



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

“DISEÑO DE UNA CENTRAL FOTOVOLTAICA DE
GRAN POTENCIA”

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

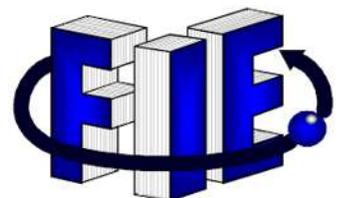
PRESENTA

JOSÉ ALBERTO RODRÍGUEZ PERALES

ASESOR:

DR. GILBERTO GONZÁLEZ ÁVALOS

MORELIA, MICHOACÁN, MARZO 2018



Dedicatoria

A mi madre Sandra Liliana Rodríguez Perales por ser el pilar y lo más valioso en mi vida, porque me ha guiado y apoyado incondicionalmente durante mi entera trayectoria, por el amor tan fuerte y puro que me ha brindado y por los consejos que me han forjado a lo largo de mis 23 años, porque por ella soy y quiero ser.

A mi abuelo José Rodríguez Bucio por darme la oportunidad de trabajar con él en su negocio eléctrico y despertar en mí el enorme interés por la ingeniería eléctrica y por su apoyo sin condiciones a partir de ese momento, en dónde se convirtió en mi entero padre al darme su amor, sustento y sus valiosos consejos tanto de ingeniería como de vida.

A mi hermano Oscar Iván Rodríguez Perales simplemente por ser mi hermanito y enfrentar conmigo y mi madre la vida que no siempre es fácil, al yo haber cuidado de él y enseñarme así a apreciar lo valiosa que es tu sangre y el amor que nos demostramos.

A mi amigo que en paz descansa Eric Francisco Guerrero Olvera quien me acompañó en el trayecto desde la preparatoria y parte de mi carrera profesional hasta que lamentablemente falleció. Mostrándome el valor de una gran y verdadera amistad, un hermano que yo escogí.

Agradecimientos

A Dios por permitir que todo esto sea posible de alguna forma.

A mi madre y su incondicional amor y apoyo.

A mi abuelo por su apoyo y sus consejos y por haberme brindado la posibilidad de familiarizarme con el ambiente de la ingeniería eléctrica.

A mi asesor el Dr. Gilberto González Ávalos por ayudarme a desarrollar y revisar este trabajo.

A todos mis profesores a lo largo de mi carrera, que me compartieron sus conocimientos y me ayudaron a forjar las bases de mi juicio profesional.

A mis tíos presentes en Morelia que me ofrecieron su hogar y trabajo para apoyar mi economía.

A mis amigos de la facultad Humberto, Javier, Vicente y Oscar que me acompañaron y me apoyaron en la escuela.

A mis amigos de Apatzingán que me mostraron su gran amistad estando yo en otra ciudad.

A mi novia Diana González por estar conmigo, darme su amor, su enorme apoyo y resaltar en mí, cualidades.

A la Sra. Carmela Valencia y sus hijos: mi madrina María del Carmen Arias y el Sr. Javier del Toro por su gran apoyo a lo largo de mi carrera profesional

Resumen

La presente tesis contiene el diseño de una central fotovoltaica de gran potencia (300 MW) como comparativa con las centrales eléctricas convencionales en cuanto a inversión inicial, costos de combustibles y mantenimiento, aspectos ambientales, así como la ubicación y espacio necesario; esto tomando en cuenta que México es uno de los países con mayor índice de radiación solar [1]. Se mencionan las demás fuentes renovables de producción de energía eléctrica, así como las no renovables y destacar aspectos de disponibilidad, productividad y rentabilidad. Se presentará una serie de figuras que ilustrarán el proceso de comparación con plantas de combustibles fósiles y se contrastará contra el decremento de los precios de materiales para la construcción de sistemas fotovoltaicos. Se resolverá problemas de terreno necesario mínimo para la disposición de paneles solares debido a la enorme cantidad de estos.

Concluir finalmente con temas de inversión, demanda de energía a cubrir, y la participación en el sistema eléctrico nacional pudiéndose optar, tal vez, por centrales de media potencia. La propuesta será dirigida en base a la prospectiva de la nueva reforma energética que espera obtener una generación, entre empresas productivas del estado y sector privado del 35% del total en fuentes renovables [2].

Palabras clave: Energía; fuentes renovables; radiación solar; 300 megawatts; Tierracaliente, Michoacán; reforma energética.

Abstract

This thesis contains the design of a great power photovoltaic central as a comparative with the conventional electric centrals, such an initial investment, fuel costs and maintenance, environment aspects, ubication and the necessary space, taking into consideration that Mexico is one of the countries whit the highest solar radiation.

Mention the others renewable sources of electric power production, as well as the no-renewables and highlight aspects like availability, productivity and confidence. Will be presented a series of figures that will illustrate the comparation process with fossil fuel plants and it will contrast against the decrement of the prices of materials for the construction of photovoltaics systems. It will be solved problems of minimum necessary ground for the solar panels disposition because the enormous amount of these.

Conclude finally with investment, demand to cover and the participation in the national electric system, being able, perhaps, to opt for middle power centrals. The propose will be addressed with base to the new energy reform prospective that waits to obtain a generation, between productive states companies and the private sector of 35% of the total in renewable sources.

Keywords: Energy; renewable resources; solar radiation; 300 megawatts; Tierracaliente, Michoacán; energetic reform.

Contenido

Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen	iii
Abstract.....	iv
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tablas	ix
Símbolos y abreviaturas	x
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Antecedentes Históricos.....	1
1.2 Introducción	1
1.3 Las Fuentes Renovables.....	2
1.4 Objetivos Generales	5
1.5 Objetivos Específicos	6
1.6 Justificación	6
1.7 Metodología	6
1.8 Contenido de la Tesis.....	7
Capítulo 2 Antecedentes de Centrales Eléctricas.....	8
2.1 Centrales Termoeléctricas	8
2.2 Centrales Nucleoeléctricas (de fisión)	12
2.3 Centrales Geotermoeléctricas.....	14
2.4 Centrales Hidroeléctricas.....	15
2.5 Centrales Eólicas.....	18
2.6 Centrales Mareomotrices	20
2.7 Centrales Termosolares.....	22
Capítulo 3 Diseño de una Central Fotovoltaica	25
3.1 El Recurso Solar de Energía	25
3.2 La Radiación Electromagnética.....	26
3.3 El Efecto Fotoeléctrico.....	27
3.4 Los Paneles Fotovoltaicos.....	28
3.5 La Trayectoria del Sol.....	30
3.5.1 Medición de la Radiación Solar	31

3.6	El Potencial de Radiación Solar en México	32
3.7	El Potencial de Radiación Solar en Tierracaliente, Michoacán.....	35
3.8	Sistemas Fotovoltaicos	37
3.9	Diseño de un Sistema Fotovoltaico Estándar	38
3.10	Central Fotovoltaica de 300 MW.....	43
3.11	Promedio de energía generada	51
Capítulo 4 Caracterización de Centrales de Gran Potencia.....		53
4.1	Centrales Eléctricas en Comparación	53
4.2	Generación de Energía Eléctrica.....	54
4.3	Aspectos Ambientales	57
4.4	Costos	60
4.4.1	Costos de Obra	60
4.4.2	Costo de Mantenimiento.....	64
4.4.3	Combustible (costo de operación)	66
Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones.....		69
5.1	Conclusiones.....	69
5.2	Recomendaciones.....	74
Referencias		75

Lista de Figuras

Figura 2.1-1 Representación termodinámica de los equipos utilizados en el ciclo de potencia Rankine: bomba, caldera, turbina y condensador	9
Figura 2.1-2 Esquema convencional de una central termoeléctrica.	10
Figura 2.1-3 Representación esquemática del ciclo combinado.....	11
Figura 2.2-1 Reactor de una central termonuclear.....	12
Figura 2.2-2 Esquema de funcionamiento de una central nucleoelectrica.....	13
Figura 2.3-1 Esquema conceptual de una planta geotérmica para generación de energía eléctrica.....	14
Figura 2.4-1 Esquema básico de una central hidroeléctrica.....	16
Figura 2.4-2 Rango de utilización de los diferentes tipos de turbinas.....	17
Figura 2.5-1 Molino de viento antiguo.....	18
Figura 2.5-2 Diagrama esquemático de un parque eólico.....	19
Figura 2.5-3 Figura esquemática de aerogenerador.....	20
Figura 2.6-1 Diagrama esquemático de forma de aprovechamiento de la energía de mareas.....	21
Figura 2.6-2 Diagrama esquemático de planta mareomotriz de turbinas ancladas.....	22
Figura 2.7-1 Diagrama general de una planta Termosolar de temperatura media.....	24
Figura 2.7-2 Diagrama esquemático de una central termosolar de alta temperatura.....	24
Figura 3.2-1 Diagrama esquemático de la dispersión de la radiación solar en la superficie terrestre.....	27
Figura 3.3-1 Diagrama esquemático del efecto fotoeléctrico.....	28
Figura 3.4-1 Celdas fotovoltaicas agrupadas en un panel o módulo.....	29
Figura 3.4-2 Componentes de un panel fotovoltaico (caja de conexiones en parte trasera).....	29
Figura 3.4-3 Componentes de un panel fotovoltaico (vista de perfil).....	29
Figura 3.5-1 Movimiento elíptico de la tierra alrededor del Sol.....	31
Figura 3.5-2 Incidencia de la radiación solar de en función de la latitud.....	31
Figura 3.5-3 Piranómetros.....	32
Figura 3.5-4 Piroheliómetro.....	32
Figura 3.6-1 Potencial global de concentración de energía solar.....	33
Figura 3.6-2 Gráfica de los mejores países con la relación radiación solar-Área del mundo.....	34
Figura 3.6-3 Radiación solar promedio para los meses de marzo y julio.....	34
Figura 3.6-4 Radiación solar promedio para los meses de septiembre y diciembre.....	35
Figura 3.8-1 Diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico aislado.....	37
Figura 3.8-2 Diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico interconectado a la red.....	38
Figura 3.9-1 Especificaciones del módulo fotovoltaico S72PC-320.....	40
Figura 3.9-2 Dimensiones específicas del módulo fotovoltaico S72PC-320.....	41
Figura 3.9-3 Especificaciones técnicas del inversor SB 6000US-11 - 240VAC.....	41
Figura 3.9-4 Arreglo fotovoltaico para diseño estándar (se han omitido equipos como cajas combinadoras y protecciones).....	42
Figura 3.9-5 Itinerario descrito por el sol el 21 de diciembre (izquierda) y el 21 de junio (centro),	

solsticios de invierno y verano	43
Figura 3.10-1 Datos del inversor SUNNY CENTRAL 2500-EV / 2750-EV.....	44
Figura 3.10-2 Diagrama esquemático de los ángulos en consideración para el cálculo de la distancia mínima entre módulos fotovoltaicos.....	46
Figura 3.10-3 Diagrama esquemático de la distancia mínima entre módulos para la inclinación más crítica del sol en el año (solsticio de invierno).....	48
Figura 3.10-4 Diagrama esquemático de la superficie total del módulo fotovoltaico con su sombra más crítica.	49
Figura 3.10-5 Fotografía de la ciudad de Apatzingán con dirección hacia Tepalcatepec.	50
Figura 3.10-6 Fotografía de Tierracaliente desde el poblado de Acahuato, municipio de Apatzingán.	50
Figura 3.10-7 Fotografía de Tierracaliente desde La Cuchilla, municipio de Buenavista.....	50
Figura 3.10-8 Fotografía de Apatzingán desde Acahuato, municipio de Apatzingán.	51
Figura 3.11-1 Diagrama esquemático de la central de 300 MW.	52
Figura 4.2-1 Estrategia de Generación para satisfacer la demanda.	55
Figura 4.2-2 Asignación de unidades para cubrir la demanda del SEN.	55
Figura 4.2-3 Gráfica comparativa en generación de energía eléctrica anual de cada central.	56
Figura 4.3-1 Calculadora de emisiones	58
Figura 4.4-1 Programa de inversiones de rehabilitación y modernización de centrales generadoras (millones de pesos de 2013).....	61
Figura 4.4-2 Costos de paneles de la marca Solartec®.	62
Figura 4.4-3 Desglose de costos de los sistemas fotovoltaicos convencionales en los Estados Unidos, 2010	63
Figura 4.4-4 Desglose de costos de sistemas residenciales, comerciales y de escala utilitaria en los Estados Unidos, 2010	63
Figura 4.4-5 Gráfica comparativa del costo de inversión de cada central eléctrica.....	64
Figura 4.4-6 Gráfica de comparación del costo de mantenimiento de cada central eléctrica.....	66
Figura 4.4-7 Comparativa de costos para un mismo año de inicio de operaciones de cada central eléctrica.	68
Figura 5.1-1 Decremento anual del coste de los sistemas fotovoltaicos.	72
Figura 5.1-2 Incremento proyectado del costo de combustibles fósiles en diferentes escenarios.	72
Figura 5.1-3 Costos de cada central después de 30 años de operación.....	73

Lista de Tablas

Tabla 1.3-1 Ventajas y desventajas de las fuentes renovables de energía.....	2
Tabla 3.7-1 Radiación promedio en distintos puntos de la región de Tierracaliente, Michoacán.	35
Tabla 3.7-2 Temperaturas máximas en grados centígrados registradas en el año en distintos puntos de Tierracaliente, Michoacán.....	36
Tabla 3.9-1 Especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico a utilizar.....	40
Tabla 4.3-1 Resumen del daño ambiental de cada central eléctrica.	59

Símbolos y abreviaturas

A	Ampere (unidad de corriente eléctrica)
V	Volt (unidad de potencial eléctrico)
W	Watts (unidad de potencia)
Wh	Watts-hora (unidad de energía)
TW/TWh	Terawatts/hora = 1000000000000 W/Wh
GW/GWh	Gigawatts/hora = 1000000000 W/Wh
MW/MWh	Megawatts/hora = 1000000 W/Wh
kW/kWh	Kilowatts/hora = 1000 W/Wh

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes Históricos

La energía ha sido siempre un factor clave a la hora de progresar como sociedad, puesto que es necesario dominar ciertas fuerzas para el sustento de la forma evolutiva de vida social. Entonces, la obtención y uso de energía puede ser catalogada como el progreso o la evolución social. Partimos entonces de la necesidad de dominar la energía mecánica, mover, formar y deformar grandes y/o rígidos objetos o materiales, recorrer grandes distancias en busca de descubrimiento cuando aún no llegaba el sedentarismo y que con la simple fuerza humana si no es que imposible, era muy tardado. También con la energía calorífica, surge la necesidad de mantener el calor corporal después del descubrimiento del fuego. Ejemplos burdos pero que sin duda llevaron a la penuria de buscar fuentes de energía que compensasen las demandas de la sociedad evolutiva.

En primera instancia se recurrió al uso de bestias para llevar a cabo gran parte de procesos que requerían fuerza o resistencia sobrehumana. Posteriormente con el descubrimiento del potencial energético de combustibles fósiles la humanidad dio un gran salto evolutivo, haciendo más eficientes los procesos y desarrollando tecnología como nunca, gracias a esta nueva y gran forma de energía. La generación de la electricidad, (con base en combustibles fósiles) como forma de energía, gradualmente trajo consigo mucho más desarrollo para las sociedades. Actualmente, los combustibles fósiles sostienen y han sostenido la civilización y los más grandes avances tecnológicos.

1.2 Introducción

Como bien es sabido y constantemente citado, hoy en día y desde hace ya muchos años, el consumo desmedido de energía y con la creciente población en todo el mundo, los combustibles fósiles o fuentes no renovables de energía del planeta se están agotando, son muy contaminantes y cada vez más costosos. Situación que orilla a la humanidad a optar por fuentes, para la generación de energía eléctrica, que sean enteramente reversibles y factibles económicamente. Fuentes que sean más directas y no lleven procesos de millones de años en su formación, como son los derivados del petróleo, carbón mineral y elementos radioactivos, dicho de otra manera, que no se acaben y que no contaminen en tal magnitud.

Por lo tanto, en este trabajo se abordarán temas de diversas fuentes limpias de generación, energía solar, así como la forma de convertir la energía solar en energía eléctrica, de una manera directa y no contaminante, finalizando con el diseño de una central de energía renovable de gran potencia, para representar el contraste con las grandes plantas generadoras de combustibles fósiles. La cual se analizará en cuanto a generación de energía, impacto ambiental, y costos tanto de inversión, mantenimiento y operación.

1.3 Las Fuentes Renovables

Toda vida en la tierra es sostenida por la energía del sol. Plantas y animales pueden almacenar energía y un poco de esta energía permanece con ellos incluso cuando mueren. Es esta permanencia de energía en plantas y animales de la prehistoria, la que da lugar a los combustibles fósiles de hoy en día [3].

Los combustibles fósiles son fuentes no renovables porque algún día se acabarán. Quemar combustibles fósiles genera gases de efecto invernadero y confiar en ellos para la generación de energía eléctrica es insostenible [3].

Así entonces, la necesidad de encontrar más formas renovables y sostenibles de generar energía. Renovables o recursos infinitos de energía son fuentes de poder que rápidamente se recuperan por sí mismas y pueden ser usadas una y otra vez.

Las fuentes renovables según son de rápida recuperación por sí mismas y pueden ser usadas una y otra vez. Por esta razón son muchas veces llamadas fuentes de energía renovables infinitas [3]. En la tabla 1.1 se muestra la clasificación de las fuentes renovables de energía.

Tabla 1.3-1 Ventajas y desventajas de las fuentes renovables de energía [3].

Tipo de energía	Cómo es obtenida	Ventajas	Desventajas
Solar (Fotovoltaica)	<ul style="list-style-type: none"> La energía de sol (Luz) es capturada en paneles solares y convertida en electricidad 	<ul style="list-style-type: none"> Potencialmente un suministro infinito de energía. Viviendas simples pueden tener su propio suministro de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> Actualmente su manufacturación es muy costosa La eficiencia es relativamente baja.

Tipo de energía	Cómo es obtenida	Ventajas	Desventajas
Viento	<ul style="list-style-type: none"> Turbinas de viento que convierten el viento en energía eléctrica. 	<ul style="list-style-type: none"> Pueden ser usadas de manera singular pero más usualmente en granjas de "viento". Potencialmente un suministro infinito de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> La manufactura e implementación de granjas de viento puede ser muy costoso. Algunas personas locales se oponen a estos sistemas argumentando que estropea el campo
Termosolar	<ul style="list-style-type: none"> Mediante colectores solares cilíndricos o parabólicos para transformar el agua dentro de ellos en vapor y así mover una turbina. 	<ul style="list-style-type: none"> Confianza en generación de electricidad relativamente constante con ciclos Rankine y Brayton de manera ecológica. Generación de gran potencia debido al uso convencional de vapor para mover turbinas. 	<ul style="list-style-type: none"> El mantenimiento es muy constante debido a la exposición al medio ambiente. Los materiales para su construcción son muy costosos.
Olas	<ul style="list-style-type: none"> El movimiento del agua de mar dentro y fuera de una cavidad en la orilla, comprime el aire atrapado, moviendo una turbina. 	<ul style="list-style-type: none"> Ideal para un país de isla. Tienden a ser mejor operadas de manera pequeña y local, que a escala nacional. 	<ul style="list-style-type: none"> Construcción puede ser costosa. Tal vez sean rechazadas por locales o grupos ambientalistas.

Tipo de energía	Cómo es obtenida	Ventajas	Desventajas
Marea	<ul style="list-style-type: none"> • El movimiento de las mareas mueve turbinas. • Una presa de marea (una especie de presa) es construida a través de estuarios, forzando el agua a pasar a través de brechas. • En el futuro, las turbinas sumergibles tal vez sea posible montarlas fuera en el mar y sin presas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ideal para islas como lo es Japón Australia, Reino Unido, etc. • Potencial para generar mucha electricidad. • Las presas de marea pueden funcionar como puente y prevenir inundaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • La construcción de estas presas es muy costosa. • Solo unas pocas son adecuadas. • Opuestas para algunos grupos ambientalistas por tener un impacto negativo en la vida salvaje. • Puede reducir el flujo de mareas e impedir el flujo de aguas residuales fuera del océano.
Hidroeléctrica	<ul style="list-style-type: none"> • Energía aprovechada del movimiento de agua a través de ríos, lagos, y embalses. 	<ul style="list-style-type: none"> • La energía hidráulica constituye una de las energías renovables más importantes del planeta. • Se tiene una alta eficiencia en este tipo de sistemas • La energía hidráulica es una energía renovable. 	<ul style="list-style-type: none"> • La construcción de presas y embalses modifica y altera en gran medida y de manera dañina el medio ambiente que la rodea. • La obra civil es muy costosa
Biomasa	<ul style="list-style-type: none"> • Por combustión de esta, es la energía solar almacenada en 	<ul style="list-style-type: none"> • Es una energía prácticamente ilimitada debido a que su 	<ul style="list-style-type: none"> • Las características de esta energía la hacen no

Tipo de energía	Cómo es obtenida	Ventajas	Desventajas
	los seres vivos, vegetales o animales por medio del proceso de fotosíntesis (vegetales) y la digestión (comida) de estos vegetales por los animales.	regeneración es relativamente rápida, y es mucho menos contaminante que los combustibles fósiles.	almacenable (en grandes cantidades) y no transportable, por lo que la producción y el consumo prácticamente coinciden en el tiempo y en el espacio.
Geotérmica	<ul style="list-style-type: none"> En perforaciones efectuadas sobre campos hipertérmicos, el agua caliente o el vapor se emplean para mover turbinas de vapor y producir electricidad. 	<ul style="list-style-type: none"> A escala humana, la energía geotérmica puede considerarse una energía renovable, en el sentido que su duración puede considerarse ilimitada. 	<ul style="list-style-type: none"> Su aprovechamiento solo es posible en aquellas zonas donde el calor se aproxima a la superficie.

1.4 Objetivos Generales

- Establecer propuestas de generación de energía eléctrica a nivel nacional usando fuentes renovables.
- Ser parte de la meta de la nueva reforma energética que pretende un 35% de generación con fuentes renovables para el año 2024 [2].
- Diseñar un proyecto que pueda ser implementado en un futuro temprano dentro de la región de Tierracaliente de Michoacán, para ayudar a resolver la creciente demanda de energía eléctrica.
- Ayudar a resolver la problemática de empleos del estado de Michoacán, mediante la implementación de este proyecto o similares.

1.5 Objetivos Específicos

- Emplear los conocimientos adquiridos a lo largo de mi carrera para ayudar a enfrentar un reto en específico de carácter nacional.
- Desarrollar un proyecto, que consiste en obtener datos necesarios y convenientes para el diseño una central fotovoltaica de gran potencia para conectarse al sistema eléctrico nacional.
- Calcular la cantidad de paneles para conexión y formación de bloques, de dichos módulos solares, con un determinado número de inversores.
- Analizar el costo, factores ambientales y generación de energía eléctrica para la comparativa con centrales convencionales de gran potencia.

1.6 Justificación

El presente trabajo es una iniciativa, con un diseño basado en investigaciones previas y cálculos, para sumarse a la prospectiva de la nueva reforma energética, que pretende alcanzar el 35% de generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables [2]. Siendo México un país muy rico en radiación solar [1] y puesto que, no se ha hecho una inversión a profundidad para distinguir por está forma de energía, como en otras fuentes renovables de energía, eólica, por ejemplo en [4] y [5], se opta por explotar dicho potencial energético, especialmente en el área de Tierracaliente en Michoacán, debido a que a lo largo de mis recorridos por la región y observaciones cautelosas me he dado cuenta de las condiciones óptimas de este recurso renovable y particulares de terreno llano.

Sumado a todo lo anterior se justifica el creciente precio de los combustibles fósiles convencionales [6] y en gran medida la contaminación que estos desprenden a la hora de extraer su potencial energético, contrastado con el constante y cada vez más notable descenso de los precios de equipos y sistemas solares [7], [8].

El desarrollo de este trabajo también se excusa de la falta de empleos en la mencionada región pretendiendo ayudar a combatir este problema que afecta también de manera indirecta al resto del estado [9].

Se utiliza, por lo tanto, este esquema de fuente renovable, valiéndose de todas las ventajas que en los últimos años ha ido adquiriendo haciéndolo cada vez más rentable y muy confiable, así como eficaz y eficiente.

1.7 Metodología

El presente trabajo se ha desarrollado mediante trabajos de investigación que conllevan lecturas y búsqueda de datos y estadísticas de la situación actual de la energía eléctrica en México y en el mundo, partiendo de energéticos como los hidrocarburos y extendiéndose

hasta las fuentes renovables, valiéndose de bibliografía reciente, estudios y artículos de revistas, periódicos y científicos. Se ha tomado en cuenta gran parte de la presente reforma energética del gobierno federal mexicano, desde su justificación hasta sus conclusiones. Se llevaron a cabo cálculos mediante software que arrojan datos de diseño y exploración con herramientas satelitales en páginas de internet. Se ha aprovechado la experiencia de un curso en paneles fotovoltaicos para avalar esta investigación en campo, así como el conocimiento adquirido en prácticas profesionales en una empresa de energías renovables.

1.8 Contenido de la Tesis

En el capítulo 1 contempla la introducción del presente trabajo de tesis, mencionándose las fuentes de energía renovable, ventajas y desventajas, así como la justificación y metodología que se siguió para darle forma.

El capítulo 2 abarca el marco teórico y los antecedentes de centrales eléctricas, así como la explicación de conceptos necesarios para su posterior uso en los demás capítulos. Cabe destacar que, en este capítulo, se encuentran centrales tanto de fuentes renovables como no renovables.

El capítulo 3 contiene el tema principal, que es el diseño de una central fotovoltaica de gran potencia. Se encontrarán los datos que hay que tomar en cuenta de condiciones ambientales, solares, etc. los cálculos necesarios para el diseño, medidas, dimensiones de paneles y la conexión que llevarán representada en conjuntos de bloques.

En el capítulo 4 se caracterizarán las centrales eléctricas de gran potencia, por su capacidad de generación de energía, impacto ambiental, costo, etc. Para hacer el contraste con la central fotovoltaica en diseño y determinar ventajas y desventajas en todas sus partes.

El capítulo 5 comprende las conclusiones obtenidas de la investigación, el diseño, comparativa con centrales convencionales y la forma de implementación del proyecto fotovoltaico de gran potencia, así como gráficas relativas y porcentajes.

Finalmente se tiene la bibliografía, las consultas de sitios web, programas utilizados, recursos web satelitales, artículos de revistas científicas y periódicos nacionales e internacionales.

Capítulo 2

Antecedentes de Centrales Eléctricas

El uso de la energía eléctrica ha sido el factor clave para el desarrollo de la humanidad como se mencionó en la sección 1.1.

Según la primera ley de la termodinámica: la energía no se crea ni se destruye, se conserva. Así entonces, la energía eléctrica no puede ser creada, tiene que producirse a partir de una fuente, mediante procesos químicos, mecánicos atómicos, la combinación de algunos de éstos, etc.

En un principio y actualmente el sistema eléctrico que nos rige, tanto en México como en el mundo, es sustentado por centrales eléctricas convencionales (no renovables en su mayoría), ya sean de carbón, petróleo e hidroeléctricas. Esto se debe a que estas centrales utilizan fuentes confiables de suministro, lo que quiere decir que se tiene un combustible principal o recurso principal para utilizarse de manera controlada y mantener un suministro de energía eléctrica constante y estable.

Durante los últimos 200 años, una proporción cada vez mayor de la energía que utilizamos proviene de fuentes no renovables, como lo son el carbón y el petróleo [3].

2.1 Centrales Termoeléctricas

Las centrales termoeléctricas basan su funcionamiento en la ignición de algún tipo de combustible (por lo general fósil) para transformar agua circulante, dentro de una caldera, en vapor y de esta manera, introducir el vapor a cierta presión a una turbina y así lograr un movimiento rotatorio, el vapor que sale de la turbina es condensado nuevamente mediante enfriadores o naturalmente para transformarlo en agua, la cual es reiteradamente introducida a la caldera. La turbina es conectada mediante una flecha a un generador eléctrico el cual, con su movimiento rotatorio, rompe campos magnéticos y produce una corriente alterna.

Lo anterior significa que estas centrales trabajan mediante ciclo termodinámico Rankine de potencia para agua-vapor. El ciclo Rankine refleja el comportamiento de un sistema formado por cuatro unidades donde se aplican cuatro procesos al fluido de trabajo, como lo representa la figura 2.1-1 [10].

1. Proceso adiabático reversible (isoentrópico) en la turbina de 1 a 2. El fluido pierde

presión y se obtiene trabajo [10].

2. Proceso isobárico de enfriamiento con cambio de fase en el condensador. Desde 2 a 3 [10].
3. Proceso adiabático reversible (isoentrópico) en la bomba del estado 3 al estado 4 en la región líquido. Se realiza un trabajo sobre el sistema [10].
4. Proceso isobárico de calentamiento con cambio de fase de líquido a vapor en la caldera. De 4 a 1 [10].

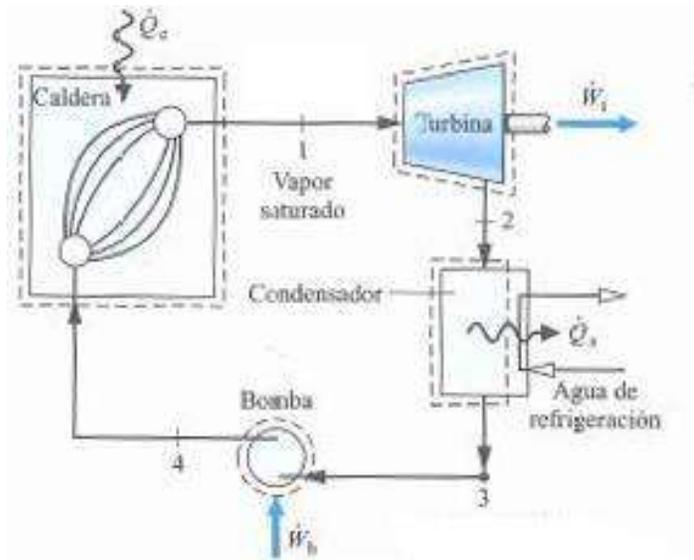


Figura 2.1-1 Representación termodinámica de los equipos utilizados en el ciclo de potencia Rankine: bomba, caldera, turbina y condensador [10].

El ciclo Rankine es la representación física de un sistema termodinámico donde se considera que los procesos transcurren de manera ideal. En el proceso industrial, sin embargo, existen caídas de presión, irreversibilidades debidas a la fricción y pérdidas de calor que condicionan que no todo el calor disponible en la materia prima utilizada pueda ser convertida en trabajo, definiendo así el concepto de rendimiento térmico del proceso [10].

La figura 2.1-2 muestra el sistema que generalmente rige a estas centrales para la producción de energía eléctrica.

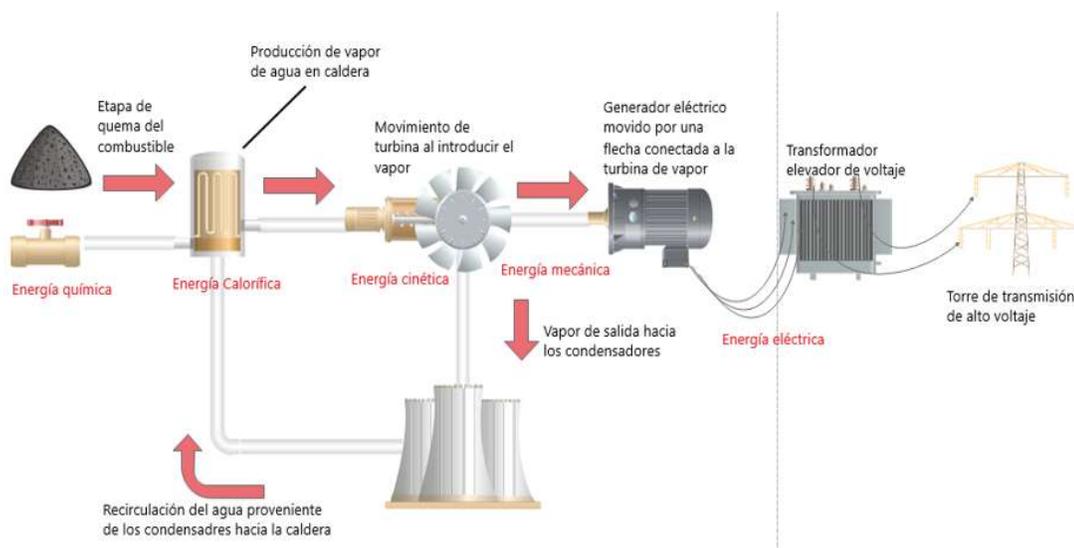


Figura 2.1-2 Esquema convencional de una central termoeléctrica.

Estas centrales por lo general son construidas en puntos estratégicos, en donde se encuentra la fuente primaria de energía [11], de otro modo, se tiene que pensar en el transporte del combustible fósil. Las plantas de generación termoeléctricas producen la mayor parte de la energía eléctrica en México [11].

Las centrales termoeléctricas generalmente constan de los siguientes equipos.

- Caldera: Es el equipo en donde sucede la ignición del combustible y la evaporación del agua circulante.
- Turbina: Máquina que transforma la energía cinética del vapor proveniente de la caldera en energía mecánica, al chocar con los alabes y lograr un movimiento rotacional.
- Generador eléctrico: Equipo que se conecta mediante una flecha a la turbina para tomar la energía mecánica y transformarla en energía eléctrica mediante la ruptura de campos magnéticos al rotar según el fenómeno de inducción electromagnética.
- Condensador: Aquí es donde entra el vapor de la salida de la turbina para transformarlo nuevamente en agua con la ayuda de las torres de refrigeración.
- Torre de refrigeración: Estas torres ayudan a la condensación del agua, igualando su temperatura a la del medio ambiente, mediante un circuito de agua independiente.

- Equipo de tratamiento de gases de combustión: Emplea sistematizaciones de separación a los gases de combustión, antes de su liberación a la atmósfera.
- Chimenea: Torre que dirige el escape de los gases de combustión hacia la atmósfera.

Las centrales termoeléctricas que utilizan combustibles fósiles se clasifican de acuerdo al tipo utilizado para su ignición; siendo el proceso similar en todas.

- ❖ Centrales Termoeléctricas de petróleo.
- ❖ Centrales Termoeléctricas de carbón.
- ❖ Centrales Termoeléctricas de gas.
- ❖ Centrales Termoeléctricas de turbogas.

Estas centrales tienden a tener una eficiencia del orden del 30 al 40% con ciclos Rankine convencionales [12]. Para aumentar la eficiencia de estos procesos de potencia, existen centrales con ciclos combinados.

Consiste en el acoplamiento de dos ciclos termodinámicos, uno donante y uno receptor, que generan potencia a partir de energía calorífica mediante la utilización de una turbina de vapor y una turbina de gas. El combustible que se requiere para el funcionamiento del proceso es el gas natural o gas de síntesis [10].

El ciclo que opera con el circuito de agua-vapor es el ciclo Rankine previamente explicado para el proceso de ciclo convencional. El otro ciclo de potencia que complementa al ciclo Rankine es el ciclo Brayton [10] como se muestra en la figura 2.1-3.

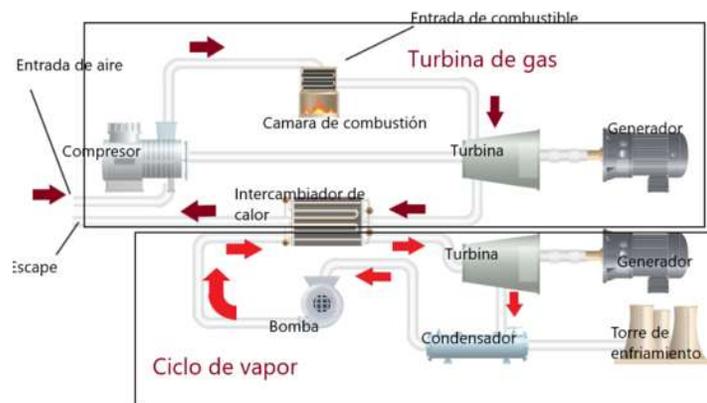


Figura 2.1-3 Representación esquemática del ciclo combinado.

2.2 Centrales Nucleoeléctricas (de fisión)

Las centrales nucleoeeléctricas son una opción muy favorable para la producción de grandes cantidades de energía eléctrica de manera constante, confiable y robusta; ideales en la mayoría de los sistemas eléctricos interconectados para satisfacer la demanda base de energía. Su funcionamiento es completamente similar al de una central termoeléctrica convencional, la diferencia radica en la forma de transformar el agua en vapor al no tener estas una caldera sino un reactor (figura 2.2-1).

El combustible para estas centrales principalmente es el uranio enriquecido ^{235}U , que pasa a través de una serie de procesos químicos después de ser extraído de la naturaleza para su posterior uso como combustible nuclear.

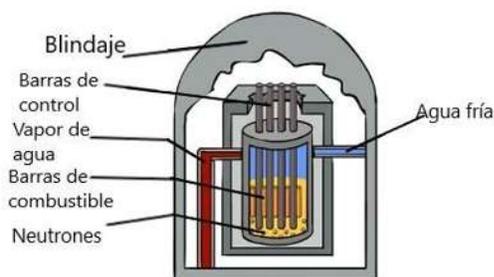


Figura 2.2-1 Reactor de una central termonuclear.

Un reactor nuclear está formado por los siguientes componentes [13]:

- Barras de combustible nuclear: Son el lugar físico en donde se confina el combustible nuclear.
- Barras de control: Proporcionan un medio rápido para controlar la reacción nuclear en cadena. Permiten realizar cambios rápidos de potencia del reactor.

La reactividad del núcleo aumenta o disminuye subiendo o bajando las barras de control, es decir, modificando la presencia de material absorbente de neutrones contenido en ellas.

- Moderador: Sirve para reducir la velocidad de los neutrones resultantes de una reacción anterior y sean más propensos a ser bombardeados e iniciar nuevas reacciones en cadena.
- Refrigerante: La función del refrigerante es absorber la energía térmica de las reacciones y transportarla.

Los refrigerantes más usuales son gases, como el anhídrido carbónico y el helio, y líquidos como el agua ligera y el agua pesada.

- Blindaje: Cuando el reactor esté en operación, se genera gran cantidad de radiación. Es necesaria una protección para aislar a los trabajadores de la instalación de las radiaciones ocasionadas por los productos de fisión. Por ello, se coloca un blindaje biológico alrededor del reactor para interceptar estas emisiones. Los materiales más usados para construir este blindaje son el hormigón, el agua y el plomo.

El funcionamiento básico de una central térmica nuclear es la siguiente:

La fisión nuclear del átomo de uranio por impacto de neutrones genera una gran cantidad de energía térmica que se puede aprovechar mediante una turbina de vapor. La energía liberada por la fisión controlada en un reactor nuclear calienta un circuito de agua líquida hasta que pasa a estado de vapor y se envía al grupo turbina-alternador para la transformación a energía mecánica y posteriormente a energía eléctrica [10].

El circuito de agua es en realidad el radiador del reactor, ya que si esta dejase de funcionar el reactor se sobrecalentaría y podría explotar y causar un desastre enorme en el medio ambiente.

Por lo tanto, el lugar en donde sucede la fisión del uranio, por impacto de neutrones, se conoce como reactor, a partir de ahí, el circuito de potencia es el mismo que una central termoeléctrica de combustible fósil. El ciclo Rankine se mantiene como se muestra en la figura 2.2-2.

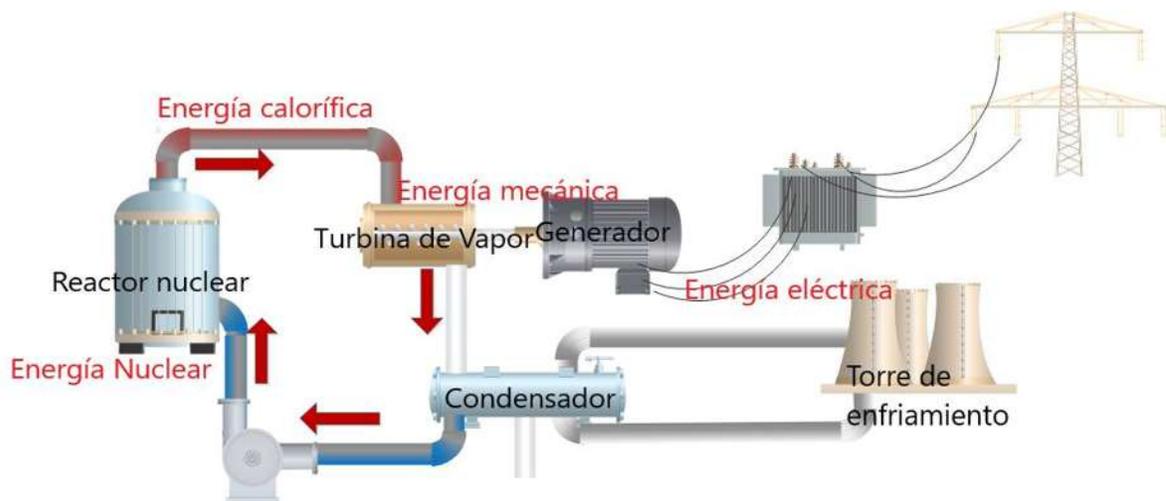


Figura 2.2-2 Esquema de funcionamiento de una central nucleoelectrica.

2.3 Centrales Geotermoeléctricas

La Tierra, además de disponer de energía procedente del exterior, fundamentalmente del Sol, que da origen, directa o indirectamente, a diversos tipos de energías renovables (solar, eólica, oleaje, maremotérmica, biomasa, etc.), también dispone de energías endógenas. Un tipo de energía endógena es la energía térmica, la cual proviene de la importante cantidad de calor que la Tierra almacena en su interior. Por su procedencia, a esta energía térmica interna de la Tierra se les denomina energía geotérmica y se la incluye dentro del grupo de energías renovables, ya que la disipación del calor almacenado requeriría el transcurso de millones de años [14].

Así entonces, a escala humana, se muestra como fuente inagotable de energía calorífica. Presente de manera concisa en los volcanes activos y disponible debido al agua fría que, del deshielo de montañas o las lluvias, se filtra a través de las rocas porosas, dando lugar a mantos acuíferos o ríos subterráneos; al tener contacto estos mantos con rocas calientes o magma se crean concentraciones de vapor y/o yacimientos en la superficie (fuentes termales).

Cuando el calor almacenado en los yacimientos geotérmicos se encuentra a profundidades razonables para poder extraerlo, con la tecnología existente, es posible aprovecharlo energéticamente [14].

La explotación de esta fuente de energía se realiza perforando el suelo y extrayendo el agua, su vapor, o una mezcla de ambos, que sirven de vehículo de transporte [14]. De la misma manera que ocurre con las centrales termoeléctricas convencionales (véase sección 2.1). La manera de aprovechamiento es con la utilización de la energía calorífica del vapor a presión suficiente para operar una turbina que se acopla a un generador eléctrico mediante una flecha y produzca corriente eléctrica (Figura 2.3-1).

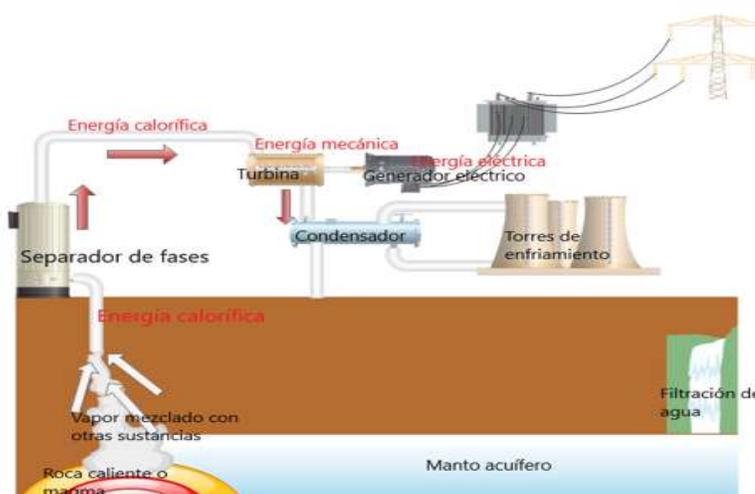


Figura 2.3-1 Esquema conceptual de una planta geotérmica para generación de energía eléctrica.

Existen diversos tipos de sistemas para el aprovechamiento de fuentes geotérmicas de alta entalpía. Entre éstos se pueden destacar los cuatro siguientes [14]:

- **Sistemas de conversión directa.**
Los sistemas de conversión directa se utilizan en aquellos yacimientos hidrotérmicos donde predomina el vapor seco. En este caso, el vapor supercalentado que llega a la superficie se emplea directamente, después que las partículas sólidas y los gases no condensables hayan sido separados
- **Sistemas de expansión súbita de una etapa.**
Se emplean en los yacimientos hidrotérmicos donde predomina el agua líquida. En estos sistemas, el agua puede expansionarse súbitamente durante el ascenso a la superficie o mediante el empleo de un recipiente de expansión, originando que parte del líquido se evapore instantáneamente. Por tanto, es necesario utilizar un separador de fases que permita dirigir el vapor hacia la turbina y el agua no evaporada hacia el acuífero.
- **Sistemas de expansión súbita de dos etapas.**
Se emplean en los yacimientos hidrotérmicos donde predomina el agua líquida con bajos contenidos de impurezas. Tienen como objetivo mejorar el rendimiento de los sistemas de expansión de una etapa. Las diferencias de los sistemas de una etapa frente a los de dos etapas se encuentran en la existencia de dos etapas de expansión del agua que llega a la superficie desde el acuífero y en que la turbina dispone de dos cuerpos; un cuerpo que trabaja a alta presión y un cuerpo que trabaja a baja presión.
- **Sistemas de ciclo binario.**
Los sistemas de ciclo binario pueden ser utilizados en los yacimientos hidrotérmicos de entalpía media, donde predomina el agua líquida.
Admiten la explotación de yacimientos con acuíferos con un mayor porcentaje de impurezas.
El líquido extraído del acuífero, una vez ha cedido su calor al fluido de trabajo en el intercambiador de calor, retorna de nuevo al yacimiento. El fluido secundario trabaja de acuerdo con el ciclo convencional Rankine.

2.4 Centrales Hidroeléctricas

La energía hidráulica es la energía cinética del movimiento de masas de agua y la energía potencial del agua disponible a una cierta altura [14].

Su origen es la evaporación del agua de océanos, lagos, etc. por la acción de la energía solar y que cae en forma de lluvia o nieve en cotas altas de la superficie terrestre. Por tanto, se trata de una energía renovable procedente de un pequeño porcentaje de la energía solar que llega

a la Tierra [14].

El otro porcentaje se debe a la fuerza de gravedad ejercida por el mismo planeta, la cual hace que la masa o masas de agua se desplacen en uno o varios sentidos. El concepto de aprovechamiento para la producción de energía eléctrica es sencillo; creando alturas artificiales para la retención del líquido y haciéndolo pasar por un ducto hacia una turbina; que se sitúa en la base de del salto de agua y se conecta mediante una flecha a un generador eléctrico. El esquema básico se muestra en la figura 2.4-1.

Las instalaciones hidroeléctricas se suelen clasificar en función de diferentes parámetros (altura efectiva del agua, capacidad instalada, tipo de tecnología empleada, etc.) [14].

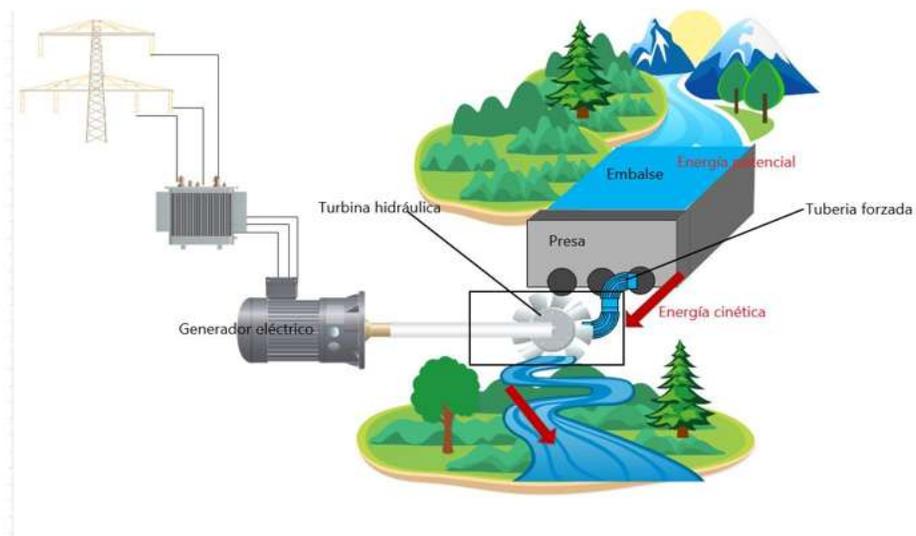


Figura 2.4-1 Esquema básico de una central hidroeléctrica.

Para transformar la energía cinética y potencial del agua en energía mecánica de rotación se utilizan dispositivos denominados turbinas hidráulicas, las cuales, acopladas al eje de un generador eléctrico, le imprimen el movimiento de giro necesario para que éste produzca energía eléctrica [14].

Las plantas hidroeléctricas se dividen en tres grupos, dependiendo de la caída del agua [11]:

1. Desarrollo de caída alta: Tienen caídas de más de 300 m y se utilizan turbinas Pelton de alta velocidad.
2. Desarrollo de caída mediana: Tienen caídas de entre 30 m y 300 m y se utilizan turbinas Francis de mediana velocidad.

- Desarrollo de caída baja: tienen caídas de menos de 30 m y se utilizan turbinas Kaplan o Francis de baja velocidad. Estas plantas de generación a menudo extraen la energía de las corrientes de los ríos.

En la figura 2.4-2 se presentan las diferentes turbinas hidráulicas mencionadas anteriormente en una gráfica del rango de utilización (en dirección de izquierda a derecha Pelton, Francis y Kaplan).

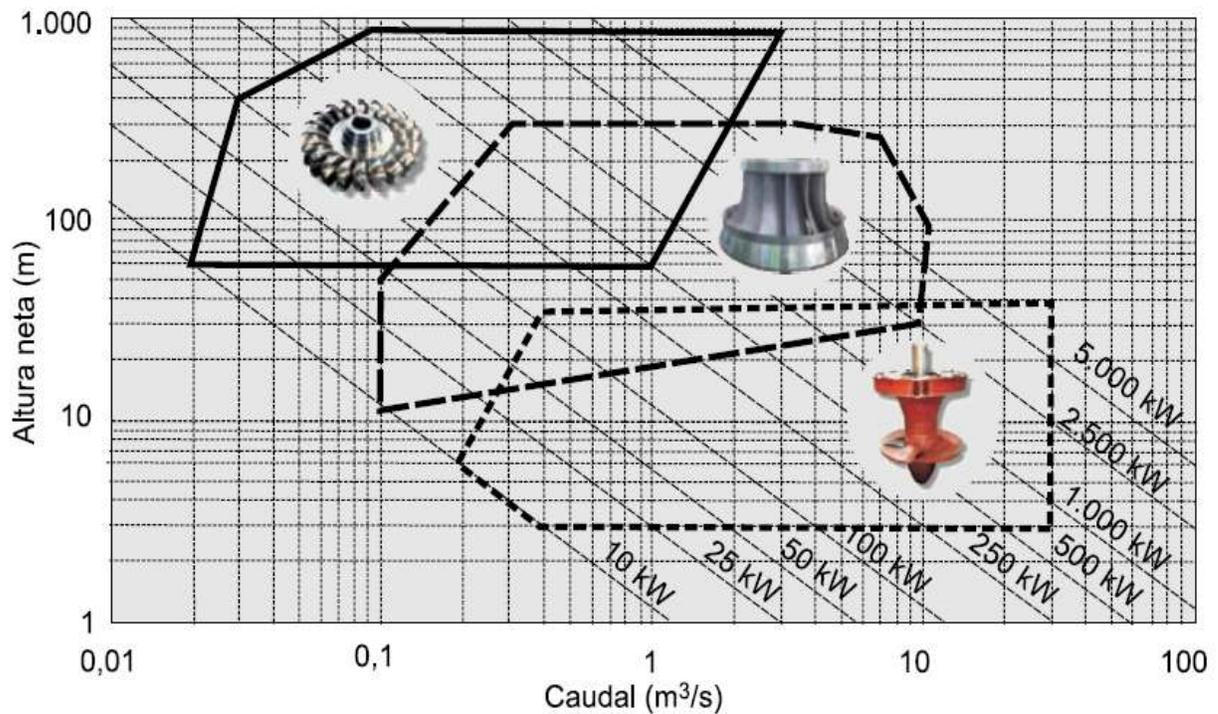


Figura 2.4-2 Rango de utilización de los diferentes tipos de turbinas [14].

En general, los componentes que conforman a las plantas hidroeléctricas son los siguientes:

- Presa: La presa o cortina es el muro de retención, se construye sobre lechos de ríos y crea el embalse de agua. Permite regular el flujo de agua para que se tenga un trabajo constante durante todo el tiempo.
- Tubería forzada: Las tuberías forzadas son ductos reforzados clavados entre las rocas que canalizan el agua hacia las cajas espirales que contienen las turbinas hidráulicas.
- Turbina hidráulica: La turbina hidráulica es el equipo necesario para la conversión de la energía cinética del agua en energía mecánica. Es un dispositivo que mediante el choque del agua con sus álabes produce un movimiento de rotación.
- Equipo eléctrico: Conformado por el generador eléctrico que recibe la energía mecánica de la turbina y la convierte en energía eléctrica; y el transformador, el cual eleva el voltaje de la energía eléctrica para su transmisión.

Existen otros mecanismos que pueden o no tener las plantas hidroeléctricas:

- Compuertas que permiten regular el agua en el embalse.
- Válvulas, dispositivos que permiten controlar y regular la circulación del agua por las tuberías [15] y, por lo tanto, regular la velocidad de giro de las turbinas.
- Chimeneas de equilibrio que son unos pozos de presión de las turbinas que se utilizan para evitar el llamado “golpe de ariete”, que se produce cuando hay un cambio repentino de presión debido a la apertura o cierre rápido de las válvulas en una instalación hidráulica [15].

2.5 Centrales Eólicas

Estas plantas aprovechan la energía cinética del viento. El viento es generado por la diferencia de temperatura entre zonas de la superficie terrestre, diferencias generadas por el calentamiento irregular que proporciona el sol; como consecuencia de esto, se crean diversas zonas de presión en la atmósfera, fluyendo así el aire de la parte más fría a la más caliente o de la de mayor presión a la de menor presión atmosférica.

El aprovechamiento de la energía del viento remonta su origen a los molinos de viento desde antes de la edad media (figura 2.5-1). El gran potencial que tenía en ciertas zonas hacía que fuese fundamental para trabajos de gran fuerza como moler grano y el bombeo de agua.



Figura 2.5-1 Molino de viento antiguo [16].

En el año 1973, como consecuencia de la primera crisis del petróleo, se inicia otro periodo en el campo del aprovechamiento eólico como fuente de energía, aunque en esta ocasión, compartiendo protagonismo con la energía solar, como recursos renovables y no contaminantes [17].

Actualmente se tienen parques eólicos en donde se genera energía eléctrica a partir de la energía cinética del viento, estas centrales eléctricas son colocadas o construidas en sitios con buen potencial eólico, de donde se han hecho estudios previamente.

Aunque es posible inferir la velocidad y, algunas veces, la dirección de los vientos por los cambios de las propiedades de la atmósfera, con frecuencia se necesita obtener medidas más

directas del movimiento atmosférico [14].

Para lo anterior se tienen sensores llamados anemómetros, utilizados para recopilar datos durante un tiempo y así obtener variaciones reales del viento en cierta zona. Asumiendo estos datos y llevando a cabo estudios de factibilidad con complejas series de tiempo. Se generan predicciones para determinar si un sitio en específico tiene o no potencial para colocar un parque eólico y si a través del tiempo será sustentable y redituable.

Un parque eólico es la concentración, en un área con buen potencial de viento, de varias turbinas eólicas, con el fin de aprovechar la energía del viento de ese lugar. El parque eólico se muestra en la figura 2.5-2.

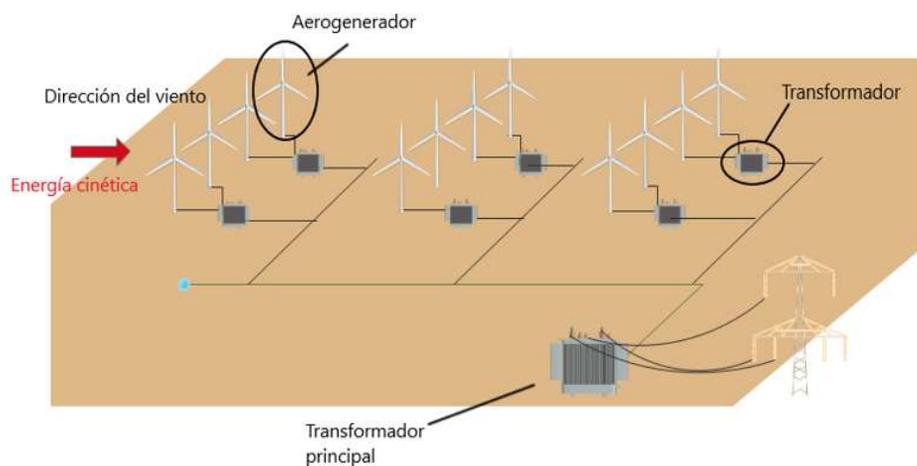


Figura 2.5-2 Diagrama esquemático de un parque eólico.

El equipo o equipos principales de una central de generación son, como se menciona anteriormente, los aerogeneradores; que son básicamente turbinas de viento, así como en temas atrás se han visto turbinas de gas a cierta presión (véase sección 2.1) o turbinas hidráulicas (véase sección 2.7) los aerogeneradores se valen del empuje del viento para producir un movimiento rotatorio y están compuestos de varios subsistemas para su funcionamiento.

De forma general pueden señalarse los siguientes subsistemas componentes [14] (figura 2.5-3):

- Subsistema de captación. El subsistema de captación es el encargado de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación. Está integrado por el rotor, el cual se compone de las palas y del buje
- Subsistema de transmisión mecánica. Un tren de potencia completo de un aerogenerador está compuesto por todas las partes en rotación de la turbina. Éstas

incluyen un árbol de baja velocidad (en el lado del rotor), acoplamientos, freno, caja multiplicadora de engranajes, y un árbol de alta velocidad (en el lado del generador).

- Subsistema de generación eléctrica. El sistema eléctrico de un aerogenerador incluye todos los dispositivos que intervienen en el proceso de conversión de la energía mecánica en energía eléctrica.
- Subsistema de orientación. El cambio de dirección del viento incidente hace necesaria la orientación del rotor situándole perpendicularmente a dicha dirección.
- Subsistema de regulación. Para generar potencia de forma óptima los subsistemas de las turbinas necesitan de un subsistema de control que enlace la operación de todos ellos.

El subsistema de control y regulación tiene la misión incrementar la captación de energía cinética del viento, mejorar la potencia eléctrica generada y garantizar un funcionamiento seguro de la máquina.

- Subsistema soporte. El subsistema está constituido por la góndola y la torre. La góndola está formada por el bastidor o estructura portante de acero en el que se montan la mayoría de los distintos subsistemas de la máquina eólica y la carcasa que, diseñada de forma aerodinámica, los protege de los agentes atmosféricos.

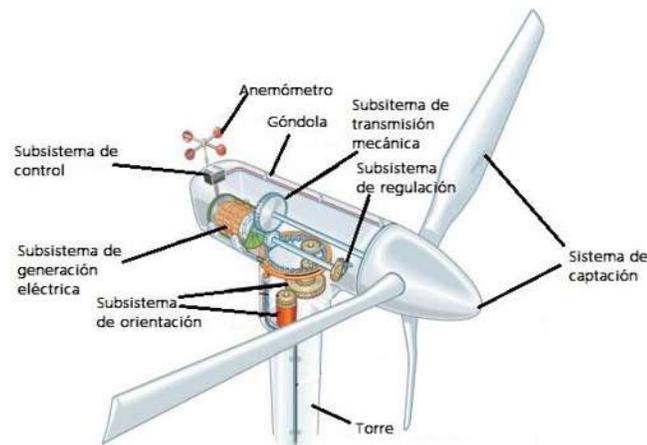


Figura 2.5-3 Figura esquemática de aerogenerador.

2.6 Centrales Mareomotrices

Las corrientes de los océanos, que son la causa que el mar fluya, se generan principalmente por la subida y bajada de las mareas, las cuales son consecuencia de la interacción gravitacional entre la Tierra, la Luna y el Sol [14].

La potencia asociada a las mareas se estima del orden de 3 TW. Sin embargo, para el aprovechamiento eficaz de la energía mareomotriz es necesario que la amplitud de las mareas sea al menos de cinco metros y que exista una bahía apropiada para la recogida y almacenamiento del agua en las pleamares. Además, la potencia disponible en las costas se reduce a valores del orden de 1 TW [14].

Existen dos métodos diferentes de extraer energía de las mareas [14].

Uno de ellos consiste en la utilización de la energía potencial del agua que se almacena en un estuario (el cual se separa del mar abierto mediante un dique con el propósito de constituir un depósito de almacenamiento) durante la pleamar [14].

En semejanza con las plantas hidroeléctricas, éstas plantas utilizan un salto de agua que es creado por la subida de la marea y posteriormente el embalsamiento del agua del mar mediante un dique que separa del mar abierto. Se coloca una turbina en el dique para "turbinar" mientras se llena el embalse. Algunas plantas permiten la que se turbinar el agua en ambos sentidos, es decir, cuando la marea sube y se llena el embalse y cuando la marea baja y se drena el embalse como se muestra en la figura 2.6-1.

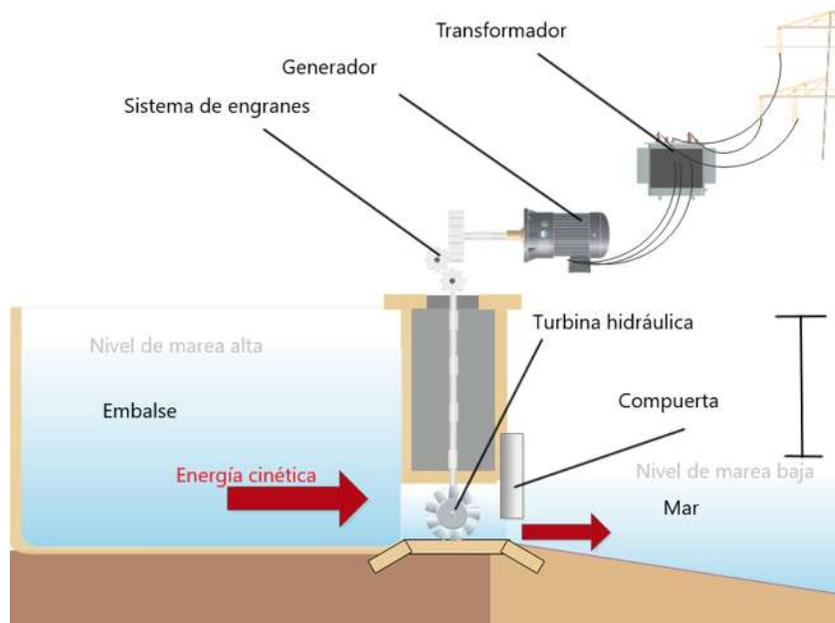


Figura 2.6-1 Diagrama esquemático de forma de aprovechamiento de la energía de mareas.

Debido a problemas que, al igual que las hidroeléctricas presentan, de deformar el terreno y con ello el ecosistema que existe en esa zona costera en donde se construye el dique, se ha optado también por un segundo método de aprovechamiento de la energía de las mareas.

El segundo método básicamente consiste en colocar una turbina dentro de una corriente marina, que es originada por las mareas, y aprovechar la energía cinética de esta para crear

un movimiento rotatorio en dicha turbina. En la figura 2.6-2 se muestra el proceso de este tipo de aprovechamiento de energía.

Para aprovechar la energía cinética de este tipo de corrientes se han diseñado dispositivos simples, parecidos a los rotores de las turbinas eólicas, que se sumergen en el mar a profundidades comprendidas entre 20 y 30 metros [14].

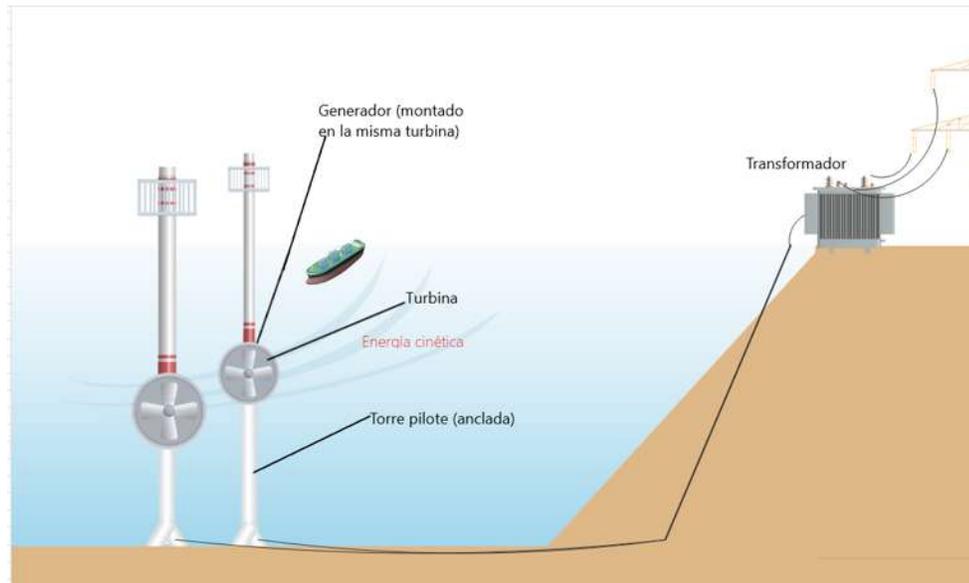


Figura 2.6-2 Diagrama esquemático de planta mareomotriz de turbinas ancladas.

Dentro de los dos sistemas de generación eléctrica con energía mareomotriz existen diversos métodos o configuraciones de colocación y/u orientación de las turbinas, incluso, diferentes tipos de turbinas; sin embargo, la forma de aprovechamiento es la misma para cada método respectivamente.

2.7 Centrales Termosolares

El Sol es el origen de la energía solar y de las otras fuentes renovables de energía. Esta estrella es un enorme reactor de fusión nuclear que transforma parte de su masa en energía de acuerdo con la ecuación de Einstein, $E=mc^2$, donde E es la cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa m ; c es la velocidad de la luz [14].

Al quemar el combustible nuclear el sol emite su energía al espacio exterior en forma de ondas electromagnéticas, que pueden desplazarse en el vacío. Estas ondas electromagnéticas alcanzan el planeta Tierra. Estos conceptos se explicarán en el capítulo 3 con mayor detalle.

Así, tenemos radiación solar que llega a la superficie terrestre en grandes cantidades. Esta radiación se descompone o se debilita conforme pasa las capas atmosféricas; sin embargo, un gran potencial queda disponible para su aprovechamiento con este tipo de centrales de generación eléctrica.

La forma de aprovechar esta energía es mediante el calentamiento de un líquido transportador de la energía calorífica obtenida con colectores solares, que reciben el calor de la radiación del sol.

La tecnología utilizada en la captación de la energía solar térmica de forma activa se puede clasificar, en función del margen de temperatura que se requiera, en tecnologías de [14]:

- Baja temperatura ($T < 90^{\circ}\text{C}$)
- Media temperatura ($90^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$)
- Alta temperatura ($T > 400^{\circ}\text{C}$)

La tecnología de baja temperatura usualmente es destinada a aplicaciones domésticas, el fluido no rebasa el punto de ebullición del agua como se vio anteriormente. El sistema se conforma por colectores solares planos y un tanque de almacenamiento de agua caliente, que se une al circuito de agua de los hogares o negocios y su uso es principalmente sanitario.

En cuanto a sistemas de media temperatura se tienen aplicaciones industriales y de generación eléctrica.

La generación de electricidad mediante la conexión del fluido caliente (hasta 400°C) utilizado por los colectores a un sistema convencional de producción de electricidad a partir de un ciclo térmico [14].

Estos sistemas de media temperatura para la generación de energía eléctrica se valen de un ciclo Rankine (véase sección 2.1), con un fluido primario o portador de calor en donde cederá su temperatura mediante un intercambiador de calor a un circuito de agua fluyente como se muestra en la figura 2.7-1. La forma de captación de la energía solar es por medio de colectores solares cilíndrico-parabólicos (colectores de concentración) que captan la radiación directa de mejor manera que un colector plano, ya que la superficie de captación es mayor y se concentra en un punto, además, se valen de un sistema de seguimiento para mayor aprovechamiento de energía solar.

Aunque el colector de concentración cilíndrico-parabólico es el más extendido hay que señalar que existe diversidad de tipos. Todos los modelos disponen de un sistema de seguimiento con el propósito de orientarlos en la mejor posición para captar eficazmente la radiación solar durante el transcurso del día [14].

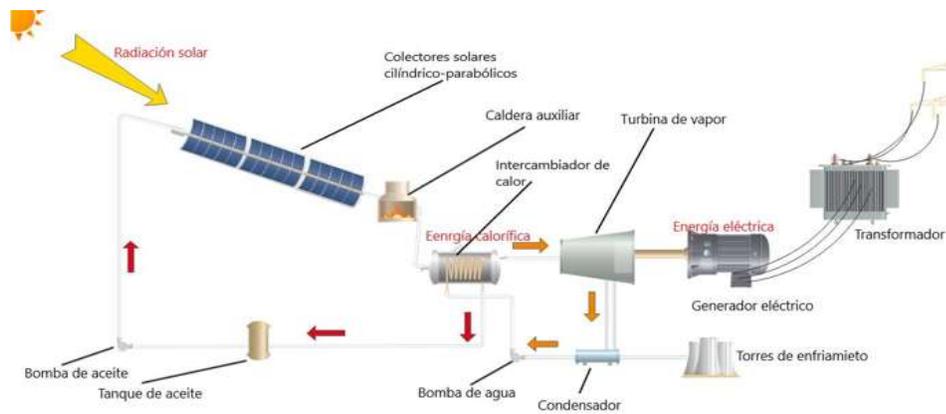


Figura 2.7-1 Diagrama general de una planta Termosolar de temperatura media.

La radiación solar directa es captada más apropiadamente en este tipo de colectores solares; sin embargo, la radiación difusa no logran captarla, por lo tanto, no son convenientes estos sistemas en lugares en donde tiende a haber cierta nubosidad.

La tecnología para el aprovechamiento de energía solar térmica de alta temperatura es casi exclusivamente para uso de generación de energía eléctrica.

El principal cambio con la tecnología de media temperatura sigue siendo la forma de captación de la radiación térmica del sol, en este caso mediante heliostatos, que son utilizados para reflejar la radiación solar y concentrarla en un punto de calentamiento del líquido transportador de la energía calorífica. En la figura 2.7-2 se muestra el esquema básico de la disposición de este tipo de central eléctrica.

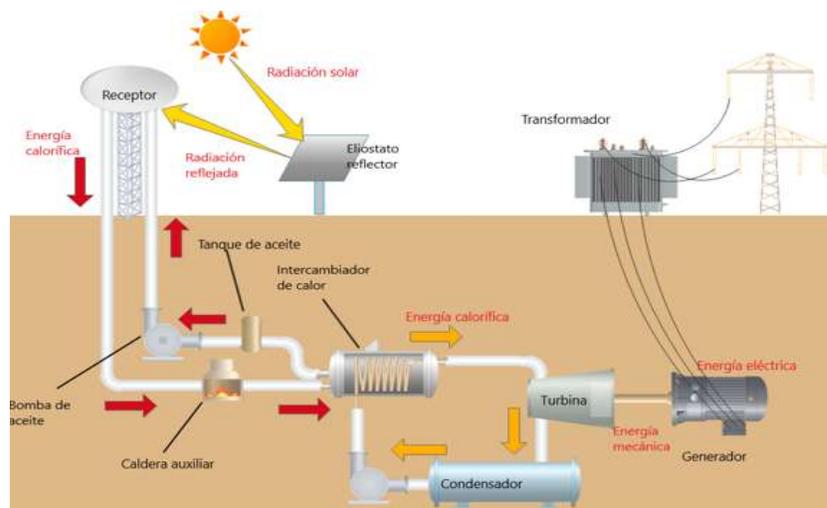


Figura 2.7-2 Diagrama esquemático de una central termosolar de alta temperatura.

Capítulo 3

Diseño de una Central Fotovoltaica

En el capítulo 2 se han mencionado las distintas fuentes convencionales para la producción de energía eléctrica, tanto fuentes de energía renovables, como no renovables. Algunas de estas tecnologías con fuentes renovables son relativamente nuevas; cada una con ciertas ventajas y desventajas que, de manera primordial, las hacen potencialmente rentables para ciertos sitios de operación.

Se ha citado al final de dicho capítulo el funcionamiento de la planta termosolar para la generación de energía eléctrica mediante el calor de la radiación solar (véase sección 2.9). En este capítulo se diseñará un tipo de planta que también utiliza la energía de la radiación solar, pero aprovechando la luz y no el calor.

Anteriormente, se ha indicado qué es el Sol y un poco acerca de la energía que transmite el a la Tierra, aquí se verá más a fondo con propósitos interpretativos para el desarrollo de la central fotovoltaica de gran potencia.

3.1 El Recurso Solar de Energía

El Sol es la estrella más cercana a nuestro planeta, aproximadamente a unos 150 millones de kilómetros de la Tierra. Es el astro responsable de que la vida en la Tierra prospere, evolucione y se desarrolle; que el clima varíe, la superficie se modifique (debido a la erosión) y un sinnúmero de procesos más; por causa de la energía que transmite diariamente. Hablando de energía, el Sol es el causante de la formación de la mayoría de las fuentes de energía que el ser humano aprovecha desde ya hace mucho tiempo, desde los combustibles fósiles (véase sección 1.2), hasta las mareas con la interacción gravitacional con la Luna y la Tierra (véase sección 2.8).

La energía solar directa ha sido aprovechada por la humanidad desde hace milenios, como principal fuente de calentamiento desde la simple exposición, hasta para el calentamiento de sustancias, iluminación natural, etc. Calculándose de manera más o menos precisa su comportamiento durante el paso del tiempo y cada ciclo, con las estaciones del año. Dicho de otra forma, las civilizaciones han estudiado y venerado al sol por ser una fuente de energía inagotable.

La energía total que llega a la Tierra procedente del Sol es de 1.559.280 TWh en un año, de los cuales alrededor de un 1% podrían ser utilizables. La potencia solar aprovechable en la Tierra supera los 1.000 TW [14].

La forma de aprovechamiento de la energía de la radiación solar para este tipo de central de producción de energía eléctrica no es por el calor sino por las ondas electromagnéticas.

3.2 La Radiación Electromagnética

La radiación es transferencia de energía por ondas electromagnéticas, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. La radiación es un proceso de transmisión de ondas o partículas a través del espacio o de algún medio. Todas las formas de radiación son producidas por cargas aceleradas [18].

Así, estas ondas pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. La longitud de onda (λ) y la frecuencia (ν) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión $\lambda\nu=c$, son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad $c = 299.792 \text{ km/s}$ [18].

La radiación electromagnética es independiente de la materia para su propagación; sin embargo, la velocidad, intensidad y dirección de su flujo de energía se ven influidos por la presencia de materia. Esta radiación abarca una gran variedad de energías. La radiación electromagnética con energía suficiente para provocar cambios en los átomos sobre los que incide se denomina radiación ionizante. La radiación de partículas también puede ser ionizante si tiene suficiente energía [18].

La radiación en la superficie solar es de 63450720 W/m^2 , la Tierra sólo recibe 1353 W/m^2 (Constante Solar). Ahora, de los 1353 W/m^2 , se clasifican 3 tipos de radiación solar [19]:

- La radiación directa: Que es la recibida directamente desde el sol sin que se desvíe en su paso por la atmósfera.
- La radiación difusa: Es la que sufre cambios en su dirección debido a la reflexión y difusión en la atmósfera.
- Albedo: Es la radiación directa que se recibe por reflexión en el suelo y otras superficies.

La figura 3.2-1 muestra la radiación solar y sus tipos de dispersiones en la superficie terrestre.

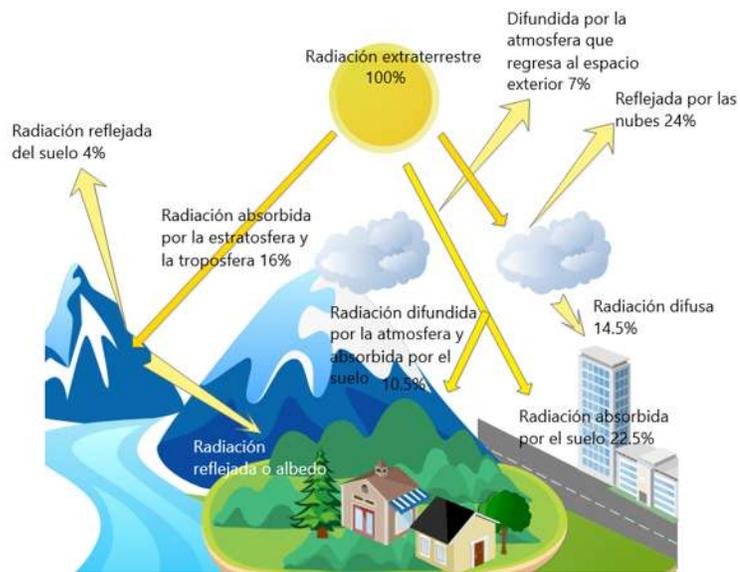


Figura 3.2-1 Diagrama esquemático de la dispersión de la radiación solar en la superficie terrestre.

El aprovechamiento de esta energía es llevado a cabo mediante la conversión eléctrica de las ondas electromagnéticas emitidas por la radiación solar. El fenómeno es llamado efecto fotoeléctrico.

Se estudia y comprende como una dualidad el comportamiento de la luz onda-partícula. Por un lado y para propósitos convenientes se asimila como una onda; para otro tipo de estudios a conveniencia (como lo es este) se toma por partículas (fotones) de acuerdo con la explicación de Albert Einstein en 1905 sobre este efecto fotoeléctrico para la aclaración o comprensión de la frecuencia de radiación. Viaja como onda e interactúa con la materia como partícula.

3.3 El Efecto Fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es básicamente la consecuencia que tienen, las anteriormente descritas, ondas electromagnéticas (estudiadas como partículas) que contiene la radiación solar sobre ciertos materiales semiconductores.

Cuando ciertos materiales llamados semiconductores son expuestos a los rayos solares, los electrones de la banda de valencia pueden ser excitados a la banda de conducción. Para que se dé este fenómeno, la energía de los fotones (rayos solares) debe ser igual o superior al salto energético (band gap) entre la banda de valencia y la de conducción del semiconductor [14].

Al ocurrir lo anterior se crea un campo eléctrico debido a la naturaleza física propia de los semiconductores, al crearse este campo se establece una trayectoria que siguen los electrones desprendidos y así se forma una corriente eléctrica como se muestra en la figura 3.3-1.

Es importante destacar que se tiene que tener una cierta región de umbral en la longitud de onda electromagnética que incide sobre el material semiconductor (rayos UV).

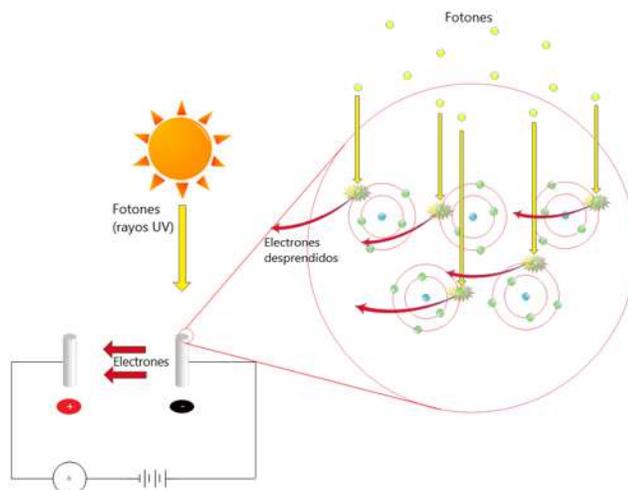


Figura 3.3-1 Diagrama esquemático del efecto fotoeléctrico.

Este proceso de transformación se produce en un elemento semiconductor que se denomina célula fotovoltaica [20]. Entonces, tenemos que:

Cuando la luz del sol incide sobre una célula fotovoltaica, los fotones de la luz solar transmiten su energía a los electrones del semiconductor generándose así una corriente eléctrica capaz de circular por un circuito externo [20].

3.4 Los Paneles Fotovoltaicos

La corriente eléctrica que extraemos de la célula es la diferencia entre los pares electrón hueco que la luz genera en la célula y los pares que se recombinan antes de que podamos extraerlos al exterior. En cortocircuito, la corriente es máxima, pero la tensión es nula. En circuito abierto, el número de recombinaciones iguala al de generaciones: la tensión es máxima (tensión de circuito abierto), pero la corriente es cero. Entre ambos valores se encuentra el punto de máxima potencia de la célula que define su eficiencia [14].

Para hacer posible el manejo práctico de las células fotovoltaicas, estas se presentan asociadas eléctricamente entre sí y encapsuladas en un bloque llamado panel o módulo fotovoltaico, que constituye el elemento básico para la producción de electricidad [20], como se muestra en la figura 3.4-1.

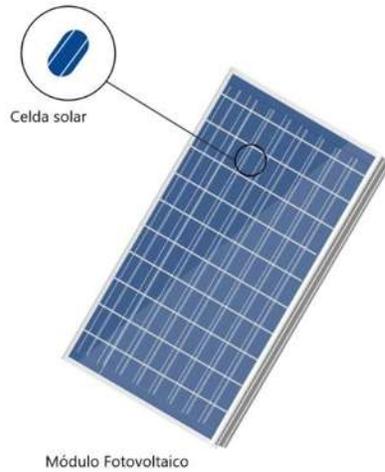


Figura 3.4-1 Celdas fotovoltaicas agrupadas en un panel o módulo.

Los paneles fotovoltaicos, comercialmente se fabrican de silicio y se forman de los componentes mostrados en las figuras 3.4-2 y 3.4-3.

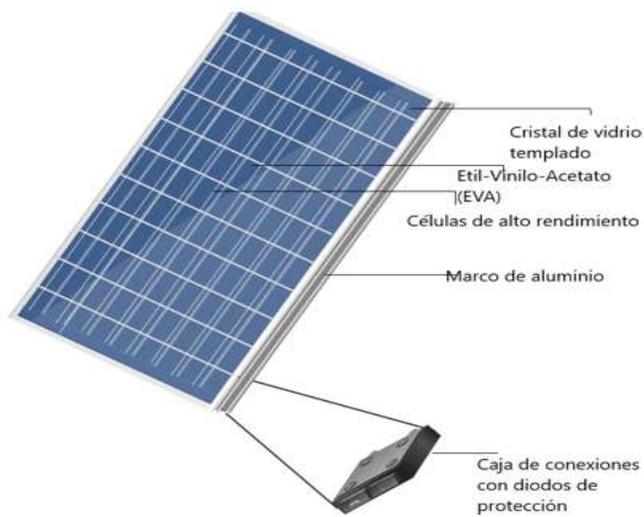


Figura 3.4-2 Componentes de un panel fotovoltaico (caja de conexiones en parte trasera).

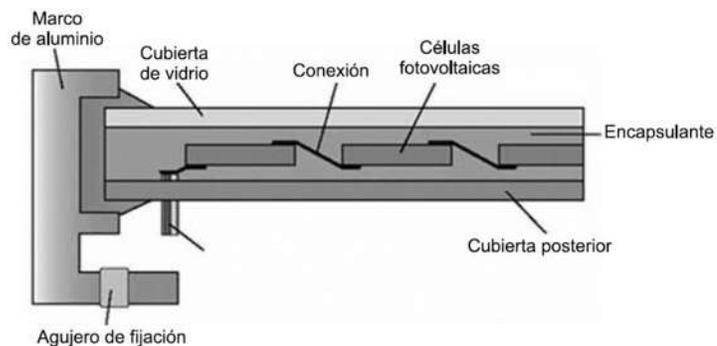


Figura 3.4-3 Componentes de un panel fotovoltaico [14] (vista de perfil).

Existen tres tipos de paneles fotovoltaicos de silicio:

- Monocristalinos. Basados en secciones de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza. Con un rendimiento en laboratorio de 24.7% [19].
- Policristalinos. También se basan en las secciones de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales. Con un rendimiento en laboratorio de 19.8% [19].
- Amorfos. Basados también en silicio, pero a diferencia de los dos, este material no sigue aquí estructura cristalina alguna. Con un rendimiento en laboratorio de 13.0% [19].

3.5 La Trayectoria del Sol

Es importante saber, para este estudio, como interactúa el Sol con nuestro planeta, ya que la captación de la radiación solar por los paneles solares debe ser durante el mayor tiempo posible en el que el astro esté disponible para entregar su energía.

La distribución de la energía solar que llega a la Tierra no es uniforme. En la caracterización de la radiación solar incidente en la Tierra, con el objeto de estimar el potencial solar, intervienen diversos factores. Entre estos factores pueden señalarse [14]:

- Las condiciones climatológicas, que influyen en el grado de nubosidad, la turbidez atmosférica, viento predominante, etc.
- Época del año.
- La latitud del lugar.
- Orientación de la superficie receptora.

La Tierra describe un movimiento de traslación alrededor del Sol según una órbita elíptica en la que éste ocupa uno de los focos. El plano que contiene esta órbita se denomina plano de la eclíptica. El período de traslación dura 365 días, lo que define el año y las estaciones. A su vez la Tierra realiza un movimiento de rotación alrededor de un eje que pasa por los polos. El período de rotación es de aproximadamente 24 horas y determina la duración de los días y la alternancia del día y la noche [14].

El eje polar, sobre el que gira la Tierra, está inclinado respecto del plano de la eclíptica un ángulo de $23,45^\circ$ [14].

Durante estos movimientos respectivos de la Tierra con el Sol y con la inclinación se generan

distintos ángulos de radiación en distintas estaciones del año. Este ángulo (δ) varía entre $+23.45^\circ$ para el solsticio de verano y -23.45° para el solsticio de invierno. La figura 3.5-1 muestra el movimiento elíptico descrito.

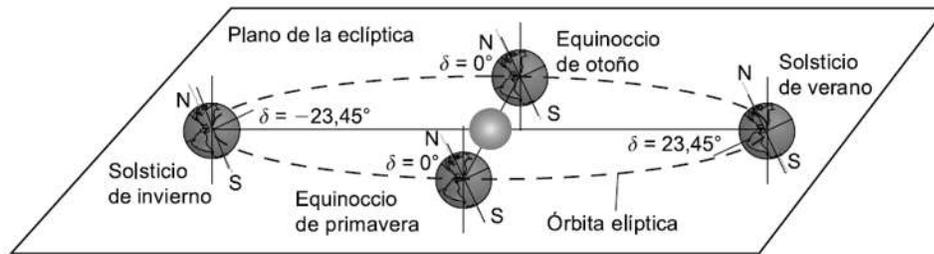


Figura 3.5-1 Movimiento elíptico de la tierra alrededor del Sol [14].

Como consecuencia de la variación de la declinación solar el ángulo con que los rayos solares inciden sobre la superficie terrestre (sobre un plano tangente a la superficie terrestre) será mayor o menor dependiendo de la época del año y de la latitud L del lugar. La perpendicularidad de los rayos solares, para una misma latitud L , es mayor en verano que en invierno [14].

Dicho lo anterior es importante resaltar que conforme se mueve la superficie receptora, en un valor absoluto en latitud, tiende a disminuir la incidencia de radiación solar perpendicular como se muestra en la figura 3.5-2.

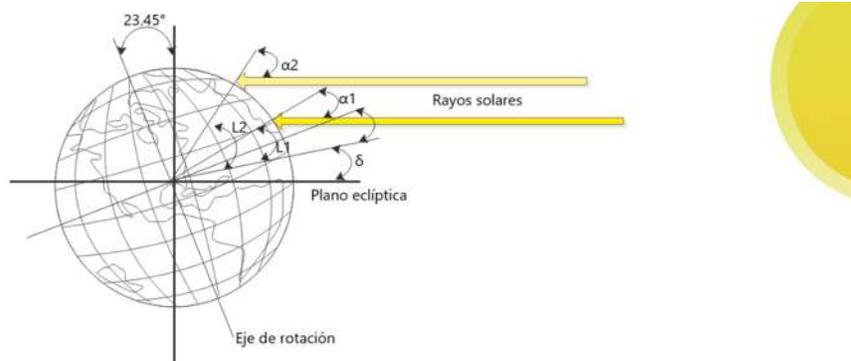


Figura 3.5-2 Incidencia de la radiación solar de en función de la latitud.

3.5.1 Medición de la Radiación Solar

Para casos prácticos, el hecho de determinar la radiación solar por el cálculo de la trayectoria solar no siempre es suficiente. Para esto, se tienen dispositivos que miden la radiación solar en un determinado lugar. Esto es necesario para cálculos y diseños de sistemas de colectores o módulos solares más precisos.

Entre ellos se pueden señalar los piranómetros, que miden la radiación global (directa

más difusa) (W/m^2) (Figura 3.5-3) y los piroheliómetros que miden la radiación directa [14].

A diferencia del piranómetro, que suele instalarse fijo, el piroheliómetro debe contar con un sistema de movimiento de relojería para seguir al sol con gran precisión (Figura 3.5-4) [14].



Figura 3.5-3 Piranómetros



Figura 3.5-4 Piroheliómetro

3.6 El Potencial de Radiación Solar en México

México es uno de los países con mayor radiación en el mundo. El territorio nacional tiene un potencial de 40 mil MW [1], tan sólo en el continente americano, tanto en Norteamérica como en Sudamérica, México tiene la mayor radiación solar en su territorio.

La localización geográfica de México y sus recursos solares de clase mundial lo hacen un candidato principal para el desarrollo de la energía solar [21].

La radiación solar esta desigualmente distribuida alrededor del mundo. Varía en intensidad de una localización geográfica a otra dependiendo de la latitud, temporada del año y hora del día [21].

De acuerdo con lo descrito en la sección 3.5, los movimientos respectivos entre la Tierra y el Sol crean diferentes zonas de máxima o mínima radiación solar, esto quiere decir que la distribución de esta va a depender mayormente del territorio en donde se esté midiendo (latitud) y que existen zonas optimas en el planeta para el desarrollo o el aprovechamiento del potencial solar, así como zonas en donde no es tan favorable dicho potencial.

Por conveniencia y simplicidad, ha sido generalmente establecido que la distribución geográfica de la radiación solar es dividida en términos de intensidad en cuatro cinturones de anchur alrededor del globo. Los cinturones más "favorables al sol" existen entre $15^{\circ}N$ y $35^{\circ}N$.

Esto incluye las regiones que son naturalmente dotadas con las condiciones más favorables para las aplicaciones de energía solar. Estas regiones semiáridas son caracterizadas por tener la cantidad más grande de radiación solar, más del 90% de las cuales vienen como radiación directa por el límite de cobertura nubosa y lluvias (menos de 250 mm por año) [21]. Además, usualmente hay más de 3000 horas de luz solar por año. La mayoría del desarrollo de los países caen dentro las regiones más favorables, entre 35°N y 35°S. Por esta razón, ellos pueden depender de la radiación solar como una fuente firme de energía que puede ser rápida y económicamente explotada [21].

El territorio total de México se encuentra dentro de las latitudes 14° y 33°N y las longitudes 86° y 119°W, haciéndolo uno de los pocos países que se encuentran al 100% dentro de los cinturones solares más favorables del planeta [21].

La figura 3.6-1 presenta un mapa mundial de la radiación solar, en donde se muestra a México en el cinturón "más favorable al sol" con coordenadas denotadas anteriormente.

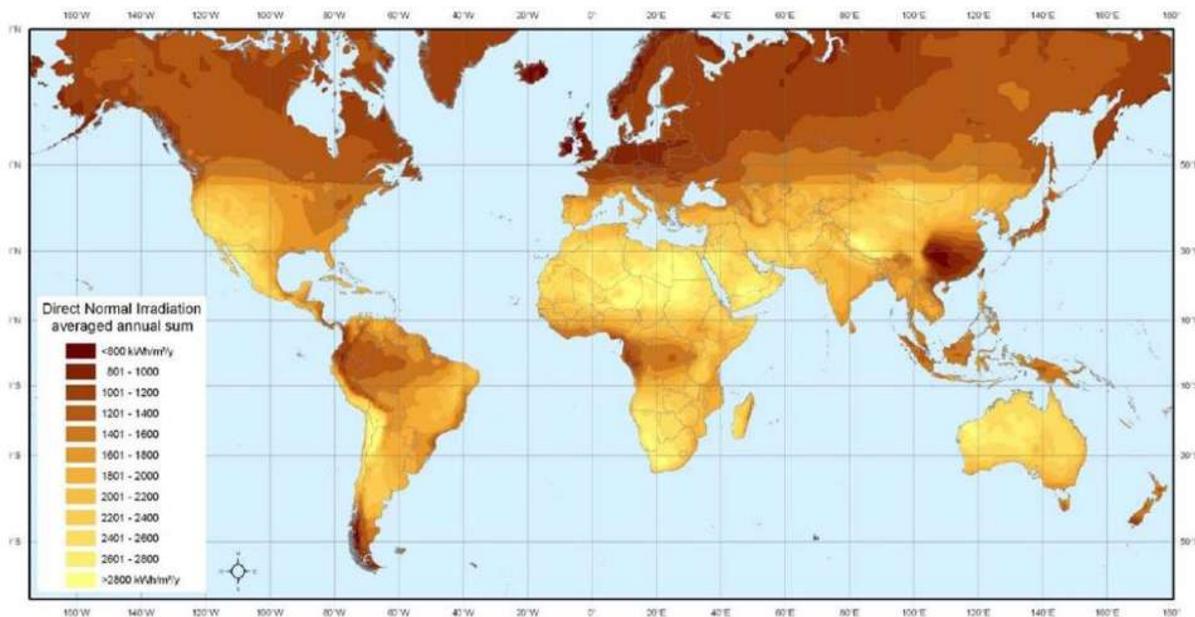


Figura 3.6-1 Potencial global de concentración de energía solar [22].

México tiene un nivel alto de radiación solar. Recibe, por ejemplo, dos veces la radiación solar de Alemania. A lo largo de México, la radiación diaria varía entre 4.4 kWh/m² y 6.3 kWh/m² de energía solar, lo cual es comparable con regiones en África, los Andes y partes de Oceanía. Esto significa que los paneles fotovoltaicos cristalinos requerirían un área de aproximadamente 100,000 hectáreas, o mil kilómetros cuadrados, para cubrir todas las necesidades de energía de México. En Alemania o Canadá, por comparación, la misma tecnología requeriría dos veces el área y por consecuencia, el doble de inversión para entregar la misma cantidad de energía (184 TWh) [21].

En la gráfica de la figura 3.6-2 se muestran los países con mejor radiación solar en el mundo

en relación con su territorio.

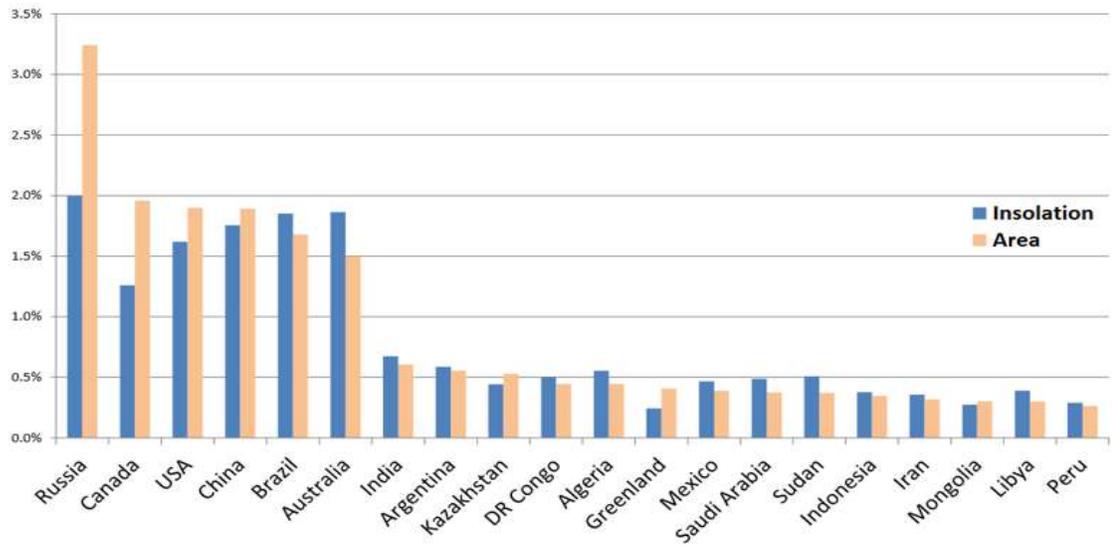


Figura 3.6-2 Gráfica de los mejores países con la relación radiación solar–Área del mundo [22].

En la anterior gráfica se puede apreciar como países como Argentina o Perú e incluso Brasil pudieran tener mayor relación de radiación-territorio que México, sin embargo, en las figuras 3.6-3 y 3.6-4 se muestra la radiación en diferentes épocas del año, en donde la radiación favorece a México más que a los anteriores países mencionados.

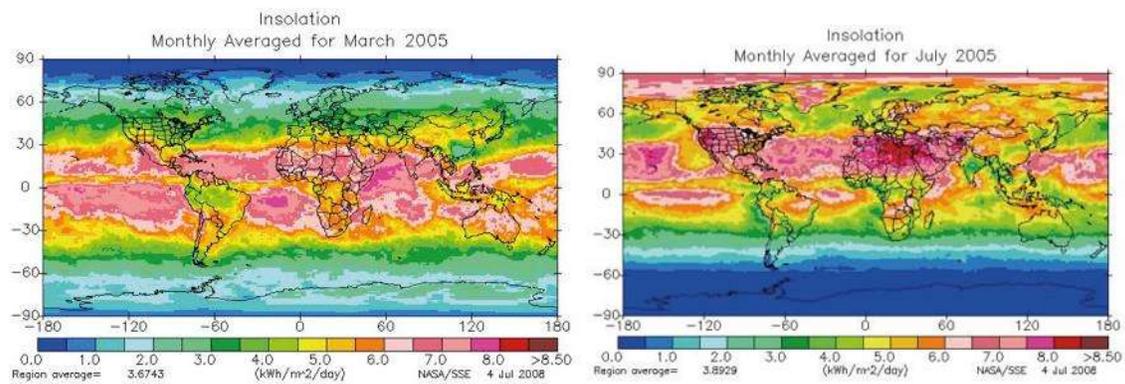


Figura 3.6-3 Radiación solar promedio para los meses de marzo y julio [23].

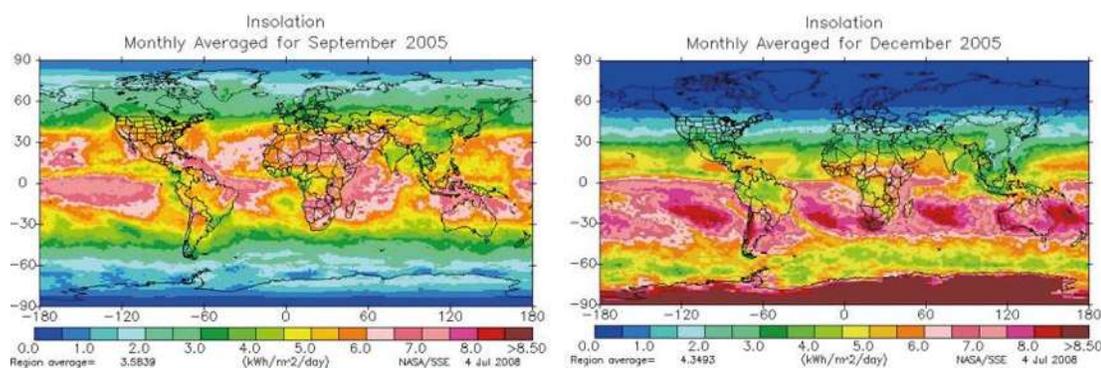


Figura 3.6-4 Radiación solar promedio para los meses de septiembre y diciembre [23].

3.7 El Potencial de Radiación Solar en Tierracaliente, Michoacán

Se describió en la sección 3.6 el gran potencial de radiación solar en México y la enorme ventaja que presenta respecto a otras naciones.

México goza de una situación privilegiada en cuanto a irradiación solar, con un promedio anual de 5.3 kWh/m² por día [24]. Dentro de la república mexicana se tienen regiones o estados que cuentan con radiación mayor o menor.

Aunque los estados con mejor radiación solar son Sonora (con promedio de 6.38 kWh/m² [21]), Chihuahua (con promedio de 6.29 kWh/m² [21]), Coahuila (con promedio de 5.35 kWh/m² [21]), Baja California Norte y Sur (con promedio de 6.45 kWh/m² [21]), existe una región en Michoacán llamada Tierracaliente con índice de radiación solar comparable con el de los estados mencionados.

El mapa interactivo de la página web <http://www.heliogis.com/cms/> proporciona datos de medición de radiación solar promedio de cada mes en distintos puntos de la república mexicana, entre los cuales, en el estado de Michoacán, están situados, por ejemplo, en los municipios de Tepalcatepec, Buenavista, Apatzingán, La Huacana, Huetamo; municipios que se extienden por toda Tierracaliente, Michoacán. En la tabla 3.7-1 se muestran los datos de radiación solar en kWh/m² que se han recogido en cada una de estas regiones.

Tabla 3.7-1 Radiación promedio en distintos puntos de la región de Tierracaliente, Michoacán [25].

Mes	Tepalcatepec	Buenavista	Apatzingán	La Huacana	Huetamo
Enero	5.320	5.298	5.320	5.303	5.355
Febrero	6.218	6.232	6.261	6.215	6.222
Marzo	7.058	7.072	7.066	7.096	7.028

Mes	Tepalcatepec	Buenavista	Apatzingán	La Huacana	Huetamo
Abril	7.581	7.604	7.596	7.593	7.522
Mayo	7.301	7.446	7.398	7.364	7.387
Junio	5.801	6.354	6.401	6.195	6.569
Julio	5.602	6.073	6.263	6.087	6.608
Agosto	5.470	5.982	6.215	5.990	6.479
Septiembre	4.872	5.439	5.548	5.310	5.946
Octubre	5.027	5.337	5.394	5.237	5.670
Noviembre	5.157	5.178	5.180	5.173	5.235
Diciembre	4.690	4.702	4.700	4.720	4.755
Promedio	5.841	6.059	6.111	6.023	6.231

Heliogis proporciona un inventario del recurso de energía solar y una evaluación de la electricidad generada con sistemas fotovoltaicos en México. Es parte de las actividades que ha venido desarrollando la empresa SOLARTRONIC, con relación a la evaluación de los recursos renovables, particularmente la radiación solar, y que contribuye al fomento de la implementación de sistemas que aprovechen las energías renovables en México, como una estrategia de suministro de energía sustentable y de largo plazo [25].

Debido a que es muy importante el factor de la temperatura para este tipo de sistemas, la tabla 3.7-2 proporciona información de las temperaturas máximas registradas durante los meses del año de cada región en los distintos puntos de la tabla 3.7-1. Temperatura en grados centígrados (°C).

Tabla 3.7-2 Temperaturas máximas en grados centígrados registradas en el año en distintos puntos de Tierracaliente, Michoacán [25].

Mes	Tepalcatepec	Buenavista	Apatzingán	La Huacana	Huetamo
Enero	25.60	25.06	25.42	25.20	26.01
Febrero	35.30	35.19	35.93	35.60	37.10
Marzo	37.70	37.78	38.36	37.40	39.39
Abril	39.30	39.46	40.05	38.87	40.81
Mayo	39.40	39.46	40.25	39.24	41.18
Junio	37.10	36.89	37.68	36.87	37.69
Julio	34.90	34.35	34.98	34.54	35.20
Agosto	34.90	34.06	34.82	34.37	34.89
Septiembre	34.10	33.56	34.26	33.87	34.29
Octubre	34.37	33.94	34.58	34.40	34.90
Noviembre	34.10	33.86	34.72	35.00	35.60
Diciembre	33.00	32.00	33.00	33.00	34.00
Promedio	34.980	34.634	35.337	34.863	35.921

3.8 Sistemas Fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos, son un conjunto de equipos que conforman una planta de generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de la energía solar por el efecto fotoeléctrico (explicado en la sección 3.3). Los componentes principales son paneles o módulos fotovoltaicos (explicados en la sección 3.4) y el inversor.

El inversor es un equipo encargado de recibir y adecuar la energía entregada por los módulos fotovoltaicos (la cual se presenta en forma de corriente continua) en corriente alterna y a las condiciones requeridas por las cargas, incluso proporciona alimentación en corriente directa para cargas que así lo requieran.

Los inversores para la conexión a la red eléctrica están equipados generalmente con un dispositivo electrónico que permite extraer la máxima potencia, paso por paso, del generador fotovoltaico. Este dispositivo sigue el punto de máxima potencia (MPPT, Maximum Power Point Tracking) y tiene justamente la función de adaptar las características de producción del campo fotovoltaico a las exigencias de la carga [14].

Existen dos tipos de sistemas fotovoltaicos:

- Sistemas fotovoltaicos aislados.

Estos sistemas se conforman por arreglos de paneles fotovoltaicos, protecciones en corriente directa, regulador de carga, inversor, y un sistema de acumuladores.

Por lo regular estos sistemas se implementan en lugares en donde se necesita una fuente de energía eléctrica, pero que están aislados de la red eléctrica convencional, ya sea porque es un lugar muy remoto o porque no es tan factible el tendido eléctrico. La figura 3.8-1 muestra el arreglo convencional de este tipo de sistemas.

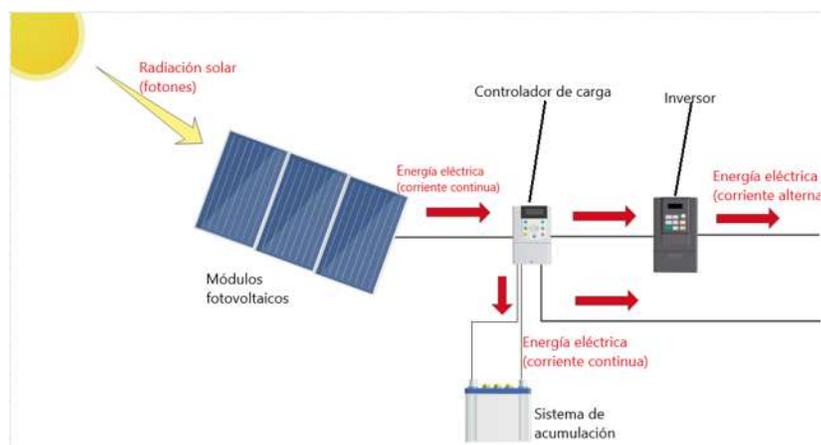


Figura 3.8-1 Diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico aislado.

- Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red.

Estos sistemas están compuestos por arreglos de paneles fotovoltaicos, protecciones en corriente directa, inversor y medidor bidireccional básicamente. Este tipo de sistemas se emplean en hogares, negocios o industria que requiere de disminuir el consumo eléctrico que tiene con la compañía suministradora, por lo que el sistema se interconecta con la red eléctrica convencional en un arreglo en donde no exista ninguna situación de peligro en caso de que alguno de los dos sistemas falle. La figura 3.8-2 muestra el esquema de conexión de este sistema.

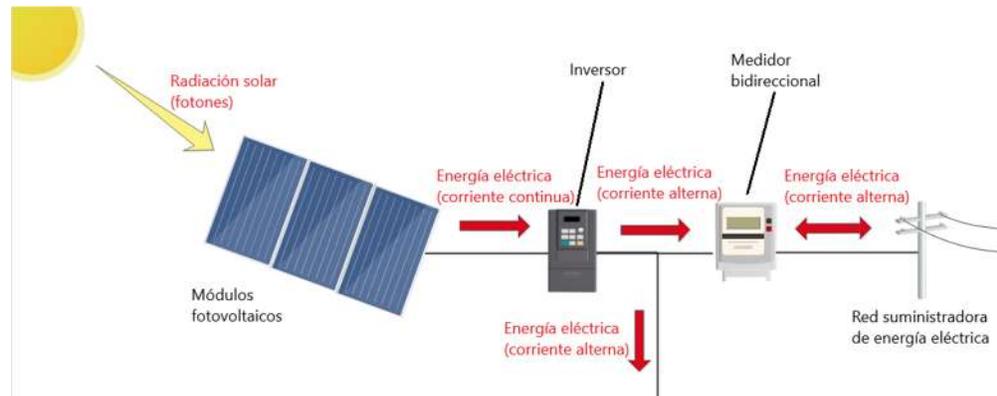


Figura 3.8-2 Diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico interconectado a la red.

3.9 Diseño de un Sistema Fotovoltaico Estándar

Para comenzar con el diseño se opta, primeramente, por proporcionar un ejemplo de un diseño fotovoltaico a pequeña escala para una vivienda o un comercio. Para esto, se tomará el ejemplo de un comercio de que gasta un promedio de **2000 kWh** de energía al bimestre.

1. Se inicia con el cálculo de la potencia del sistema

$$P_S = \frac{E_{req} (\text{por día}) * CS}{HSP * n} \quad (3.1)$$

En donde:

P_S : Es la potencia del sistema

E_{req} : Es la energía requerida en kWh

HSP: Son las Horas Solares Pico del lugar donde se va a instalar kWh/m²

CS: Es la constante solar

n: Es la eficiencia global del sistema

Datos:

- La energía bimestral promedio requerida es de **2000 kWh** lo que equivale a **33.33 kWh/día**.
- El promedio de HSP en Tierracaliente según los datos mostrados (véase tabla 3.7-1) es de **6.025 kWh/m²**.
- Se tomará una eficiencia del **85%** global del sistema
- En la sección 3.2 se hizo mención de la constante solar de 1,353 W/m² que por efectos prácticos y tomando en cuenta la dispersión, se tomará de **1000 W/m²**.

Entonces tenemos, según la ecuación (3.1):

$$P_S = \frac{33.33 \text{ kWh/día} * 1000 \text{ W/m}^2}{6.025 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} / \text{día} * 0.85}$$

$$P_S = 6508.17 \text{ W}$$

2. Se satisface la potencia necesaria con un número determinado de paneles.

Para este punto, serán propuestos módulos fotovoltaicos S72PC-320 de la marca Solartec® de 320 Watts pico (Wp), debido a que comercialmente, es la máxima potencia en paneles manejada por la empresa (en la tabla 3.9-1 se muestran las características del módulo fotovoltaico elegido), por lo tanto, tenemos que:

$$N_P = \frac{P_S}{P_P} \quad (3.2)$$

En donde:

N_P : Es el número de paneles.

P_S : Es la potencia que requiere el sistema.

P_P : Es la potencia pico del panel.

Tabla 3.9-1 Especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico a utilizar

Voltaje de circuito abierto (Voc)	45.75 V
Voltaje en el punto de máxima potencia (Vmpp)	37.78 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	9.93 A
Corriente en el punto de máxima potencia (Impp)	8.47 A
Potencia máxima (Pmax)	320 W
Eficiencia del módulo	16.52%

Por lo tanto, según la ecuación (3.2) tenemos que:

$$N_p = \frac{6508.17 \text{ W}}{320 \text{ W}}$$

$$N_p = 20.33 \quad (3.3)$$

Las figuras 3.9-1 y 3.9-2 muestran las dimensiones de los módulos fotovoltaicos a emplearse en el diseño y otras especificaciones.

	
Especificaciones	
Tipo de celda	Policristalina
Dimensiones de Celda	156 mm * 156 mm
Número de Celdas	72 (6 x 12)
Peso	23.2 Kg
Dimensiones de módulo	1956 mm x 992 mm x 45 mm
Cable	900 mm fotovoltaico
Caja de Conexiones	IP65 / IP67
Número de diodos de derivación	3 / 6
Conectores	Mc4 Compatible
Hoja Trasera	Blanca
Marco	Aluminio anodizado (15 µm)
Clasificación de Flama	Clase C
Aplicación de acuerdo a IEC	Clase A
Configuración de Empacado	23 piezas

Figura 3.9-1 Especificaciones del módulo fotovoltaico S72PC-320.

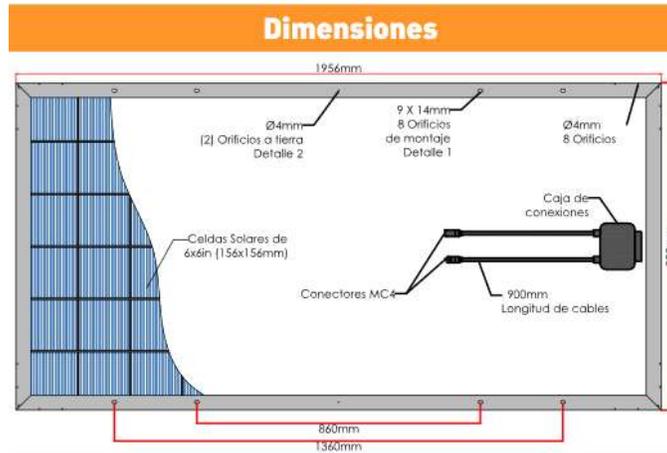


Figura 3.9-2 Dimensiones específicas del módulo fotovoltaico S72PC-320.

3. Selección del inversor

La selección del inversor comienza con el dato de la potencia del sistema fotovoltaico, teniendo este dato, se procede a buscar un equipo que dentro de su rango de operación cumpla con el dato anterior.

El inversor seleccionado es un Sunny Boy SB 6000US-11 - 240VAC de la marca SMA® (SMA Solar Technology AG) de 6360 W debido a que su rango de potencia de funcionamiento soporta la potencia del sistema fotovoltaico, la figura 3.9-3 muestra las especificaciones técnicas del equipo.

Technical data	Sunny Boy 6000-US		
	208 V AC	240 V AC	277 V AC
Input (DC)			
Max. recommended PV power (@ module STC)		7500 W	
Max. DC power (@ cos φ = 1)		6350 W	
Max. DC voltage		600 V	
DC nominal voltage		310 V	
MPP voltage range		250 V - 480 V	
Min. DC voltage / start voltage		250 V / 300 V	
Max. input current / per string (at DC disconnect)		25 A / 20 A	
		36 A @ combined terminal	
Number of MPP trackers / fused strings per MPP tracker			1 / 4 (DC)
Output (AC)			
AC nominal power		6000 W	
Max. AC apparent power		6000 VA	
Nominal AC voltage / adjustable	208 V / ●	240 V / ●	277 V / ●
AC voltage range	183 - 229 V	211 - 264 V	244 - 305 V
AC grid frequency, range		60 Hz: 59.3 - 60.5 Hz	
Max. output current	29 A	25 A	22 A
Power factor (cos φ)		1	
Phase conductors / connection phases	1 / 2	1 / 2	1 / 1
Harmonics		< 4%	
Efficiency			
Max. efficiency	96.9%	96.8%	97.0%
CEC efficiency	95.5%	95.5%	96.0%

Figura 3.9-3 Especificaciones técnicas del inversor SB 6000US-11 - 240VAC.

4. Determinar el arreglo fotovoltaico para alimentar el inversor de manera adecuada según sus especificaciones.

Las especificaciones muestran un rango de voltaje de entrada en corriente directa de 250 a 600 V. Debido a que la operación de la ecuación (3.3) indica que son **20** paneles los que se necesitan para satisfacer la energía requerida por el usuario, en este caso se optó por dos cadenas de 10 paneles en serie y estas a su vez en paralelo, como se muestra en la figura 3.9-4 para lograr un voltaje máximo de **377.8 V** y una corriente de **16.94 A**.

El arreglo fotovoltaico para este caso estándar se muestra en la figura 3.9-4.

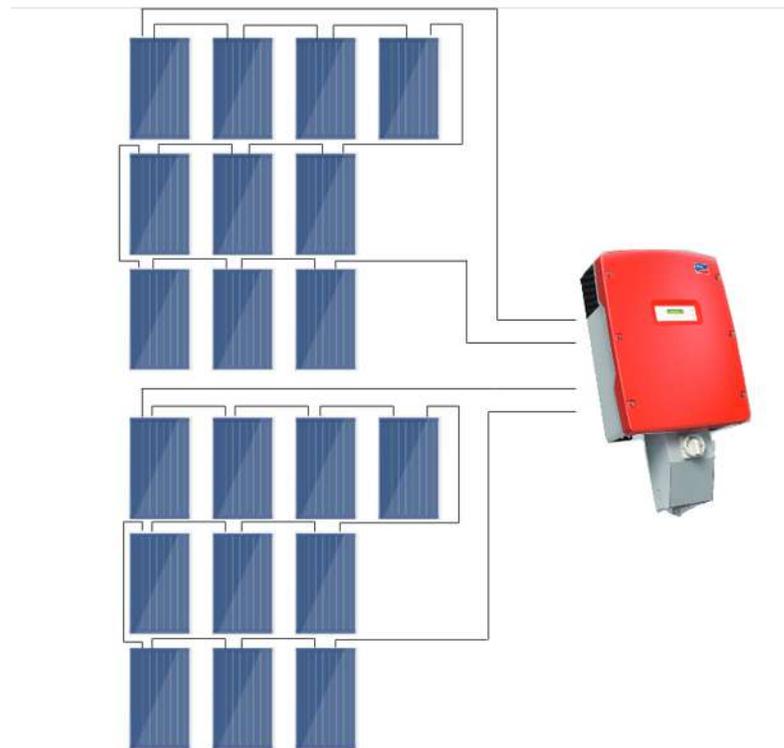


Figura 3.9-4 Arreglo fotovoltaico para diseño estándar (se han omitido equipos como cajas combinadoras y protecciones).

5. Disposición de los paneles solares

Es importante mencionar, de acuerdo con lo visto en la sección 3.5, la disposición y orientación que tendrán los paneles fotovoltaicos para obtener la mejor incidencia de radiación solar posible durante todo el año.

Para el caso del territorio nacional mexicano, la disposición, de acuerdo con las coordenadas en donde se localiza, debe de ser **hacia el sur**, debido a que el país se encuentra en su totalidad en el hemisferio norte del planeta. Así mismo la disposición o inclinación deberá ser igual al grado de latitud en donde se encuentra, por lo tanto, será de **19°**. De esta manera la

captación de energía solar será presente en su relativa totalidad durante todo el año. La figura 3.9-5 muestra la altura máxima y mínima a la que está el sol durante el año con motivo de ayudar con la disposición de los paneles solares para la captación de la energía solar en distintas épocas del año.

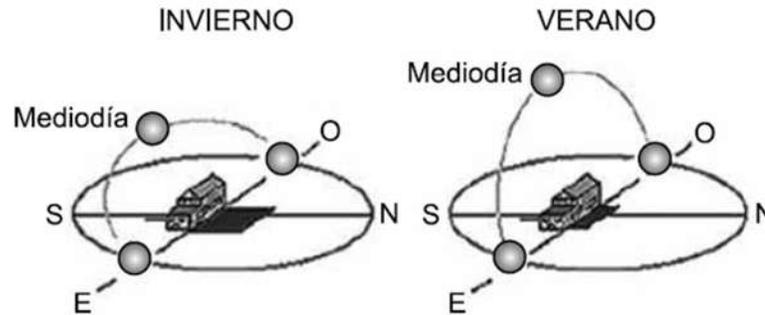


Figura 3.9-5 Itinerario descrito por el sol el 21 de diciembre (izquierda) y el 21 de junio (centro), solsticios de invierno y verano [14].

3.10 Central Fotovoltaica de 300 MW

Para el diseño de una central fotovoltaica de 300 MW se seguirán los pasos vistos en la sección 3.9 como una guía aproximada, salvo que en este caso se tomarán algunas consideraciones más que se verán a lo largo de esta sección.

Para comenzar con este diseño, a diferencia del visto anteriormente (sección 3.9) se necesita comenzar por el dato de la potencia máxima de la central.

Datos:

Potencia máxima de la central 300 MW.

Potencia de paneles. Tomando en cuenta el mismo modelo de módulo fotovoltaico que en la sección 3.9 tenemos que se trata del modelo S72PC-320 de la marca Solartec® de 320 (Watts pico).

1. Se calcula el número de módulos fotovoltaicos a emplearse para satisfacer la potencia de 300 MW mediante la ecuación (3.2):

$$N_P = \frac{300000000 \text{ W}}{320 \text{ W}}$$

$$N_P = 937500$$

2. Selección del inversor.

Debido a la cantidad exuberante de paneles que se necesitan para esta central, se opta por calcular el número de inversores que se necesitarán para adecuar la energía eléctrica producida para su entrega a la red nacional. En este caso se escogen inversores SUNNY CENTRAL 2200 / 2500-EV / 2750-EV de la marca SMA® cuya hoja de datos se muestra en la figura 3.10-1.

Datos técnicos	Sunny Central 2500-EV	Sunny Central 2750-EV
Entrada (CC)		
Rango de tensión del MPP V_{CC} (a 25 °C/50 °C)	850 V a 1425 V / 1275 V	875 V a 1425 V / 1275 V
Tensión de entrada $V_{CC, máx}$ / tensión inicial $V_{CC, inico}$	778 V / 878 V	849 V / 949 V
Tensión de entrada máx. $V_{CC, máx}$	1500 V	1500 V
Corriente de entrada máx. $I_{CC, máx}$ (a 25 °C/50 °C)	3000 A / 2700 A	3206 A / 2914 A
Corriente de cortocircuito máx.	6400 A	6400 A
Número de entradas de CC	24	24
Número máx. de cables de CC por entrada de CC (para cada polaridad)	2 x 800 kcmil, 2 x 400 mm ²	2 x 800 kcmil, 2 x 400 mm ²
Zone Monitoring integrado	o	o
Tamaños de fusible de CC disponibles (por entrada)	200 A, 250 A, 315 A, 350 A, 400 A, 450 A, 500 A	
Salida (CA)		
Potencia nominal de CA con $\cos \varphi = 1$ (a 25 °C/40 °C/50 °C)	2500 kVA / 2350 kVA / 2250 kVA	2750 kVA / 2600 kVA / 2500 kVA
Potencia nominal de CA con $\cos \varphi = 0,8$ (a 25 °C/40 °C/50 °C)	2000 kW / 1880 kW / 1800 kW	2200 kW / 2080 kW / 2000 kW
Corriente nominal de CA $I_{CA, nom}$ = Corriente máx. de salida $I_{CA, máx}$	2624 A	2646 A
Coefficiente de distorsión máx.	< 3% a potencia nominal	< 3% a potencia nominal
Tensión nominal de CA/rango de tensión nominal de CA ¹⁾	550 V / 440 V a 660 V	600 V / 480 V a 690 V
Frecuencia de red de CA/rango	50 Hz / 47 Hz a 53 Hz 60 Hz / 57 Hz a 63 Hz	50 Hz / 47 Hz a 53 Hz 60 Hz / 57 Hz a 63 Hz
Relación mín. de cortocircuito en los bornes de CA	> 2	> 2 ⁹⁾
Factor de potencia a potencia asignada/factor de desfase ajustable ⁸⁾	1/0,8 inductivo a 0,8 capacitivo	1/0,8 inductivo a 0,8 capacitivo
Rendimiento		
Rendimiento máx. ^{2)/europeo^{2)/californiano³⁾}}	98,6% / 98,3% / 98,0%	98,7% / 98,6% / 98,5%
Dispositivos de protección		
Punto de desconexión en el lado de entrada	Interruptor-seccionador de CC	
Punto de desconexión en el lado de salida	Interruptor de potencia de CA	
Protección contra sobretensión de CC	Descargador de sobretensión del tipo I	
Protección contra sobretensión de CA (opcional)	Descargador de sobretensión, clase I	
Protección contra rayos (según IEC 62305-1)	Tipo de protección contra rayos III	
Monitorización de fallo a tierra/de fallo a tierra por control remoto	o / o	
Monitorización de aislamiento	o	
Tipo de protección: Electrónica/conducto de aire/area de conexión (según IEC 60529)	IP65/IP34/IP34	
Datos generales		
Dimensiones (ancho x alto x fondo)	2780 / 2318 / 1588 mm (109,4 / 91,3 / 62,5 in)	
Peso	< 3400 kg / < 7496 lb	
Autoconsumo (máx. ^{4)/carga parcial^{5)/promedio⁶⁾}}	< 8100 W / < 1800 W / < 2000 W	
Autoconsumo (stand-by)	< 370 W	
Alimentación auxiliar interna	Transformador integrado de 8,4 kVA	
Rango de temperatura de servicio ⁸⁾	-25 a 60 °C / -13 a 140 °F	
Emisiones de ruido ⁷⁾	64,3 dB(A)	
Rango de temperatura (stand-by)	-40 a 60 °C / -40 a 140 °F	
Rango de temperatura (almacenamiento)	-40 a 70 °C / -40 a 158 °F	
Valor máximo permitido para la humedad relativa (con condensación/sin condensación)	95% a 100% (2 meses/año) / 0% a 95%	
Altitud de funcionamiento máxima sobre el nivel del mar ³⁾ 2000 m/3000 m	● / o (reducción de potencia temprana en función de la temperatura)	

Figura 3.10-1 Datos del inversor SUNNY CENTRAL 2500-EV / 2750-EV [26].

El modelo elegido para este trabajo es el SUNNY CENTRAL 2750-EV. Tomando en cuenta los datos del fabricante vistos en la figura 3.10-1 tenemos que el voltaje máximo de alimentación es de 1500 V_{cc} y su corriente máxima de entrada a diferentes temperaturas, lo cual nos permitirá establecer los arreglos de módulos fotovoltaicos para su alimentación que se mostrarán más adelante. También se tiene la potencia de salida, de igual manera,

a distintas temperaturas.

En la sección 3.8 se muestra la tabla 3.7-2 que indica las temperaturas que se manejan en los distintos puntos considerados en la región de Tierracaliente, Michoacán; debido a que son temperaturas altas las consideraciones se tomarán a **50° C** lo que indica que se podrá tener una corriente máxima de entrada de **2914 A** y una potencia máxima de salida con un **factor de potencia de 0.8** de **2000 kW o 2 MW**, por lo tanto, se indica el número de inversores total para la central:

$$N_{Inv} = \frac{P_{Central}}{P_{Inv}}$$

En donde

N_{Inv} = Número de inversores

$P_{Central}$ = Potencia de la central fotovoltaica

P_{Inv} = Potencia del inversor seleccionado

Entonces, tenemos que:

$$N_{Inv} = \frac{300 \text{ MW}}{2 \text{ MW}}$$

$$N_{Inv} = 150$$

Para determinar el arreglo fotovoltaico que se tendría, se dispondrán los paneles de tal manera que se acerquen al máximo valor de voltaje de cada inversor para así reducir, por fines convenientes, la corriente de salida del arreglo. Por lo tanto, se colocarán de **40 módulos fotovoltaicos en serie** para lograr un voltaje máximo de **1511.2 V** y con aproximadamente **156 o 157 de estas series en paralelo** para acercarse a una corriente máxima de **1330 A** según la ley de Ohm, con un aproximado de **6250 módulos** por cada inversor.

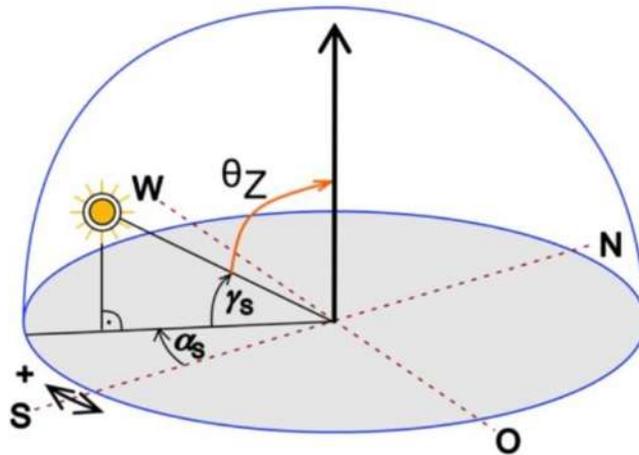
3. Disposición de paneles solares y superficie ocupada tomando en cuenta sombras.

Una vez determinados los arreglos fotovoltaicos para la entrada de cada inversor se determina la disposición de los módulos, que por las mismas razones que en la sección 3.10, se dispondrán con orientación al **sur** y con una inclinación de **19°** aproximadamente.

Para este caso es importante considerar la superficie total que necesitarán los paneles para su colocación, para esto, se necesita calcular el área mínima que comprenderán con su determinada sombra, para la época del año en que el sol tenga menor inclinación (véase figura 3.9-5) y haga que el módulo proyecte la mayor sombra en su parte posterior (en este caso en el solsticio de invierno).

A continuación, se presentará una ecuación que proporciona la distancia mínima (d_{\min}) que pueden tener de separación los módulos fotovoltaicos. Los únicos datos que se necesitan son el ángulo de latitud del lugar y los grados que el sol se inclina respecto al ecuador en el solsticio de invierno (ya que en ese solsticio tenemos la sombra más crítica), esta inclinación es de 23.5 grados [27]. En la imagen 3.10-2 se muestran los ángulos, de acuerdo con la inclinación solar en solsticio de invierno (21 de diciembre), que se deben de tomar en cuenta para el cálculo.

$$\theta_z = \text{Ángulo de latitud del lugar} + 23.5^\circ$$



$$\gamma_s = 90^\circ - \theta_z$$

Figura 3.10-2 Diagrama esquemático de los ángulos en consideración para el cálculo de la distancia mínima entre módulos fotovoltaicos [27].

Los siguientes pasos describen detalladamente la secuencia de cálculos para obtener así la distancia mínima entre módulos fotovoltaicos [27].

1. Se calcula el ángulo θ_z con base al ángulo de latitud del lugar.

$$\theta_z = \theta_L + 23.5^\circ$$

En donde:

θ_L = Ángulo de latitud del lugar

Tenemos que:

$$\theta_z = 19^\circ + 23.5^\circ$$

$$\theta_z = 42.5^\circ$$

2. Calcular el ángulo γ_s . Este ángulo dará la sombra más crítica que se tendrá en todo el año cuando el solsticio de invierno se presente el 21 de diciembre.

$$\gamma_s = 90^\circ - \theta_z$$

$$\gamma_s = 90^\circ - 42.5^\circ$$

$$\gamma_s = 47.5^\circ$$

3. Aplicar la ecuación de distancia mínima entre módulos.

$$d_{min} = b \left(\frac{\text{sen}(\gamma_s + \beta)}{\text{sen } \gamma_s} \right)$$

En donde:

β = el ángulo de inclinación del módulo.

b = el largo del módulo fotovoltaico

γ_s = es el ángulo crítico en el solsticio de invierno.

Por lo tanto, tenemos que la distancia mínima entre cada módulo para el periodo de mayor sombra será de:

$$d_{min} = 1.956 \text{ m} \left(\frac{\text{sen}(47.5^\circ + 19^\circ)}{\text{sen } 47.5^\circ} \right)$$

$$d_{min} = 2.43 \text{ m}$$

La figura 3.10-3 muestra la disposición de paneles solares y ángulos con su distancia mínima calculada.

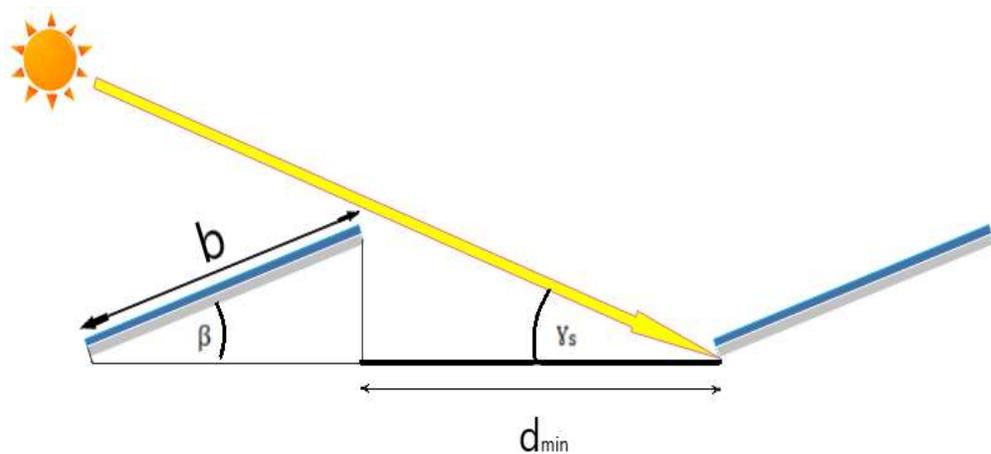


Figura 3.10-3 Diagrama esquemático de la distancia mínima entre módulos para la inclinación más crítica del sol en el año (solsticio de invierno).

Al obtener el dato de la distancia mínima se procede a calcular la superficie mínima que ocupará el total de módulos fotovoltaicos, calculados con anterioridad, a implementarse.

Para comenzar con este cálculo, se tienen módulos fotovoltaicos con dimensiones de **1.956 m x 0.992 m** cada uno (véase figura 3.16), los cuales, serán colocados a **19°** de la superficie. Por lo tanto, se necesita saber la superficie que cubrirá el módulo de 1.956 m (hipotenusa) dispuesto al ángulo mencionado (cateto adyacente), las dimensiones quedarían de la siguiente manera (figura 3.10-4), según la fórmula trigonométrica del cateto adyacente:

$$\cos \theta = \frac{\text{cateto adyacente}}{\text{hipotenusa}}$$

$$\text{cateto adyacente} = \cos 19^\circ * 1.956 \text{ m}$$

$$\text{cateto adyacente} = 1.849 \text{ m}$$

que será la superficie adquirida por cada módulo, sumándole a esta, la distancia mínima calculada previamente, por lo tanto:

$$\text{Largo de área} = 1.849 \text{ m} + 2.43 \text{ m}$$

$$\text{Largo de área} = 4.28 \text{ m}$$

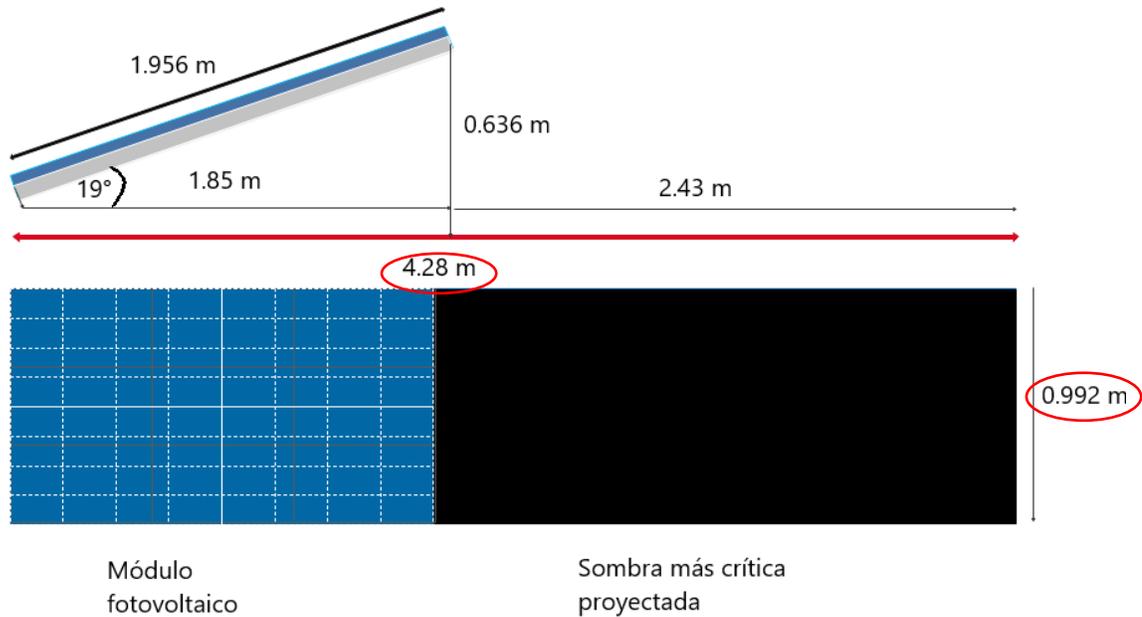


Figura 3.10-4 Diagrama esquemático de la superficie total del módulo fotovoltaico con su sombra más crítica.

Tenemos entonces, que la superficie para cada módulo fotovoltaico incluida su sombra más crítica será de **4.28 m x 0.992 m** lo que da un total de **4.245 m²** por módulo fotovoltaico, que multiplicada dicha área por un total de 937,500 módulos, se necesitará un área mínima para su colocación de **3980400 m²** o **398.04 hectáreas (Ha)**.

Uno de los objetivos de este trabajo es incitar a implementar un proyecto de esta magnitud en la mencionada área de Tierracaliente, Michoacán. Debido a que, como ya se trabajó con los datos obtenidos de radiación solar, también se tome en cuenta las condiciones de terreno llano que presenta la región y que si bien es terreno que en muchas ocasiones no es muy apto para el cultivo es muy bueno para la producción de energía solar mediante esta técnica. Las figuras 3.10-5, 3.10-6, 3.10-7 y 3.10-8 muestran fotografías de una parte de terreno llano que presenta la región de Tierracaliente.



Figura 3.10-5 Fotografía de la ciudad de Apatzingán con dirección hacia Tepalcatepec.



Figura 3.10-6 Fotografía de Tierracaliente desde el poblado de Acahuato, municipio de Apatzingán.



Figura 3.10-7 Fotografía de Tierracaliente desde La Cuchilla, municipio de Buenavista.



Figura 3.10-8 Fotografía de Apatzingán desde Acahuato, municipio de Apatzingán.

Aspectos como protecciones, calibres de conductores, etc. No son de la comprensión de esta tesis por lo tanto se han omitido en los cálculos anteriores, dejando simplemente datos de corriente y voltaje para la consideración.

3.11 Promedio de energía generada

Para finalizar con este diseño, se calcula la energía promedio generada al año con esta planta. Para esto, se toma en cuenta el dato de radiación promedio de los distintos puntos de la región de Tierracaliente, Michoacán que se utilizó anteriormente (véase sección 3.10) el cual es de **6.025 kWh/m²**, así como la potencia de los paneles, factor de corrección, etc.

Por lo tanto, se tiene:

$$E_p \text{ (por día)} = \frac{P_s * HSP * n}{CS}$$

En donde:

E_p : Es la energía producida en kWh

P_s : Es la potencia del sistema

HSP: Son las Horas Solares Pico del lugar donde se va a instalar kWh/m²

CS: Es la constante solar.

n: Es la eficiencia global del sistema.

Datos

- La potencia del sistema es de **300 MW**
- El promedio de HSP en Tierracaliente según los datos mostrados (véase tabla 3.1) es de **6.025 kWh/m²**.
- Se tomará una eficiencia del **85%** global del sistema

- En la sección 3.2 se hizo mención de la constante solar de 1,353 W/m² que por efectos prácticos y tomando en cuenta la dispersión, se tomará de 1,000 W/m².

Entonces tenemos:

$$E_p \text{ (por día)} = \frac{300000000 \text{ W} * 6.025 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} / \text{día} * 0.85}{1000 \text{ W/m}^2}$$

$$E_p \text{ (por día)} = 1536375 \text{ kWh/día}$$

La producción promedio diaria de energía sería entonces de aproximadamente 1536375 kWh/día que multiplicada por los 365 días del año da un total aproximado de 560 GW/h anuales.

La figura 3.11-1 muestra un diagrama esquemático de la central d 300 MW en su totalidad, en el cual se observa la totalidad de paneles conectados a cada uno de los 150 inversores respectivamente y se hace un acercamiento en la parte inferior central para prestar atención al detalle de este acomodo.

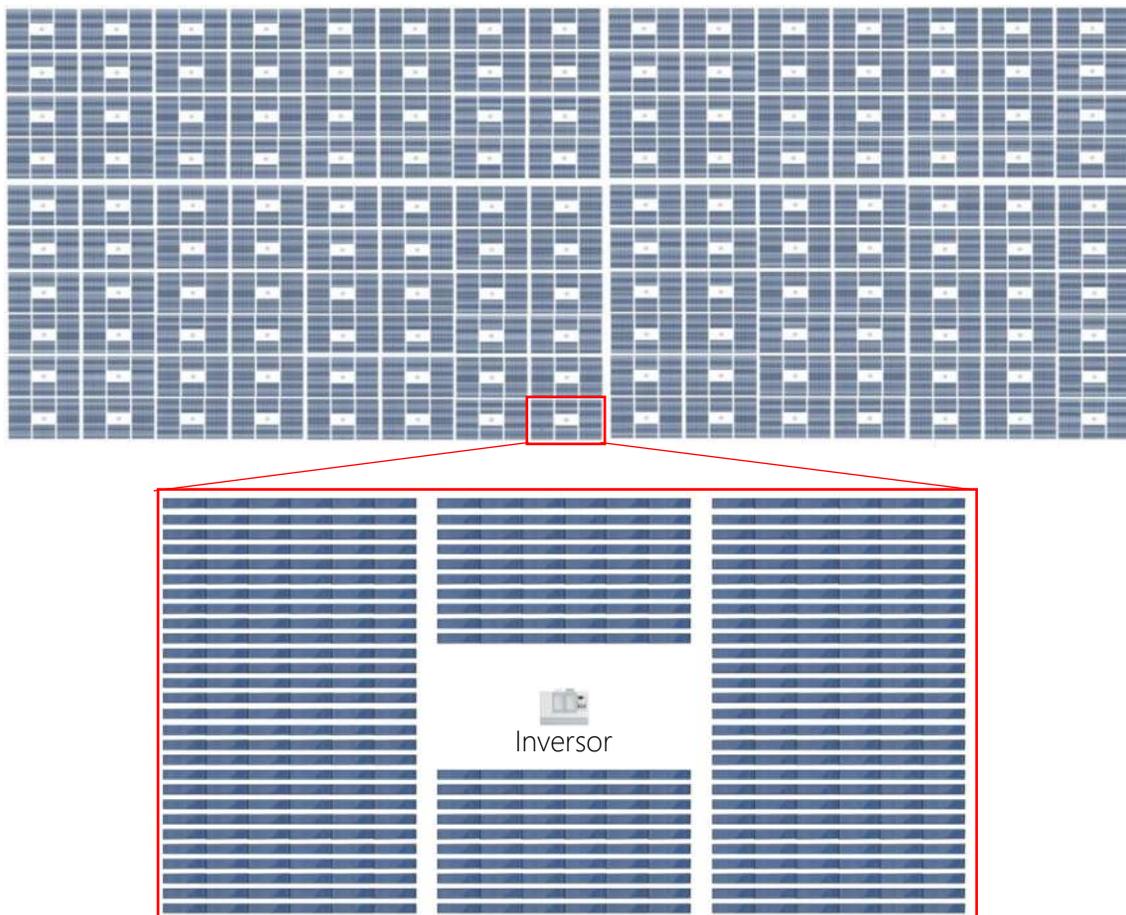


Figura 3.11-1 Diagrama esquemático de la central de 300 MW.

Capítulo 4

Caracterización de Centrales de Gran Potencia

En el capítulo 3 se ha visto, la factibilidad y el diseño de una central fotovoltaica de gran potencia en una cierta región de Michoacán. Esto con la finalidad de impulsar el desarrollo de la zona aprovechando el gran recurso solar que, como en la mayoría del territorio nacional, se tiene, y contribuir a la generación de energía eléctrica del país con energías renovables. En este capítulo se pretende cubrir una comparación entre algunos de los aspectos que caracterizan centrales eléctricas de la misma potencia pero que funcionan de manera diferente o con fuentes de energía primaria diferente. Para resaltar ventajas y desventajas que puede tener una central fotovoltaica de 300 MW frente a otras formas de generación de energía eléctrica.

4.1 Centrales Eléctricas en Comparación

Es importante tener en cuenta para esta sección, que tipo de centrales de producción de energía eléctrica serán tomadas en cuenta para la comparativa. Para esto se han elegido tres centrales las cuales son:

- Centrales de gas natural
- Centrales hidroeléctricas
- Centrales de carbón

que son las más importantes para la generación de energía eléctrica en el país (gas natural y carbón como combustibles no renovables e hidroeléctrica como "energía limpia") [28].

Las centrales tomadas en cuenta serán de la misma capacidad que la diseñada en el capítulo 3 o en su defecto (centrales que en su totalidad rebasen los 300 MW) al menos una unidad generadora de la misma o aproximada capacidad de potencia para hacer una mejor comparación.

Para tener una idea más clara se tomarán en cuenta ejemplos de centrales que actualmente están en operación como lo son:

1. Central Carboeléctrica José López Portillo

La Central Termoeléctrica José López Portillo de la Comisión Federal de Electricidad

tiene una capacidad instalada efectiva de 1200 MW en cuatro unidades generadoras de **300 MW** cada una [29].

Para este caso, se tomará en análisis comparativo solamente una unidad generadora.

2. La presa José María Morelos, "La Villita", es una obra hidráulica de usos múltiples construida por la Comisión del Río Balsas, dependencia de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, entre mayo de 1964 y julio de 1968. Está ubicada sobre el cauce principal del Río Balsas [30].

La generación de energía eléctrica con capacidad de **304000 kW**, aprovechando las descargas de la planta hidroeléctrica de El Infiernillo [30].

3. Central Ciclo Combinado Naco Nogales (combustible gas natural).

La Central de Naco Nogales se encuentra ubicada en la ciudad de Agua Prieta, en el Norte del estado de Sonora. Entró en operación comercial en octubre del 2003. Una planta de energía con una potencia de generación de **300 MW** [31].

4.2 Generación de Energía Eléctrica

El primer aspecto para esta caracterización es la comparativa de la energía que genera cada central al año. Puesto que la potencia es la misma para las tres, es de destacar que ya en operación existen centrales que cubren cierta demanda de energía eléctrica.

Debido a que se requieren de estrategias para el cubrimiento de la demanda de energía eléctrica que son diseñadas a partir de datos recogidos de demanda durante las 24 horas del día ciertos días de la semana. En donde es más importante tomar en cuenta los días laborales que son en los que se consume más energía eléctrica.

La figura 4.2-1 muestra una gráfica de las 24 horas del día de demanda energética de electricidad en donde se mencionan los tipos de carga a satisfacer.

La figura 4.2-2 muestra una gráfica que asigna centrales de generación de energía eléctrica de acuerdo con su fuente de energía primaria para cubrir la demanda del sistema eléctrico nacional.

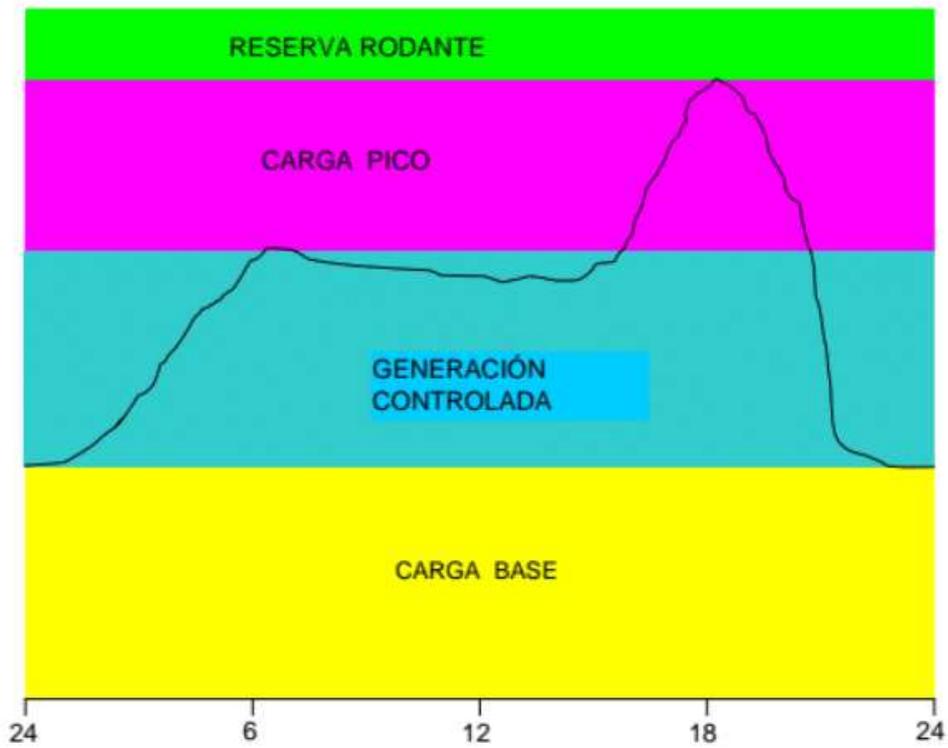


Figura 4.2-1 Estrategia de Generación para satisfacer la demanda [32].

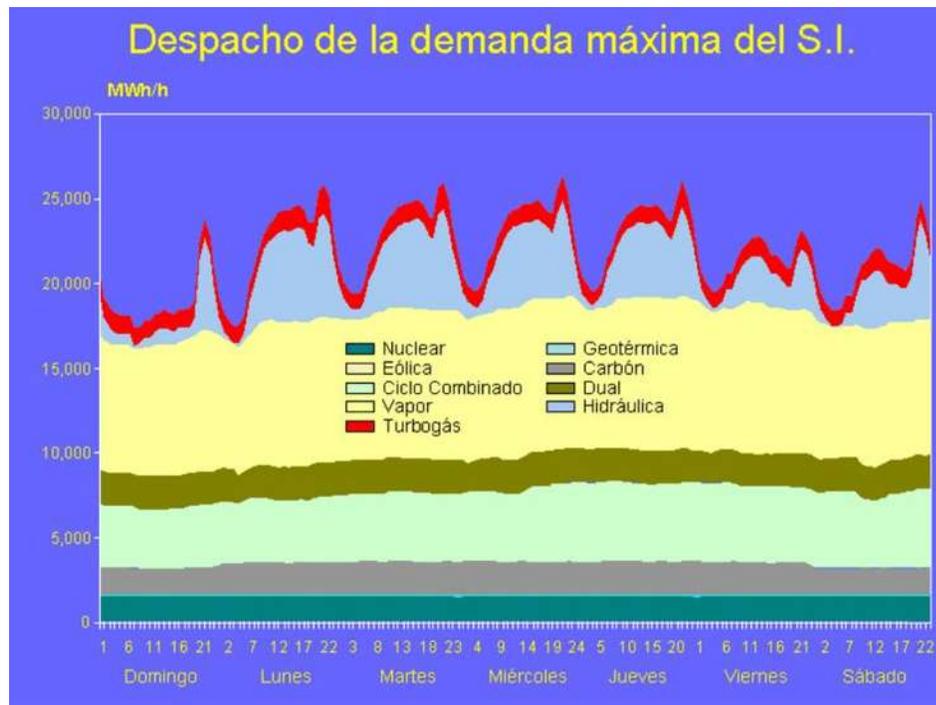


Figura 4.2-2 Asignación de unidades para cubrir la demanda del SEN [32].

Mencionado lo anterior se procede a destacar los datos de generación de cada una de las centrales en consideración.

La Central Termoeléctrica José López Portillo anualmente entrega una generación promedio de 9200000 MWh [29], o 9,200 GWh lo cual indica que la central eléctrica prácticamente está funcionando los 365 días del año las 24 horas del día ya que es una central de carga base [32], sin embargo, la consideración hecha para esta central es sólo con una unidad generadora, por lo tanto, se reduce a un total anual promedio de 2300 GWh.

Continuando con el esquema de la figura 4.2-2 tenemos que la central hidroeléctrica **La Villita** tiene una producción bruta cercana a los 1471 GWh al año [33]. Esta central aprovecha las descargas de la planta hidroeléctrica de El Infiernillo. Lo que quiere decir que es en un porcentaje dependiente de la operación de la presa Adolfo López Mateos y aunado a esto, el manejo que da el centro de control de energía del país como generador intermedio, para entrar a cubrir parte de la demanda. Los generadores intermedios o controlables están conectados al sistema durante casi todo este periodo de tiempo, pero no necesariamente a plena carga [32].

Por último, la central de ciclo combinado **Naco Nogales** tiene una producción anual cercana a los 1920 GWh [34]. Por el tipo de tecnología estas centrales caen en unidades de demanda pico. Las unidades de pico son mantenidas conectadas en el sistema únicamente durante unas pocas horas todos los días ya que pueden tomar carga muy rápidamente y son usadas para propósitos de satisfacer los incrementos rápidos de demanda que ocurren durante el periodo de carga pico; sin embargo, La Central se diseñó para operar en forma continua las 24 horas del día, los 365 días del año y la operación será de acuerdo con las políticas y procedimientos del Reglamento de Despacho y Operación del Sistema Eléctrico Nacional [34].

La figura 4.2-3 muestra una gráfica comparando la producción anual de energía eléctrica de cada central.

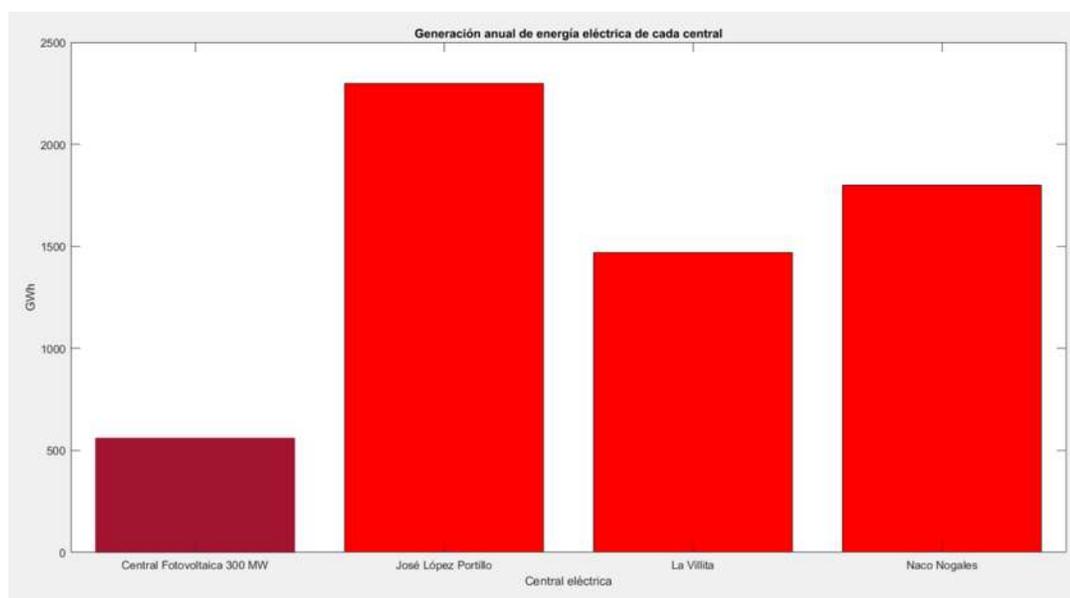


Figura 4.2-3 Gráfica comparativa en generación de energía eléctrica anual de cada central.

4.3 Aspectos Ambientales

El siguiente aspecto comparativo importante es el ambiental, como se mencionó en el capítulo 1, es importante impulsar el desarrollo de tecnología para la generación de energía eléctrica de manera amigable con el medio ambiente. Sin embargo, en los últimos años se ha visto una mejora en eficiencia y en reducción de la contaminación por las grandes centrales de energía eléctrica, no obstante, estas siguen contaminando en cierta medida; en cambio para otras, el impacto ambiental sucede a la hora de su construcción o implementación.

Se comienza analizando el impacto ambiental de la central térmica **José López Portillo**.

El principal contaminante emitido por las plantas carboeléctricas generadoras es el bióxido de carbono, con 99.3% [35], seguido muy de lejos por el bióxido de nitrógeno, con 0.6% [35], con un promedio de 7.3 millones de toneladas [35], esto para la central completa, el estudio se comprende con los datos de una unidad lo que indica que el consumo anterior debe de ser dividido entre cuatro, lo que da un aproximado de **1.825 millones de toneladas**, sin mencionar el enorme impacto ambiental en la minería para la extracción del carbón. La central tiene una superficie de 12.94 km² [36] o en la cual se contempla el patio en donde se tiene el carbón almacenado, sin embargo, la consideración de 300 MW de una unidad obliga a que se tome en consideración solo una cuarta parte del terreno ocupado, lo que equivale a 3.235 km² o **323.5 hectáreas**.

La minería de carbón causa una degradación extensa al ecosistema natural como los bosques y puede dejar cicatrices irreparables en el paisaje [37].

Para la central de ciclo combinado **Naco Nogales** se tiene un consumo anual aproximado de gas natural de 389 millones de metros cúbicos en condiciones estándar [33], para la generación de energía eléctrica mencionada en la sección 4.2. Por lo tanto, teniendo este dato de consumo se procede a utilizar una hoja de cálculo de emisiones descargada de la página <https://www.camarazaragoza.com> cuya interfaz se muestra en la figura 4.3-1 con los datos de la central Naco Nogales ya introducidos para obtener las emisiones anuales de contaminación.

Por otro lado, la central de gas natural cuenta ocupa una superficie aproximada de **28.139 Ha**.

Cálculo automático de emisiones totales en relación a los consumos energéticos de sus instalaciones

FACTOR DE EMISIÓN DE CONSUMO ELÉCTRICO

	Consumo anual	Unidades de medida física	Factor de emisión (Kg de CO2 eq/kWh)	Kg de CO2 eq
Electricidad	1920000000	kWh	0.385	739200000

FACTORES DE EMISIÓN COMBUSTIBLES

Combustible	Consumo anual	Unidades de medida física	Factor de conversión	kWh	Factor de emisión (Kg de CO2 eq/kWh)	Kg de CO2 eq
Gas natural	390000000	Nm3	10.7056 kWh/Nm3	4175184000	0.2016	841717094.4
Gasóleo		Litros	10.6 kWh/l	0	0.2628	0
Fuel		Kg	11.1611 kWh/Kg	0	0.2736	0
GLP Genérico		Kg	12.6389 kWh/Kg	0	0.234	0
Carbón nacional		Kg	5.6972 kWh/Kg	0	0.4032	0
Carbón de importación		Kg	7.0917 kWh/Kg	0	0.3564	0
Gas butano		Nº de bombonas o Kg	12.4389 kWh/Kg	0	0.2383	0

Figura 4.3-1 Calculadora de emisiones [38].

En la figura 4.3-1 se tienen dos cifras aproximadas de contaminación anual de CO₂, una calculada mediante el promedio de consumo (en este caso generación) anual de **0.739 millones de toneladas** y otra calculada mediante el dato de consumo de gas natural anual de **0.841 millones de toneladas**.

El gas natural emite de un 50 a un 60 por ciento menos de CO₂ cuando se combustiona en una nueva planta de energía de gas natural comparado a las emisiones típicas de una planta de carbón [39].

Donde sí que se encuentran sus emisiones son en la extracción y perforación del gas natural de los pozos y su transporte a través de las tuberías lo que resulta en el filtrado de metano, un gas más potente incluso que el CO₂ [39].

Para el caso de la central hidroeléctrica La Villita, específicamente por el tipo de tecnología empleada para la producción de energía eléctrica (véase sección 2.4) no se tienen emisiones de gases de efecto invernadero durante su operación; el verdadero y gran impacto ambiental sucede en la obra civil que requiere la central para su montaje y posterior operación. Si bien después de esto la energía es práctica y totalmente limpia, el daño que causó es irremediable y puede afectar incluso, dependiendo de la magnitud de la obra, con un cambio irreversible del ecosistema de una geografía muy extensa.

La presa La Villita cuenta con una superficie de **6125 hectáreas**; una capacidad de almacenaje de **534900000 m³**, a una altura de **60 m** sobre el nivel del mar [30]. Si bien la presa fue construida con muchos otros propósitos, por ejemplo, que permitió la construcción de la Planta Siderúrgica Las Truchas, el Puerto Lázaro Cárdenas. Así como también el riego de 18000

hectáreas de las costas de Guerrero y de Michoacán el control de avenidas para proteger localidades y tierras, en las zonas costeras; el paso de la carretera costera del Pacífico, sobre la corona de la cortina y sobre un puente construido sobre el cimacio del vertedor de demasías de la propia presa y por último, el permitir la navegación, pesca y recreación, en el lago con longitud de 60 km, hasta el pie de la presa de El Infiernillo [30], no deja de generar un alto impacto ambiental por sus dimensiones y la modificación del medio ambiente en donde se encuentra.

Por último, se tiene la **central fotovoltaica de gran potencia** diseñada en este capítulo, en donde el impacto ambiental se puede ver y tomar en gran importancia para esta comparativa en dos razones: la **producción** de la gran cantidad de **módulos fotovoltaicos** que se requieren, así como sus inversores, como las **400 hectáreas** requeridas para su montaje.

En la producción del panel solar se produce un gasto energético que genera residuos, como partículas de **NOx, SO₂, CO₂** etc. Esto se debe a que la energía utilizada en la fabricación del panel solar tiene su origen en la mezcla de fuentes energéticas convencionales del país de fabricación [40].

La obtención de silicio de grado metalúrgico es requerida en grandes cantidades para la industria del acero, siendo una pequeña proporción de este material la dedicada a la fabricación de las obleas de silicio [40].

Todos los materiales utilizados para la producción de células fotovoltaicas son utilizados en mayor medida para la industria de otros materiales y electrónicos por lo tanto no es un factor que considerar. Finalmente, se tiene en consideración el impacto de la montura de los paneles fotovoltaicos, la estructura, inversores y otros equipos de los que se vale el funcionamiento final de la central.

En la tabla 4.1 se observa el resumen de mayor impacto ambiental de cada central eléctrica en diversas formas.

Tabla 4.3-1 Resumen del daño ambiental de cada central eléctrica.

Central	Impacto ambiental		
	Gases de efecto invernadero (millones de toneladas) de la planta en operación	Modificación del ecosistema	Impacto por terreno necesario (Ha)
José L. Portillo	1.825		323.5
Naco Nogales	0.841		28.139
La Villita	0		6,125
FV 300 MW	0		400

- Extremo
- Severo
- Considerable
- Sin efecto

4.4 Costos

Las centrales de generación de energía eléctrica requieren de diversos gastos para su total funcionamiento, estos gastos difieren de central a central debido, propiamente, al tipo de tecnología que emplean o con el que trabajan. Se calcula el costo de cada uno de los gastos necesarios, los cuales van desde la inversión inicial o costo de obra, costo de la fuente primaria de energía, costos de mantenimiento hasta incluso costos de modernización y rehabilitación.

4.4.1 Costos de Obra

Un aspecto muy importante (sino es que el más importante) en consideración para que un proyecto de esta naturaleza (generación de energía eléctrica) se lleve a cabo es el costo de la obra o la inversión inicial que tendrá. Esto comprende la obra civil y el costo de materiales a implementarse para el total funcionamiento de la central eléctrica, maquinaria, tecnología de control, etc. El presupuesto puede o no incluir el costo de la subestación transformadora y según el mercado actual de energía, el retorno de inversión de acuerdo con el precio de venta que se maneja por la tecnología empleada para la producción de energía eléctrica. En esta sección el enfoque será exclusivamente en el costo aproximado que requiere o requirió la central eléctrica.

Se comienza analizando las centrales termoeléctricas ya que el principio de operación es similar y los materiales implementados tienen un parecido comparable.

Uno de los principales insumos para la construcción de los equipos y componentes de una central termoeléctrica de cualquier tipo es el acero, material que ha bajado su disponibilidad debido a una sobredemanda a nivel mundial, lo que se suma a la menor disponibilidad de materias primas para su manufactura: níquel, hierro y cobre [41].

Para la central carboeléctrica **José López Portillo** se tiene el dato del costo aproximado de su inversión inicial (1982). El costo unitario actualizado al inicio de operación es del orden de **1700 USD/kW** [42], lo que indica que para una unidad de 300 MW se tuvo una inversión aproximada de **510 millones de dólares**, sin embargo, también se tienen datos de inversiones que se han hecho para su rehabilitación y modernización en los últimos años. En la figura 4.4-1 se observan las cifras desde el 2014 de las inversiones en millones de pesos que se han efectuado en esta planta.

La cifra asciende a un total de 2,410 millones de pesos, esto para la central en su totalidad, cifra que se podría reducir si el estudio se concentra en solo una unidad como se ha venido desarrollando en el presente trabajo, lo cual indicaría a groso modo que la unidad de 300 MW ha tenido un costo de rehabilitación de aproximadamente

de 602.5 millones de pesos lo que al precio actual del dólar suponen 32.05 millones de dólares.

	2014	2015	2016	2017	2018	2019-2028	Total
Obra presupuestal (13)							
Modernización de centrales hidroeléctricas	815	463	475	432	110	1,417	3,712
Modernización de centrales térmicas	1,222	330					1,552
C.T. Tula unidad 5	767	1,271	1,460	515			4,013
Mantenimiento y estudios de centrales eólicas	121	74					195
Mantenimiento y estudios de centrales geotérmicas	1,109	410	327				1,846
Perforación de pozos en Cerro Prieto	899	945	1,275				3,119
Otros	485	368	43	30	5		931
Subtotal	5,418	3,861	3,580	977	115	1,417	15,368
Obra pública financiada (11)							
CCC Poza Rica	36						36
CCC El Sauz Paquete 1	57						57
CT Altamira Unidades 1 y 2	1,248	1,249	1,244	151			3,892
CT José López Portillo	708	708	635	309	50		2,410
CCC Tula Paquetes 1 y 2	34	1,685	1,687	436			3,842
CH Temascal Unidades 1 a 4	43	119	110	34			306
Otros	2,776	3,670	2,921	1,570	597	302	11,836
Subtotal	4,902	7,431	6,597	2,500	647	302	22,379
Total	10,320	11,292	10,177	3,477	762	1,719	37,747

Figura 4.4-1 Programa de inversiones de rehabilitación y modernización de centrales generadoras (millones de pesos de 2013) [43].

Siguiendo con la segunda central termoeléctrica, la central de gas Naco Nogales de Gas Natural Fenosa® tuvo una inversión de \$216 millones de dólares [44], la cual fue concluida en octubre del 2003 [31].

En tercer lugar, se tiene la presa José María Morelos La Villita con una inversión de \$398.373 millones de dólares [45], terminada en el año 1968 [45].

Por último, se tiene el costo de inversión de la central fotovoltaica de 300 MW. Aunque se tomará en cuenta una cotización aproximada del costo de todos los componentes que necesitará la central fotovoltaica, se comienza analizando de manera concreta el costo final de inversión que necesitó una planta solar de la misma potencia en Francia en el año 2015, France's 300 MW Cestas solar plant tuvo un costo de \$382 millones de dólares [46].

Sin embargo, se tienen datos de costos de paneles fotovoltaicos proporcionados por la marca Solartec® como se muestra en la figura 4.4-2. El cálculo del costo de los paneles se estimó según el precio y corresponde solamente a los módulos fotovoltaicos.

El costo de los módulos fotovoltaicos es típicamente entre la tercera parte y la mitad del costo total del sistema fotovoltaico, dependiendo del tamaño del proyecto y del

tipo de módulo fotovoltaico [47].

El costo del balance del sistema para los sistemas fotovoltaicos se conforma, principalmente, de los siguientes aspectos [47]:

- El inversor
- Los componentes requeridos para la montura del sistema fotovoltaico
- Las cajas combinadoras y demás componentes eléctricos
- Preparación del lugar e instalación, costos de labor por la instalación y conexión a la red.
- Diseño del sistema, administración, gastos generales del instalador, tarifas de permisos y costos de financiamiento inicial.

PRECIOS PALLET

PANELES DE LINEA					
ITEM	MODELO	PRODUCTO	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
1	S60PC-260	PALLET DE S60PC-260 W	26	\$ 135.20	\$ 3,515.20
1	S72PC-315	PALLET DE S72PC-315 W	23	\$ 166.95	\$ 3,839.85
1	S72PC-320	PALLET DE S72PC-320 W	23	\$ 169.60	\$ 3,900.80
1	S72MC-330	PALLET DE S72MC-330 W	23	\$ 174.90	\$ 4,022.70

Solartec
Energía Renovable

Figura 4.4-2 Costos de paneles de la marca Solartec®.

De acuerdo con la figura 4.4-2 el costo aproximado del total de paneles fotovoltaicos tomando en cuenta el precio del modelo anteriormente elegido (S72PC-320) de \$169.60 dólares, se tiene un total, para 937500 módulos, de **159 millones de dólares**.

Debido a que el balance del sistema (costo de los inversores, componentes eléctricos, tramites, permisos, etc.) es muy difícil de medir y/o cuantificar, se toma en consideración las gráficas de la figura 4.4-3 en donde se muestra el porcentaje del costo de los módulos

fotovoltaicos respecto al balance del sistema y lo que conforma en costo al mismo balance del sistema (BOS por sus siglas en inglés).

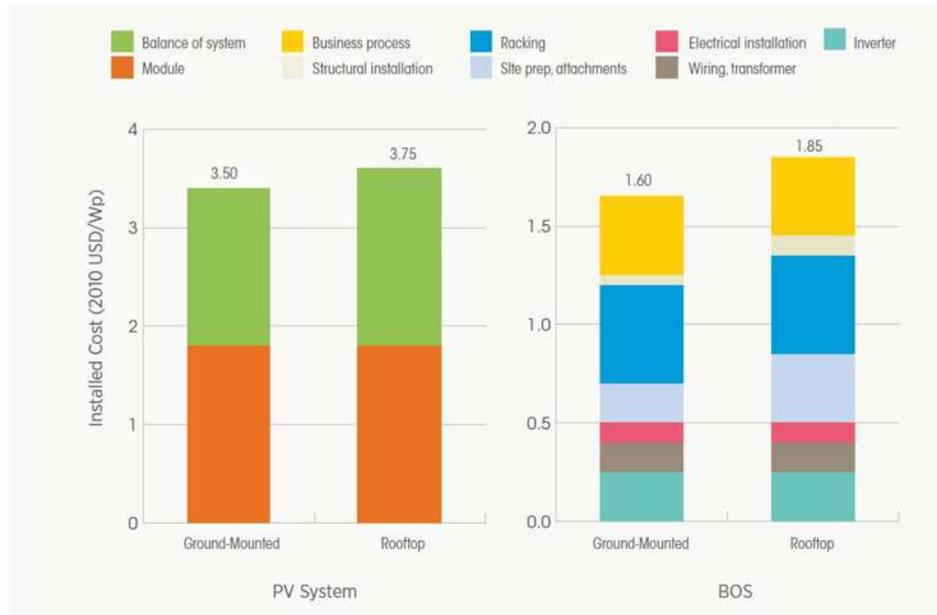


Figura 4.4-3 Desglose de costos de los sistemas fotovoltaicos convencionales en los Estados Unidos, 2010 [47].

Así mismo, en la figura 4.4-4 se muestra el desglose de costos para diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos.

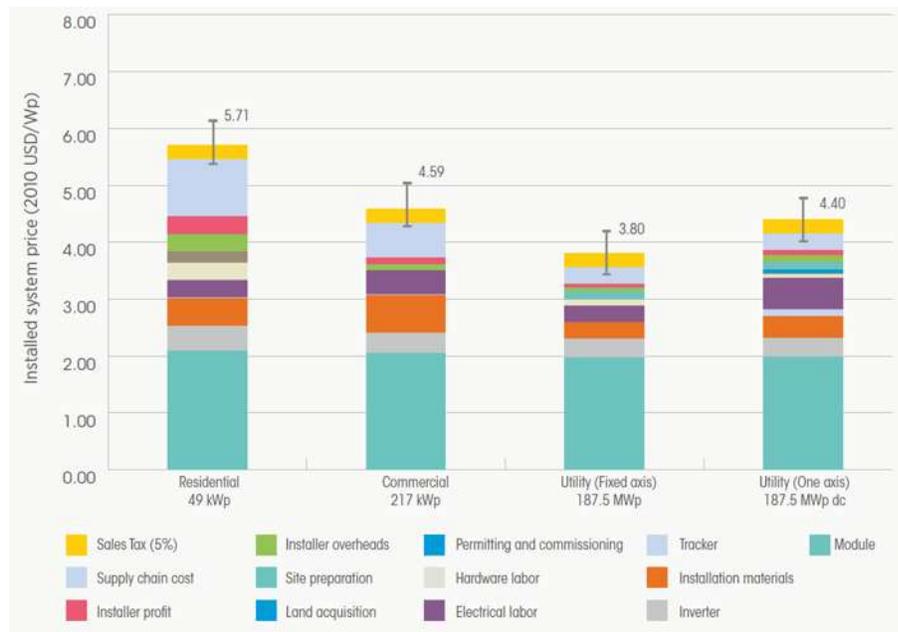


Figura 4.4-4 Desglose de costos de sistemas residenciales, comerciales y de escala utilitaria en los Estados Unidos, 2010 [47].

En la figura 4.4-5 se muestra una gráfica de la comparación del costo de inversión de cada central eléctrica en el momento de su construcción.

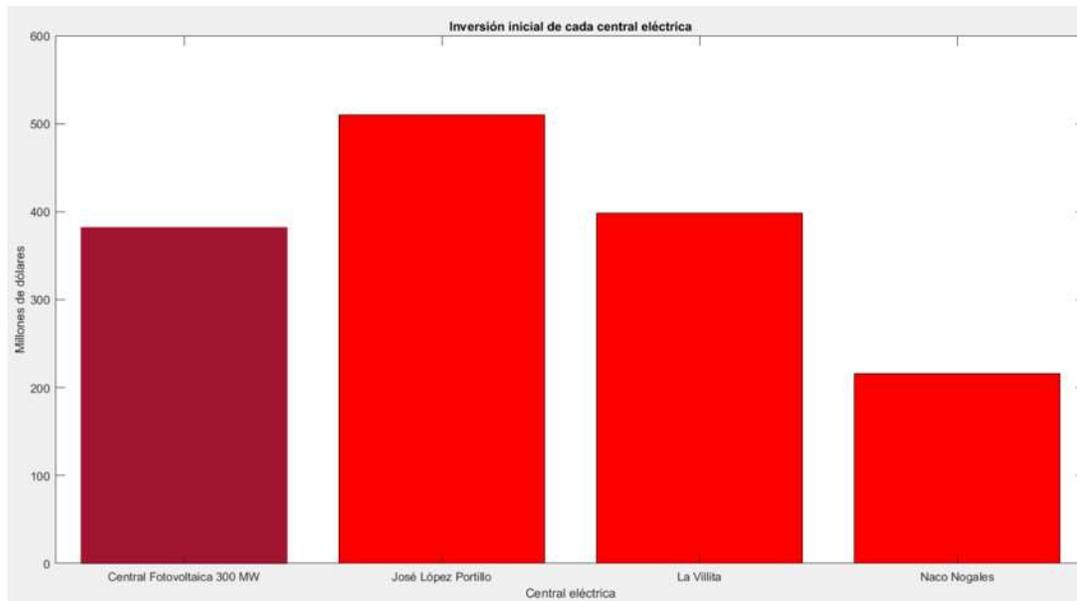


Figura 4.4-5 Gráfica comparativa del costo de inversión de cada central eléctrica.

4.4.2 Costo de Mantenimiento

Dentro de los costos y gastos que se tendrán en estos proyectos, es importante considerar el costo de mantenimiento que requiere cada cierto tiempo cada una de las plantas en esta comparativa, ya que es indispensable para el buen funcionamiento de la central, de otro modo la vida útil se reduciría drásticamente y posiblemente el retorno de inversión nunca se logre, además, se tienen que cumplir estrictos estándares de calidad en el funcionamiento y operación de esta.

Para comenzar, cabe aclarar que el periodo o la frecuencia con que el evento de mantenimiento para cada central sucede es diferente para cada central eléctrica, esto debido al tipo de tecnología con la cual producen energía eléctrica. Enseguida se analizará el costo de dicho mantenimiento, todo esto será en base a un periodo anual.

Los costos de operación y mantenimiento no son espectacularmente bajos para el carbón. Por ejemplo, las plantas subcríticas, como opción más barata, llegan a 43\$ por kW, aumentándose los costos de manera constante a través de las modernas tecnologías de combustión de carbón ultrasuper crítica y supercríticas más eficientes antes de llegar a los **88\$ por kW** [48]. Lo que supone un total aproximado de **26.4 millones de dólares** anuales en mantenimiento en el caso más eficiente de la unidad de 300 MW de la central **José López Portillo**.

La producción de electricidad a partir del gas es conocida por tener relativamente unos bajos costos de operación y mantenimiento si se compara con otros métodos de

generación, y las estadísticas de la IEA lo demuestran. Las centrales eléctricas equipadas con turbinas de combustión de ciclo simple, el más común (y menos eficiente) en tecnología de gas, han llegado a un promedio anual de costo por operación y mantenimiento de sólo 20\$ por kilovatio (kW) producido [48].

De acuerdo con cifras de la IEA, las plantas de gas más sofisticadas también se benefician de un panorama económico favorable en este sentido. La tecnología de turbinas de gas de ciclo combinado (CCGT, por sus siglas en inglés) pueden aumentar la eficiencia en un 39% para turbinas simples a un 60% en coste O&M promedio de **25\$ por kW** [48]. Cantidad que arroja un total aproximado anual de **7.5 millones de dólares** para la central de **Naco Nogales**.

La energía hidroeléctrica a gran escala es en la actualidad significativamente más barata de operar y mantener que los proyectos de menor envergadura; el primero tiene un coste promedio anual O&M de **53\$ por kW**, mientras que las más pequeñas alcanzan los 70\$ [48]. En este caso el costo aproximado de mantenimiento anual para la central hidroeléctrica **La Villita es de 15.9 millones de dólares**.

Los costos de mantenimiento de una central fotovoltaica se adjudican a la relativa simplicidad del sistema, la cual termina siendo el factor clave en el costo del propio mantenimiento. La limpieza de los módulos fotovoltaicos para evitar problemas de captación de la radiación solar, junto con una minuciosa monitorización de las unidades de inversores y subsistemas de corriente alterna, son las tareas de mantenimiento principales en este tipo de infraestructuras. El costo para esto asciende a los **\$ 6.5/kW** [47]. Para la **central fotovoltaica de 300 MW** el costo de mantenimiento asciende a un aproximado de **1.8 millones de dólares** anuales.

Teniendo establecidos los datos de costo de mantenimiento por año por kW se presenta en la figura 4.4-6 una gráfica en donde se muestra la comparación de cada central en dicho ámbito.

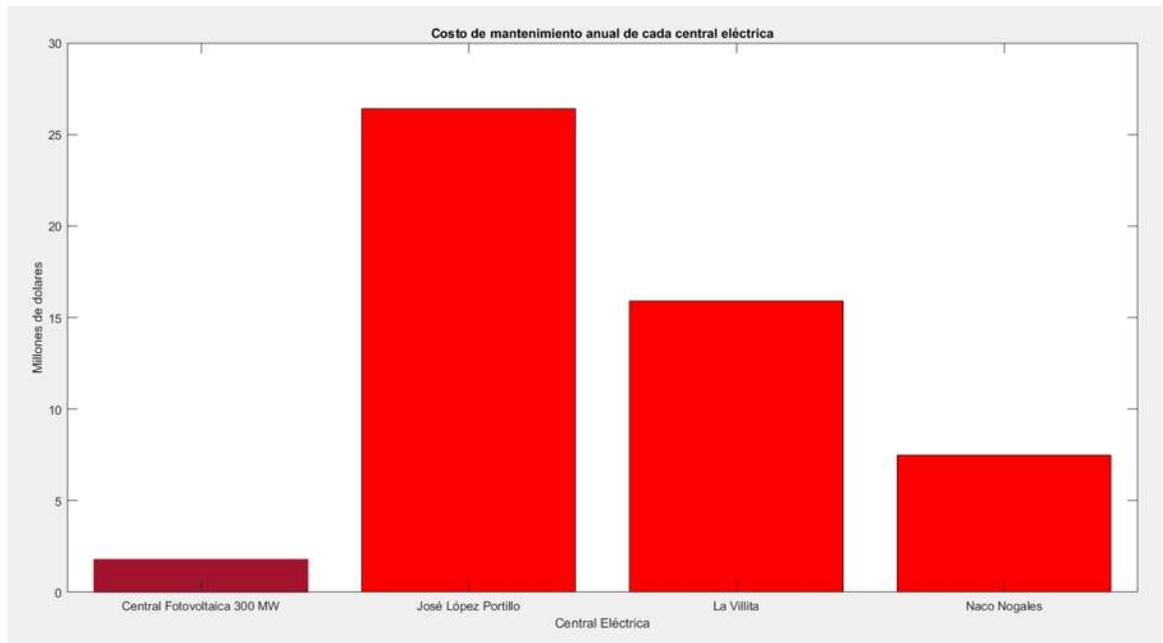


Figura 4.4-6 Gráfica de comparación del costo de mantenimiento de cada central eléctrica.

4.4.3 Combustible (costo de operación)

Finalmente se tiene el costo necesario para la operación de las plantas en cuestión, este costo se refiere al gasto en combustible o en la energía o recurso primario que requiere la central para operar. Principalmente, se somete a análisis el costo de los combustibles fósiles o fuentes no renovables de los que hacen uso algunas de estas centrales. Los datos son de volúmenes y cantidades para la producción de energía anual de cada central (véase sección 4.2).

El análisis comienza con el costo del carbón para la central termoeléctrica José López Portillo. En la región de Nava, Coahuila existen dos centrales carboeléctricas: la central ya mencionada José López Portillo de 1200 MW y la central Carbón II de 1400 MW ambas centrales son operadas por la Comisión Federal de Electricidad y requieren de 3 millones de toneladas de carbón al año para su abastecimiento [49]. CFE abre subastas para la participación de diversas empresas mineras para la compra de carbón.

Para el año 2016 las subastas entre las diferentes empresas para los tipos de carbón requeridos por CFE fluctuaban en un rango de entre 950 y 790 pesos por tonelada [50]. Considerando que las dos centrales tienen una capacidad muy similar se calcula el precio para aproximadamente 1.5 millones de toneladas anuales que requeriría la central **José López Portillo** para su abastecimiento. Para el caso de estudio se examina una cuarta parte del abastecimiento debido a que el anterior dato es de la central en su totalidad, por lo tanto, se contemplan **375000 toneladas** anuales a un precio

promedio convertido a dólares (1 dólar= 18.56 pesos mexicanos) de **\$46.89 dólares por tonelada**, lo que da un total de **17.583 millones de dólares**.

La generadora eléctrica mexicana **Fuerza y Energía de Naco Nogales S.A. de C.V.** es una filial de propiedad absoluta del grupo español Gas Natural Fenosa y controlada por la división internacional de generación del grupo, Global Power Generation. La firma está a cargo de la operación de la central de ciclo combinado Naco Nogales [51].

Por lo anterior, acceder al costo del gasto que se tiene en combustible es muy difícil, ya que la misma compañía puede suministrar a un muy bajo precio su propio recurso sin dar lugar a competencia o a otros proveedores. Para la operación de la central de ciclo combinado de Naco Nogales en el estado de Sonora se tiene un consumo anual de **390 millones de metros cúbicos**. El precio se tomará en cuenta de la producción de gas natural de la empresa PEMEX.

Como productor de este hidrocarburo PEMEX, en el año 2016, tuvo una producción promedio diaria de 5793.75 millones de pies cúbicos diarios [52], lo que equivale a una producción anual de 2 billones 114718 millones de pies cúbicos.

Tan sólo durante el primer semestre del año pasado Pemex envió a la atmósfera 13.1% de su producción, equivalente en valor a 360 millones de dólares [53]. Lo que equivale a 138514.078 millones de pies cúbicos o 3922.281 millones de metros cúbicos.

Tomando ese valor como referencia, el valor aproximado del consumo anual de la central Naco Nogales con el precio de gas natural de PEMEX es de **35.795 millones de dólares**.

En el caso de la planta hidroeléctrica **La Villita** no existe un gasto por combustible debido al tipo de tecnología que emplea para la generación de energía eléctrica. Por lo tanto, **no existe un costo** en este caso, sin embargo, es importante mencionar que la generación depende de la clasificación y/o la prioridad del uso del agua según la Comisión Nacional del agua, ya que la mayoría de las presas en México solventan los usos para riego agrícola y agua potable para comunidades los cuales tienen mayor prioridad [54]. Sin mencionar que la presa, como se mencionó anteriormente, depende de las descargas de la hidroeléctrica El Infiernillo.

Finalmente se tiene la **central fotovoltaica de 300 MW** la cual, al igual que la hidroeléctrica La Villita, no requiere de ningún tipo de combustible para su operación salvo la energía de radiación solar presente durante el día que, hasta la fecha, **no tiene un costo**. Debido a esto se puede resumir que básicamente no es dependiente de ninguna comisión de regulación u organismo de control del recurso solar.

En la figura 4.4-7 se muestra gráficos que contrastan cada uno de los aspectos comparativos de esta sección, considerándose que los costos de la inversión inicial son tomados en cuenta, por conveniencia y simplicidad, como si cada central hubiese entrado en operación el mismo año.

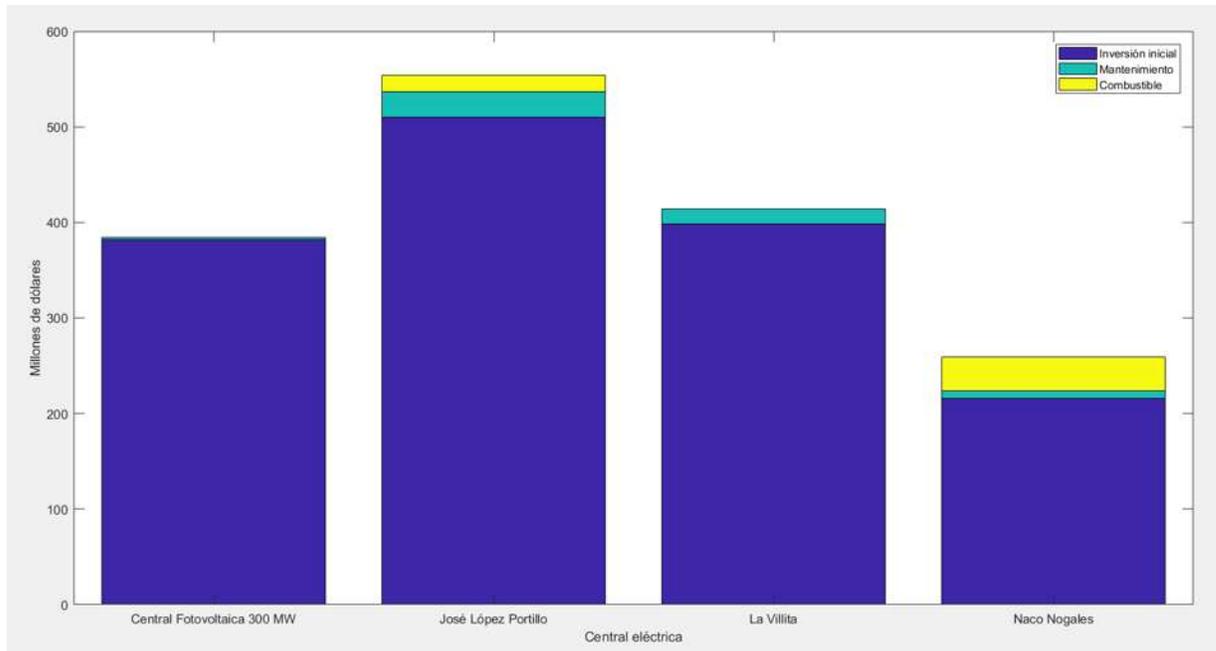


Figura 4.4-7 Comparativa de costos para un mismo año de inicio de operaciones de cada central eléctrica.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Desde que se hizo evidente la reforma energética en México y sus perspectivas de generación de energía eléctrica a base de fuentes renovables de energía, entre otros aspectos; surge la necesidad de encontrar y explotar las fuentes que tienen buen potencial para la producción de energía eléctrica en el país. Para este estudio, se trató de la radiación solar. Fuente de energía con la que el territorio nacional, privilegiadamente, cuenta de manera formidable, lamentablemente no se aprovecha mucho su potencial.

La inversión en infraestructura para la generación de energía eléctrica es muy importante para el desarrollo de la sociedad como se vio en el capítulo 1, sin embargo, las condiciones o los recursos naturales con las que cuenta cada país son diferentes. Esto obliga a cada nación a optar por diversas formas de generar energía eléctrica.

En el capítulo 1 se presentaron la mayoría de las fuentes renovables de energía eléctrica, presentando ciertas ventajas y desventajas que figuran en las propuestas de aprovechamiento de diferentes regiones en las que están disponibles, tomando esto en cuenta, se presentó entonces una justificación alentando a diseñarse en cierta región del país una central fotovoltaica de gran potencia, en base a los datos favorables de dicha zona y pretendiendo ayudar a combatir una innegable problemática que presenta el territorio descrito así como la meta de la reforma energética.

Para esto, se han desglosado una serie de objetivos que ayudarían a introducirse al desarrollo del trabajo tratando de satisfacer cada punto que se propuso.

En el capítulo 2 se estudiaron las formas convencionales de generación energía eléctrica, comenzando con las centrales térmicas que se valen de ciertos ciclos y de una manera común de aprovechamiento de los combustibles fósiles y el carbón mineral, así como los combustibles nucleares, en donde se muestra en detalle los ciclos y procesos que se tienen para la conversión de la energía calorífica inicial a la eléctrica final. Dentro del mismo capítulo se estudiaron también fuentes que no utilizan combustibles que se encuentran en el interior de la tierra si no de los recursos naturales y renovables que el planeta presenta como el caso de las centrales hidroeléctricas o las centrales eólicas y otras menos comunes, sin embargo, en constante estudio y desarrollo como las formas de aprovechamiento de la energía del mar.

Para el capítulo 3, se entró en detalle a contemplar y detallar el recurso solar de energía que se presenta en el planeta tierra, para comenzar desde el punto inicial con el estudio de esta fuente inagotable de energía a escala humana y el diseño de una central fotovoltaica de 300 MW.

Puesto que en el capítulo 2 se hizo mención de las centrales termosolares, las cuales aprovechan el calor de la radiación solar, se tuvo que diferenciar la forma de explotación de esta energía para la central fotovoltaica. Para esto se estudió la radiación electromagnética, su forma, interacción con la materia y las maneras en que llega a la tierra para su aprovechamiento, esto dio partida al estudio del efecto fotoeléctrico de la luz y la forma de captación mediante celdas solares que establecen el elemento principal para la producción de energía eléctrica y que, en conjunto, conforman los módulos fotovoltaicos. Una vez establecida la manera de captación de la energía y la forma en que llegaba del sol a la tierra se examinó la disposición y orientación que se debía tener de los paneles para un mejor aprovechamiento de la radiación. Las coordenadas geográficas y el cálculo de ángulos dieron el apoyo a esta cuestión.

Para seguir con el objetivo del trabajo, se continuó con el potencial de radiación solar presente en México el cuál, debido a la investigación hecha en diversas fuentes y con herramientas en línea, se encontró sorprendente y muy beneficioso debido a las coordenadas geográficas en las que se encuentra el país. Al haberse establecido estos datos fructuosos se contempló la investigación del potencial en una región específica del país; la región de Tierracaliente, Michoacán que de acuerdo con lo capturado en la tabla 3.7-1 el promedio de radiación solar supera a la media del país y es comparable con la radiación presente en los estados de la nación con el mayor recurso solar, con promedios mayores (en la mayoría de los casos) a 6 kWh/m², para esto, también fueron tomados en cuenta aspectos muy relevantes como las temperaturas de la región para cálculos posteriores más reales y precisos.

Ahora, al haber resaltado de manera satisfactoria las condiciones tan favorables del recurso solar que presenta tanto México como Tierracaliente se procedió realizar el diseño de la central de 300 MW con los datos de la región de Michoacán, partiendo con un pequeño diseño estándar en el cual se cubrieron 2000 kWh de demanda bimestral con un total de 20 paneles en donde se eligieron paneles de 320 Wp ya fue la potencia máxima que comercialmente maneja la empresa, así como un inversor central de potencia cercana a la potencia instalada del sistema fotovoltaica de la marca SMA debido a que posteriormente sería dicha empresa (SMA) la que se escogería para suplir la necesidad de grandes inversores centrales en el diseño de la central de gran potencia. Lo conflictivo en el diseño de la central de 300 MW pudo ser la cantidad estratosférica de módulos fotovoltaicos que se requirieron para lograr la potencia prevista, tanto para los métodos de interconexión, como el para el espacio requerido; sin embargo, la solución para la conexión fue encontrada con grandes inversores que admiten arreglos de grandes cantidades de paneles, ya sea logrando su máxima corriente de admisión o su máximo voltaje de admisión, de esta manera mediante

arreglos descritos en la sección 3.11 se solvento el problema. Para el caso del espacio fue necesario considerar las sombras que producirían la totalidad de paneles para el caso más crítico, que como se indicó en la sección 3.12 es en invierno.

Para el capítulo 4 se compararon las características más importantes de tres centrales eléctricas con la central fotovoltaica diseñada, todas de aproximadamente la misma potencia instalada pero cada una de diferente tecnología para la generación de energía eléctrica.

Se comenzó analizando la energía generada anualmente de cada una, lo que gráficamente arrojó una producción muy baja por parte de la central fotovoltaica en comparación con las otras, esto debido netamente a la dependencia del sol para la generación de energía eléctrica, en cambio las otras centrales pueden funcionar debido a su tecnología, las 24 horas del día, los 365 días al año, esto claro, siempre y cuando la disponibilidad de combustible o agua para la hidroeléctricas esté siempre presente porque el ciclo del día es infalible. Este, sin duda es el punto débil de dicha central.

El siguiente punto en comparación es el aspecto ambiental, el cual se extiende desde la emisión de gases dañinos, hasta el impacto en el ecosistema que conlleva su construcción. En este punto, como se esperaba, la central en estudio fue la más amigable debido a que no genera ningún tipo de contaminación atmosférica, salvo en la construcción de los componentes, lo cual no podría ser un punto en contra ya que también existe una amplia contaminación en los componentes de las otras plantas. Por otro lado, está el cambio dañino al ecosistema por la presencia de la central en una zona, en este aspecto la mayor repercusión fue de la central hidroeléctrica, ya que estudios indican que la marca ambiental que su construcción genera es gigantesca, modificando incluso hasta el clima de la región, sin embargo las centrales térmicas no se quedan atrás, puesto que el constante arrojó de gases de efecto invernadero a la atmosfera de la zona causa una grave modificación negativa del ecosistema, en cambio, la central fotovoltaica no produce ningún cambio significativo por la puesta de la misma ya que no requiere de algún recurso natural que se deba alterar salvo el enorme espacio que necesita. Ahora si el punto de comparación es el territorio que ocupa cada central, esta (central fotovoltaica) cae en tercer lugar ya que junto con el embalse que la hidroeléctrica requiere, es más de doce veces el espacio necesitado por la planta de energía solar y la central carboeléctrica requiere de más del doble del terreno necesitado por la misma.

Los costos de cada central fueron una gran característica que marco una notable diferencia, comenzando por la inversión inicial que tuvo cada una al momento de su construcción y puesta en operación. Los costos de esto están representados en dólares y cabe destacar que fueron en diferentes años en donde se dispuso de cada planta de producción de energía eléctrica, por lo tanto, el dólar ha tenido fluctuaciones en su valor con respecto al peso mexicano a lo largo de la historia. Para simplificar esto, se tomó en cuenta el valor del dólar por igual para cada año en donde se puso en operación cada central, así como en los demás

aspectos monetarios comparativos. Una vez dejando en claro esto, se observó que el costo de la central fotovoltaica es aún muy considerable, sin embargo, plantas térmicas e hidroeléctricas lo superan por dos aspectos importantes: el primero es el alza del precio de los materiales principales para la construcción de estas plantas convencionales en donde predomina el acero y otros metales, los cuales constantemente están subiendo de precio y el segundo aspecto es el contraste directo del anterior, puesto que los materiales y equipos que conforman los sistemas fotovoltaicos están bajando considerablemente de precio a través de los años. La figura 5.1-1 muestra el proceso paulatino del descenso del precio de los materiales para los sistemas solares mientras que en contraste la figura 5.1-2 muestra el proceso de incremento de las fuentes no renovables de energía a través de los años y su proyección.

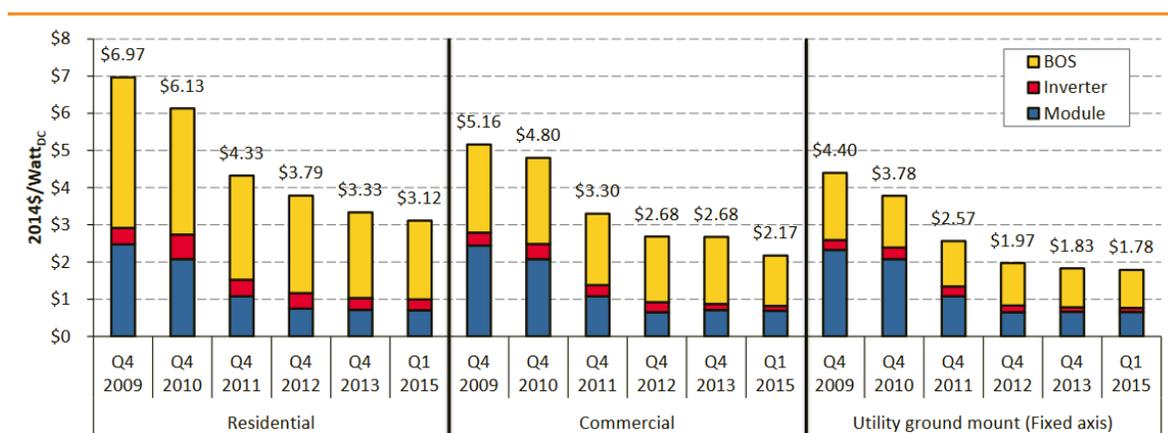


Figura 5.1-1 Decremento anual del coste de los sistemas fotovoltaicos [55].

Real terms (\$2015)	2015	New Policies Scenario			Current Policies Scenario			450 Scenario		
		2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040
IEA crude oil (\$/barrel)	51	79	111	124	82	127	146	73	85	78
Natural gas (\$/MBtu)										
United States	2.6	4.1	5.4	6.9	4.3	5.9	7.9	3.9	4.8	5.4
European Union	7.0	7.1	10.3	11.5	7.3	11.1	13.0	6.9	9.4	9.9
China	9.7	9.2	11.6	12.1	9.5	12.5	13.9	8.6	10.4	10.5
Japan	10.3	9.6	11.9	12.4	9.9	13.0	14.4	9.0	10.8	10.9
Steam coal (\$/tonne)										
OECD average	64	72	83	87	74	91	100	66	64	57
United States	51	55	58	60	56	61	64	53	52	49
European Union	57	63	74	77	65	80	88	58	57	51
Coastal China	72	78	86	89	79	92	98	73	72	67
Japan	59	66	77	80	68	84	92	61	59	53

Figura 5.1-2 Incremento proyectado del costo de combustibles fósiles en diferentes escenarios [56].

En la figura 4.4-6 se hace muy evidente el bajísimo costo de mantenimiento de la central fotovoltaica en la comparación con las demás plantas, que como se explicó en dicha sección se reduce a la simplicidad del sistema y al no usar un combustible para su operación, con lo

que se concluye el siguiente punto a favor del costo de combustible. Los paneles solares tienen un promedio de vida útil con eficiencia de más del 80% durante alrededor de 30 años después de esto dicha eficiencia comienza a descender y es de considerarse el cambio completo del sistema. Puede ser que esto se vea como un punto en contra, sin embargo, anteriormente se ha descrito el precio descendiente de los sistemas fotovoltaicos y es inminente el aumento del costo de los combustibles fósiles. En la gráfica de la figura 5.1-3 se muestra el costo final después de 30 años de haber operado las distintas plantas eléctricas, haciendo las siguientes consideraciones:

- Se han reemplazado la central fotovoltaica en su totalidad al cabo de los 30 años en manteniendo el mismo costo de inversión que el investigado en el capítulo 4.
- No se considera el aumento del precio de los combustibles no renovables para las centrales que los requieren.
- No se considera para las demás centrales costos de inversiones de rehabilitación y/o modernización como el indicado en la figura 4.4-1 para la central carboeléctrica.

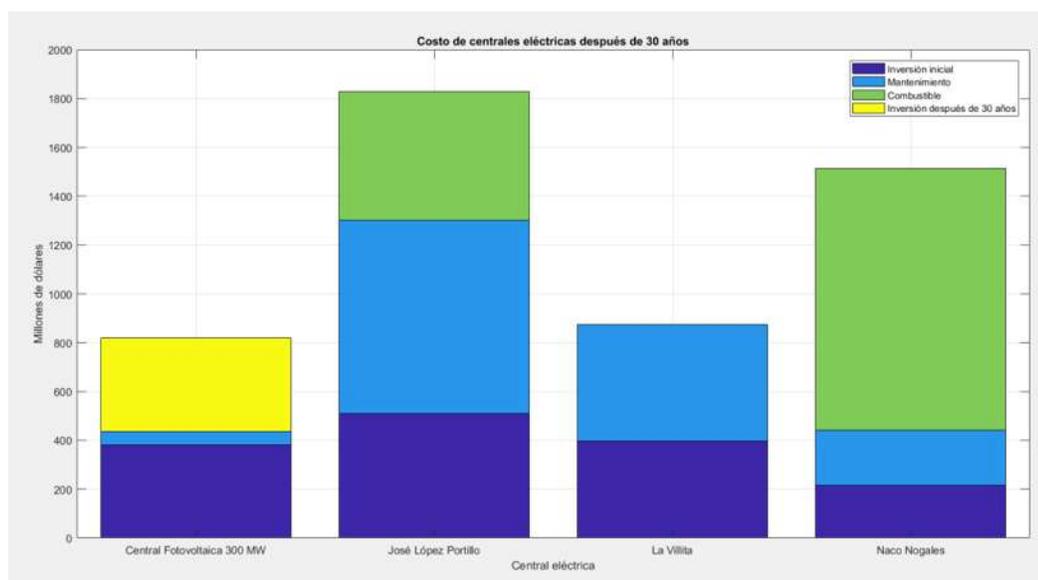


Figura 5.1-3 Costos de cada central después de 30 años de operación.

Como se puede observar el costo de una nueva central después de su vida útil sigue siendo menor al de cada una de las centrales, incluso omitiendo costos adicionales que se presentan en las demás y considerando que los restantes equipos de los que requiere la central fotovoltaica también han sido reemplazados cuando se indica que son los módulos fotovoltaicos los que sufren el mayor deterioro.

El aprovechamiento de fuentes no renovables da lugar a un planteamiento importante en estos días, los combustibles fósiles se están agotando continuamente.

Mientras la demanda de energía aumenta, estos recursos disminuyen [3]. Además, se

encuentran mayormente distribuidos o concentrados en algunos países y todos los países cuentan con al menos un buen recurso en fuente renovable.

5.2 Recomendaciones

A fin de complementar la investigación y/o llevar a cabo la construcción de una central de esta magnitud se recomienda:

- Diseñar, en base a los valores de voltaje y corriente de salida proporcionados por los inversores, la subestación apropiada para la conexión con el sistema eléctrico nacional.
- Crear estrategias de toma de carga de la central fotovoltaica en el sistema eléctrico nacional para proveer la energía eléctrica generada durante el día de acuerdo con las curvas de generación que presentan estos sistemas. ¿Qué tipo de demanda cubrirá de acuerdo con su limitante?
- Investigar la posibilidad de colocar la planta completa, tomando en cuenta el gran terreno que necesita, pudiéndose optar por dividir en centrales de menor potencia en diferentes zonas hasta completar la potencia deseada. Aprovechando el espacio de la región y evitando los problemas que causa la nubosidad para un mismo terreno.
- Debido al descendiente costo de materiales, investigar la factibilidad de implementar automatización y controles de mantenimiento de la planta.

Referencias

- [1] M. Á. Meneses, «México, #1 en radiación solar en el continente americano,» *Excelsior*, p. 6, 22 Mayo 2017.
- [2] G. F. d. I. E. U. Mexicanos, «Reforma energética,» 15 09 2017. [En línea]. Available: <http://cdn.reformaenergetica.gob.mx/Reforma19Nov.pdf>.
- [3] B. UK, «BBC,» BBC Geography, 2014. [En línea]. Available: http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/geography/energy_resources/energy_rev2.shtml. [Último acceso: 10 Agosto 2017].
- [4] A. M. d. E. Eólica, «El potencial eólico mexicano: Oportunidades y retos en el nuevo sector eléctrico,» PWC, Ciudad de México, 2015.
- [5] L. A. M. C. L. G. G. G. Rafael Alexandri Rionda, «Prospectiva de Energías Renovables 2016 - 2030,» Secretaría de Energía, Ciudad de México, 2016.
- [6] R. Anderson, «BBC Mundo,» BBC, 2 Mayo 2014. [En línea]. Available: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/05/140430_economia_combustibles_fosiles_aa. [Último acceso: 10 Septiembre 2017].
- [7] A. Cerillo, «El Futuro de las Renovables,» *"Los costes de la energía fotovoltaica han bajado un 80% en 6 años"*, 5 Diciembre 2016.
- [8] F. Muciño, «Forbes México,» 1 Enero 2015. [En línea]. Available: <https://www.forbes.com.mx/se-aproxima-el-boom-de-la-energia-solar/>. [Último acceso: 12 Septiembre 2017].
- [9] H. Sanchez, «La Voz de Michoacán,» 14 Agosto 2014. [En línea]. Available: <http://www.lavozdemichoacan.com.mx/dinero/michoacan-en-el-desempleo/>. [Último acceso: 13 Septiembre 2017].
- [10] G. M. Osuna, Diseño de una central térmica convencional, Salamanca: Universidad de Salamanca, 2015.
- [11] T. Wildi, Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia, Ciudad de México: Pearson Educación, 2007.
- [12] «Centrales Termoeléctricas,» WordPress, 2009 Octubre 2009. [En línea]. Available: <https://centrales-termoelectricas.wordpress.com/centrales-termoelectricas/ventajas-y-desventajas-2/>. [Último acceso: 17 Agosto 2017].
- [13] energia-nuclear.net, «Energía Nuclear,» 3 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://energia-nuclear.net/reactor-nuclear>. [Último acceso: 01 Octubre 2017].

- [14] J. A. C. González y R. C. Pérez, Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables, Madrid: Pearson Educación, 2009.
- [15] E. Educa, «Centrales Hidroeléctricas,» Enel S.A., 25 Enero 2013. [En línea]. Available: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xi.-las-centrales-hidroelectricas#. [Último acceso: 02 Octubre 2017].
- [16] Boke9a, «Pixabay,» 12 Mayo 2016. [En línea]. Available: <https://pixabay.com/es/molino-de-viento-piedra-harina-1379026/>. [Último acceso: 3 Octubre 2017].
- [17] A. C. Martínez y R. Caro, Sistemas de Generación Eléctrica, Madrid: Ministerio de Defensa, 2010, pp. 35-54.
- [18] J. Inzunza, «Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera,» 23 Abril 2007. [En línea]. Available: http://www.met.igp.gob.pe/users/yamina/meteorologia/radiacion_doc_Univ_CHile.pdf. [Último acceso: 08 Octubre 2017].
- [19] I. I. L. Castillo, *Diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red*, Morelia: Integración Eléctrica, 2016.
- [20] J. R. Allué, Central solar fotovoltaica de 500 kW, Logroño: Universidad de La Rioja, 2013.
- [21] S. Romero-Hernandez, B. D. Rodríguez-Granada, O. Romero-Hernandez y D. Wood, Solar Energy Potential in Mexico's Northern Border States, Washington: Mexico Institute Woodrow Wilson International Center for Scholars, 2012.
- [22] C. Hargreaves, «World Resources Forum,» 2015 Diciembre 2015. [En línea]. Available: <http://www.wrforum.org/wp-content/uploads/2015/10/SS1-Hargreaves.pdf>. [Último acceso: 7 Octubre 2017].
- [23] W. E. Council, «World Energy Council,» Octubre 2013. [En línea]. Available: https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/10/WER_2013_8_Solar_revised.pdf. [Último acceso: 7 Octubre 2017].
- [24] N. H. Cruz, «CONAGUA,» 15 Febrero 2012. [En línea]. Available: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/presentacion1.pdf>. [Último acceso: 8 Octubre 2017].
- [25] S. d. M. S. d. C.V., «Heliogis México,» Solartronic de México S.A. de C.V., [En línea]. Available: <http://www.heliogis.com/cms/>. [Último acceso: 18 Octubre 2017].
- [26] S. S. T. AG, «SMA,» Octubre 2017. [En línea]. Available: <https://www.sma.de/es/productos/inversor-fotovoltaico/sunny-central-2200-2500-ev-2750-ev.html>. [Último acceso: 15 Noviembre 2017].

- [27] E. G. Vásquez, «Cálculo de sombra con el método del solsticio de invierno,» cceea, 11 Mayo 2016. [En línea]. Available: <https://cceea.mx/energia-solar/calculo-de-sombra-con-el-metodo-del-solsticio-de-invierno/>. [Último acceso: 5 Noviembre 2017].
- [28] S. d. Energía, «Prospectiva del Sector Eléctrico 2015 - 2029,» Dirección General de Planeación e Información Energéticas, México D.F., 2015.
- [29] C. Municipio de Nava, «Nava,» Municipio de Nava, Coahuila, 2014. [En línea]. Available: http://nava.gob.mx/?page_id=99. [Último acceso: 14 Noviembre 2017].
- [30] Y. B. Saldaña, «CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA EN CONCRETO,» 14 Enero 2011. [En línea]. Available: <http://www.imcyc.com/revistacyt/oct10/especial.htm>. [Último acceso: 13 Noviembre 2017].
- [31] G. N. Fenosa, «Generación eléctrica,» Gas Natural Fenosa, 2015. [En línea]. Available: <http://www.gasnaturalfenosa.com.mx/mx/conocenos/la+compania/nuestras+actividades/1285345895984/generacion+electronica.html>. [Último acceso: 14 Noviembre 2017].
- [32] C. R. F. Esquivel, «Dropbox - CursoOperacion,» 27 Agosto 2008. [En línea]. Available: https://www.dropbox.com/scl/fo/t38mi85n740qyiol4unh8/AAAUEsrJFc8DkDEoWqi5YGv2a?new_user=1&oref=e&preview=operacionSlides.pdf&r=AASkDPdYtOkKh4zY11K150j6A3HjgMl5gXX_zT80Uko6H2c-V6tGDuiaze8ZZ7C4LX0jubXeRfzPAaA75E9dphlITqQKJ6dA2yrPQzY6gi0kzJc5F3BebAs6HJGNVtXx. [Último acceso: 14 Noviembre 2017].
- [33] A. P. Barrera, «PROGRAMA DE OBRAS E INVERSIONES DEL SECTOR ELÉCTRICO 2012 - 2026,» 9 Enero 2013. [En línea]. Available: http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/_layouts/mobile/disppform.aspx?List=02198503-8a91-4a57-904d-d6558215bdf4&View=58b9a1a3-b23d-4a10-8b97-6e7c19221302&ID=7. [Último acceso: 14 Noviembre 2017].
- [34] D. Z. Araiza, PRODUCTORES INDEPENDIENTES DE ENERGÍA EN MÉXICO, EL GAS NATURAL Y LA ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA NOMINACIÓN DE COMBUSTIBLES PARA LAS CCC HERMOSILLO Y CCC NACO NOGALES, Ciudad de México: Universidad Nacional Autonoma de México, 2012.
- [35] A. REFORMA, «Genera CFE el 44% de la contaminación,» am, 21 Diciembre 2013. [En línea]. Available: <https://www.am.com.mx/leon/mexico/genera-la-cfe-44-de-la-contaminacion-72225.html>. [Último acceso: 14 Noviembre 2017].
- [36] rajangupta, «Global Energy Observatory,» 15 Febrero 2012. [En línea]. Available: <http://globalenergyobservatory.org/form.php?pid=3754>. [Último acceso: 19 Noviembre 2017].
- [37] Greenpeace, «greenpeace,» Mayo 2005. [En línea]. Available: <http://www.greenpeace.org/new-zealand/Global/new-zealand/report/2007/1/enviro-impacts-of-coal.pdf>. [Último acceso: 19

Noviembre 2017].

- [38] D. G. d. C. A. d. G. d. Aragón, «Camara Zaragoza,» 8 Febrero 2016. [En línea]. Available: <https://www.camarazaragoza.com/productos/eaccel-secretaria-tecnica/>. [Último acceso: 16 Noviembre 2017].
- [39] M. Ramirez, «La energía del gas natural también produce contaminación,» Renovables Verdes de Bezzia, 11 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.renovablesverdes.com/el-gas-natural-tambien-produce-contaminacion/#comments>. [Último acceso: 16 Noviembre 2017].
- [40] Energía, «Ecologistas en Acción,» Junio 2007. [En línea]. Available: <https://www.ecologistasenaccion.org/article10057.html>. [Último acceso: 18 Noviembre 2017].
- [41] C. Quiroga, «PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE,» 29 Septiembre 2008. [En línea]. Available: <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/mercados/carbon/carbon.htm>. [Último acceso: 20 Noviembre 2017].
- [42] A. L. Terrés, Informes anuales y de labores de CFE, Monterrey: Centro de Estudios de Energía, 2007.
- [43] CFE, «amdee Asociación Mexicana de Energía Eólica,» 30 Junio 2014. [En línea]. Available: <http://www.amdee.org/Publicaciones/POISE-2014-2028.pdf>. [Último acceso: 21 Noviembre 2017].
- [44] E. Universal, «EL Universal,» 4 Mayo 2000. [En línea]. Available: <http://archivo.eluniversal.com.mx/finanzas/5709.html>. [Último acceso: 21 Noviembre 2017].
- [45] I. Infraestructura, «Infraestructura,» INGENET Infraestructura, 20 Octubre 2009. [En línea]. Available: <http://infraestructura.ingenet.com.mx/2009/10/presa-jose-maria-morelos-la-villita/>. [Último acceso: 11 Noviembre 2017].
- [46] P. Magazine, «PV Magazine,» PV Magazine, 2 Diciembre 2015. [En línea]. Available: https://www.pv-magazine.com/2015/12/02/frances-300-mw-cestas-solar-plant-inaugurated_100022247/. [Último acceso: 21 Noviembre 2017].
- [47] T. I. R. E. Agency, «IRENA,» Junio 2012. [En línea]. Available: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-SOLAR_PV.pdf. [Último acceso: 22 Noviembre 2017].
- [48] E. Rodríguez, «Fieras de la Ingeniería,» 9 Diciembre 2014. [En línea]. Available: <https://www.fierasdelaingenieria.com/los-costes-de-operaciones-y-mantenimiento-de-los-diferentes-tipos-de-energia/>. [Último acceso: 22 Noviembre 2017].
- [49] D. Meré, «Reforma,» 28 Octubre 2016. [En línea]. Available: <http://www.reforma.com/aplicacioneslibre/articulo/default.aspx?id=972717&md5=2fc17e7666cc5d7c745b67636612ce25&ta=0dfdbac11765226904c16cb9ad1b2efe&po=4>. [Último acceso:

23 Noviembre 2017].

- [50] T. Mexicana, «CFE,» 15 Agosto 2016. [En línea]. Available: [http://www.cfe.gob.mx/Proveedores/4_Informaciongeneral/Lists/Testigos%20sociales/Attachments/115/CFE-0001-CAAAA-0004-2016\(2\).pdf](http://www.cfe.gob.mx/Proveedores/4_Informaciongeneral/Lists/Testigos%20sociales/Attachments/115/CFE-0001-CAAAA-0004-2016(2).pdf). [Último acceso: 23 Noviembre 2017].
- [51] BNamericas, «BNamericas,» 6 Julio 2016. [En línea]. Available: <https://www.bnamericas.com/company-profile/es/fuerza-y-energia-de-naco-nogales-sa-de-cv-fuerza-y-energia-de-naco-nogales>. [Último acceso: 23 Noviembre 2017].
- [52] PEMEX, «PEMEX,» 22 Noviembre 2017. [En línea]. Available: http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Indicadores%20Petroleros/eprodcrudo_esp.pdf. [Último acceso: 22 Noviembre 2017].
- [53] L. Carriles, «El Economista,» 21 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/La-CFE-y-Pemex-dominan-la-demanda-de-gas-natural-20170322-0050.html>. [Último acceso: 23 Noviembre 2017].
- [54] C. N. d. Agua, «Usos del Agua,» Comisión Nacional del Agua, 8 Junio 2016. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/usos-del-agua>. [Último acceso: 23 Noviembre 2017].
- [55] f. D. Feldman, G. Barbose, R. Margolis, M. Bolinger, D. Chung, R. Fu, J. Seel, C. Davidson, N. Darghouth y R. Wiser, «National Renewable Energy Laboratory,» 25 Agosto 2015. [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64898.pdf>. [Último acceso: 27 Noviembre 2017].
- [56] I. A. Energy, «International Agency Energy,» 15 Noviembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/media/publications/weo/WEO2016Chapter1.pdf>. [Último acceso: 27 Noviembre 2017].