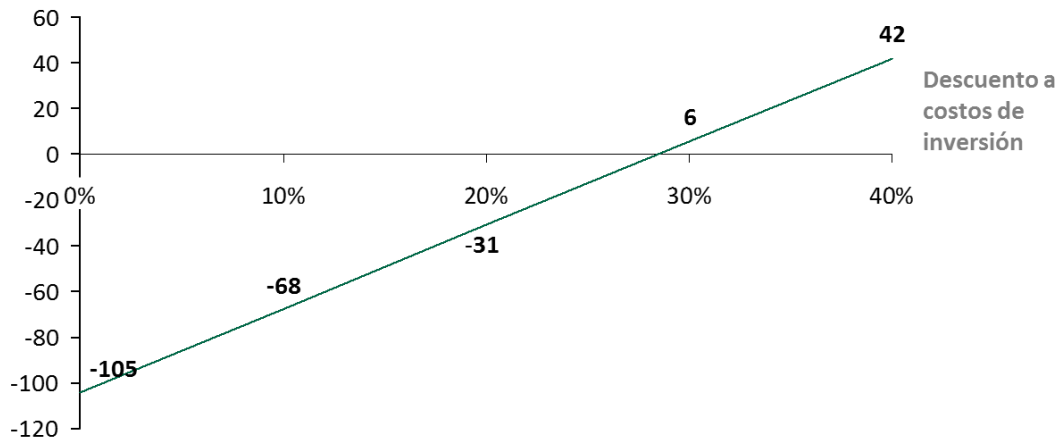
Como puede observarse en el gráfico, los resultados económicos del proyecto son negativos bajo los escenarios mínimo y promedio de precios de la Subasta de Largo Plazo y sólo son ligeramente positivos ante el escenario de precio máximo. Por lo tanto, se esperaría que para que el proyecto sea factible se lograra conseguir un cliente dispuesto a comprar la energía a precios cercanos a las ofertas máximas de la subasta, así como mejorar las condiciones de costos de inversión para desarrollar el proyecto.

## Sensibilidad a los costos de inversión

Bajo esta consideración, estos serían los resultados económicos ante diferentes niveles de disminución en los costos de inversión respecto a la cotización comercial conseguida por el autor, suponiendo el escenario de precio promedio para la subasta:

### Rentabilidad del proyecto de energía fotovoltaica ante escenarios de costos de inversión (escenario promedio de precios)

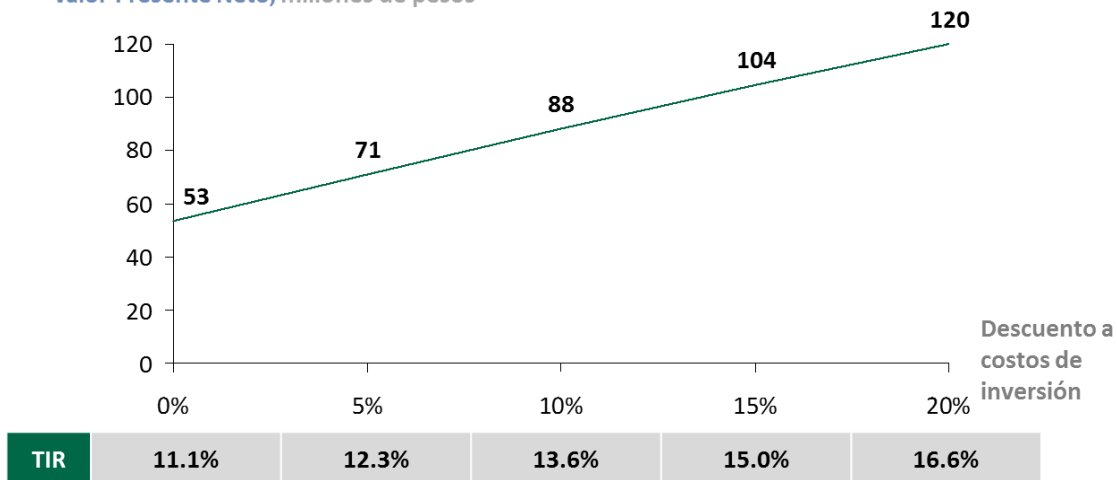
Valor Presente Neto, millones de pesos



**Figura 27: Sensibilidad de VPN a los costos de inversión (precio promedio)**

### Rentabilidad del proyecto de energía fotovoltaica ante escenarios de costos de inversión (escenario máximo de precios)

Valor Presente Neto, millones de pesos



**Figura 28: Sensibilidad de VPN a los costos de inversión (precio máximo)**

El punto de equilibrio en costos de inversión para que el proyecto sea rentable ( $VPN=0$ ) se daría en caso de conseguir un descuento de ~29% con respecto a la cotización actual de la central. Al contar con un proyecto concreto es posible negociar los precios del equipo, sin embargo, conseguir un descuento importante (como el casi 30% necesario para hacer el proyecto rentable) en los costos de inversión es poco probable debido a que los márgenes para los desarrolladores de la tecnología no lo permiten.

Por lo anterior, la factibilidad económica del proyecto se daría sólo en caso de una mezcla de condiciones, bajo las que se consigan descuentos significativos en el costo de inversión y además asegurar compradores de energía a precios cercanos a los máximos en la Subasta de Largo Plazo.

Debido a que este tipo de subastas se realizan para desarrollo de proyectos de energía limpia, se ve posible que estos precios pudieran alcanzarse, sin embargo no hay una certeza de esto.

Para recomendar el desarrollo de este proyecto, primero deberían asegurarse contratos de compraventa de energía a precios que hagan factible económicamente el mismo. En caso contrario, no se recomendaría el desarrollo del mismo, ya que no sería posible recuperar la inversión realizada.

## **2.6. Estudio de impacto social y ambiental**

### **Impacto social del proyecto**

Una gran ventaja de la apertura del mercado eléctrico y la entrada de tecnologías limpias para generación de energía eléctrica es el gran ímpetu que han tomado las iniciativas para aumentar la generación con este tipo de energía.

Es por lo anterior que el apoyo social a este tipo de proyectos es importante. Más que contar con resistencia social, la percepción hoy en día es que este tipo de proyectos deben desarrollarse.

Esto es el caso especialmente para proyectos de energía solar, debido a los pocos trabajos que requiere para su construcción y el poco impacto que genera a las cercanías (ruido, residuos, efectos secundarios que otras tecnologías generan) por lo que hay pocos argumentos para una potencial respuesta negativa social hacia el proyecto en estudio.

Además de esto, existe el incentivo social del pueblo que se encuentra junto al terreno a desarrollar, Jalapasco. Se trata de un pueblo principalmente agrícola (maíz) con pocos recursos y con niveles de vida muy bajos.

Los agricultores de la zona no cuentan con los recursos para realizar el pago energético necesario para hacer operar el pozo de agua del pueblo, el cual es necesario para el riego de sus cultivos. El proyecto podría tener una utilización con fines de ayuda social para alimentar la bomba de agua con parte de la energía generada y apoyar las actividades agrícolas del pueblo.

Ante esto, no se prevé que el aspecto social pueda ser un freno durante el desarrollo y operación del proyecto, debido a la nula afectación que generaría en la población cercana y el gran apoyo que se le está dando a este tipo de proyectos de generación de energía con tecnologías limpias y renovables.

### **Impacto ambiental del proyecto**

Un proyecto de energía solar presenta pocos riesgos de impacto ambiental, los cuales pueden deberse principalmente a los trabajos necesarios para la preparación del terreno y la instalación de los equipos, en el caso de que exista una tala de árboles y de pérdida de ecosistemas que se encuentren en la zona.

A continuación, se muestran las principales Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia ambiental a las que pudieran aplicar este tipo de proyectos, y un posterior análisis del caso en específico para cada una:

#### **NOM-052-SEMARNAT-2005: Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos**

Bajo esta norma se consideran residuos peligrosos a los siguientes (y que deben mantenerse dentro de los límites permisibles):

- Inorgánicos: Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo, Mercurio, Plata, Plomo, Selenio
- Orgánicos: Clordano, Cresol, Endrin, Lindano, Metoxicloro, Toxafeno, entre otros.

Al ser un proyecto de energía solar, no existen residuos que se generen durante la operación del mismo, y fuera de la irradiación de calor que puede sentirse cerca de los equipos, los efectos colaterales durante la operación de la central son nulos, por lo que tampoco presenta riesgos ambientales.

**NOM-059-SEMARNAT-2010 : Que establece las especies nativas de México de flora y fauna silvestres y categorías de riesgo**

El proyecto no requiere más que la tala de un par de Álamos (una de las especies más comunes en el estado de Puebla) que se encuentran en el centro del terreno y no es considerada una especie en riesgo, y la fauna que se encuentra en el lugar consta principalmente de insectos y pequeños reptiles (lagartijas, camaleones) que no requieren ser reubicados en caso de desarrollar el proyecto.

**NOM-168-SEMARNAT-ASEA-2016 : Que establece los niveles máximos permisibles de emisión provenientes de turbinas de gas, a ciclo abierto o ciclo combinado, aeroderivados y su medición**

En el caso del caso en estudio, al tratarse de un proyecto de energía solar, no tendría implicaciones en normas de impacto ambiental, debido a que no utiliza combustibles fósiles para su operación y no existen emisiones contaminantes provenientes del mismo.

Adicionalmente, el posible impacto que se generaría durante la construcción del proyecto es nulo, debido a que el terreno se encuentra prácticamente listo para la instalación de los equipos, requiriéndose sólo pequeñas adecuaciones y limpieza en el terreno.

Ante esto, se concluye que el impacto ambiental del proyecto no es una cuestión en la que deba profundizarse en el estudio, debido a los pocos riesgos que conlleva un proyecto de este tipo. En caso de realizarse el proyecto, no se prevé que el tema ambiental sea un factor que pudiera complicar su ejecución.

## 2.7. Riesgos del proyecto y estrategias de mitigación

### Matriz de riesgos

Riesgo	Descripción	Estrategia de mitigación
<b>Aumento de costos de inversión</b>	Condiciones bajo las cuales los costos de inversión para el proyecto , principalmente paneles, instalación e interconexión, aumenten (p.ej. alta en precios de materiales)	Cotización previa con los proveedores de la tecnología y de la interconexión para congelar el costo de inversión a condiciones actuales
<b>Reducción de precios de energía</b>	Cambios en las condiciones de mercado que puedan generar reducciones en los precios de energía para el proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conseguir contratos a largo plazo de energía, para congelar la demanda y el ingreso proveniente de la misma inclusive ante ajustes en los precios de mercado</li> <li>• Debido a que los precios de la Subasta de Largo Plazo representan la recuperación de costos de las tecnologías más baratas (p.ej. Solar), no se espera que haya riesgo de presentarse precios menores a estos</li> </ul>
<b>Cambios de regulación en el país</b>	Debido a que una gran parte del ingreso del proyecto se debe a los CELs, un cambio en la regulación de cálculo o requerimiento de los mismos podría afectar negativamente al proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitorear la regulación local en la materia para prever posibles cambios</li> <li>• Conseguir contratos a largo plazo de CELs, para congelar la demanda y el ingreso proveniente de los mismos inclusive ante ajustes en la regulación</li> </ul>
<b>Rechazo de financiamiento</b>	Condiciones del proyecto que no hagan viable que una institución financiera otorgue un financiamiento para su desarrollo	Conseguir contratos a largo plazo de energía, potencia y CELs, para asegurar los ingresos futuros del proyecto y de esta forma garantizar las condiciones para el otorgamiento del financiamiento
<b>Aumento en tasas de financiamiento</b>	Condiciones financieras locales que resulten en un aumento en las tasas esperadas de financiamiento	El proyecto tiene pocas alternativas para mitigar este riesgo, por lo que es necesario monitorear las condiciones financieras en todo momento y priorizar la obtención del crédito a tasa constante en el momento en el que las condiciones sean adecuadas

**Figura 29: Matriz de riesgos y estrategias de mitigación para el proyecto**

### 3. Conclusiones

El proyecto de una central de energía solar se basa el impulso que están teniendo actualmente las energías limpias y los apoyos que hay para las mismas (Certificados de Energía Limpia, Subastas de Largo Plazo), por lo que analizar la factibilidad de un proyecto de este tipo en zonas que tradicionalmente no son las ideales para su desarrollo (debido a la baja irradiación con respecto a otras zonas como Sonora) es esencial para continuar su expansión en la red nacional.

Además de considerar el análisis económico del proyecto, es necesario recordar los beneficios ambientales que la generación eléctrica con energía solar conlleva, ya que el contaminante emitido por la generación eléctrica con combustibles fósiles es perjudicial para el medio ambiente y debe ir disminuyendo su uso para dar lugar a la energía limpia.

Por esto, el autor considera importante el análisis de un proyecto de este tipo en la zona en la que se propone, una zona conocida, cercana al centro del país y con beneficios a un ambiente con paisajes y fauna maravillosos.

Tras analizar los resultados económicos del proyecto, puede observarse que los costos de inversión obtenidos son seguramente mayores a los costos de mercado que pueden conseguirse con proveedores de gran escala, lo cual afecta los resultados del mismo. En caso de contar con un proyecto sólido, sería posible realizar una mayor investigación de los posibles proveedores y una negociación para conseguir menores costos a los cotizados para este proyecto.

Además de esto, los costos de energía eléctrica observados en las Subastas de Largo Plazo son bajos, estresando los resultados económicos del proyecto al máximo. Esto puede deberse a que los proyectos se encuentran en zonas con mayor irradiación solar (Sonora, Chihuahua, entre otros) y de otros proyectos ya realizados o que tienen ciertos costos hundidos, por lo que no necesitan recuperar la totalidad de la inversión.

En conclusión, el autor recomienda que en el caso de este proyecto, debería realizarse una mayor investigación para el proveedor de tecnología para reducir en la medida de lo posible los costos de inversión, además de negociar un contrato de compraventa de energía a precios que reflejen la poca capacidad natural de la zona de obtener energía limpia con respecto a otras zonas con mayor irradiación (energía solar), mantos acuíferos (energía hidroeléctrica) o viento (energía eólica).

En caso de lograr conseguir mejores condiciones en costos de inversión y en precios de venta de energía eléctrica, este proyecto sería factible y representaría un avance importante en el apoyo de la modernización de la red eléctrica en el centro del país con tecnologías limpias y amigables con el medio ambiente (tanto en su construcción como en la generación eléctrica).



## **Referencias bibliográficas**

Energía solar fotovoltaica – qué es, cómo se genera y usos [en línea], Erenovable, junio de 2016 [consulta, enero de 2017]

Disponible en:

<http://erenovable.com/energia-solar-fotovoltaica/>

Mundo Solar, Historia de la energía solar [en línea], Consulta en enero de 2017

Disponible en:

<http://www.dforcesolar.com/energia-solar/historia-de-la-energia-solar/>

Saberes y Ciencia, Fuentes de energía en México [en línea], Administrador, septiembre de 2012 [consulta, enero de 2017]

Disponible en:

<http://saberesyciencias.com.mx/2012/09/16/fuentes-de-energia-en-mexico/>

Desarrollo Sustentable, ¿Qué es el desarrollo sustentable?, Juan David Montoya, abril de 2013 [consulta en febrero de 2017]

Disponible en:

<http://www.desarrollosustentable.co/2013/04/que-es-el-desarrollo-sustentable.html>

Papeles de cuadernos de energía, El trilema energético, Marta Camacho Parejo, Club Español de la energía, diciembre de 2012 [consulta, febrero de 2017]

Disponible en:

<https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2012/12/Trilema-Energ%C3%A9tico-2012-Espanol.pdf>

Energías Renovables Hoy, Ventajas y Desventajas del Uso de la Energía Solar Fotovoltaica, Octubre de 2011 [consulta, febrero de 2017]

Disponible en:

<http://www.energiasrenovables hoy.net/2011/10/ventajas-y-desventajas-del-uso-de-la.html>

Ventajas y desventajas de la energía solar, BNamericas, septiembre de 2015 [consulta, febrero de 2017]  
Disponible en:  
<https://www.bnamericas.com/es/noticias/energiaelectrica/ventajas-y-desventajas-de-la-energia-solar>

CENACE, Descripción de Subastas de Largo Plazo, sin fecha [consulta, febrero de 2017]  
Disponible en:  
<http://www.cenace.gob.mx/paginas/publicas/MercadoOperacion/Subastas.aspx>

CENACE, Documentos de Subasta de Largo Plazo 2015, mayo de 2016 [consulta, febrero 2017]  
Disponible en:  
<http://www.cenace.gob.mx/Paginas/Publicas/MercadoOperacion/SubastasLP.aspx>

CENACE, Documentos de Subasta de Largo Plazo 2016, septiembre de 2016 [consulta, febrero 2017]  
Disponible en:  
<http://www.cenace.gob.mx/Paginas/Publicas/MercadoOperacion/SubastasLP.aspx>

Milenio, Inflación bajará a 3% en 2018, Silvia Rodríguez, diciembre de 2016 [consulta, febrero de 2017]  
Disponible en:  
[http://www.milenio.com/negocios/inflacion-minuta\\_junta\\_banxico-gasolinazo-salario\\_minimo-milenio\\_noticias\\_0\\_874712598.html](http://www.milenio.com/negocios/inflacion-minuta_junta_banxico-gasolinazo-salario_minimo-milenio_noticias_0_874712598.html)

SEMARNAT, Normas Oficiales Mexicanas (en diversas materias), última modificación en enero de 2015 [consulta, febrero de 2017]  
Disponible en:  
<http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/normas-oficiales-mexicanas>