



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA**

**APROVECHAMIENTO DE EMBALSES Y CORTINAS DE PRESAS PARA GENERACIÓN
DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

P R E S E N T A:
MARÍA DE LOS ÁNGELES BALTAZAR LÁZARO

TUTOR:
Dr. FELIPE ARREGUÍN CORTÉS

FACULTAD DE INGENIERÍA

JIUTEPEC, MORELOS, SEPTIEMBRE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Carlos Eduardo Mariano Romero
Secretario: Dra. María Joselina Espinoza Ayala
Vocal: Dr. Felipe I. Arreguín Cortés
Suplente: M.I. José Alfredo González Verdugo
2^{do} Suplente: M.I. Claudia Elizabeth Cervantes Jaimes

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:
DEPFI-UNAM, Campus Morelos
Paseo Cuauhnáhuac 8532
Colonia Progreso
C.P.:62550
Jiutepec, Morelos,
México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Felipe I. Arreguín Cortés

FIRMA

RESUMEN:

Este trabajo presenta una metodología para la estimación del potencial de generación de energía eléctrica mediante paneles solares instalados en embalses y cortinas de presas en México, país en el que la irradiación global promedio diaria varía de 4.55 kWh/m² en la zona colindante con el golfo de México hasta los 6.18 kWh/m² en la parte Norte, Centro y Noroeste.

Para fines de esta investigación se consideraron las cortinas de las presas con altura mayor a 4 m orientadas hacia el Sur, lo que llevó a una estimación de potencial de generación en 1,503 cortinas de presas, con un área de 2,611.05 ha. Con referencia al potencial de generación en embalses, se descartaron aquellas presas en las que se realizan actividades de acuicultura, y el cálculo del potencial se realizó para un área del embalse de 29,395.43 ha, correspondiente a 180 vasos de presas.

El potencial estimado de generación fotovoltaica anual (probable), a través de sistemas fotovoltaicos en las cortinas es de 3,793.3 GWh y 40,346.88 GWh para sistemas en embalses. Con este potencial de generación se podría abastecer la demanda de energía eléctrica de algunos sectores, como el agrícola y el de saneamiento y potabilización de agua.

PALABRAS CLAVES: generación de energía eléctrica, sistema fotovoltaico, presas, cortinas, embalses, paneles solares flotantes

ABSTRACT:

This research work aims to estimate the photovoltaic potential for electric power generation through solar panels installed in dams and curtains of dams in Mexico. In this country, the average daily global irradiation varies from 4.55 kWh / m² in the area adjacent to the Golfo de México to 6.18 kWh / m² in the North, Center and Northwest.

For the purposes of this investigation, curtains for dams with a height greater than 4 m and oriented towards the south were considered, leading to an estimation of generation potential for 1,503 curtains of dams, with a total area of 2,611.05 ha. In the case of the estimation of the generation potential in the reservoir, we discarded those dams that have aquaculture as an objective of use, so that the potential calculation was made for a reservoir area of 29,395.43 ha corresponding to 180 reservoirs of dams.

The estimated potential of photovoltaic generation (Installed Capacity), derived from the installation of photovoltaic systems in the curtains, is 14,731.15 MW and 140,546.88 MW using the reservoirs.

With this generation potential, it could supply the demand for electricity in some sectors, such as agriculture and water sanitation and purification

KEY WORDS: electric power generation, photovoltaic system, dams, curtains, reservoirs, floating solar panels

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Justificación.....	4
1.2.	Objetivo General:.....	4
1.3.	Objetivos Particulares:.....	4
II.	ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1.	Estudios de potencial fotovoltaico en cortinas y embalses.....	5
2.2.	Proyectos en operación.....	7
III.	GENERACIÓN Y DEMANDA DE ENERGÍA ACTUAL Y PROSPECTIVA 2019-2032 EN MÉXICO.....	11
3.1.	Sector Agrícola.....	14
3.2.	Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales.....	17
3.3.	Plantas Potabilizadoras.....	20
3.4.	Sistema Cutzamala.....	21
IV.	INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA.....	22
4.1.	Presas en condiciones para la instalación de Sistemas Fotovoltaicos en Cortinas.....	22
4.2.	Presas en condiciones para la instalación de Sistemas Fotovoltaicos en Embalses.....	25
V.	TECNOLOGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	27
5.1.	Recurso Solar.....	27
5.2.	Descripción de un sistema fotovoltaico y sus componentes.....	28
5.3.	Eficiencia del sistema fotovoltaico.....	30
5.4.	Estructura de soporte.....	32
VI.	METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACION FOTOLVOLTAICA.....	34
6.1.	Irradiación solar global:.....	38
6.2.	Área disponible.....	40
6.3.	Determinación de la tecnología.....	42
6.4.	Determinación de la eficiencia del sistema.....	43
6.5.	Determinación de la densidad de potencia por superficie.....	43
VII.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	46
7.1.	Potencial de generación probable en cortinas:.....	47
7.2.	Potencial probable en embalses:.....	49
7.3.	Potencial probable total.....	51
7.4.	Cortinas con mayor potencial fotovoltaico.....	54
7.5.	Embalses con mayor potencial fotovoltaico.....	57
VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
8.1.	Sector agrícola.....	59
8.2.	Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.....	61
8.3.	Plantas de Potabilización.....	63
8.4.	Sistema Cutzamala.....	63
IX.	CONCLUSIONES.....	64
X.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1- Características de las presas en las que se instalaron paneles en la cortina.....	7
Tabla 3.1.- Permisos de generación e importación de energía eléctrica en México (2016)	11
Tabla 3.2.- Plantas de tratamiento de aguas residuales	18
Tabla 4.1.- Área disponible por altura de presa.....	24
Tabla 5.1.- Eficiencias para distintos materiales de células fotovoltaicas	31
Tabla 6.2.- Inversa de la densidad de potencia para superficies planas	44
Tabla 6.3.- Inversa de la densidad de potencia para superficies inclinadas	45
Tabla 7.1.- Resultados de potencial de generación en cortina para cada estado.....	49
Tabla 7.2.- Resultados de potencial de generación en embalse para cada estado.....	51
Tabla 7.3.- Resultados de potencial total de generación para cada estado	53
Tabla 7.4.- Cortinas de presas con potencial de generación mayor o igual a 10 GWh.....	54
Tabla 7.5.- Embalses de presas con potencial de generación mayor o igual a 100 GWh	57
Tabla 8.1.- Embalses de presas propuestas para cubrir el consumo requerido	59
Tabla 8.2.- Embalses y cortinas de presas propuestas para cubrir el consumo requerido.....	61
Tabla 8.3.- Cortinas y embalses propuestos para satisfacer el 28% de la demanda del sistema Cutzamala.	63

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Presa Kotani, Gongen y Heiso antes de la instalación de paneles	7
Figura 2.2- Presa Kotani, Gongen y Heiso con sistemas fotovoltaicos en cortinas.....	8
Figura 2.3- Proyectos fotovoltaicos flotantes hasta 2014 (Trapani, 2014).	8
Figura 2.4- Capacidad de generación de las plantas fotovoltaicas flotantes	9
Figura 2.5- Plantas fotovoltaicas flotantes de mayor capacidad a nivel mundial.....	10
Figura 3.1- Capacidad Instalada de energías renovables 2016 (MW)	11
Figura 3.2.- Prospectiva de capacidad instalada y generación en centrales solares fotovoltaicas	13
Figura 3.3.- Demanda de energía eléctrica para bombeo en el sector agrícola.....	15
Figura 3.4.- Demanda de energía eléctrica para bombeo en el sector agrícola.....	16
Figura 3.5.- Número de plantas por proceso de tratamiento.....	17
Figura 3.6.- Número de plantas por proceso de tratamiento.....	20
Figura 4.2- Área de cortina disponible.....	23
Figura 4.3- Cantidad de presas por altura de cortina.....	23
Figura 4.4- Clasificación de presas por material de cortina.....	24
Figura 4.5- Número de embalses de presas por estado	25
Figura 5.1. Componentes de un sistema fotovoltaico	28
Figura 5.2- Funcionamiento de una célula fotovoltaica	29
Figura 5.3.- Componentes de un módulo fotovoltaico	29
Figura 5.4- Tipo de materiales de un módulo fotovoltaico	31
Figura 5.5.- Estructura convencional para la instalación de paneles en tierra.....	33
Figura 5.6.- Componentes y características de una estructura flotante comercial.....	33
Figura 6.1.- Definición de conceptos de potencial.	34
Figura 6.2.- Metodología utilizada en la estimación del potencial probable	37
Figura 6.3.- Base de datos de Radiación Solar de la NASA	39
Figura 6.4.- Base de datos de Radiación Solar de la SWERA.....	40
Figura 6.5.- Presa con dimensiones utilizadas en el cálculo del área	41
Figura 6.6.- Cortina con datos básicos para el cálculo del área disponible.....	41
Figura 6.7.- Esquema del cálculo de la inversa de densidad de potencia	44
Figura 7.1.- Irradiación solar global promedio diaria	46
Figura 7.2.- Capacidad instalable en cortina por estado.....	47
Figura 7.3.- Capacidad instalable en cortina por estado.....	48
Figura 7.5.- Capacidad instalable en embalses por estado.....	50
Figura 7.6.- Potencial de generación en embalse por estado	50
Figura 7.7.- Capacidad instalable total (embalses y cortinas).....	52
Figura 7.8.- Potencial de generación anual total (embalses y cortinas)	52
Figura 7.9.- Cortinas de presas con potencial de generación mayor o igual a 10 GWh.....	54
Figura 7.10.- Imágenes de satélite de algunas cortinas y embalses de presas.	56
Figura 7.11.- Embalses de presas con potencial de generación mayor o igual a 100 GWh.....	57

I. INTRODUCCIÓN

Los esfuerzos a nivel global para lograr la sostenibilidad del medio ambiente, uno de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, incluyen compromisos a nivel internacional como el Acuerdo de París. Al firmarlo el 20 de diciembre de 2015, México se comprometió a generar el 35% de energía limpia en 2024 y 43% al 2030.

Una de las principales motivaciones es que se proyecta un aumento continuo de las emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento del planeta y causan cambios perdurables en el sistema climático, con un impacto sobre los sistemas naturales y humanos incluyendo ecosistemas y hábitats alterados, impactos perjudiciales en la agricultura que podrían llevar a la escasez alimentaria, mas fenómenos meteorológicos y desastres naturales extremos de mayor duración junto con numerosos riesgos a la sociedad (ONU, 2015).

En 2015 México enfrentó los primeros retos derivados de la adopción de este compromiso, en primer lugar el establecimiento de las regulaciones e instituciones necesarias para llevar a cabo una transición de un modelo basado en energías fósiles, a uno con mayor producción de energías limpias y una mejor gestión de consumo.

Además en otros acuerdos a nivel global, México se comprometió a incrementar su porcentaje de generación de energías de fuentes no convencionales renovables. Con este objetivo, de acuerdo a la prospectiva del sector eléctrico, la capacidad de generación con tecnología solar fotovoltaica tendrá una capacidad instalada de 11,615 MW en el año 2032 (SENER, 2017).

Para contribuir al porcentaje planteado de generación de energía a partir de fuentes no convencionales renovables, mediante el uso de tecnologías fotovoltaicas, son necesarias extensiones de terreno considerables. Se requiere 1 km², es decir 100 ha, para generar 65 MW, las cuales podrían destinarse a la producción de alimentos o a la conservación de ecosistemas (zonas naturales protegidas).

Una de las experiencias más notables en el aprovechamiento de infraestructura ya existente para la generación de energía eléctrica a partir de recursos renovables se tiene en Japón, que actualmente cuenta 6 de las 10 plantas flotantes para generación de energía eléctrica más grandes del mundo; en conjunto poseen una capacidad instalada de 30.1 MW.

Dado que México recibe hasta un 70% más de irradiación que otros países con grandes desarrollos de aprovechamiento solar, aproximadamente el 90% del territorio mexicano presenta una irradiación solar en el rango de 4 kWh/m² a 6 kWh/m², es viable utilizar sistemas fotovoltaicos para contribuir en la disminución del uso de combustibles fósiles, ya que actualmente un 70.5 % de la energía eléctrica en México proviene de tecnologías convencionales y solo el 29.5% de tecnologías limpias (SENER, 2018). Además, existen en el territorio nacional aproximadamente 6,000 presas y bordos (CONAGUA, 2018, citado por Bourguett) con zonas propicias para la instalación de sistemas de generación a partir de fuentes renovables.

Al hacer una revisión de la infraestructura hidráulica en México, es evidente que las presas representan un gran potencial para la generación de energía eléctrica por medio de la instalación de sistemas fotovoltaicos. Tanto sobre la cara aguas abajo de las cortinas como en la superficie libre de los embalses, las cuales en muchos casos ofrecen protección a los sistemas fotovoltaicos ante un posible robo o daño. Además, por las vías de comunicación y líneas de transmisión de energía eléctrica presentes, necesarias para la instalación de infraestructura, así como la inyección de la energía generada en la red existente y su distribución.

Algunas de las necesidades energéticas a nivel nacional que podrían cubrirse se presentan en el sector agrícola, que en el período 2009-2017 demandó un promedio de 8,580.1 GWh al año (INEGI, 2018). Así mismo en el país se trata únicamente el 52.7% de las aguas residuales, y existen 555 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) fuera de operación (CONAGUA, 2016), que representan 19 % del número total de instalaciones, y han sido abandonadas por falta de recursos por parte de los gobiernos locales para cubrir el costo por consumo energético de operación.

Este trabajo presenta una estimación del potencial de generación de energía eléctrica mediante paneles solares instalados en embalses y cortinas de presas en México, que pueden ser conectados a la red eléctrica nacional. Se proponen como una fuente de energía renovable que mediante recursos disponibles hasta ahora no aprovechados, contribuya a resolver necesidades energéticas específicas.

1.1. Justificación

México, por sus condiciones geográficas y climáticas se encuentra entre los principales países con mayor potencial solar, lo cual hace propicia su explotación como fuente de energía a través de diferentes tecnologías.

Actualmente la tecnología solar fotovoltaica se consolida como la más competitiva del mercado eléctrico mexicano, al presentar una reducción en los costos de aproximadamente el 73 % desde 2010 a la fecha (IRENA 2014, citado por Anh T. N.D.).

Sin embargo, uno de los problemas con los que se encuentra la instalación de sistemas fotovoltaicos es la dificultad de encontrar superficies con la extensión y condiciones adecuadas para la generación de energía eléctrica, por lo que se propone utilizar el área disponible en cortinas y embalses de presas para la instalación de paneles solares. Estas áreas actualmente no tienen un uso productivo, en su mayoría son grandes extensiones, se localizan cerca de la red de transmisión y distribución ya existente y además son de propiedad federal, lo que facilitaría el permiso de uso en beneficio de los inversionistas.

1.2. Objetivo General:

- Evaluar el potencial fotovoltaico para generación de energía eléctrica con paneles solares instalados en embalses y cortinas de presas en México.

1.3. Objetivos Particulares:

- Seleccionar entre presas destinadas a generación, aquellas con las condiciones adecuadas en cortinas y embalses para la instalación de paneles fotovoltaicos.
- Determinar la disponibilidad de superficie libre en el vaso de presas con factibilidad de ser acondicionadas con sistemas fotovoltaicos.

- Seleccionar el tipo de tecnología fotovoltaica disponible en el mercado con las características adecuadas para una máxima eficiencia en instalaciones flotantes y en cortinas.

II. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se enunciarán los estudios de cálculo de potencial fotovoltaico utilizando el paramento aguas abajo de cortinas en presas y área disponible en embalses.

De igual manera se darán a conocer los proyectos fotovoltaicos flotantes de mayor capacidad, los hallazgos sobre sus ventajas, las presas que contienen sistemas fotovoltaicos en las cortinas y que se encuentran operando actualmente.

2.1. Estudios de potencial fotovoltaico en cortinas y embalses.

En 2015, Ioannis K., et al. realizaron un estudio del potencial fotovoltaico en el paramento aguas abajo de las cortinas de diez presas, localizadas en el Norte de África. Utilizaron el software PVGIS para un cálculo exacto del área y la irradiación global inclinada que reciben las cortinas. Seleccionaron presas orientadas al Norte (debido a que África se encuentra en el hemisferio Sur), descartaron las cortinas tipo arco y contrafuertes.

Como resultado obtuvieron una capacidad posible a instalar de 41.3 MW y un potencial de generación estimado en 70.2 GWh/año utilizando un área de 27.5 ha. Entre sus recomendaciones para el cálculo del potencial está el calcular con exactitud el área disponible para la instalación de los paneles.

En 2016, Jinyoung S. y Yosoon C. analizaron el potencial de los sistemas fotovoltaicos flotantes en un Lago de una de Mina abandonada en Corea. Con el objetivo de identificar el área adecuada para la instalación de un sistema fotovoltaico flotante, utilizaron una cámara de precisión y modelos digitales de elevación para el análisis de sombreado.

El diseño del sistema fotovoltaico flotante se realizó con el ángulo de inclinación óptimo que permite el máximo aprovechamiento de las horas de luz solar y el espaciado entre los paneles fotovoltaicos que evite la incidencia de sombras sobre

los paneles. Se utilizó el Software SAM del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, por sus siglas en inglés) para realizar simulaciones de energía basadas en datos meteorológicos y el diseño del sistema. Los resultados indicaron que el sistema fotovoltaico propuesto podría generar 971.57 MWh/año utilizando un área de embalse de 1.1 ha.

En 2016, Aseem K., S. y Kothari D.,P. realizaron una estimación de potencial fotovoltaico utilizando los embalses de las presas más grandes de la India, con la finalidad de contribuir al cumplimiento de las metas establecidas para 2022 de generar 100 GW de energía solar. El cálculo del potencial lo realizaron con base en la experiencia en instalaciones e indicaciones de varios instaladores, una estimación conservadora de 40 MWp de capacidad por cada km² de superficie del embalse cubierta.

El cálculo se realizó para 40 embalses, utilizando el 20% de la superficie total del embalse, para no ocasionar un impacto significativo en el medio ambiente. Se obtuvo una capacidad a instalar de 909.05 GWh/año en 256,300 ha de embalse.

A partir de este análisis, determinaron que uno de los principales beneficios en las presas hidroeléctricas es que la energía solar podría sustituir a la generación hidroeléctrica durante el día. En tal caso, el agua que no es extraída del depósito para generación, servirá como una reserva de energía para la mañana y noche donde hay más demanda y el recurso solar no está en su nivel máximo.

En 2017 Hartzell, T., evaluó el estado actual de la tecnología solar fotovoltaica flotante y propuso usarla en la infraestructura hidráulica en Arizona, realizó la modelación de una pequeña instalación piloto en Lake Pleasant Reservoir, como parte del Proyecto Central de Arizona. En sus resultados encontró que la energía solar flotante fotovoltaica tiene una densidad de energía más alta (100 W/m²) que la solar terrestre, a escala de servicios públicos y no implica un aumento de costo significativo. Recomienda utilizar los embalses de presas hidroeléctricas como lugares ideales para instalaciones fotovoltaicas flotantes. Para el diseño del sistema utiliza el software SAM de NREL, sin embargo el propone distintas áreas con la finalidad de conocer la inversión necesaria para que el sistema sea rentable.

2.2. Proyectos en operación

A nivel mundial la generación fotovoltaica está en constante crecimiento, se estima que en 2015 esta ya cubría el 1.3% de la generación de energía eléctrica. Los países con mayor generación son China, Japón y Estados Unidos con una capacidad instalada de 15.2 GW, 11 GW y 7.3 GW respectivamente. En Latinoamérica se estima que en 2015 se tenía una capacidad instalada de 2.3 GW, y México 170.24 MW (IEA, 2016, citado por CIEMAT, 2017).

En 2014, Japón se planteó el objetivo de eficientar el uso de la infraestructura hidráulica existente, por lo que propusieron el uso de las caras inclinadas aguas abajo de las presas de Kotani, Heiso y Gongen para la instalación de sistemas fotovoltaicos, con lo que demostró la viabilidad de la instalación y operación de sistemas fotovoltaicos en las cortinas de presas.



Figura 2.1- Presa Kotani, Gongen y Heiso antes de la instalación de paneles

Fuente: <https://www.researchgate.net/>

Tabla 2.1- Características de las presas en las que se instalaron paneles en la cortina

Nombre	Kotani	Gongen	Heiso
Propósito	Agua Potable	Agua Industrial	Agua Industrial
Tipo de presa	Enrocamiento	Enrocamiento	Tierra compactada
Altura	79 m	32.6 m	19.5 m
Longitud de cresta	303.4 m	357.4 m	670 m
Superficie de agua	72 ha	101 ha	100 ha
Capacidad instalada	4.99 MW	1.76MW	1.61MW
Año de construcción	2000	1981	1969

Fuente: Elaboración propia con información de

https://tech.nikkeibp.co.jp/dm/english/NEWS_EN/20150516/418600/?ST=msbe y

https://tech.nikkeibp.co.jp/dm/atclen/news_en/15mk/052500593/?ST=msbe

En la figura 2.1, se puede observar el paramento aguas abajo de las presas antes de ser instaladas con paneles fotovoltaicos y en la tabla 2.1 se muestran sus características. La figura 2.2 muestra el espaciamiento del sistema fotovoltaico.



Figura 2.2- Presa Kotani, Gongen y Heiso con sistemas fotovoltaicos en cortinas.

Fuente: <https://www.researchgate.net/>

Los proyectos fotovoltaicos flotantes desarrollados hasta 2012 a nivel mundial (Trapani, 2014), se muestran en la figura 2.3:

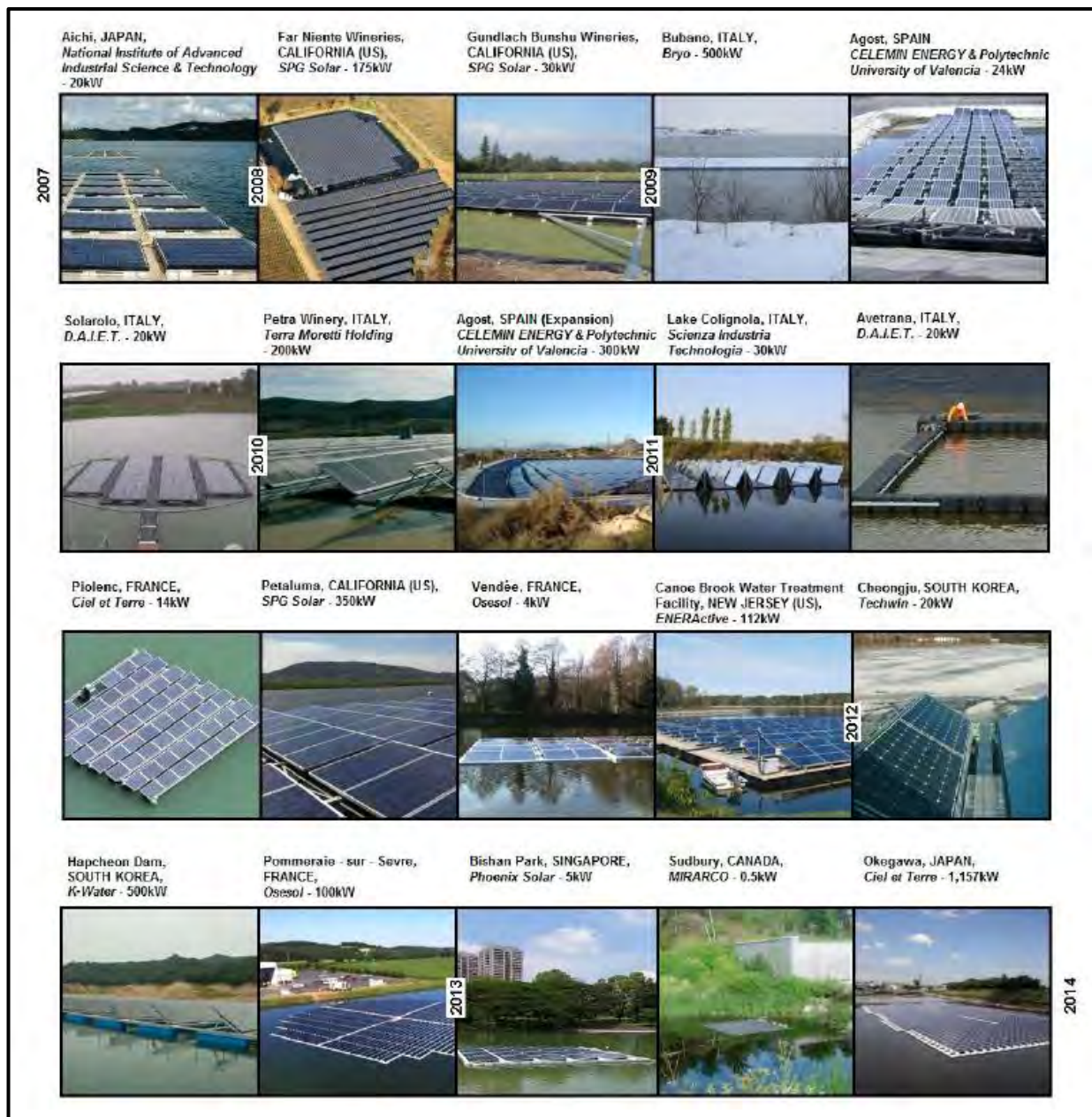


Figura 2.3- Proyectos fotovoltaicos flotantes hasta 2014 (Trapani, 2014).

Fuente: Tesis doctoral de Kim Trapani, 2014

Según Roca S. A (2017), la primera planta flotante se instaló en 2007 en California y para finales del año 2016 se cuantificaban más de 70 plantas fotovoltaicas flotantes en todo el mundo, en conjunto suman aproximadamente 93 MW de capacidad instalada, 45 de estas se encuentran en Japón. Actualmente, la planta flotante más grande tiene una capacidad de 40 MW y se localiza en China.

La capacidad de generación de las plantas flotantes es muy variada, 37 de las 70 plantas registradas tienen una capacidad menor a 1 MW, 21 plantas están entre 1 a 2 MW y las 12 restantes son de más de 2 MW, como se muestra en la figura 2.4.

Capacidad de las plantas fotovoltaicas flotantes en el mundo

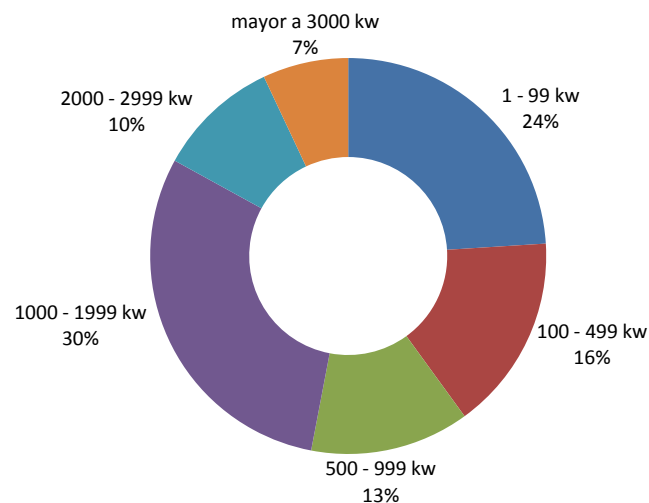


Figura 2.4- Capacidad de generación de las plantas fotovoltaicas flotantes
Fuente: Roca S. A (2017)

A continuación se presentan las 11 plantas fotovoltaicas flotantes de mayor capacidad instalada, el país donde se localizan y el año en que iniciaron su operación, además de la primera presa hidroeléctrica combinada con paneles solares flotantes en el embalse.









Coal mining subsidence area of Huainan City, China. 40MW Abril, 2016	Umenoki Solarpark, Japón 7.5MW Octubre, 2015	Queen Elizabeth II reservoir, Reino Unido 6.33MW Marzo, 2016
		
Otae Province, Corea Sur. 3MW Octubre, 2015	Jipyong Province Corea Sur. 3MW Octubre, 2015	Godley Reservoir Floating Solar PV, Reino Unido 2.9MW Enero, 2016
		
Kato-Shi, Japón. 2.8MW Marzo, 2015	Tsuga Ike Japón. 2MW Agosto, 2016	Sohara Ike, Japón 2MW Marzo, 2016
		
Sakasama Ike, Japón. 2.3MW Abril, 2015	Yamakura Dam, Japón. 13.7MW Marzo, 2018	Presa hidroeléctrica en el río Rabagão, Portugal 0.220MW Noviembre, 2016
		

Figura 2.5- Plantas fotovoltaicas flotantes de mayor capacidad a nivel mundial

Fuente: Elaboración propia con base en la información de <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-de-fotovoltaica-flotante-del-mundo/>

III. GENERACIÓN Y DEMANDA DE ENERGÍA ACTUAL Y PROSPECTIVA 2019-2032 EN MÉXICO

En 2015, México reportó una capacidad instalada de generación mediante energías limpias de 19,265.7 MW correspondiente al 28.3% del total de energía, de esto la energía fotovoltaica aportó 190.3 MW, el 0.28% de la capacidad total (SENER,2016).

En 2016, se generó el 20.31% de la energía eléctrica con fuentes limpias, la energía solar fotovoltaica registró una capacidad instalada de 388.61 MW, el 0.53% de la capacidad total del país (SENER, 2017).

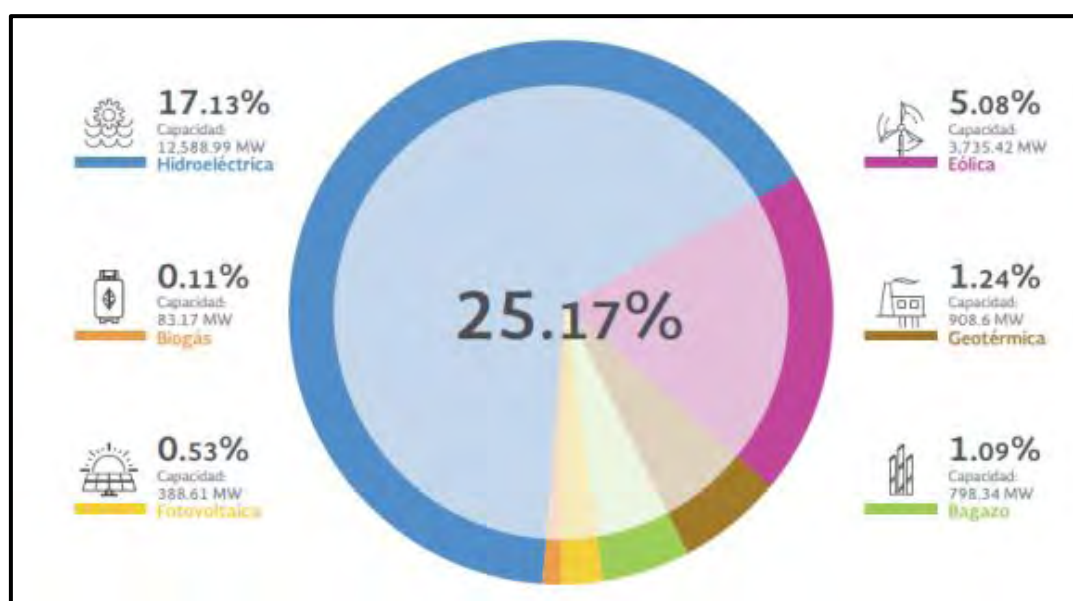


Figura 3.1- Capacidad Instalada de energías renovables 2016 (MW)
Fuente: Reporte de avance de Energías limpias 2016.

En 2016, la Comisión Reguladora de Energía dio a conocer los permisos de generación e importación de energía eléctrica de las siguientes plantas de generación fotovoltaica reportaron un total de 120 MW de capacidad instalada.

Tabla 3.1.-Permisos de generación e importación de energía eléctrica en México (2016)

No.	Nombre	Entidad federativa	Capacidad autorizada (MW)	Energía autorizada (GWh)
1	Autoabastecimiento Renovable S.A. de C.V.	Aguascalientes	0.8	1.8
2	Coppel, S.A. de C.V.	Sonora	1.0	2.3
3	Generadora Solar Apaseo S.A.P.I. de C.V.	Guanajuato	1.0	2.1
4	Plamex, S.A. de C.V.	Baja California	1.0	1.9
5	Iusasol Base, S.A. de C.V.	México	0.9	1.9
6	Iusasol I, S.A. de C.V.	México	18.3	37.2

No.	Nombre	Entidad federativa	Capacidad autorizada (MW)	Energía autorizada (GWh)
7	Sta. Rosalía (Tres vírgenes)	Baja California Sur	1.0	2
8	Cerro Prieto	Baja California	5.0	11
9	Servicios comerciales de Energía, S.A. de C.V.	Baja California Sur	30.0	86
10	Tai Durango Uno S.A.P.I. de C.V.	Durango	15.6	32.4
11	Tai Durango Dos S.A.P.I. de C.V.	Durango	6.3	12.1
12	Tai Durango Tres S.A.P.I. de C.V.	Durango	15	6.8
13	Tai Durango Cuatro S.A.P.I. de C.V.	Durango	15	12.1
14	Tai Durango Cinco S.A.P.I. de C.V.	Durango	15	57.9
Total			120.7	267.5

Fuente: Comisión Reguladora de Energía citada por Secretaría de Economía en 2017

En 2017, la capacidad instalada del Sistema Eléctrico Nacional fue de 75,685 MW, 70.5% correspondiente a centrales eléctricas convencionales y 29.5% a centrales eléctricas con tecnologías limpias, se registró un crecimiento de 28% en energía solar fotovoltaica con respecto al año anterior, alcanzando una capacidad instalada de 539 MW (SENER, 2018).

En cuanto a la generación, en 2017 fue de 329,162 GWh, 3.1 % más que en 2016 (9,799 GWh), el 78.9 % de la electricidad generada provino de tecnologías convencionales (259,766 GWh) y el 21.1% restante de tecnologías limpias (69.397 GWh) (SENER, 2018).

México cuenta con 23 centrales fotovoltaicas en operación, los estados con mayor capacidad instalada se ubican en cuatro entidades federativas: Baja California Sur, Durango, Chihuahua y el Estado de México (SENER, 2018).

En los próximos años, se prevé mayor participación de las tecnologías fotovoltaicas en la generación de energía eléctrica.

La nueva capacidad instalada de energía solar fotovoltaica se concentrará principalmente en siete estados del país; Coahuila, Aguascalientes, Yucatán, Sonora, San Luis Potosí y Chihuahua, que abarcarán en conjunto, 93% de la nueva

capacidad resultado de la primera y segunda subasta (3,310 MW); el 7% restante será instalado en los estados de Jalisco, Morelos, Baja California Sur (SE, 2017). Según la Secretaría de Energía a través del Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN), se tiene la evolución de la capacidad instalada y la generación de energía eléctrica de 2018-2032, como se describe en la siguiente figura:

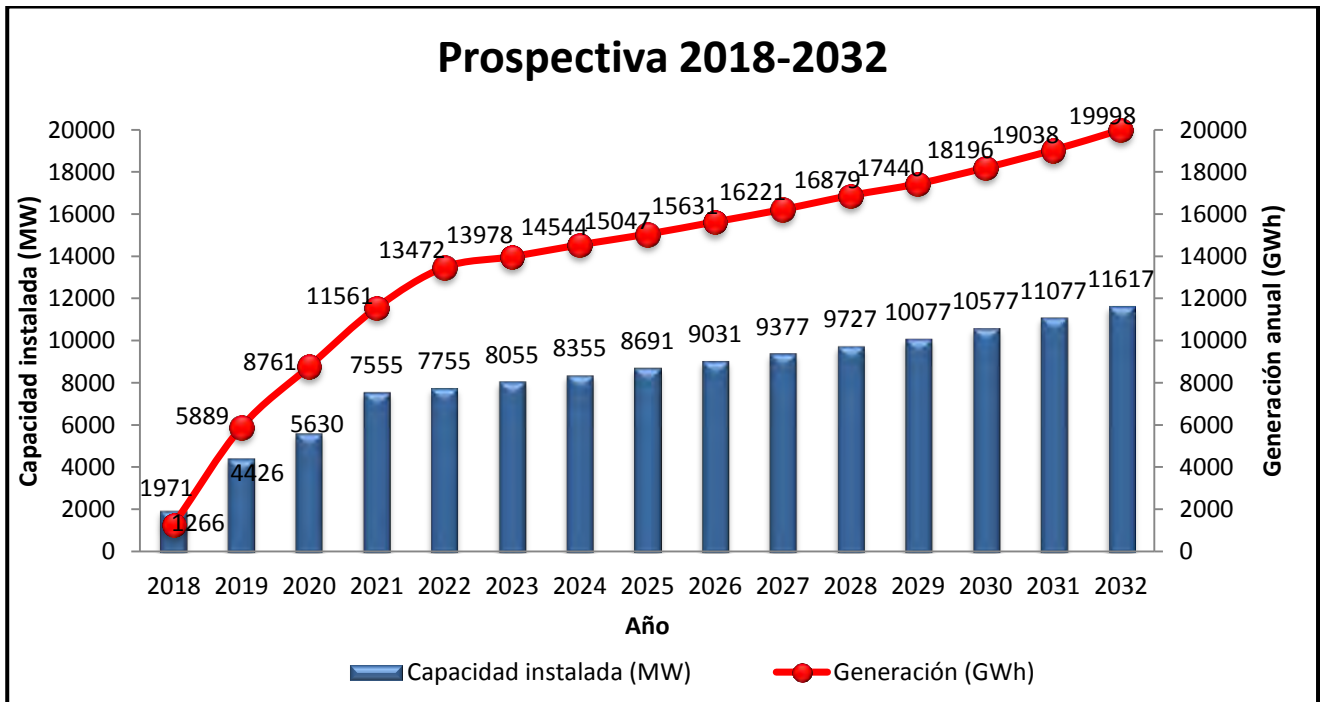


Figura 3.2.- Prospectiva de capacidad instalada y generación en centrales solares fotovoltaicas

Fuente: Elaboración propia con datos de SENER 2018

La generación de electricidad mediante sistemas fotovoltaicos en proyectos de generación a gran escala en México, ha estado principalmente dirigida al sector industrial, en donde producir electricidad mediante otros métodos resulta altamente costoso principalmente por el precio de los combustibles, y los costos de operación y mantenimiento, lo que ocasiona que la generación solar resulte rentable a largo plazo. El uso de la energía eléctrica fotovoltaica en estas condiciones también resulta atractiva para solventar las demandas de consumo en el sector agrícola, específicamente para bombeo de agua.

3.1. Sector Agrícola

Para explicar integralmente el papel que juega la energía en el manejo del agua para riego, es necesario tener clara la secuencia de operaciones del bombeo para la disponibilidad y la tecnificación del riego. Esta secuencia es el conjunto de operaciones para producir, conducir y distribuir el agua con el objeto de proporcionar la cantidad necesaria según el tipo de siembra para el cultivo y desarrollo mismo.

Los sistemas de bombeo transforman la energía eléctrica en mecánica e impulsan el agua en todas las etapas del riego. Extraer agua hacia la superficie bombeando el agua desde el nivel dinámico de un pozo profundo consume aproximadamente el 80% del consumo total de energía. El costo energético depende de la profundidad del pozo y del gasto de extracción. Los niveles de abatimiento anual de una fuente sobreexplotada afectan sustancialmente este costo.

En México, el sector agrícola consume el 76% del total de agua concesionada, se siembran cerca de 22 millones de hectáreas. De estas el 80% es de temporal y el resto tienen infraestructura de riego (alrededor de 4.4 millones de hectáreas).

La Comisión Federal de Electricidad ofrece a los agricultores el cobro del consumo de energía en el sector agrícola bajo la Tarifa 9, la cual está compuesta por segmentos tarifarios (Tarifa 9, Tarifa 9 M, Tarifa 9 CU, y Tarifa 9 N), que van desde \$0.28 pesos por kWh hasta \$10.94 pesos por kWh,

En el período 2009-2017, el sector agrícola presentó una demanda promedio anual de 8,580.1 GWh (INEGI, 2018), por uso de energía eléctrica para bombeo.

El subsidio en este sector, durante el 2009 y el 2017, alcanzó un valor aproximado de \$17,961 millones de pesos (INEGI, 2009-2016).

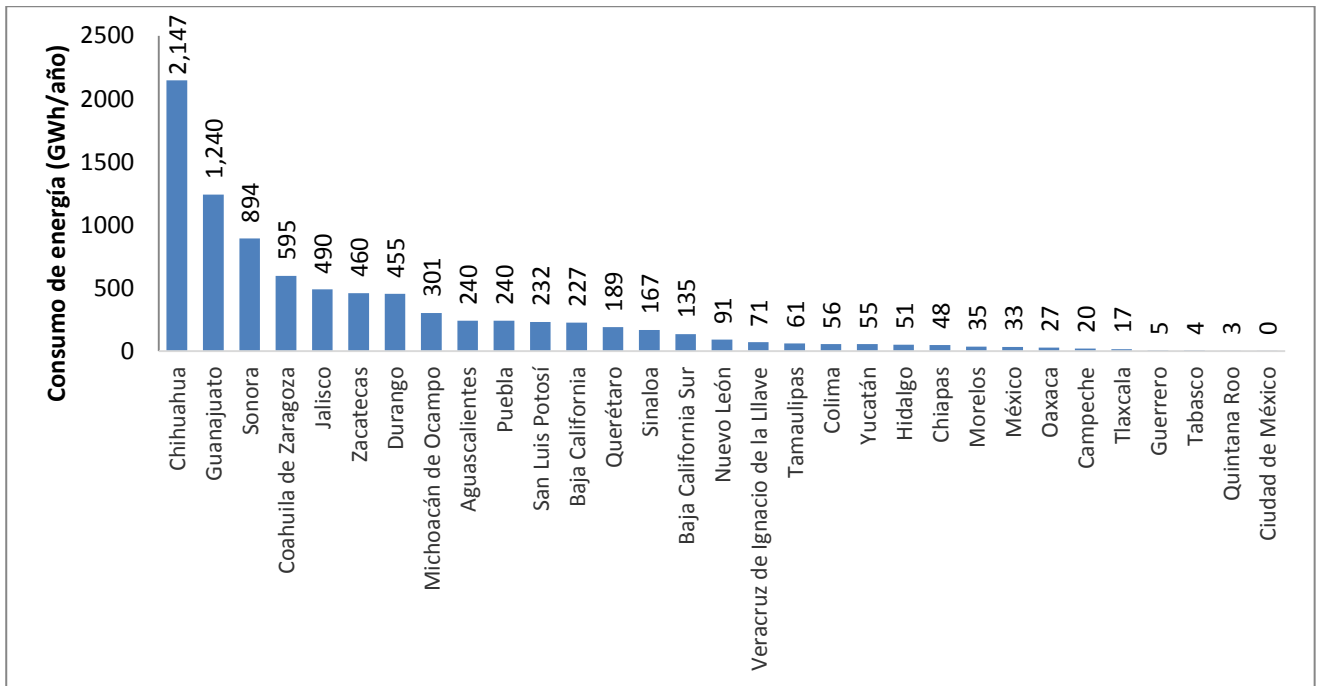


Figura 3.3.- Demanda de energía eléctrica para bombeo en el sector agrícola.

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI, 2018

En su informe 2016 - 2017, SAGARPA destaca el apoyo a 63 proyectos fotovoltaicos autónomos para bombeo, ubicados en 43 comunidades de alta y muy alta marginación de 12 municipios del estado de Yucatán, lo cuales tendrán acceso al agua para usos agrícola, ganadero, creación de huertos familiares, para autoconsumo y abasto local. Es de señalar que en la presente administración (2013- junio de 2017) se han apoyado un total de 984 proyectos, de los cuales 81 estan ubicados en localidades de alta y muy alta marginación (SAGARPA,2018).

El uso de energía solar para extraer y bombear el agua de los acuíferos permite a los agricultores cultivar de forma asequible y respetuosa con el medio ambiente. La posibilidad de utilizar la energía fotovoltaica para eficientar la producción de alimentos es viable.

Además el riego agrícola coincide con las fechas de máximo consumo de energía eléctrica y con los meses del año donde se presenta la máxima irradiación global, lo que asegura la energía en los meses requeridos.

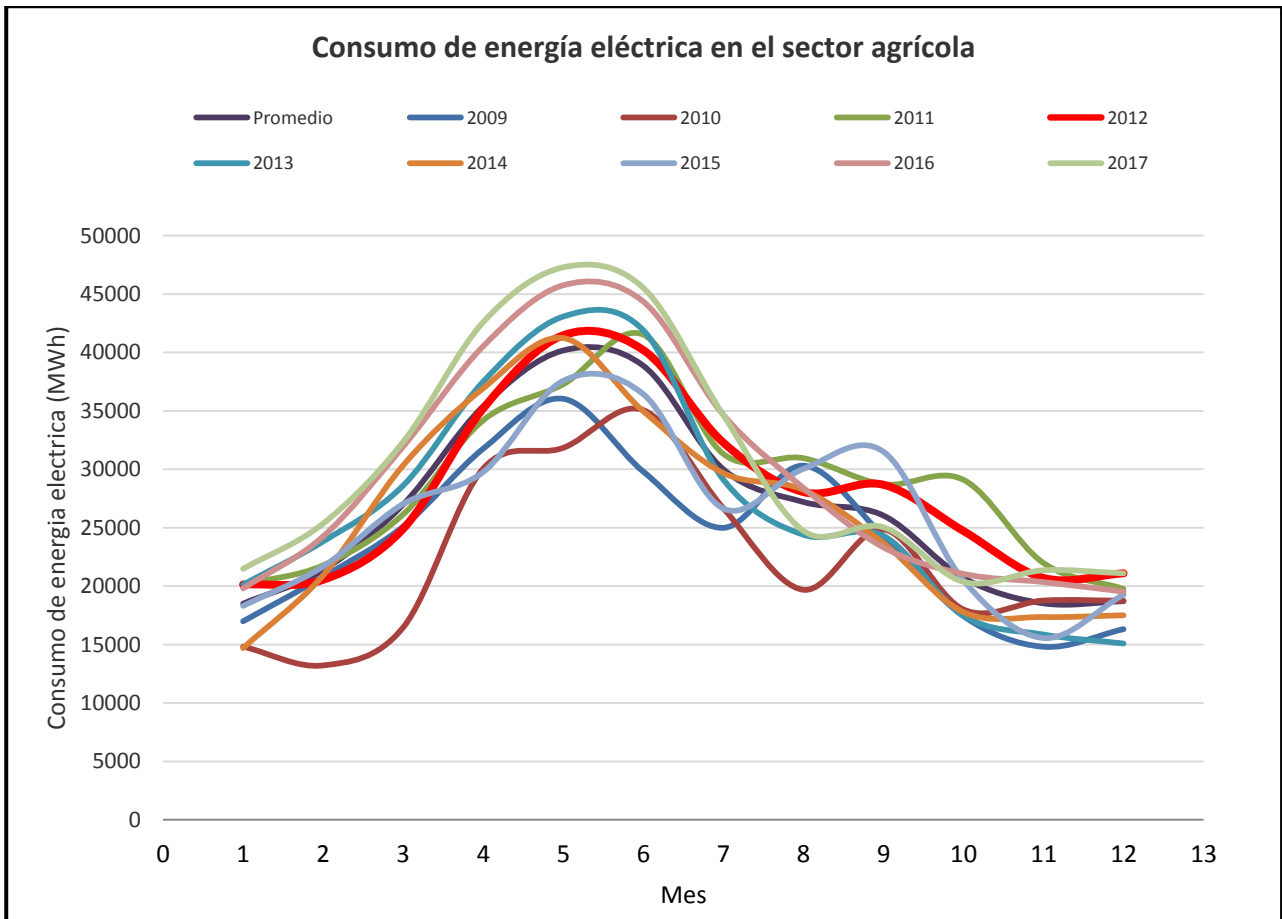


Figura 3.4.- Demanda de energía eléctrica para bombeo en el sector agrícola
Fuente: Elaboración propia con información de INEGI, 2018

Como puede observarse en la figura anterior, los meses de mayor consumo de energía eléctrica son abril, mayo, junio y julio, los cuales coinciden con la época de estiaje donde se realiza el riego agrícola. Estos meses también corresponde a los meses de mayor irradiación global en todo el territorio mexicano.

Otra de las necesidades que se propone satisfacer es la demanda de energía en algunas plantas potabilizadoras y de tratamiento de aguas residuales. A continuación se describe su consumo energético.

3.2. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales

En 2015, la CONAGUA reportó 2,477 plantas municipales de tratamiento en operación registradas en el país, con una capacidad total instalada de 177.9 m³/s, las que daban tratamiento a 120.9 m³/s, equivalentes al 57.0% del agua residual generada y colectada en los sistemas municipales de alcantarillado del país (CONAGUA; 2016).

En 2016 el registro de plantas en operación aumento a 2,536 instalaciones, con una capacidad instalada de 180.5 m³/s y un caudal tratado de 123.5 m³/s, aproximadamente el 68.4% de la capacidad total. (CONAGUA; 2016).

Los principales procesos de tratamiento de aguas residuales y el número de plantas por proceso se muestran en la figura 3.5.

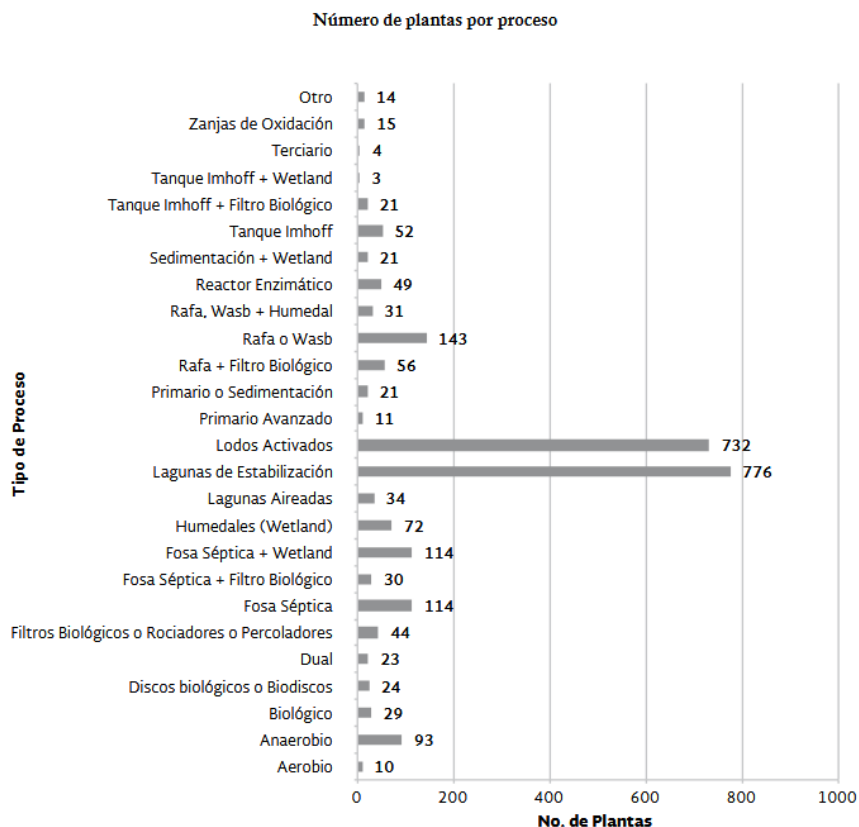


Figura 3.5.- Número de plantas por proceso de tratamiento
Fuente: IMTA, 2017

Los tipos de procesos con el mayor número de plantas son las lagunas de estabilización y lodos activados, estos procesos requieren de equipos como

bombas para el transporte de agua y fangos, motores para accionamiento de equipos mecánicos y soplantes o aireadores superficiales que aportan el oxígeno para el tratamiento biológico.

Cabe mencionar que el principal factor que provoca que existan 735 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) fuera de operación (CONAGUA, 2016), es la falta de recursos por parte de los gobiernos locales para cubrir el costo por consumo energético de operación.

Según datos estimados (IMTA, 2017), el proceso de lodos activados convencional, con estabilización aerobia de los lodos residuales, consume 0.58 kWh/m³ de agua residual tratada municipal; mientras que el mismo proceso pero con estabilización anaerobia consume 0.48 kWh/m³ de agua residual tratada.

La Tabla 3.2 contiene algunas plantas de tratamiento de aguas residuales que reportaron el consumo de energía al año (IMTA, 2017).

Tabla 3.2.-Plantas de tratamiento de aguas residuales

No.	PTAR	Edo.	Modalidad	Q _{op} L s ⁻¹	Consumo energía kWh año (2015)	Q _{op} m ³ año ⁻¹	Estabilización lodos residuales	Kwh*m ⁻³
1	Aguascalientes	AGS	DUAL: FP + CONV	952	8,233,672	30,022,272	AEROB + ESP+FB	0.27
2	Los Arellano	AGS	AER. EXT. /ZOx	170	3,147,550	5,361,120	AEROB+ESP+FB	0.59
3	Presa El Cedazo	AGS	CONV.	108	629,480	3,405,888	AEROB + ESP+FB	0.18
4	Jesús María	AGS	ZOx	95	1,238,635	2,995,920	AEROB+ESP+FB	0.41
5	Pabellón de Arteaga	AGS	CONV.	105	1,293,008	3,311,280	AEROB+FB	0.39
6	Rincón de Romos	AGS	CONV.	91	1,260,077	2,869,776	AEROB+FB	0.44
7	Ing. J.A. Herrera Solís (Potab + PTAR)	BC	AER. EXT. (Carrusel) NT- DN	246	7,389,900	7,757,856	AEROB+ESP+ CE NTRIF	0.95
8	La Morita	BC	AER. EXT. (Carrusel) NT- DN	195	4,044,950	6,149,520	AEROB+ESP+ CE NTRIF	0.66
9	Cd. Acuña	COAH	AER. EXT.	469.5	1,727,115	14,805,521	ESPES c/CAL+FB	0.12
10	Lerdo	DGO	AER. EXT.	179.34	1,992,270	5,655,666	AER+FP	0.35

No.	PTAR	Edo.	Modalidad	Q _{op} L s ⁻¹	Consumo energía kWh año (2015)	Q _{op} m ³ año ⁻¹	Estabilización lodos residuales	Kwh*m ³
11	Lagos de Moreno	JAL	AER. EXT.	165	1,923,280	5,203,440	ESP. GRAVEDAD+AE ROB+FB	0.37
12	Lago de Texcoco I	MEX	AIR. SUP.	800	490,030	25,228,800	SIN TRATAMIENTO	0.02
13	Lechería	MEX	CONV.	82	2,254,000	2,585,952	SIN TRATAMIENTO	0.87
14	Toluca Norte	MEX	DUAL: FP+CONV.	1033	6,350,148	32,576,688	ESP (FB)+AEROB+FP	0.19
15	Toluca Oriente	MEX	AER.EXT	937	6,204,168	29,549,232	ESP (FB)+AEROB+FP	0.21
16	Atapaneo	MICH	AER.EXT	941	5,948,946	29,675,376	ESTAB. CON CAL+FB	0.20
17	Los Itzúcuaros	MICH	CONV.	80	1,904,753	2,522,880	AEROB	0.75
18	Noreste	NL	AER.EXT	1241.5	7,708,762	39,153,521	ESP por FLOTACION+FB	0.20
19	Santa Rosa	NL	AER.EXT	71.04	1,562,512	2,240,317	AEROB+FB	0.70
20	Cadereyta	NL	AER.EXT	181.12	1,672,935	5,711,800	ESP + AEROB+FB	0.29
21	La Petaca	NL	AER.EXT	131	2,039,772	4,131,216	AEROB+FB	0.49
22	AIMSU (Agua Ind. de Mty, S. de U.)	NL	CONV	240	5,142,518	7,568,640	SIN TRATAMIENTO	0.68
23	Santiago	NL	AER.EXT	151.91	1,358,437	4,790,634	ESP+AEROB+FB	0.28
24	San Pedro Ahuacatlán II	QRO	ZOx	244.6	2,261,199	7,713,706	ESP ROTATORIO+AE ROB+FB	0.29
25	Norte	Q-ROO	DUAL: FP+CONV	289	3,861,417	9,113,904	ESP+AEROB+FB &SECADO SOLAR	0.42
26	Caribe 2000	Q-ROO	PRIM. AV. + CONV.	171	2,363,819	5,392,656	AEROB+ESP GRAV.+PRENSA DO+SECADO SOLAR+FB	0.44
27	Playa del Carmen II (SaasTunJa)	Q-ROO	DUAL: BF+L.ACT	198	2,309,650	6,244,128	ESP BANDA+AEROB +FB	0.37
28	Río Mayo	SON	AER.EXT	300	2,349,074	9,460,800	AEROB+CENTRIF	0.25
29	Los Alisos	SON	AER.EXT	186	1,086,629	4,885,402	AEROB+FB	0.22
30	Tierra Negra	TAMPS	AER.EXT	900	5,791,149	28,382,400	ESP+AEROB+FB	0.20
31	Norponiente Laredo	TAMPS	CONV	62	946,260	1,955,232	ESP GRAVEDAD+AE ROB+FB	0.48
32	Internacional (Sur-Ote)	TAMPS	ZOX	907.54	8,911,527	28,620,181	ESP+AEROB+LE C HO SECADO	0.31
33	PTAR II	VER	CONV	195	1,091,232	6,149,520	AEROB+CENTRIF	0.18
34	Osiris	ZAC	CONV	470	3,092,250	14,821,920	ESP+AEROB+FP	0.21
	Total			12,593.55	109,581,124	396,013,164	Promedio	0.38

En total las 34 plantas de tratamiento reportaron un consumo de energía anual para 2015 igual a 109 GWh.

3.3. Plantas Potabilizadoras

Las plantas potabilizadoras municipales mejoran la calidad del agua de las fuentes superficiales o subterráneas para adecuarlas al consumo humano.

En 2015 se potabilizaron 97.9 m³/s en las 874 plantas en operación del país. Al cierre de 2016 el registro de plantas en operación aumentó a 908 unidades con una capacidad instalada conjunta de 140.3 m³/s y un caudal potabilizado de 101.4 m³/s. Esto significó un incremento del 3.59% de caudal potabilizado con respecto al año anterior.

Los principales procesos de potabilización y el número de plantas por proceso a nivel nacional se pueden ver en la siguiente figura:

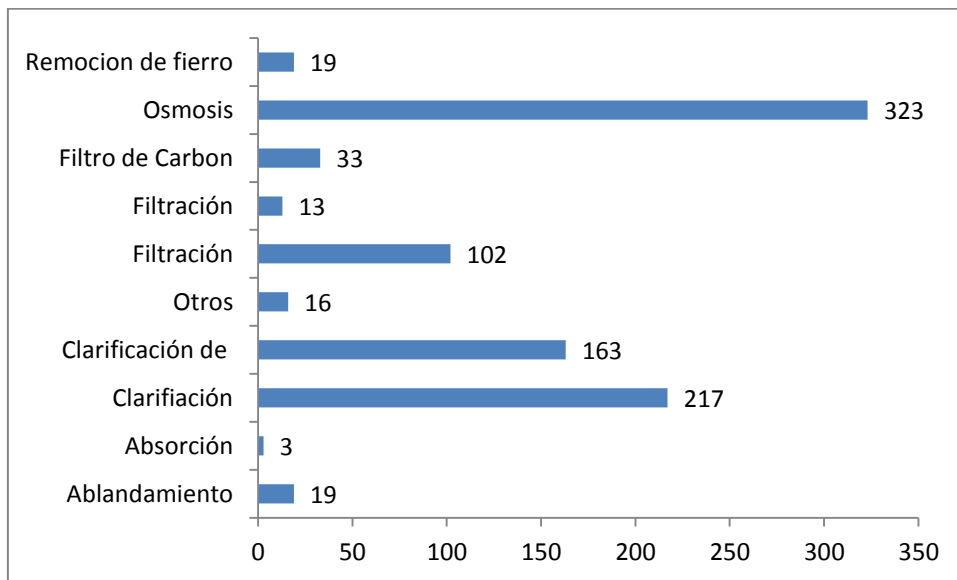


Figura 3.6.- Número de plantas por proceso de tratamiento

Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA, 2017

La cantidad de energía necesaria para la operación de estas plantas depende del tipo de proceso a utilizar en la potabilización, de igual manera del equipo de bombeo necesario para la conducción del agua.

Es difícil hacer un estimado del consumo energético que se requiere para cubrir dichas necesidades de este sector a nivel nacional, sin embargo el centro Mario Molina calculó que el Índice de Consumo Energético (ICE) del ciclo integral del agua equivale a 1.32 kWh por cada metro cúbico, por lo que para un caudal potabilizado de 101.4 m³/s se requeriría aproximadamente 4,221.03 GWh anual.

3.4. Sistema Cutzamala

El Valle de México tiene un complejo sistema de abastecimiento y desalojo del agua que conlleva importantes desafíos para su gestión. Como complejo hídrico de producción, almacenamiento, conducción, potabilización y distribución de agua dulce, el Sistema proporciona un servicio indispensable para la población y las actividades económicas en el Distrito Federal y en el Estado de México. Aprovecha las aguas de la cuenca alta del río Cutzamala, que provienen de las presas que antes formaban parte del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, así como de la presa Chilesdo, construida para aprovechar las aguas del río Malacatepec.

Los componentes básicos de esa infraestructura son siete presas principales con capacidad útil conjunta de 790.9 hm³ y seis plantas de bombeo; 322.3 km de conducciones primarias y una planta potabilizadora con capacidad de diseño de 20 m³/s para la entrega de agua en bloque a la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM) y al Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX).

Las siete presas que conforman el sistema Cutzamala son: Ixtapan del Oro, Valle de Bravo, Villa Victoria, Colorines, El Bosque, Tuxpan y Chilesdo

Las seis plantas de bombeo se construyeron en terrenos de perfil montañoso, en tramos de alta densidad de vegetación y fuertes precipitaciones. Son por ello obras que exigen una operación cuidadosa, así como conservación y mantenimiento continuos. Cada una con su subestación eléctrica, las instalaciones de bombeo alojan en total 36 conjuntos de motor-bomba-válvula esférica y 11 torres de oscilación y sumergencia, así como las correspondientes válvulas de seccionamiento. En varias de las plantas, los motores llegan hasta 22,000 caballos de fuerza para impulsar 4 m³ /s cada uno y elevar el agua más de 1,100 metros (CONAGUA, 2016).

El conjunto consume aproximadamente 2,200 millones de kWh al año, equivalente al consumo de energía eléctrica de una ciudad de 1.5 millones de habitantes.

IV. INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA

4.1. Presas en condiciones para la instalación de Sistemas Fotovoltaicos en Cortinas.

En México, la Comisión Nacional del Agua tiene registradas 6,037 presas y bordos (CONAGUA, 2018, citada por Bourguett). Para fines de esta investigación se utilizó la información contenida en el Sistema de Seguridad de Presas, el cual proporciona datos actualizados de poco más de 1,600 presas, tales como ubicación, uso del agua, dimensiones, características y estado físico y operativo.

De este conjunto de estructuras se descartaron las que poseen cortinas de altura menor a 4 m, las destinadas a almacenar material de jales y las de cortina tipo arco, arco-bóveda y contrafuertes. Al realizar esta selección, el objetivo fue contar con la mayor área posible y estándares de seguridad estructural, así como el control de acceso a las presas y protección de los dispositivos que se instalarán. Finalmente se trabajó con 1,503 presas, las cuales se distribuyen en las entidades federativas de la siguiente manera:

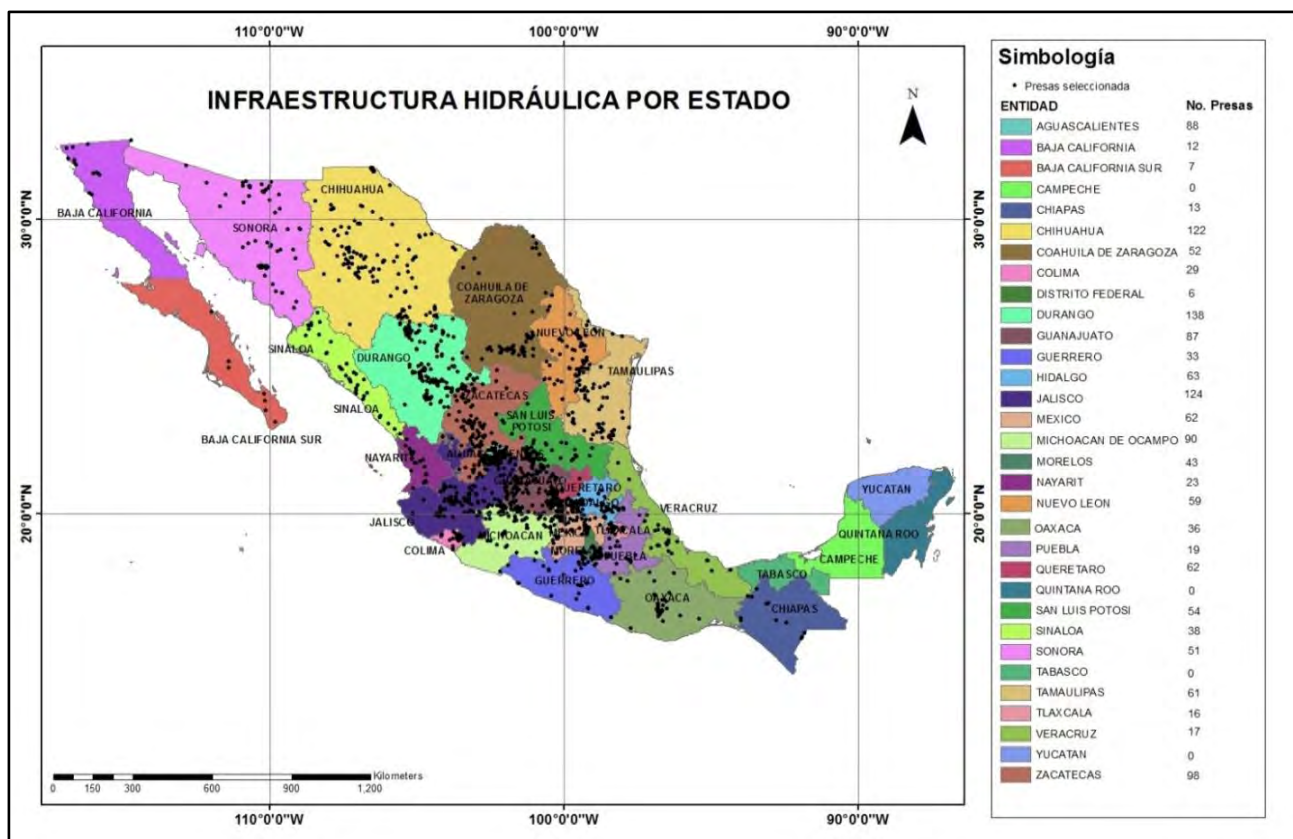


Figura 4.1- Número de presas por estado

Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA, 2018

El estado que presenta el mayor número de presas aptas para la instalación de paneles es Durango con 138, seguido por Jalisco y Chihuahua con 124 y 122 presas respectivamente. Yucatán, Quintana Roo, Campeche y Tabasco no cuentan con infraestructura hidráulica con las características deseadas.

Respecto al área acumulada disponible en cortinas, en la siguiente figura se puede observar que el estado con más área disponible es Chihuahua, seguido de Jalisco, Durango, Guanajuato y Aguascalientes (ver figura 4.2).

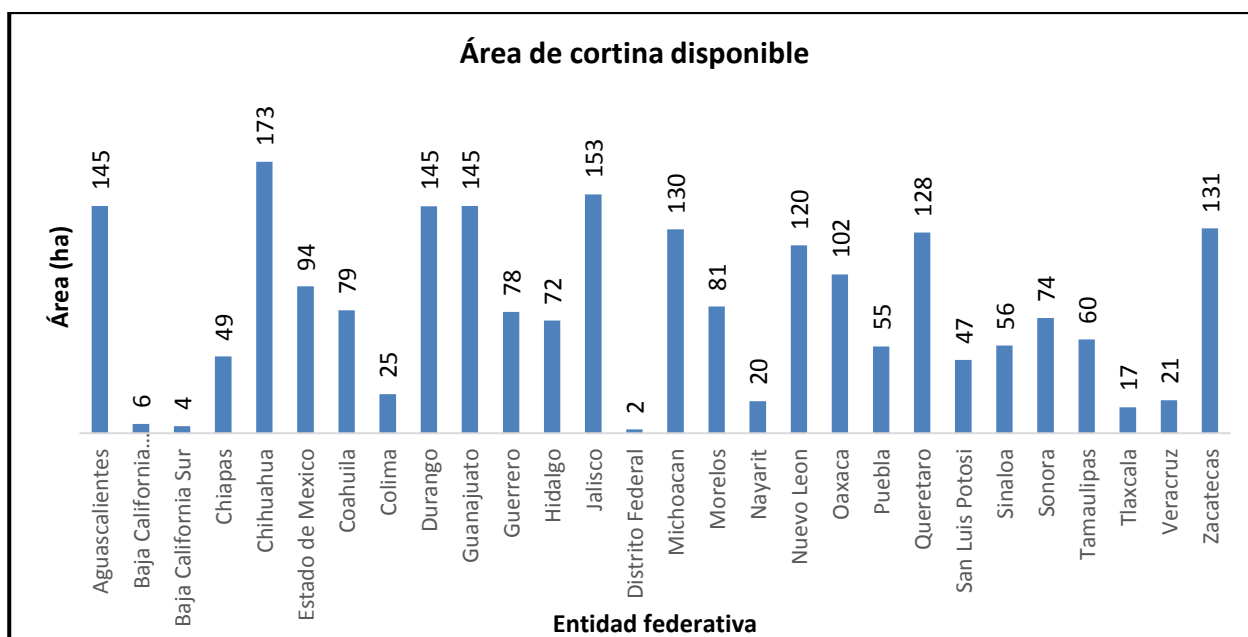


Figura 4.2- Área de cortina disponible
Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA, 2018

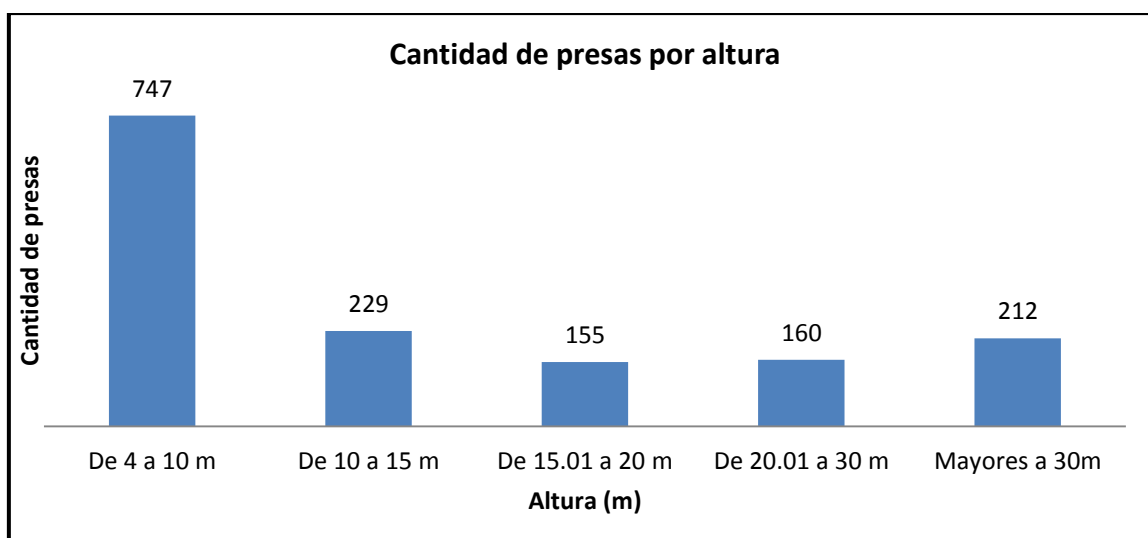


Figura 4.3- Cantidad de presas por altura de cortina
Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA, 2018

De las 1503 presas seleccionadas, 747 presas, aproximadamente el 50%, poseen cortinas de menos de 10 m de altura y suman un área de 486.4 ha, 229 presas, el 15%, entre 10 y 15 m, las cuales reúnen un área de 216.12 ha; 315 presas presentan una altura entre 15 y 30 m y acumulan 1,335.56 ha y solo 212 de estas presentan cortinas mayores a 30 m de altura con un área en conjunto de 1,106.10 ha (ver Tabla 4.1 y Figura 4.3).

En la tabla 4.1 se presentan las presas de mayor altura reúnen mayor área disponible, factor determinante para la estimación del potencial de generación.

Tabla 4.1-Área disponible por altura de presa

Altura	No. Presas	Área disponible (ha)
Menor e igual a 10m	747	486.40
Mayor a 10 y menor o igual a 15	229	216.13
Mayor a 15 y menor o igual a 20	155	174.17
Mayor a 20 y menor o igual a 30	160	229.46
Mayor a 30	212	1106.10

La mayoría de las presas poseen cortinas homogéneas de tierra, sin embargo, existe una cantidad considerable de cortinas de mampostería, materiales graduados y concreto. Para la instalación de paneles solares en este tipo de cortinas no se han identificado restricciones, por lo que no se descarta ninguna presa en función del material de la cortina.

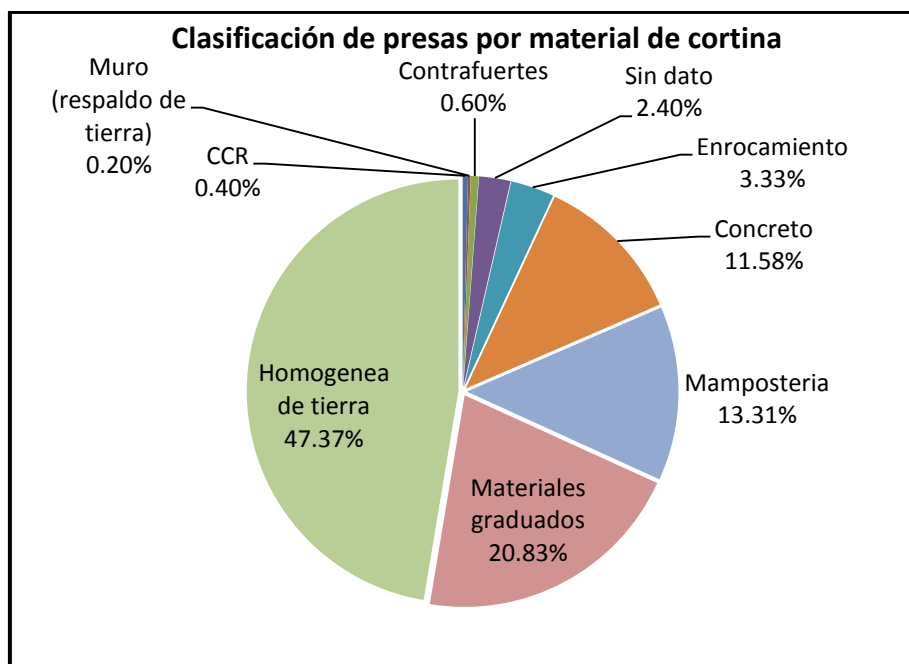


Figura 4.4- Clasificación de presas por material de cortina
Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA, 2018

4.2. Presas en condiciones para la instalación de Sistemas Fotovoltaicos en Embalses.

Actualmente se tiene un registro incompleto de la estadística diaria de presas y bordos construidos en el territorio mexicano, se desconoce el volumen almacenamiento diario de la mayoría de las presas. Sin embargo, existen reportes de niveles diarios de 180 presas, denominadas como principales presas de México por su capacidad de almacenamiento, las cuales alojan el 80% del almacenamiento nacional (150 mil hm³).

La CONAGUA a través de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, recolecta datos diarios del nivel de la superficie libre del agua de las principales presas de México, dicha información es de suma importancia para la estimación del área del embalse y la capacidad de almacenamiento.

Estos datos se encuentran actualizados hasta 2006 en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra entre otros datos el área mínima, media y máxima anual de las 180 presas mencionadas.

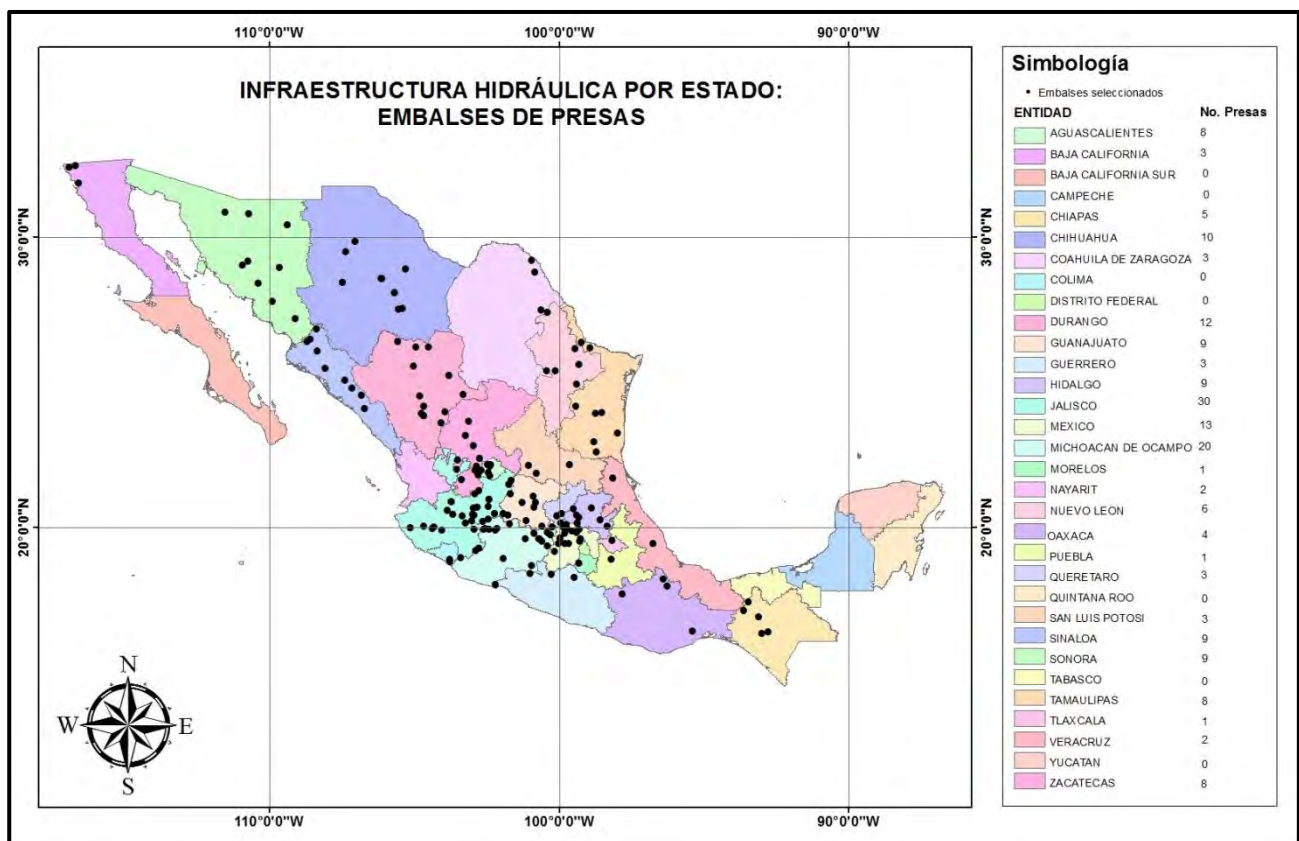


Figura 4.5- Número de embalses de presas por estado

Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA, 2018

La ubicación de las presas puede verse en la figura 4.5.

La localización de dichas presas obedece, entre otros factores, el régimen hidrológico de la corriente, la topografía y características geológicas del sitio, así como los usos a los cuales se destinará el agua almacenada, entre ellos la generación de energía eléctrica, el abastecimiento público, la irrigación y el control de avenidas.

V. TECNOLOGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

El panorama mundial muestra un crecimiento acelerado en el uso de la energía solar fotovoltaica, ya que más del 55% del total de la capacidad de esta tecnología en el mundo se instaló en los últimos cuatro años.

México no es la excepción, a nivel nacional se pronostica una mayor participación de esta tecnología en la matriz de generación, debido principalmente a la disminución de costos ligada al desarrollo tecnológico, la apertura del mercado eléctrico, la comercialización de instrumentos que fomenten la inversión en energías de fuentes no convencionales renovables, así como la mayor competitividad en el mercado eléctrico (SENER, 2018).

Los sistemas fotovoltaicos son una alternativa viable, desde las perspectivas técnica y económica, pues el país dispone durante todo el año de abundante radiación solar y condiciones meteorológicas favorables.

La energía solar fotovoltaica es una tecnología que no requiere de combustibles, por lo que puede ser utilizada cerca de los centros de consumo reduciendo la congestión del sistema eléctrico.

5.1. Recurso Solar

La radiación solar es la transferencia de energía por ondas electromagnéticas. La potencia de la radiación solar se mide en Watt. La irradiancia es el valor instantáneo de la potencia de la radiación solar recibida en un captador de un metro cuadrado de área, sus unidades son Watt/m^2 . La irradiación es el valor acumulado de la irradiancia en un tiempo dado, se mide en Wh/m^2 .

La cantidad de irradiación depende de los factores geográficos como rotación diaria, traslación, latitud y longitud y factores atmosféricos como nubes y partículas suspendidas y contaminación.

La irradiación global solar se compone de la directa y difusa.

Irradiación directa: Es la energía que llega a la superficie de la tierra sin haber sufrido cambio en su trayectoria lineal desde el disco solar.

Irradiación difusa: Es la energía dispersada por la atmosfera más la energía incidente reflejada de la superficie de la tierra

Para las estimaciones realizadas en este trabajo se utilizará la irradiación global promedio diaria.

5.2. Descripción de un sistema fotovoltaico y sus componentes

Según FOCER, 2002, un sistema fotovoltaico consta de un generador (panel o módulo fotovoltaico), un regulador de carga, una batería y un inversor, ver figura 5.1.

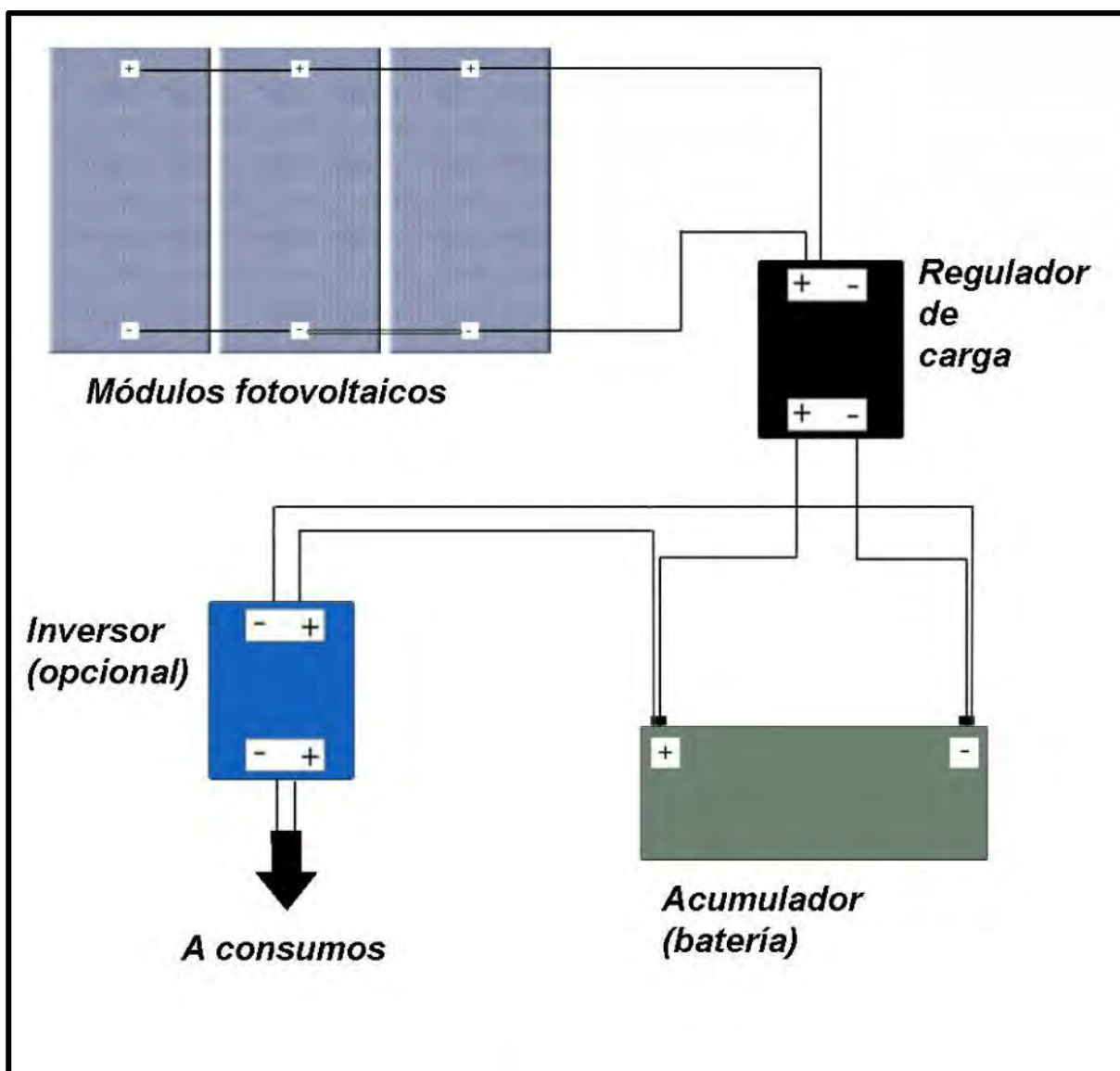


Figura 5.1. Componentes de un sistema fotovoltaico

Generador

La energía solar fotovoltaica se genera mediante un proceso de transformación de la luz solar directamente en electricidad mediante células solares. Cada célula está constituida de un material semiconductor con dos tipos de carga (positiva y negativa), especialmente tratado, que componen un campo eléctrico. Cuando la capa negativa orientada adecuadamente se expone al sol, los fotones entran en contacto con esta y liberan una gran cantidad de electrones, estos electrones se dirigirán a cubrir los espacios presentes en la capa positiva, generándose así una corriente eléctrica entre cargas opuestas, ver figura 5.2.

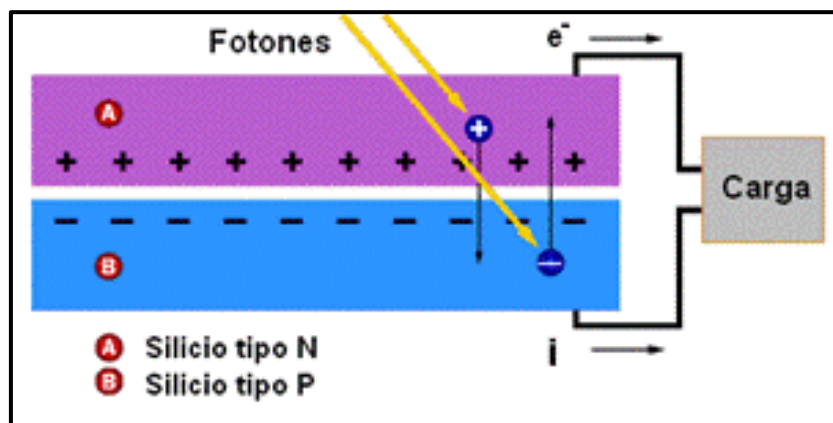


Figura 5.2.- Funcionamiento de una célula fotovoltaica

Las células son la unidad básica de los sistemas fotovoltaicos donde se produce la transformación de la luz solar en energía eléctrica. Sin embargo, debido a la baja tensión de una célula solar individual, para fines de generación, deben ser combinadas y conectadas entre sí en una matriz de varias células formando los **módulos fotovoltaicos**.

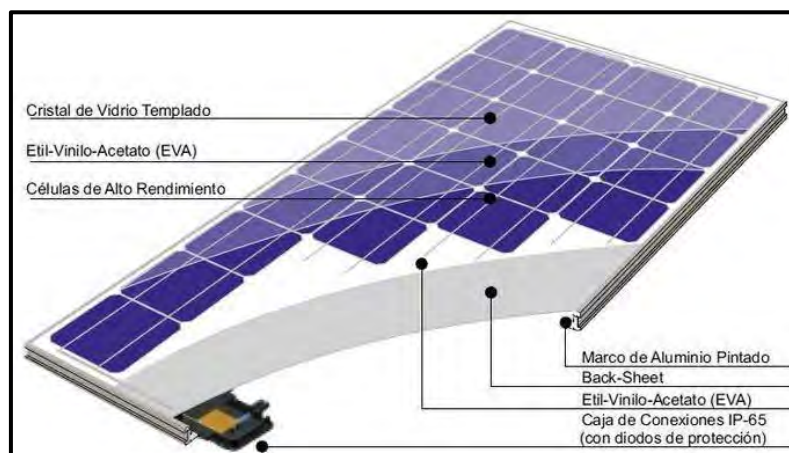


Figura 5.3.- Componentes de un módulo fotovoltaico

Regulador de carga

Es un dispositivo electrónico, que controla el flujo de la corriente de carga proveniente de los módulos hacia la batería, y el flujo de la corriente de descarga de la batería hacia los consumos. El regulador interrumpe el paso de corriente de los módulos hacia la batería en caso que tenga 100% de almacenamiento e interrumpe el paso de corriente de la batería hacia las demás cargas en caso contrario.

Baterías

Debido a que la radiación solar es un recurso variable, en parte previsible (ciclo día-noche), en parte imprevisible (nubes, tormentas); se necesitan equipos apropiados para almacenar la energía eléctrica generada cuando existe radiación y para utilizarla cuando se necesite.

La capacidad de la batería para un sistema fotovoltaico determinado se establece dependiendo de cuanta energía se consume diariamente, de la cantidad de días nublados que hay en la zona y de las características propias de la batería por utilizar.

Inversor

Es el equipo electrónico que permite suministrar la potencia generada a la red comercial. Su función principal es convertir la corriente continua producida por el generador fotovoltaico en corriente alterna, con características establecidas por la red.

5.3. Eficiencia del sistema fotovoltaico

La eficiencia del sistema fotovoltaico depende en gran medida de la eficiencia del módulo utilizado y este dependerá del tipo de material que constituya las células o celdas.

En el mercado fotovoltaico, los materiales comúnmente utilizados en la fabricación de módulos son silicio monocristalino, silicio policristalino, silicio amorfo, cobre/indio/seleniuro (CIS) y telurio/cadmio (Cd Te).

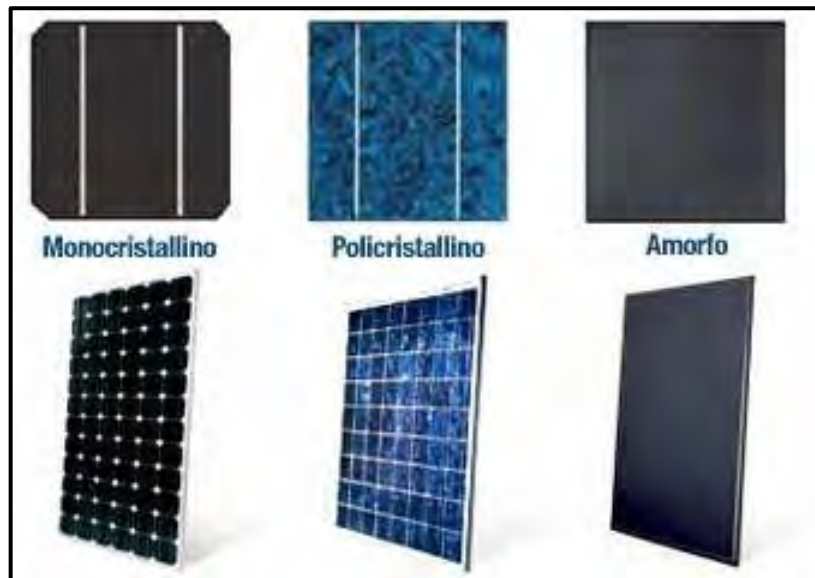


Figura 5.4-Tipo de materiales de un módulo fotovoltaico

Según la Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica (EPIA por sus siglas en inglés) citada por Martin & Dominguez, las eficiencias de los principales módulos fotovoltaicos se muestran en la tabla 5.1.:

Tabla 5.1.-Eficiencias para distintos materiales de células fotovoltaicas

Tipos de módulos fotovoltaicos		Eficiencia
Cristal de silicio	Si-monocristalino	13-20%
	Si-multicristalino	11-16%
Lámina delgada	CIS (Cobre/Indio/Seleniuro)	7-12%
	Cd Te (Teluro/Cadmio)	10-11%
	Silicio amorfo	7-9%

Para fines de este estudio se consideró una eficiencia de 17% correspondiente a un módulo de silicio monocristalino, debido a que este posee una vida útil más duradera con respecto a otros tipos y funciona mejor en condiciones de baja y alta intensidad solar.

Además, la eficiencia del sistema también dependerá de la posición de los módulos fotovoltaicos, la cual está determinada por dos ángulos que influirán en la cantidad de radiación solar promedio que recibirá un sistema instalado durante todo el año:

- **Inclinación:** ángulo formado por el plano del módulo y el plano horizontal. El ángulo de inclinación para optimizar la producción energética anual es

igual a la latitud del lugar donde se encuentre el sistema, en este caso la cortina o el embalse de la presa.

- **Orientación:** ángulo formado por la proyección sobre el plano horizontal de la normal al plano del módulo y la dirección óptima. En este caso como el territorio mexicano se encuentra en el hemisferio norte se requieren cortinas orientadas al sur.

Otros factores que influyen en la eficiencia de un sistema fotovoltaico son: temperatura de los módulos, pérdidas por acumulación de polvo y suciedad, pérdidas en el inversor, pérdidas por interconexiones, sombras y cableado, para sistemas fotovoltaicos en tierra. Según el INERE, 2017, en su metodología solar menciona que para estimaciones a gran escala se puede considerar una simplificación de todos los factores de pérdida del 80%.

5.4. Estructura de soporte

Consiste en un soporte físico y mecánico para los módulos fotovoltaicos que garantice seguridad, acceso para mantenimiento y operación.

Además permiten la orientación correcta del arreglo fotovoltaico que maximiza la generación de energía en el solsticio de invierno que es el día más crítico.

La estructura deberá tener una vida útil mayor o igual a la del módulo fotovoltaico (aproximadamente de 30 años) por lo que el material de construcción se debe seleccionar de acuerdo al clima donde se instala considerando las condiciones meteorológicas.

El anclaje debe resistir las fuerzas que actúen sobre la estructura y el arreglo fotovoltaico, sin permitir el desprendimiento.

Para fines de esta investigación se proponen dos tipos de estructuras:

Estructura en tierra para cortinas

Una muestra de la versatilidad de las plantas fotovoltaicas, se observa en las presas de Kotani, Heiso y Gongen localizadas en la prefectura de Hyogo, Japón. La

instalación de paneles fotovoltaicos sobre sus cortinas tipo enrocamiento se puede realizar con las adecuaciones necesarias a la estructura de soporte.



Figura 5.5.-Estructura convencional para la instalación de paneles en tierra

Estructura flotante para embalses

Las compañías como Ciel et Terre, Infratech Industries, y Thompson Technology Industries han creado muchos modelos y sistemas diferentes de estructuras flotantes a escalas variables.

Estas estructuras deben cumplir con ciertas características, las que destacan son: resistencia a vientos extremos de hasta 212 km/h, terremotos, con calidad sanitaria para agua potable, fácil mantenimiento, seguridad de instalación y vida útil igual o mayor a la del panel.

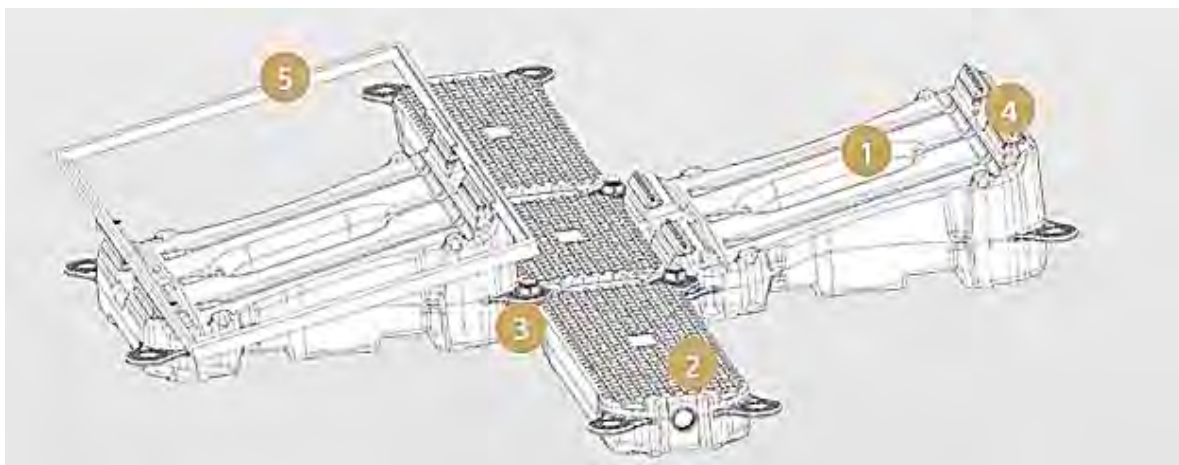


Figura 5.6.-Componentes y características de una estructura flotante comercial

Fuente: <https://www.ciel-et-terre.net/hydrelio-technology/>

1. Flotador principal soportando el panel FV
2. Flotador secundario usado para mantenimiento / flotabilidad
3. Tornillo de ensamble
4. Riel de fijación para los módulos sobre el flotador
5. Modulo Solar FV Común de 60/72 células de 1.67 a 1.975 m de longitud.

VI. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACION FOTOLVOLTAICA.

El potencial fotovoltaico se puede clasificar en función de los factores involucrados en la estimación como se muestra en la figura 4.1; esta clasificación definida por el NREL, SENER y CFE, se aplica en México y nos da una escala de factibilidad de aprovechamiento desde el existente hasta el probado.



Figura 6.1.- Definición de conceptos de potencial.

Fuente: Atlas de zonas con energías limpias. <https://dgel.energia.gob.mx/AZEL/>

En la presente metodología, la estimación del potencial fotovoltaico se realizó con base en los siguientes conceptos:

Potencial del Recurso: evalúa la disponibilidad de la energía de las fuentes renovables, empleando metodologías internacionales, las cuales solo consideran factores naturales.

Potencial posible: es el potencial teórico de capacidad instalable y generación eléctrica de acuerdo a estudios indirectos, utilizando datos de diseño y valores promedio, sin estudios de campo que permitan comprobar su factibilidad técnica y económica.

Capacidad o potencia instalable: es la capacidad energética nominal de los módulos fotovoltaicos para generar electricidad en condiciones óptimas de operación, su unidad de medida es en vatios pico (Wp).

Capacidad real: difiere considerablemente de la capacidad nominal de un módulo fotovoltaico, debido a que bajo condiciones reales de operación la cantidad de radiación que incide sobre las celdas es menor que bajo condiciones óptimas.

Según a Wiginton, Nguyen y Pearce, (2010), la potencia instalable (en kWp) para cada tecnología de módulos fotovoltaicos en una superficie determinada se calcula con la fórmula (citado por Martín A.A.M. & Domínguez B. J., 2015):

$$P = I_g * e * A_{pv} \quad [1]$$

Dónde:

P = Potencia instalable, kW

I_g = Irradiación global = 1 kW/m²

(en condiciones estándar de medida).

e = Eficiencia de los módulos fotovoltaicos, decimal

A_{pv} = Superficie disponible, m²

Potencial de generación anual, es la energía eléctrica que podría ser generada por una central eléctrica durante un año.

De acuerdo con Wiginton, Nguyen y Pearce, (2010), la energía total anual producida (en kWh) se calcula a partir de la fórmula (citado por Martín A.A.M. & Domínguez B. J., (2015):

$$E = I_{md} * 365 * e * A_{pv} * PR \quad [2]$$

Dónde:

E = Energía anual, kW.

I_{md} = Media diaria de la irradiación solar global (kWh/m² día).

e = Eficiencia de los módulos fotovoltaicos, decimal.

A_{pv} = Superficie disponible, m².

PR=Performance ratio=0.8

Potencial Probable: de acuerdo con la SENER a través del INERE, toma en consideración factores técnicos, como la disponibilidad del recurso, temperatura, latitud, altitud, entre otros, así como restricciones territoriales relacionadas con el

uso del suelo, y puede contar con estudios directos de campo, pero no cuenta con suficientes estudios que comprueben su factibilidad técnica y económica.

La **Capacidad Instalable probable P** a partir del espacio disponible (ha) dividida por la inversa de la densidad de potencia (ha/MW).

$$P = \frac{A}{IDP} \quad [3]$$

Dónde:

P=Capacidad Instalable, MW

A= Área disponible, ha

IDP= Inversa de la Densidad de Potencia, ha/MW

.
El **potencial probable de generación de electricidad anual** (GWh/a) del sistema FV está dado por:

$$E = P * F_p * 8.766 \quad [4]$$

Dónde:

P= Inversa de la densidad de potencia por la superficie entre el área disponible, MW.

F_p= Factor de planta, decimal.

Esta evaluación del potencial probable se realizó considerando una tecnología fotovoltaica fija, con orientación hacia el sur con un ángulo respecto a la horizontal de la superficie igual a la latitud de su localización.

La producción de electricidad de un sistema fotovoltaico depende de múltiples variables adicionales a la irradiación solar, como: las meteorológicas (principalmente la temperatura y la velocidad del viento), condiciones topográficas y ambientales del emplazamiento, (como relieve, pendiente y presencia de polvo en suspensión) características técnicas del proyecto como el tipo de arreglo (inclinación y mecanismo de seguimiento) y de la eficiencia de los distintos componentes (paneles, inversores, transformadores, etcétera).

De acuerdo a la metodología solar presentada en el Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias de SENER, 2018, una evaluación detallada del potencial de producción de electricidad a partir de sistemas fotovoltaicos que tome en consideración todas o la mayoría de las variables señaladas es complejo, sobre todo en un dominio territorial amplio, y es altamente probablemente que sea válido solo durante cierto periodo debido a cambios en las condiciones de uso de suelo. Por esta razón, la estimación del potencial fotovoltaico emplea una metodología simplificada, basada en estándares internacionales, y a su vez avalada por la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES).

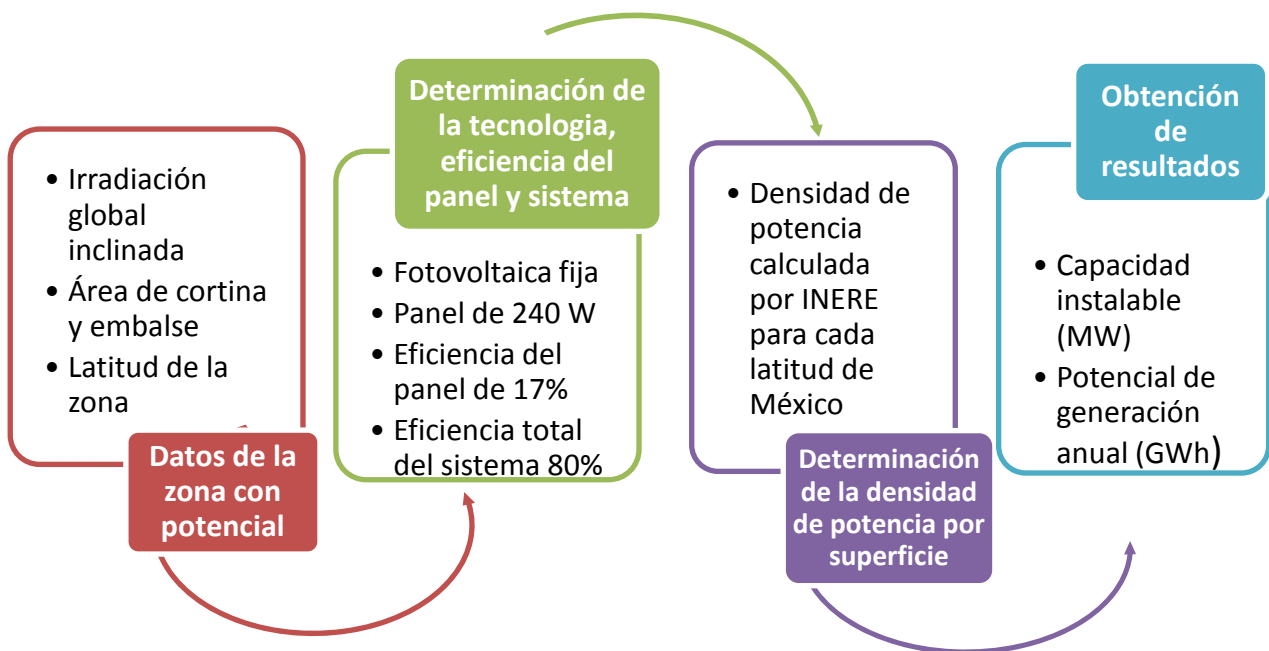


Figura 6.2.- Metodología utilizada en la estimación del potencial probable

Con base en lo anterior, la estimación del potencial fotovoltaico de sistemas instalados en presas requirió en primer lugar, identificar el recurso renovable disponible para su aprovechamiento a nivel nacional, los factores que influyen en él, así como su variación espacial y temporal.

El siguiente punto fue aplicar el criterio de selección propuesto a las presas existentes que podrán ser receptoras de los sistemas fotovoltaicos, considerando características del embalse y la cortina.

A continuación se describen los factores considerados en la estimación del potencial probable de instalación:

6.1. Irradiación solar global:

Existen registros históricos de varios años, con datos diarios y horarios de irradiación solar sobre la superficie horizontal sin embargo, para la estimación del potencial fotovoltaico requiere la irradiación solar inclinada a la latitud del sitio de estudio.

Las fuentes de información que cuentan con una versión gratuita para descarga en varios formatos son los siguientes:

El Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL, por sus siglas en inglés) está dedicado a la investigación, el desarrollo, la comercialización y el despliegue de tecnologías de energía renovable y eficiencia energética. Proporciona datos de irradiación global inclinada en formato vectorial con resolución espacial de 1.5 km, (ver Figura 7.1) y se encuentran disponible en la página web <https://maps-data.nrel.gov/geoserver/>

National Aeronautics and Space Administration (NASA), su sitio web de recursos de energía renovable patrocinado por el programa de Ciencias de la Tierra, presenta información disponible para visualización y descarga en formato ASCII, CSV, GeoJSON, GeoTiff y NetCDF con información de 30 años (enero de 1984 - diciembre de 2013) en <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

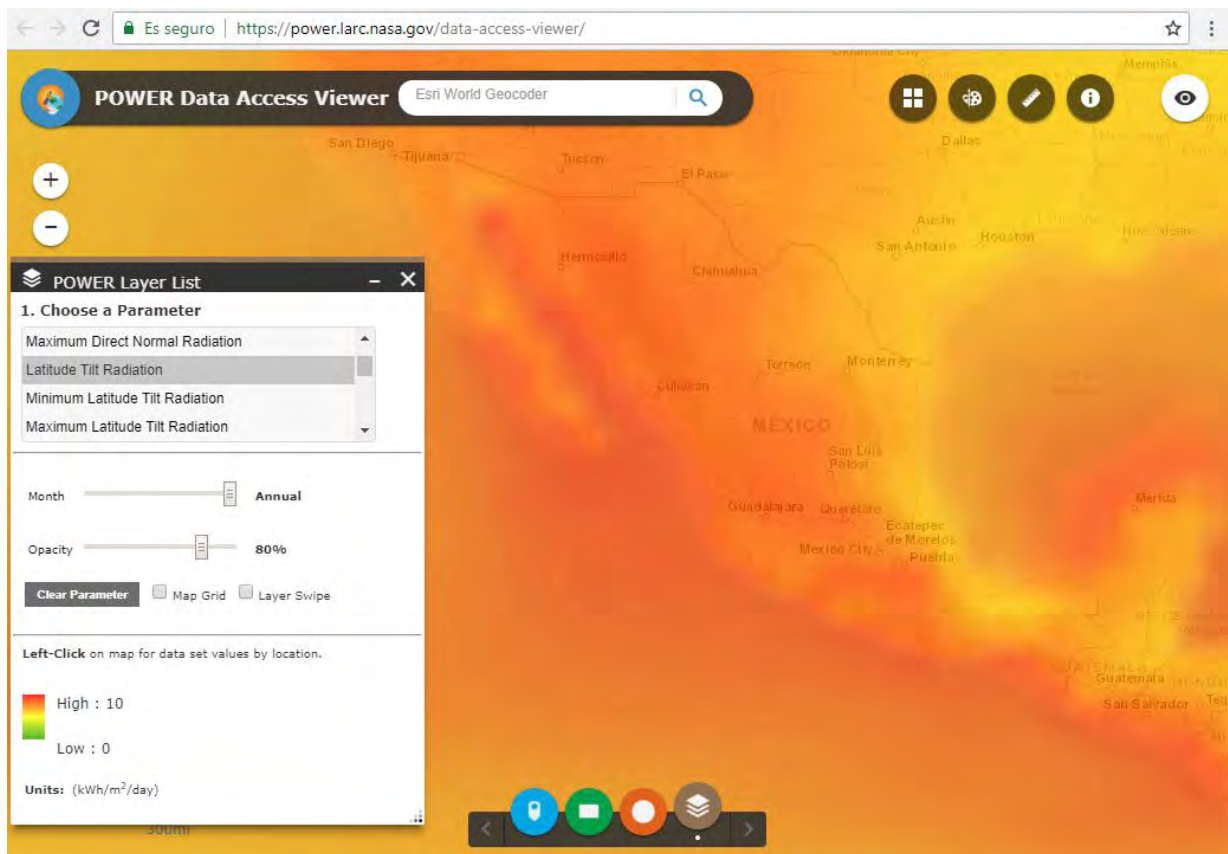


Figura 6.3.- Base de datos de Radiación Solar de la NASA

Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA), es un programa financiado por el Departamento de Energía de EE. UU. y el NREL con la misión de proporcionar información sobre recursos de energía renovable para países y regiones de todo el mundo.

La financiación y el apoyo para este programa concluyeron en 2011, momento en el que todos los datos e información del programa se transfirieron a OpenEI para su disponibilidad a largo plazo.

La radiación solar se proporciona como datos ráster en dos formatos: GeoTIFF y AAIGRID. Las capas de datos se proporcionan en una referencia espacial geográfica (EPSG: 4326), resolución espacial 1 km.

Los productos de SWERA están disponibles en el sitio web [https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_\(SWERA\)](https://openei.org/wiki/Solar_and_Wind_Energy_Resource_Assessment_(SWERA)) y <http://globalsolaratlas.info/>

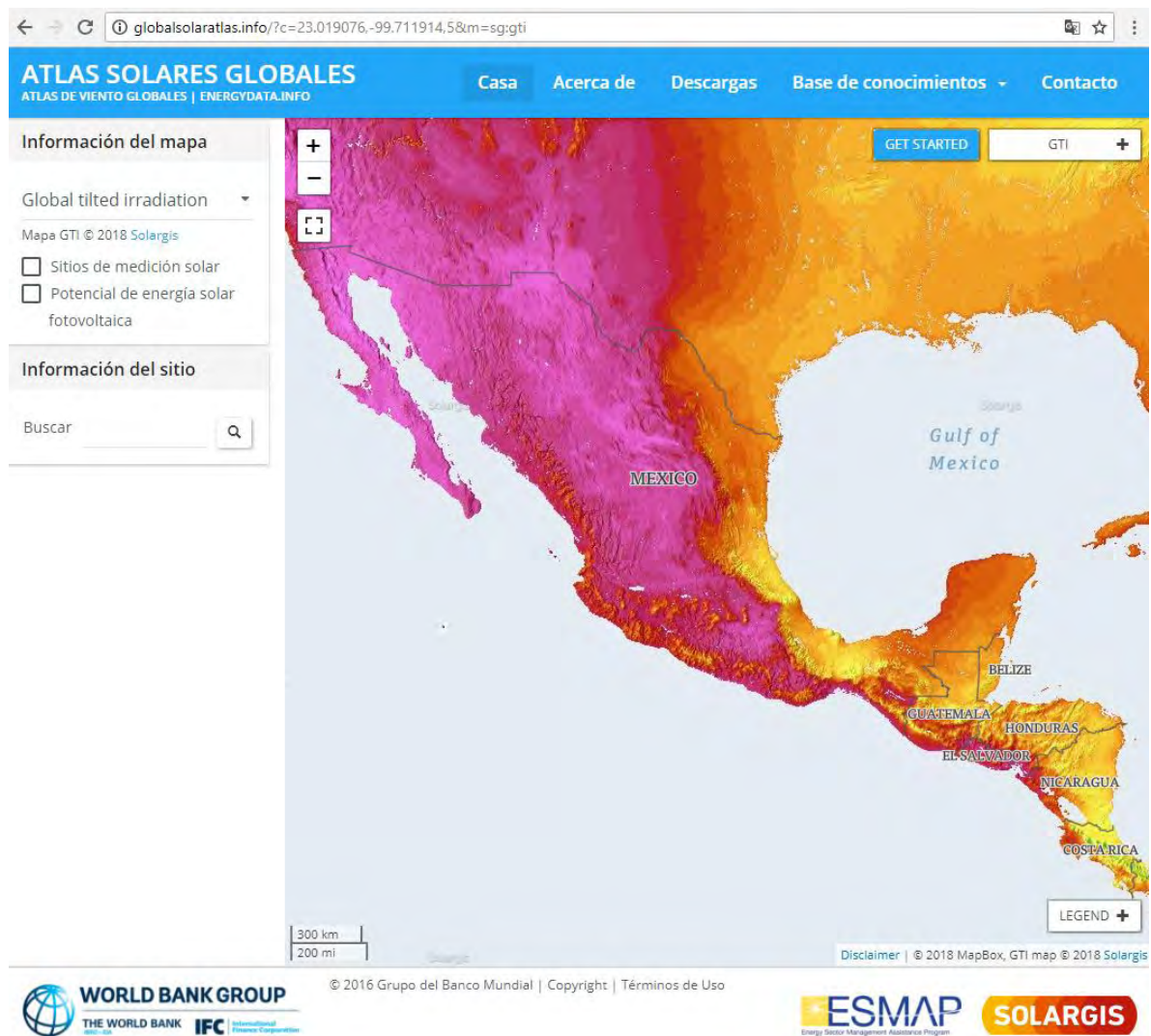


Figura 6.4.- Base de datos de Radiación Solar de la SWERA

Para fines de esta investigación se utilizó la información proporcionada por NREL en formato raster para la extracción del dato puntual de irradiación en cada presa analizada.

6.2. Área disponible

Con base en la información contenida en el Sistema de Seguridad de Presas de CONAGUA, el cual proporciona datos actualizados de poco más de 1,600 presas, se descartaron algunas presas según los criterios mencionados en el apartado de infraestructura hidráulica y finalmente se estimó un potencial en cortina para 1,487 presas.

Para estimar el potencial de generación por embalse, se tomó como base la información del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) de CONAGUA, el área correspondiente al nivel mínimo reportado, y únicamente se descartaron aquellas presas que tienen como objetivo de uso la acuacultura, por lo que el cálculo del potencial de generación se realizó utilizando el área del embalse de 180 vasos de presas.

Cortinas: De la base de datos de Seguridad de Presas se obtuvieron los datos técnicos de las cortinas seleccionadas. Para el cálculo del área se utilizó la altura y el talud aguas abajo de la cortina, ver figura 6.5.

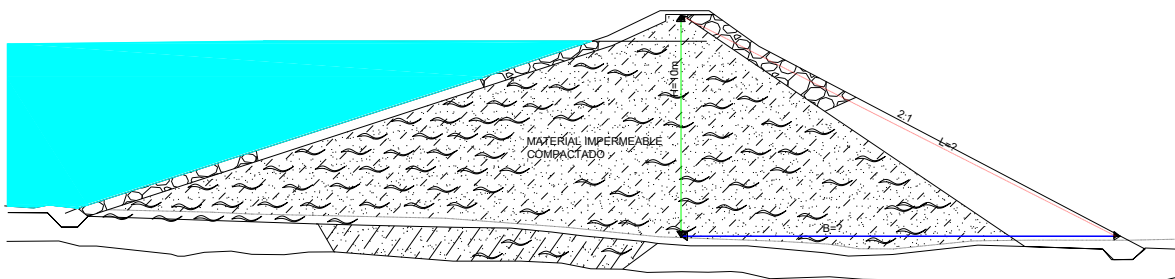


Figura 6.5.- Presa con dimensiones utilizadas en el cálculo del área

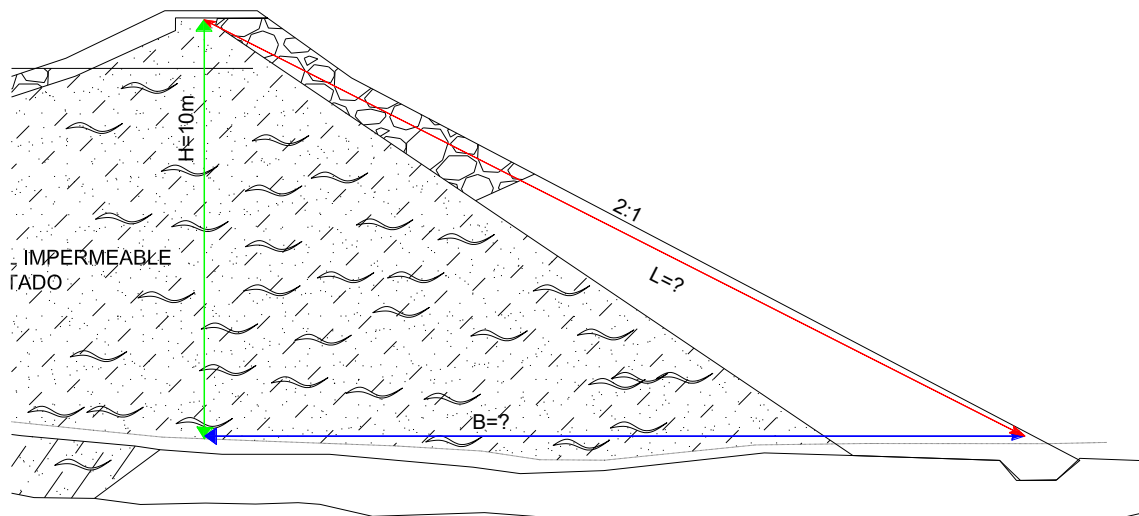


Figura 6.6.- Cortina con datos básicos para el cálculo del área disponible

Con esta información se estimó el área disponible:

$$Ac = L * \sqrt{H^2 * B^2} * 0.8 \quad [5]$$

Dónde:

Ac = Área de la cortina, m².

L = Longitud de cortina, m

H = Altura de la cortina, m.

B = Altura de cortina por talud aguas abajo, m

k = Talud aguas abajo, decimal

0.8 = Factor de reducción, decimal

Embalses: se obtuvo el área mínima de embalse de acuerdo a la base de datos BANDAS, posteriormente por recomendaciones de especialistas, se utilizó solo un tercio del área disponible para no afectar la calidad del agua del embalse por lo que dicha área se calculó como sigue:

$$Ae = \frac{1}{3} [AMIN] \quad [6]$$

Dónde:

Ae = Área del embalse, m².

AMIN = Área mínima del embalse, m².

Finalmente se hizo la estimación del potencial, considerando por separado y conjuntando el área disponible en los embalses y cortinas, la irradiación en la zona y la capacidad de generación de un sistema fotovoltaico promedio.

El potencial de generación fotovoltaica se calcula a partir de la irradiación global incidente sobre el plano del panel fotovoltaico, ajustada por una eficiencia de conversión de energía y por factores de pérdida reportados en proyectos fotovoltaicos.

6.3. Determinación de la tecnología

Para efectos de esta evaluación es importante determinar una tecnología fotovoltaica tipo para evaluar la densidad de potencia por superficie y la capacidad instalable de los proyectos fotovoltaicos. Lo anterior requirió un análisis para identificar las características generales de las plantas fotovoltaicas en operación, así como aquellas centrales que pudieran ser instaladas en México (permisionarios) y una comparación de las tecnologías existentes en el mercado. A partir de esto, se definió como óptimo, un panel monocristalino con las siguientes características:

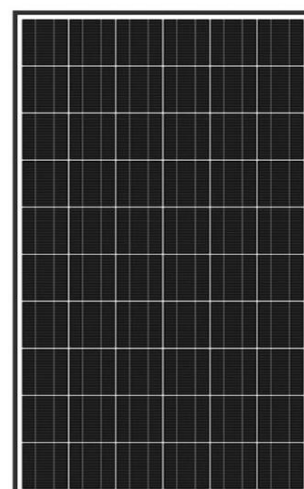
Tabla 6.1.- Dimensiones de un panel comercial Solartec

Dimensiones de un panel comercial Solartec

Número de Celdas:	60 Celdas en Serie
Especificaciones (Largo / Ancho):	(1.65m / 0.992m)
Peso:	23.5 Kg.
Cable (Longitud / Sección):	0.90m / 4mm ²

Rendimiento electrónico.

Temperatura de funcionamiento:	-40°C a 90°C
Potencia de salida:	<u>240 Watts</u>
Eficiencia del módulo:	17%
Voltaje de circuito abierto:	37.85 Volts
Voltaje en el punto de máxima potencia:	30.12 Volts
Corriente de cortocircuito:	8.65 Amperes
Corriente en el punto de máxima potencia:	8.30 Amperes



6.4. Determinación de la eficiencia del sistema

Entre las pérdidas eléctricas de los sistemas fotovoltaicos se encuentran las producidas en los inversores, transformadores, cableado, diodos y conexiones, debido a la diferencia de potencia entre módulos y por suciedad. Este conjunto de pérdidas puede variar significativamente para cada proyecto en particular, dependiendo de su configuración y mantención. Se utiliza una eficiencia igual al 80% basado en la reportada por NREL.

Para la estimación del potencial se eligió un panel monocristalino de silicio, que instalado en tierra, tiene una eficiencia del 17 %, sin embargo, se espera que la eficiencia de los paneles colocados en el embalse aumente, debido al efecto refrigerante del agua.

6.5. Determinación de la densidad de potencia por superficie

Para esta evaluación es necesario calcular la densidad de potencia por superficie o su inversa (requerimiento de área por Megawatt instalado). El método utilizado se basa en el cálculo de la separación entre paneles y su proyección, con el objeto de obtener la longitud requerida por panel para que el sistema no sea afectado por alguna sombra entre un panel y el otro. (SENER, 2018)

El INERE, realizó un análisis para las diferentes latitudes del país (inclinación del panel), para cada hora y día del año, con la finalidad de calcular el ángulo crítico respecto a la posición del sol y garantizar que el sistema no sea afectado por alguna sombra entre paneles. La tangente en relación al ángulo respecto a la posición del sol y el plano de los paneles resultó de 0.5222 radianes. Con este dato se calculó la densidad de potencia para paneles en forma horizontal e inclinada.

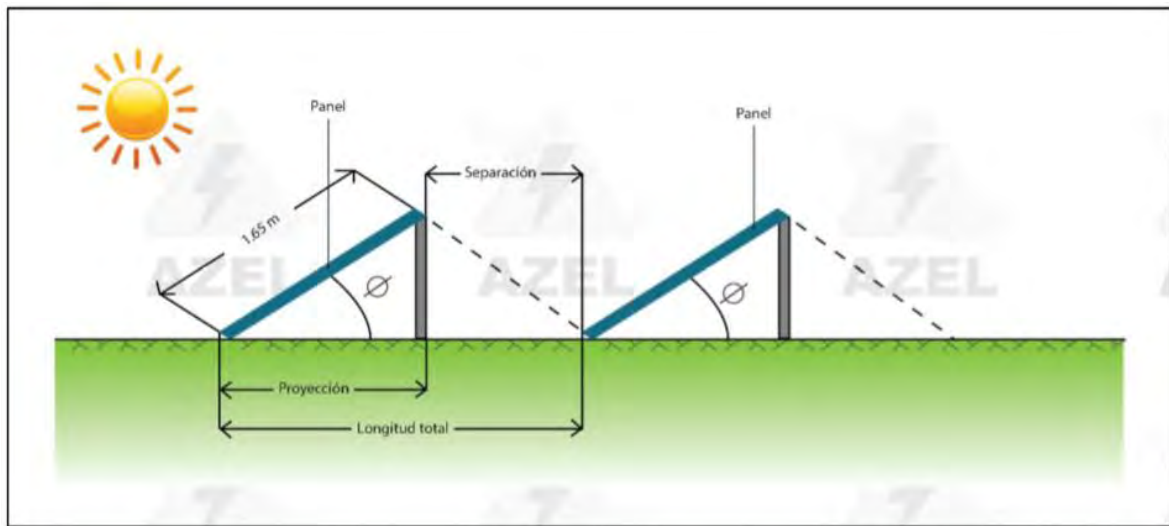


Figura 6.7.- Esquema del cálculo de la inversa de densidad de potencia
 Fuente: Atlas de zonas con energías limpias. <https://dgel.energia.gob.mx/AZEL/>

Además fue necesario suponer un factor de amortización por vías de acceso, pendientes e infraestructura requerida como casa de máquinas y subestación, utilizando en total un 30 % de amortización.

Los resultados del análisis permiten conocer la densidad de potencia típica para todo México. Por lo tanto, en la evaluación para sistemas fijos se calcula la densidad de potencia en función de la latitud de la zona. Estos datos se utilizaron para el cálculo del potencial en embalses.

Tabla 6.2.-Inversa de la densidad de potencia para superficies planas

Latitudes de México	Inversa de la densidad de potencia (ha/MW)
15	1.3
16	1.32
17	1.34
18	1.37
19	1.39
20	1.41

Latitudes de México	Inversa de la densidad de potencia (ha/MW)
21	1.44
22	1.46
23	1.48
24	1.5
25	1.52
26	1.54
27	1.56
28	1.58
29	1.6
30	1.62
31	1.63
32	1.65

Fuente: Atlas de zonas con energías limpias. <https://dgel.energia.gob.mx/AZEL//>

Con las mismas consideraciones se realizó el cálculo de la inversa de la densidad de potencia para superficies inclinadas, este dato se ocupó para el cálculo de potencial en las cortinas de las presas.

Tabla 6.3.- Inversa de la densidad de potencia para superficies inclinadas

Inversa de la densidad de potencia (ha/MW)									
Latitud/Talud	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	10.0	12.0
15	1.03	1.06	1.11	1.11	1.12	1.14	1.15	1.22	1.23
16	1.03	1.07	1.12	1.12	1.14	1.15	1.17	1.24	1.25
17	1.04	1.08	1.13	1.13	1.15	1.17	1.18	1.26	1.27
18	1.05	1.08	1.14	1.14	1.16	1.18	1.20	1.28	1.29
19	1.05	1.09	1.15	1.15	1.18	1.20	1.21	1.30	1.31
20	1.06	1.10	1.16	1.16	1.19	1.21	1.23	1.32	1.33
21	1.07	1.11	1.18	1.18	1.20	1.22	1.24	1.34	1.35
22	1.07	1.12	1.19	1.19	1.21	1.23	1.25	1.35	1.37
23	1.08	1.12	1.20	1.20	1.22	1.25	1.26	1.37	1.39
24	1.08	1.13	1.21	1.21	1.23	1.26	1.28	1.39	1.40
25	1.09	1.14	1.22	1.22	1.24	1.27	1.29	1.40	1.42
26	1.09	1.14	1.22	1.22	1.25	1.28	1.30	1.42	1.44
27	1.09	1.15	1.23	1.23	1.26	1.29	1.31	1.44	1.45
28	1.10	1.15	1.24	1.24	1.27	1.30	1.32	1.45	1.47
29	1.10	1.16	1.25	1.25	1.28	1.31	1.33	1.47	1.48
30	1.10	1.16	1.26	1.26	1.29	1.32	1.34	1.48	1.50
31	1.11	1.17	1.26	1.26	1.30	1.33	1.35	1.49	1.51
32	1.11	1.17	1.27	1.27	1.31	1.34	1.36	1.51	1.53

Fuente: Elaboración propia con base en /

VII. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan los resultados de la estimación del potencial de generación, en función de la irradiación solar global anual, la eficiencia del módulo fotovoltaico propuesto, la potencia pico del panel solar y el área disponible en las presas.

Área disponible: la superficie total disponible estimada en 1,487 cortinas de presas de México es de 2,033.11 ha y 26,311.67 ha en 180 embalses.

Irradiación global promedio diaria: con base en información descargada del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), se corroboró que en México la irradiación global incidente promedio diaria varía de 4.5 a 6.2 kWh/m².

A continuación se presenta el mapa de la distribución espacial de la irradiación global incidente en México, Figura 7.1.

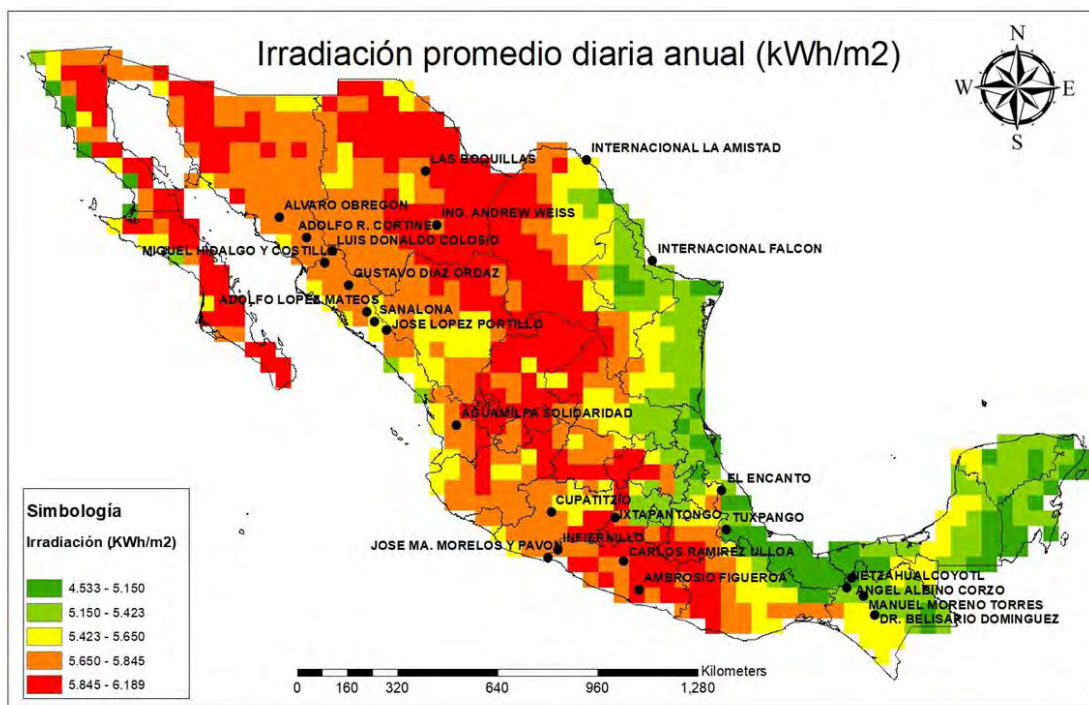


Figura 7.1.- Irradiación solar global promedio diaria

7.1. Potencial de generación probable en cortinas:

La capacidad instalable en cortinas es de 1,730 MW, los estados con mayor capacidad instalable son Tamaulipas y Sinaloa, con 174MW y 173MW respectivamente. Durango, Nuevo León, Jalisco, Guanajuato y Michoacán presentan capacidad instalable entre 100 MW y 150 MW. Yucatán, Quintana Roo, Campeche Tabasco y Baja California presentan capacidad cero debido a que no cuentan con presas disponibles o las existentes no cumplen con las condiciones requeridas para la instalación de paneles.

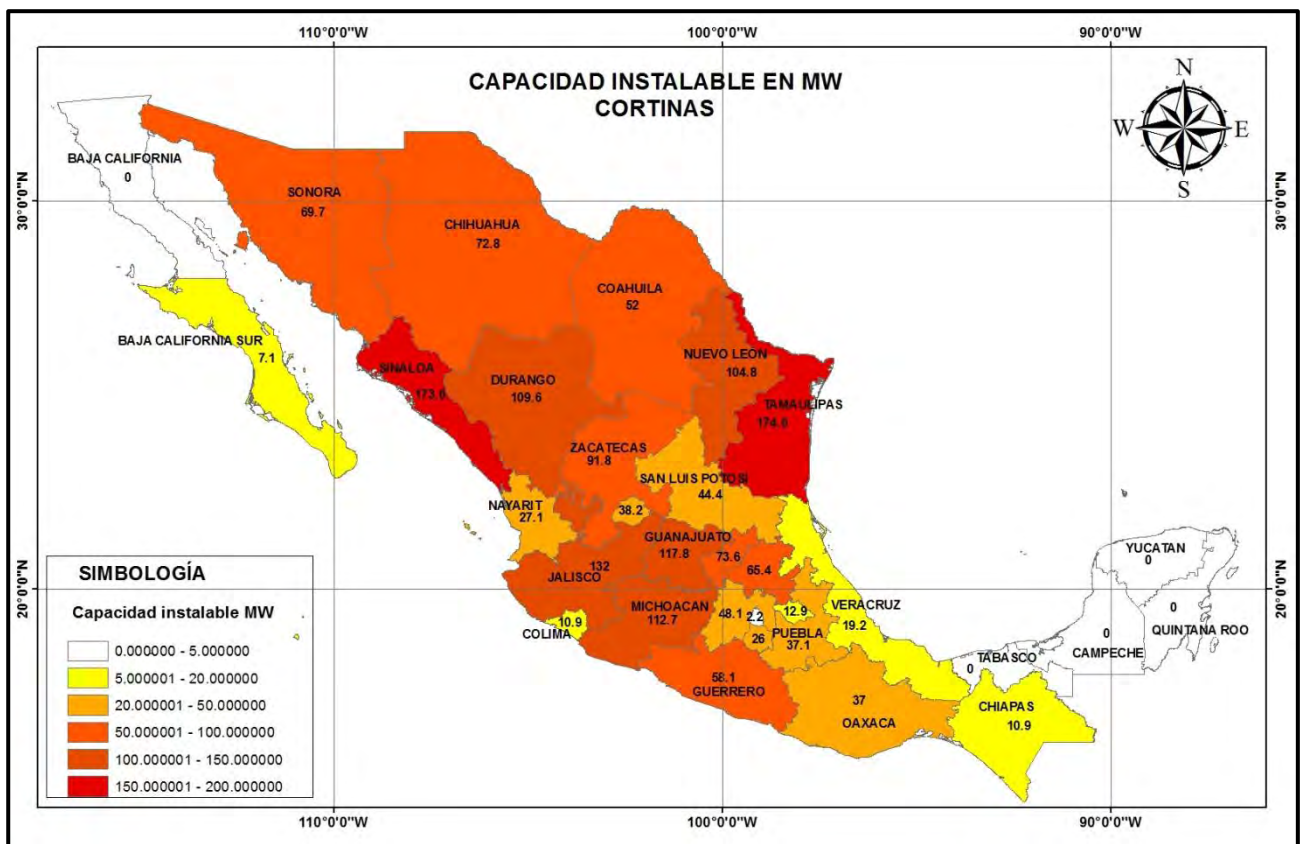


Figura 7.2.- Capacidad instalable en cortina por estado

En la siguiente gráfica, se muestra en forma descendente el aporte por entidad federativa, siendo Nayarit, Morelos, Veracruz, Tlaxcala, Chiapas, Colima, Baja California Sur y Distrito Federal los de menor capacidad instalable.

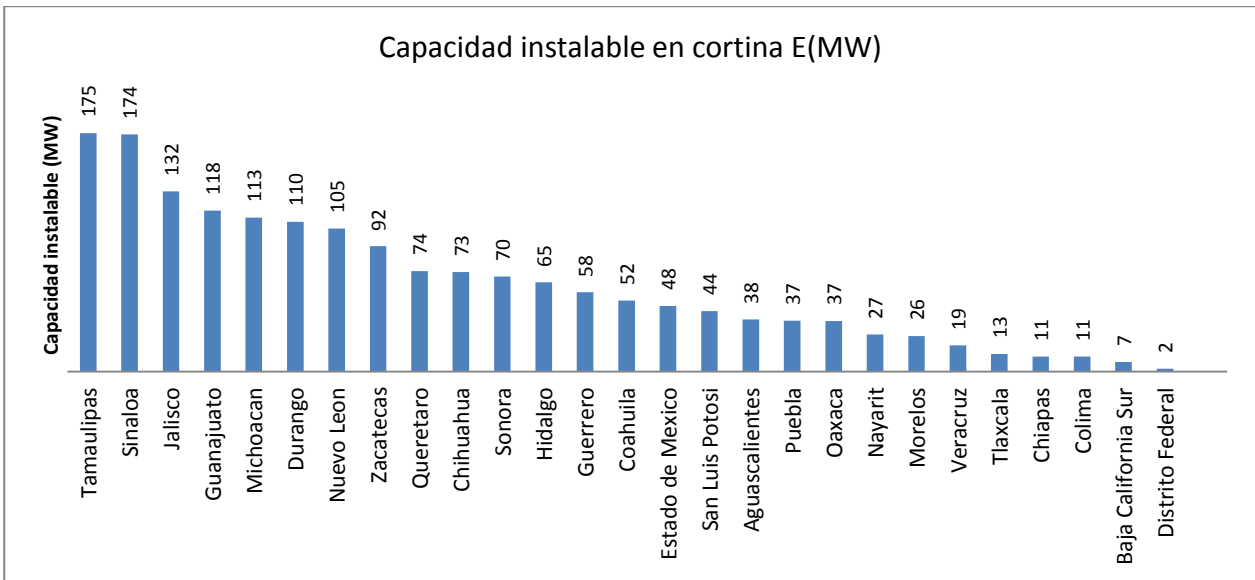


Figura 7.3.- Capacidad instalable en cortina por estado

El potencial de generación anual nacional esperado es de 3,793 GWh, ver figura 7.4. Debido a que se utilizó un factor de planta aproximado de 0.25, los estados de mayor capacidad instalada corresponden con los de mayor potencial y son Tamaulipas y Sinaloa con 382 y 380 respectivamente.

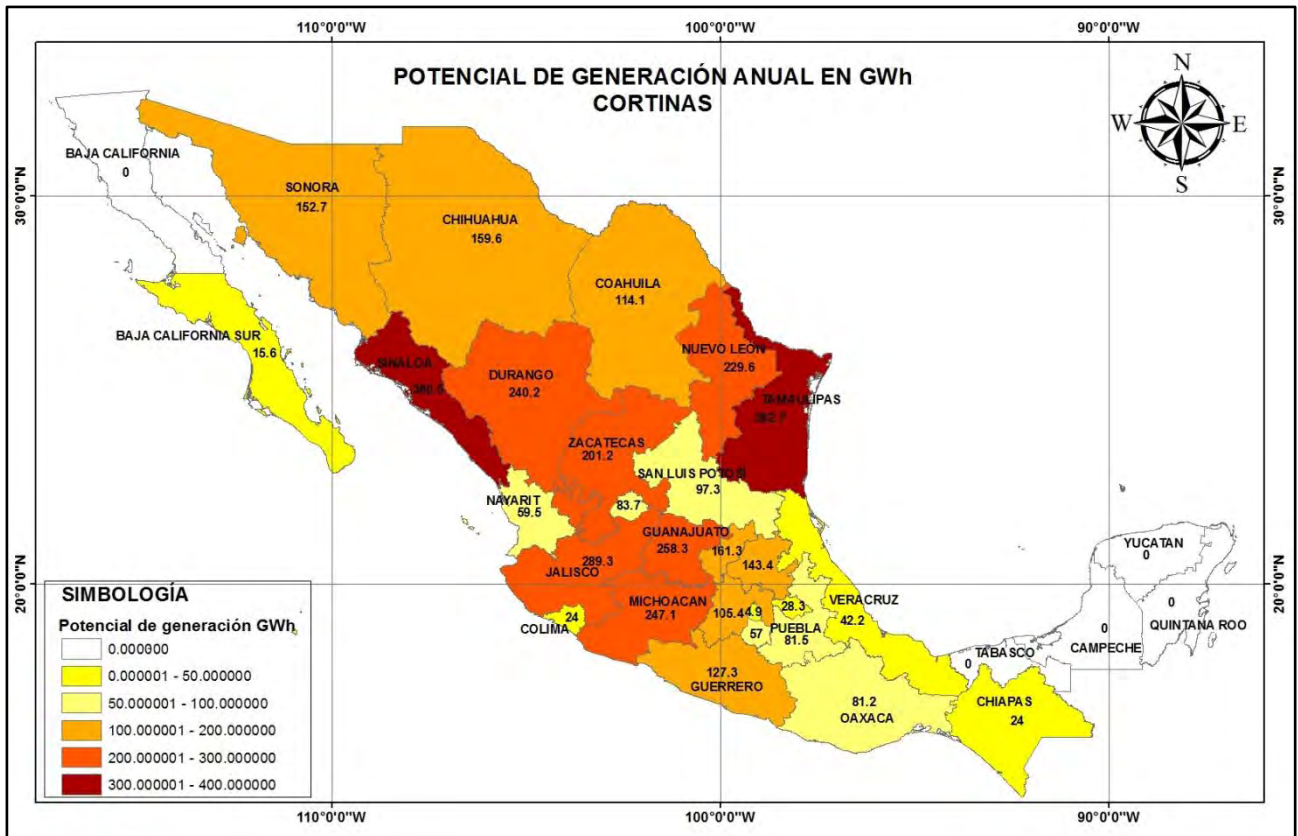


Figura 7.4.- Potencial de generación en cortina por estado

A continuación se presenta una tabla resumen con los resultados obtenidos del análisis de potencial en cortinas de presas:

Tabla 7.1.- Resultados de potencial de generación en cortina para cada estado

Estado	Número de Presas	Área de cortina disponible (ha)	Capacidad instalable en cortina E(MW)	Potencial de Generación anual (GWh/año)
Aguascalientes	101	43.32	38.22	83.76
Baja California	0	0.00	0.00	0.00
Baja California Sur	6	8.08	7.16	15.69
Chiapas	9	11.87	10.96	24.03
Chihuahua	120	89.22	72.86	159.68
Estado de México	59	54.13	48.11	105.44
Coahuila	49	63.74	52.10	114.17
Colima	28	12.64	10.96	24.03
Durango	132	132.00	109.63	240.26
Guanajuato	99	134.63	117.89	258.36
Guerrero	30	65.68	58.11	127.34
Hidalgo	62	73.55	65.46	143.45
Jalisco	117	150.10	132.01	289.30
Distrito Federal	6	2.46	2.27	4.98
Michoacán	87	129.60	112.79	247.18
Morelos	44	29.52	26.05	57.09
Nayarit	23	30.84	27.15	59.51
Nuevo León	58	126.02	104.80	229.67
Oaxaca	34	41.34	37.05	81.20
Puebla	18	42.98	37.20	81.52
Querétaro	59	83.03	73.63	161.36
San Luis Potosí	64	51.41	44.41	97.31
Sinaloa	38	209.94	173.66	380.58
Sonora	45	83.06	69.71	152.78
Tamaulipas	55	208.07	174.64	382.72
Tlaxcala	16	14.92	12.95	28.37
Veracruz	16	22.52	19.29	42.28
Zacatecas	97	106.99	91.82	201.22
Total	1,472.00	2,021.67	1,730.91	3,793.30

7.2. Potencial probable en embalses:

La capacidad instalable en embalses es de 1,730 MW, los estados con mayor capacidad instalable son Jalisco y Oaxaca, con 9,655 y 2,408 MW respectivamente. Chihuahua, Nuevo León, Sinaloa, Tamaulipas, Guanajuato y Veracruz presentan capacidad instalable entre 500 MW y 1000 MW, como se puede ver en la figura 7.5.

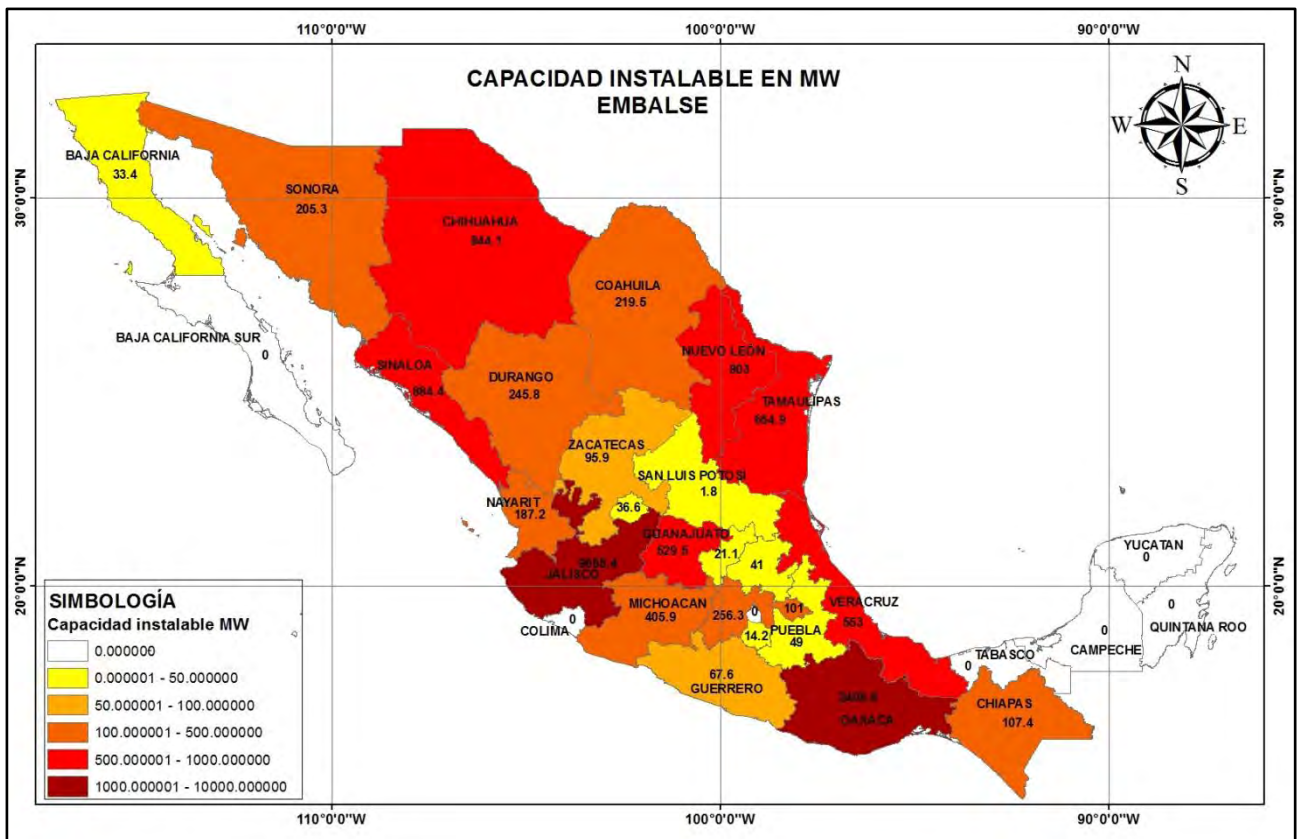


Figura 7.5.- Capacidad instalable en embalses por estado Aguascalientes, Baja California, San Luis Potosí, Puebla, Morelos, Hidalgo y Querétaro son los de menor capacidad instalable.

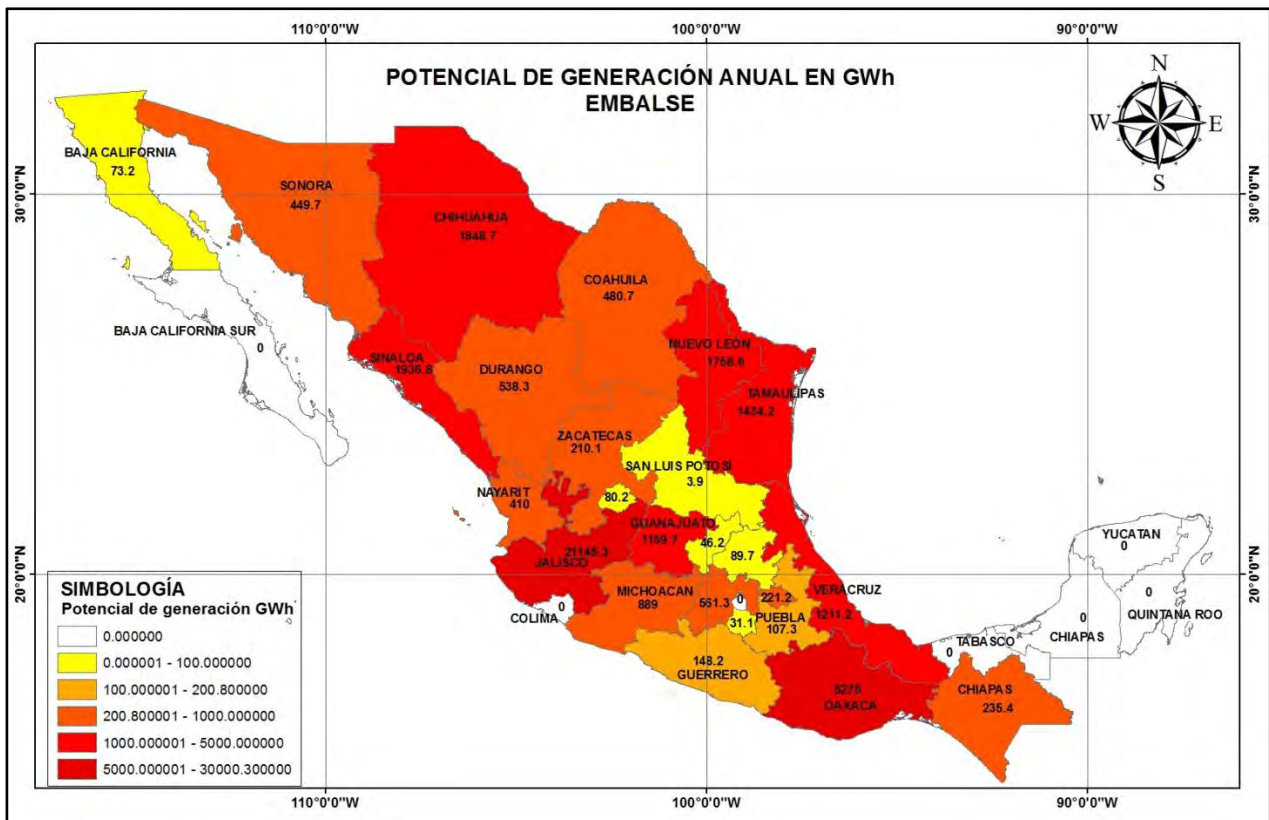


Figura 7.6.- Potencial de generación en embalse por estado

El potencial de generación anual nacional esperado por la instalación de sistemas fotovoltaicos en embalses es de 40,346 GWh, los estados de mayor potencial son Jalisco y Oaxaca con 21,145 GWh y 5,275 GWh anual respectivamente.

Tabla 7.2.- Resultados de potencial de generación en embalse para cada estado

Estado	Número de embalses	Área de embalse disponible (ha)	Capacidad instalable en embalse E(MW)	Potencial de Generación anual (GWh/año)
Jalisco	30	13598.90	9655.41	21145.36
Oaxaca	4	3291.659	2408.67	5275.00
Sinaloa	9	1342.123	884.40	1936.85
Chihuahua	10	1321.208	844.17	1848.74
Nuevo León	6	1223.06	803.05	1758.69
Tamaulipas	8	966.52	654.91	1434.25
Veracruz	2	796.26	553.09	1211.27
Guanajuato	9	746.99	529.55	1159.72
Michoacán	20	565.84	405.94	889.02
México	13	356.42	256.31	561.32
Durango	12	373.33	245.82	538.34
Coahuila	3	347.23	219.53	480.79
Sonora	9	325.71	205.38	449.78
Nayarit	2	256.54	187.25	410.09
Chiapas	5	141.91	107.49	235.42
Tlaxcala	1	140.44	101.04	221.28
Zacatecas	8	139.69	95.94	210.11
Guerrero	3	92.71	67.67	148.20
Puebla	1	67.16	49.02	107.36
Hidalgo	9	57.79	41.00	89.79
Aguascalientes	8	53.09	36.64	80.26
Baja California	3	55.15	33.45	73.27
Querétaro	3	29.76	21.11	46.23
Morelos	1	19.46	14.20	31.11
San Luis Potosí	3	2.62	1.80	3.95
Total	182	26,311.67	18,422.9621	40,346.287

7.3. Potencial probable total

La capacidad instalable total (embalses y cortinas) es de 20,153 MW y el potencial de generación anual es de 44,139 GWh.

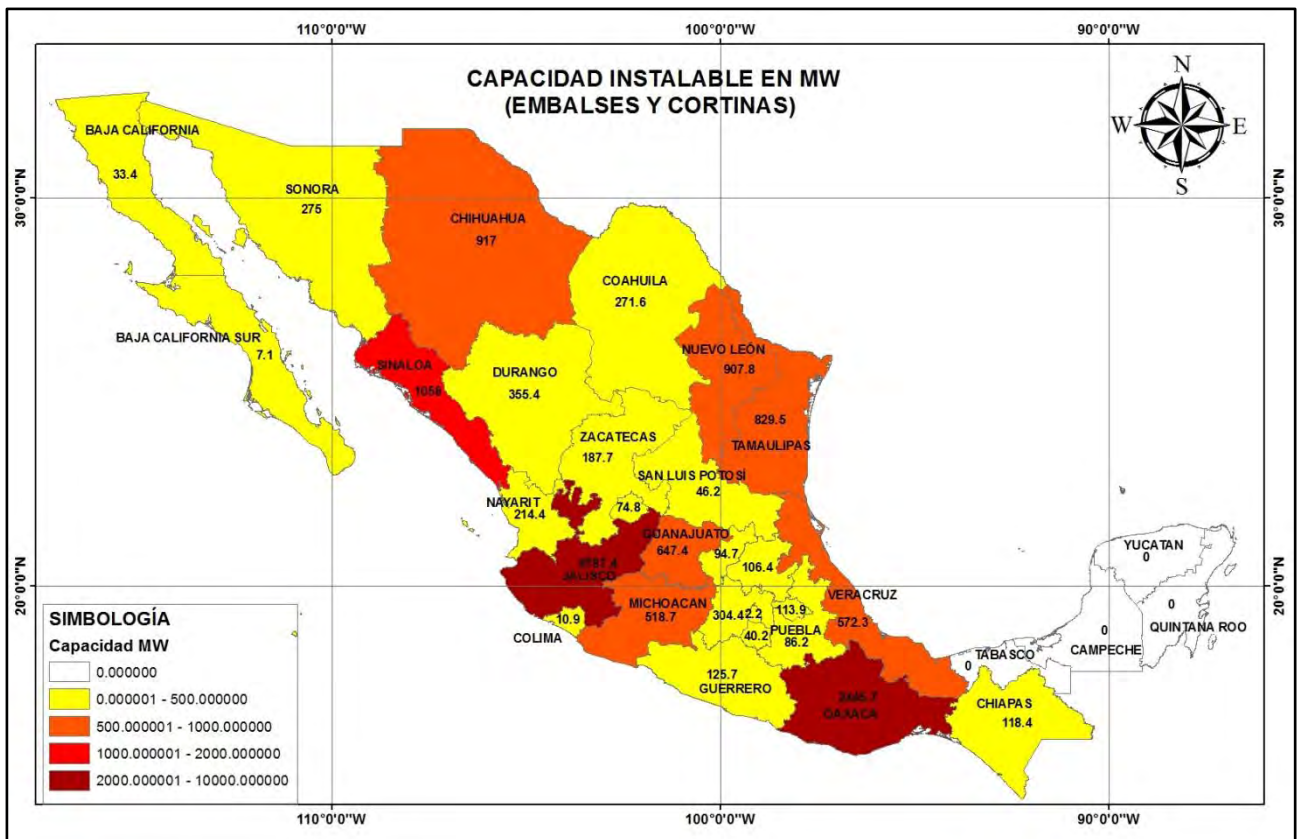


Figura 7.7.- Capacidad instalable total (embalses y cortinas)

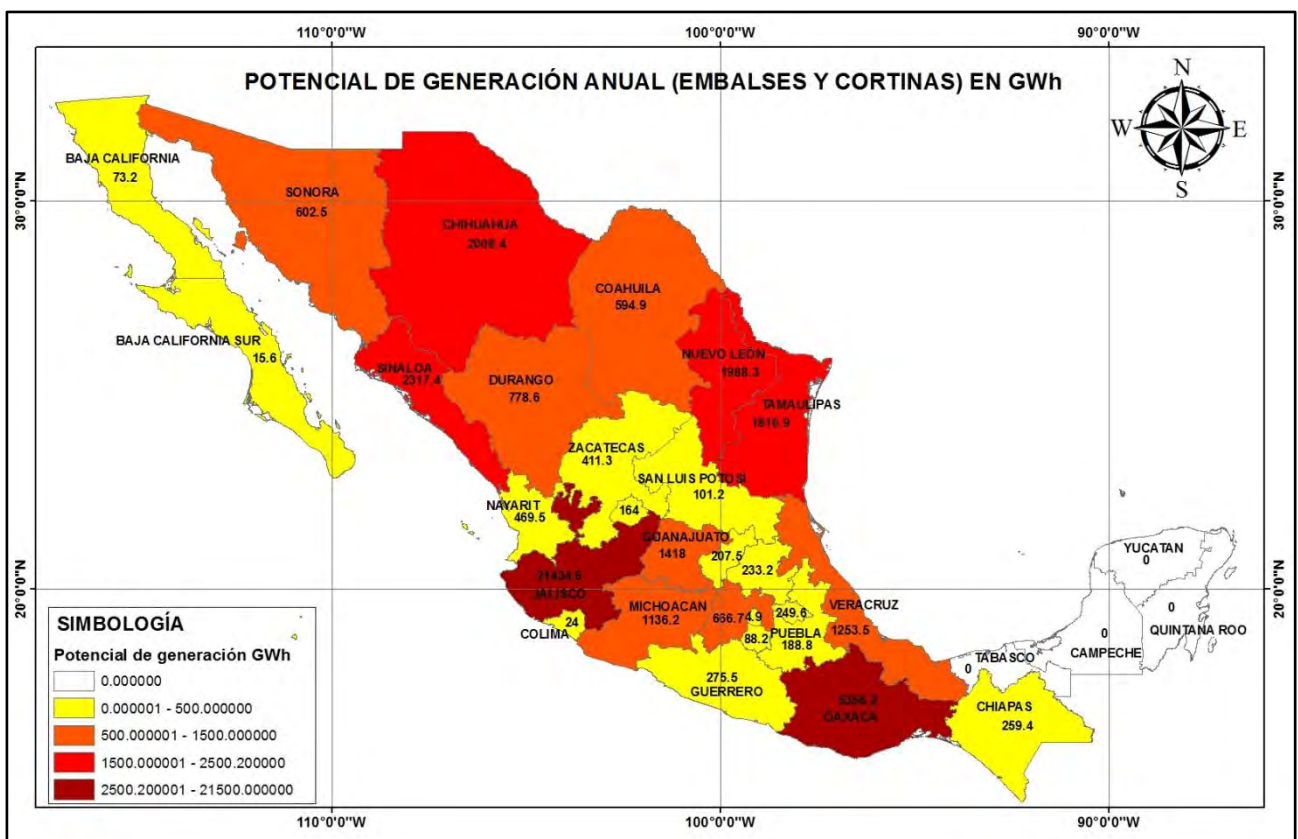


Figura 7.8.- Potencial de generación anual total (embalses y cortinas)

A continuación se presenta una tabla resumen con el total de potencial de generación anual estimado para cada estado.

Tabla 7.3.- Resultados de potencial total de generación para cada estado

Estado	Número de embalses	Número de cortinas	Área total disponible (ha)	Capacidad instalable total E(MW)	Potencial de Generación anual total (GWh/año)
Aguascalientes	8	101	96.41	74.87	164.02
Baja California	3	0	55.16	33.46	73.28
Baja California Sur	0	6	8.08	7.16	15.69
Chiapas	5	9	153.78	118.46	259.45
Chihuahua	10	120	1,410.43	917.04	2,008.42
Estado de México	13	59	410.55	304.43	666.77
Coahuila	3	49	410.98	271.64	594.96
Colima	0	28	12.64	10.96	24.03
Durango	12	132	505.33	355.45	778.61
Guanajuato	9	99	881.63	647.45	1,418.08
Guerrero	3	30	158.39	125.78	275.54
Hidalgo	9	62	131.34	106.46	233.24
Jalisco	30	117	13,749.01	9,787.43	21,434.67
Distrito Federal	0	6	2.46	2.27	4.98
Michoacán	20	87	695.45	518.74	1,136.20
Morelos	1	44	48.98	40.26	88.21
Nayarit	2	23	287.38	214.41	469.60
Nuevo León	6	58	1,349.09	907.86	1,988.37
Oaxaca	4	34	3,333.00	2,445.73	5,356.21
Puebla	1	18	110.14	86.22	188.88
Querétaro	3	59	112.80	94.74	207.60
San Luis Potosí	3	64	54.03	46.21	101.26
Sinaloa	9	38	1,552.06	1,058.07	2,317.44
Sonora	9	45	408.78	275.10	602.57
Tamaulipas	8	55	1,174.59	829.55	1,816.98
Tlaxcala	1	16	155.37	113.99	249.66
Veracruz	2	16	818.79	572.39	1,253.56
Zacatecas	8	97	246.68	187.76	411.33
Total	182	1472	28,333.34	20,153.88	44,139.58

7.4. Cortinas con mayor potencial fotovoltaico

Las cortinas de las presas con potencial de generación fotovoltaica mayor o igual a 10GWh en México se encuentran distribuidas como se muestra figura 7.9:



Figura 7.9.- Cortinas de presas con potencial de generación mayor o igual a 10 GWh

En la tabla 7.4 se listan las presas con potencial de generación fotovoltaico anual mayor a 10 GWh en cortina.

Tabla 7.4.-Cortinas de presas con potencial de generación mayor o igual a 10 GWh

No.	Nombre oficial	Estado	Capacidad Instalable (MW)	Potencial de Generación anual (GWh/Año)
1	Marte R. Gómez	Tamaulipas	42.96	94.15
2	Miguel Hidalgo Y Costilla	Sinaloa	36.69	80.42
3	Estudiante Ramiro Caballero Do	Tamaulipas	36.52	80.02
4	Cuchillo - Solidaridad	Nuevo León	29.02	63.59
5	Lic. Emilio Portes Gil	Tamaulipas	24.47	53.63
6	Miguel De La Madrid Hurtado	Oaxaca	17.79	38.98
7	Constitución De Apatzingán	Jalisco	16.88	36.99
8	Josefa Ortiz De Domínguez	Sinaloa	19.70	43.16
9	Tenango	Puebla	17.61	38.59
10	Aguamilpa Solidaridad	Nayarit	15.16	33.23
11	Gustavo Díaz Ordaz	Sinaloa	16.09	35.25

No.	Nombre oficial	Estado	Capacidad Instalable (MW)	Potencial de Generación anual (GWh/Año)
12	Paso De Piedra	Veracruz	14.46	31.69
13	Constitución de 1917	Querétaro	14.25	31.23
14	La Purísima	Guanajuato	13.58	29.77
15	Álvaro Obregón	Sonora	13.12	28.76
16	Endhó	Hidalgo	13.72	30.08
17	Tanque Colorado	Querétaro	12.85	28.16
18	Sanalona	Sinaloa	12.29	26.94
19	Javier Rojo Gómez	Hidalgo	10.90	23.88
20	Adolfo López Mateos	Sinaloa	13.62	29.84
21	Adolfo R. Cortines	Sonora	10.99	24.08
22	San Pedro Del Juajal	Nuevo León	11.37	24.91
23	Cajón de Peñitas	Jalisco	9.70	21.26
24	Los Ángeles	Michoacán	8.91	19.53
25	Eustaquio Buelna	Sinaloa	9.39	20.58
26	Copandaro	Michoacán	9.19	20.15
27	José S. Noriega	Nuevo León	8.97	19.65
28	Las Blancas	Tamaulipas	8.65	18.95
29	Infiernillo	Guerrero	7.81	17.11
30	Los Becos	Sinaloa	8.23	18.04
31	Higueras De Abuya	Sinaloa	8.22	18.02
32	José López Portillo	Sinaloa	7.95	17.43
33	Vicente Guerrero	Guerrero	7.31	16.03
34	José López Portillo	Nuevo León	7.39	16.19
35	Palote El	Guanajuato	7.80	17.09
36	Lázaro Cárdenas	Durango	7.31	16.02
37	Revolución Mexicana	Guerrero	7.09	15.53
38	El Bosque	Michoacán	7.16	15.70
39	San Miguel	Coahuila	7.46	16.36
40	Carlos Ramírez Ulloa	Guerrero	6.30	13.81
41	Chihuahua	Chihuahua	7.81	17.13
42	Aristeo Mercado	Michoacán	6.67	14.62
43	Basilio Vadillo	Jalisco	5.73	12.56
44	Valerio Trujano	Guerrero	6.41	14.06
45	General Guadalupe Victoria	Durango	6.80	14.90
46	José Ma. Morelos Y Pavón	Guerrero	6.19	13.58
47	Benito Juárez	Oaxaca	5.93	12.99
48	Cuauhtemoc	Sonora	6.02	13.20
49	Malpais	Michoacán	6.37	13.95
50	Manuel Ávila Camacho	Puebla	5.87	12.85
51	Tacotan	Jalisco	5.42	11.87
52	Luis Donald Colosio	Sinaloa	4.78	10.47
Total			627.47	1,375.10

A continuación se presentan las imágenes aéreas de algunas presas (embalse y cortina) que se mencionaron anteriormente.

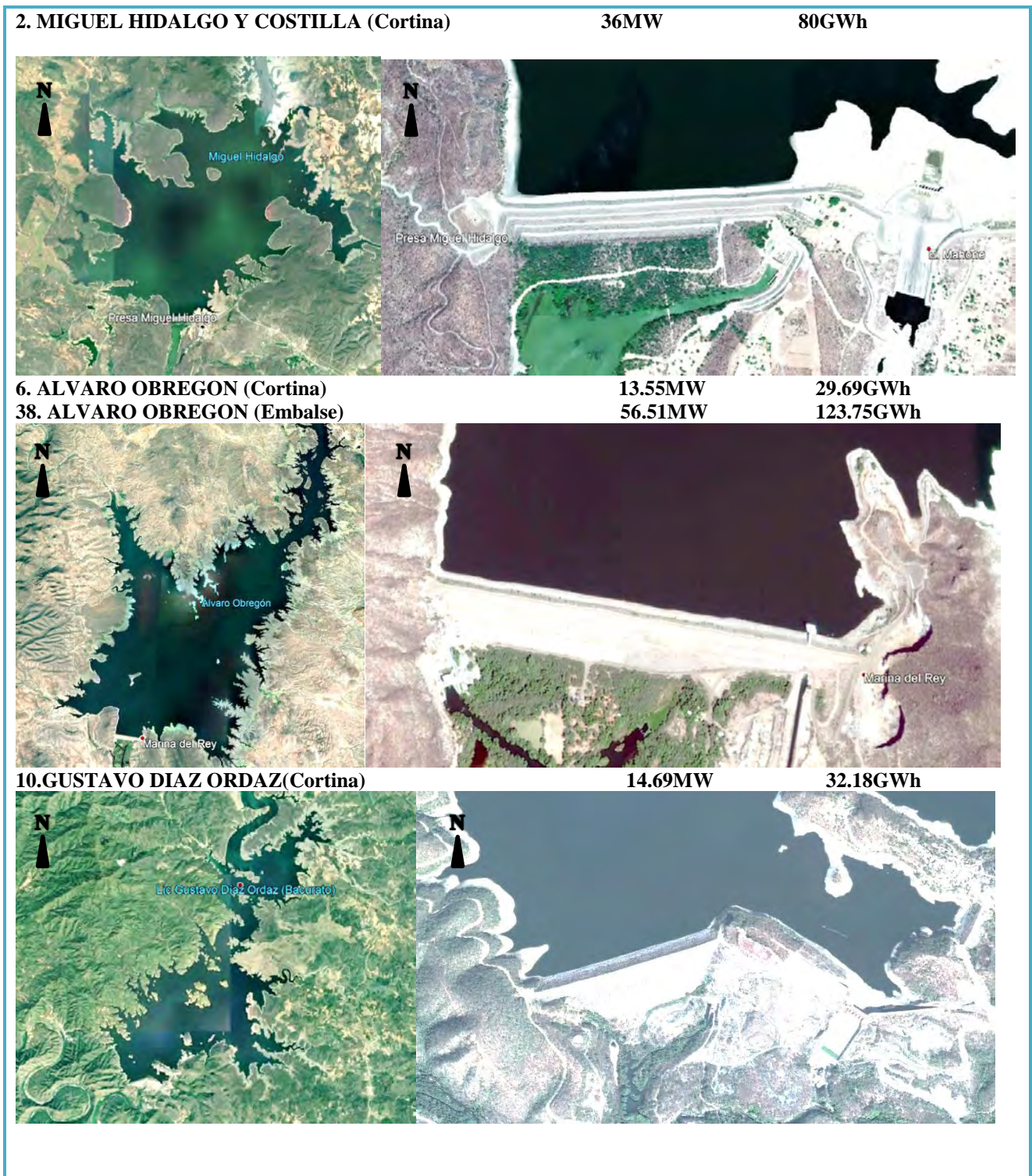


Figura 7.10.- Imágenes de satélite de algunas cortinas y embalses de presas.

7.5. Embalses con mayor potencial fotovoltaico

Los embalses de las presas con potencial de generación fotovoltaica mayor o igual a 100 GWh que se encuentran distribuidas como se muestra en la figura 7.11:

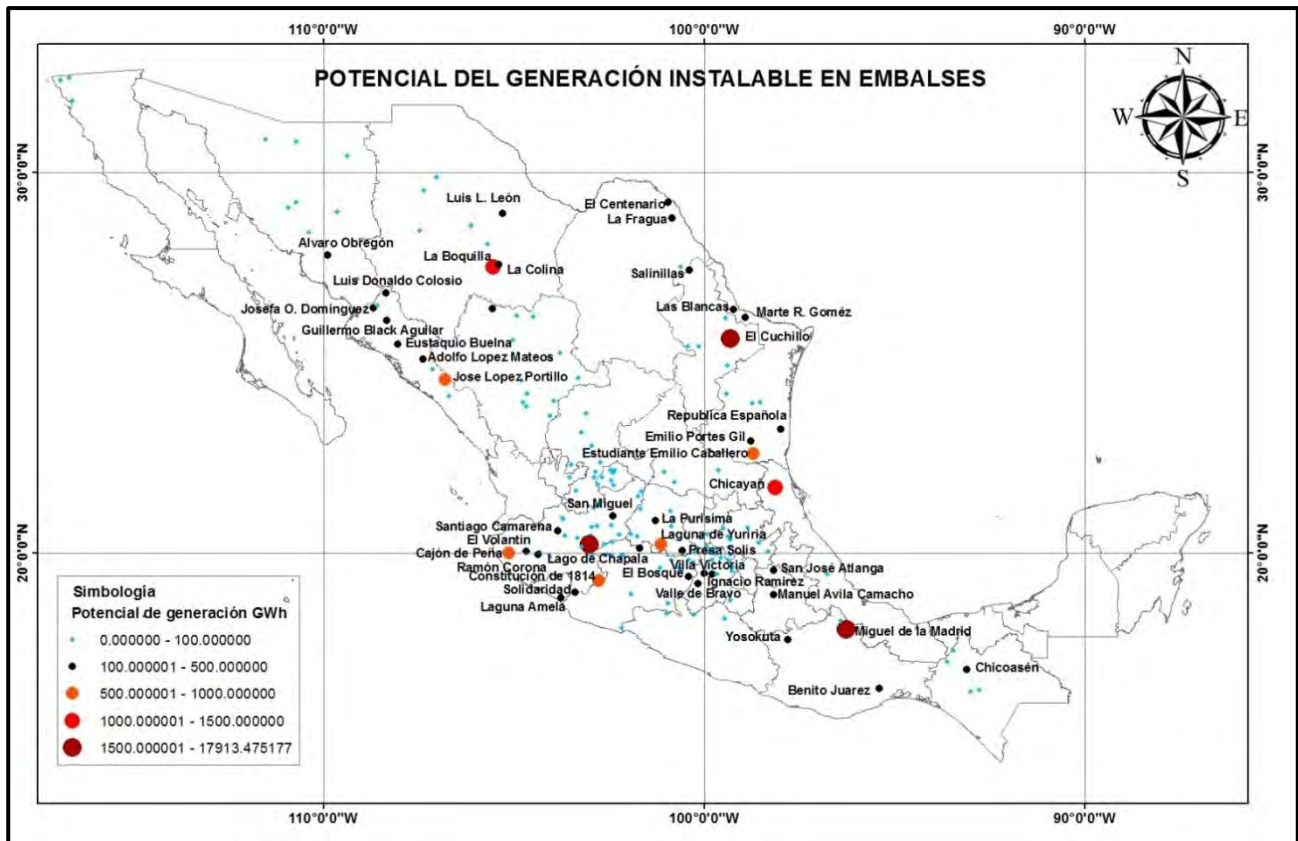


Figura 7.11.- Embalses de presas con potencial de generación mayor o igual a 100 GWh

En la tabla 7.5 se enumeran 45 embalses con potencial de generación fotovoltaico mayor a 100 GWh anual.

Tabla 7.5.- Embalses de presas con potencial de generación mayor o igual a 100 GWh

No.	Nombre Oficial		Capacidad Instalable (MW)	Potencial de Generación anual (GWh/Año)
1	Lago De Chapala	Jalisco	8179.67	17913.48
2	Miguel De La Madrid	Oaxaca	2211.19	4842.51
3	El Cuchillo	Nuevo León	689.09	1509.11
4	La Boquilla	Chihuahua	577.35	1264.40
5	Chicayan	Veracruz	549.26	1202.88
6	Cajón De Peña	Jalisco	336.88	737.77
7	Presa José López Portillo	Sinaloa	336.51	736.97
8	Laguna De Yuriria	Guanajuato	331.87	726.79
9	Estudiante Ramiro Caballero	Tamaulipas	310.16	679.25

No.	Nombre Oficial		Capacidad Instalable (MW)	Potencial de Generación anual (GWh/Año)
10	Constitución De Apatzingán	Jalisco	255.50	559.54
11	Constitución De 1814	Jalisco	255.40	559.32
12	Emilio Portes Gil	Tamaulipas	159.83	350.03
13	Luis Donald Colosio	Sinaloa	154.61	338.61
14	Laguna De Amela	Nayarit	149.84	328.15
15	El Bosque	Michoacán	143.30	313.83
16	Presa Benito Juárez	Oaxaca	123.59	270.65
17	Melchor Ocampo	Michoacán	118.06	258.55
18	La Fragua	Coahuila	116.75	255.68
19	Santiago Camarena	Jalisco	106.41	233.03
20	Presa Chicoasén	Chiapas	104.01	227.79
21	San José Atlanga	Tlaxcala	101.04	221.28
22	Solidaridad	Jalisco	94.30	206.53
23	La Colina	Chihuahua	91.73	200.88
24	Adolfo López Mateos	Sinaloa	86.80	190.09
25	Luis L. León	Chihuahua	84.51	185.07
26	Eustaquio Buelna	Sinaloa	82.78	181.29
27	San Gabriel	Durango	79.03	173.07
28	Presa Solís	Guanajuato	76.41	167.33
29	Guillermo Blake Aguilar	Sinaloa	73.16	160.22
30	Ramón Corona	Jalisco	70.89	155.25
31	Valle De Bravo	México	70.00	153.31
32	Yosocuta	Oaxaca	68.32	149.62
33	República Española	Tamaulipas	66.33	145.27
34	Villa Victoria	México	64.75	141.80
35	Presa La Purísima	Guanajuato	62.52	136.91
36	El Centenario	Coahuila	60.54	132.58
37	Laguna Salinillas	Nuevo León	58.44	127.98
38	Álvaro Obregón	Sonora	56.51	123.75
39	Marte R. Gómez	Tamaulipas	56.28	123.25
40	San Miguel	Jalisco	56.23	123.15
41	Presa Derivadora Las Blancas	Tamaulipas	53.68	117.55
42	Josefa Ortiz De Domínguez	Sinaloa	50.54	110.69
43	Manuel Ávila Camacho	Puebla	49.02	107.36
44	El Volantín	Jalisco	45.79	100.28
45	Ignacio Ramírez	México	45.70	100.08
	Total		16,914.57	37,042.97

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para finalizar, se plantea una comparación entre el potencial fotovoltaico estimado para los sistemas instalados en presas, tanto en cortinas como en embalses, y la demanda de consumo en dos sectores: agrícola y el de saneamiento. Esta comparación muestra la capacidad en contribución de la energía fotovoltaica a la demanda nacional:

8.1. Sector agrícola

El sector agrícola presentó una demanda promedio anual de 8,580.1 GWh en el periodo 2009 - 2017, por uso de energía eléctrica para bombeo, esto representa el 19% del potencial fotovoltaico estimado en total

Sin embargo se presenta una propuesta por estado de los embalses que podrían solventar las demandas en el sector agrícola a nivel local, con lo generado mediante una planta fotovoltaica flotante.

Tabla 8.1.- Embalses de presas propuestas para cubrir el consumo requerido

Estado	Consumo eléctrico (GWh)	Presas (Embalses)	Potencial estimado (GWh)	% de consumo cubierto
Chihuahua	2146.590	La Boquilla	1264	76%
		La Colina	200	
		Luis L. León	185	
Guanajuato	1239.755	Laguna de Yuriria	726	90%
		Presa Solís	167	
		Presa La Purísima	136	
		Ignacio Allende	93	
Sonora	893.778	Abelardo L. Rodríguez	64	52%
		Adolfo Ruiz Cortines	42	
		Álvaro Obregón	123	
		El Comaquito	31	
		Presa Cuauhtemoc	8	
		Ignacio L. Alatorre	2	
		Lázaro Cardenas	64	
		Plutarco Elías Calles	85	
		Rodolfo Felix Valdez	26	
Coahuila	595.435	Venustiano Carranza	92	80%
		La Fragua	255	
		El Centenario	132	
Jalisco	490.247	Constitución de Apatzingán	559	114%
Zacatecas	460.144	El Cazadero	31	44%
		Presa El Chique	49	
		Julián Adame	9	

Estado	Consumo eléctrico (GWh)	Presas (Embalses)	Potencial estimado (GWh)	% de consumo cubierto
		Leobardo Reynoso	16	
		Palomas	7	
		Presidente Alemán	89	
		Ramón López Velarde	4	
		Presa Santa Teresa	1	
		Benjamín Ortega	45	110%
		Francisco Zarco	97	
		Guadalupe Victoria	57	
		San Gabriel	173	
		Santiago Bayacora	63	
		Villa Hidalgo	46	
		Los Naranjos	23	
Durango	455.018			
		Melchor Ocampo	258	108%
		Presa Pucuató	41	
		La Villita	29	
		Abelardo Rodríguez	22	30%
		Presa Calles	3	
		Cincuenta Aniversario	6	
		Presa El Niágara	18	
		La Codorniz	3	
		Jocoque	23	
Aguascalientes	240.475			
Puebla	240.201	Manuel Ávila Camacho	107	44%
San Luis Potosí	231.524			
		Emilio López Zamora	5	31%
		Presa Rodríguez	1	
		El Carrizo	65	
Baja California	226.802			
Querétaro	189.232	Constitución 1917	45	26%
Sinaloa	167.482	Adolfo López Mateos	190	113%
Baja California Sur	134.670			
Nuevo León	90.560	Laguna Salinillas	127	141%
Veracruz	71.318	Chicayan 1202		168%
Tamaulipas	60.883	Marte R. Gómez	123	200%
Colima	55.630			
Yucatán	55.314			
		Laguna De Meztitlan	15	50%
		Laguna De San Bartolo	11	
Hidalgo	51.063			
Chiapas	48.087	Presa Chicoasén	227	470%
Morelos	34.604	Laguna El Rodeo	31	91%
México	32.718	Jose Antonio Alzate	39	120%
Oaxaca	27.167	Yosocuta	149	551%
Campeche	20.428			
Tlaxcala	16.641	San Jose Atlanga	221	1380%
Nayarit	9.968	Laguna Alcuzahue	81	818%
Guerrero	5.427	Presa Valerio Trujano	19	380%
Tabasco	4.152			
Quintana Roo	3.426			
Ciudad de México	0.383			

8.2. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

Como se mencionó en el Capítulo III, el proceso de lodos activados convencional, con estabilización aerobia de los lodos residuales, consume 0.58 kWh/m³ de agua residual tratada municipal.

Considerando que en 2016 el registro de plantas en operación aumento a 2,536 instalaciones, con una capacidad instalada de 180.5 m³/s y un caudal tratado de 123.5 m³/s, se puede estimar que la demanda de energía eléctrica para el funcionamiento de estas PTAR´s es de 2,258.92 GWh al año.

Esta demanda podría cubrirse al 100% con plantas fotovoltaicas flotantes en dos embalses, el Cuchillo y la Boquilla, utilizando el sistema de porteo donde se puede realizar la inyección de energía en un sitio y aprovecharla en otro.

A continuación se muestran algunas opciones de cortinas y embalses que podrían cubrir la demanda de las PTAR´s analizadas por **el IMTA en 2017**

Tabla 8.2.- Embalses y cortinas de presas propuestas para cubrir el consumo requerido

PTAR	Edo.	Consumo energía kWh año (2015)	Presas propuestas para cubrir la demanda
Aguascalientes	AGS	8,233,672	Abelardo Rodríguez. Potencial de generación en embalse de 64.45GWh anual. Localizado a menos de 20 km de las Ciudad de Aguascalientes.
Los Arellano	AGS	3,147,550	
Presa El Cedazo	AGS	629,480	
Jesús María	AGS	1,238,635	
Pabellón de Arteaga	AGS	1,293,008	
Rincón de Romos	AGS	1,260,077	
Ing. J.A. Herrera Solís (Potab + PTAR)	BC	7,389,900	Abelardo L. Rodríguez. Potencial de generación en cortina de 9.31 GWh anual. Localizada a 8 km de la Ciudad de Tijuana.
La Morita	BC	4,044,950	Existen 9 cortinas de presas en Coahuila que podrían abastecer a esta PTAR
Cd. Acuña	COAH	1,727,115	
Lerdo	DGO	1,992,270	Presa Garabitos Potencial de generación en cortina de 2GWh anual. Localizada aprox. a 8 km de la

			Ciudad de Durango
Lagos de Moreno	JAL	1,923,280	La Cantera Potencial de generación en cortina de 2.56 GWh anual. Localizada aprox. a 10 km de Lagos de Moreno
Lago de Texcoco I	MEX	490,030	Presa Danxho Potencial de generación en embalse de 21 GWh anual. Utilizando Porteo para abastecer a las 4 PTAR ´s
Lechería	MEX	2,254,000	
Toluca Norte	MEX	6,350,148	
Toluca Oriente	MEX	6,204,168	Tepuxtepec Potencial de generación en cortina de 7.5 GWh anual. Utilizando porteo para abastecer las 2 PTAR ´s
Atapaneco	MICH	5,948,946	
Los Itzícuaros	MICH	1,904,753	
Noreste	NL	7,708,762	Presa El Águila Potencial de generación en embalse de 54 GWh anual. Utilizando Porteo para abastecer a las 6 PTAR ´s
Santa Rosa	NL	1,562,512	
Cadereyta	NL	1,672,935	
La Petaca	NL	2,039,772	
AIMSU (Agua Ind. de Mty, S. de U.)	NL	5,142,518	
Santiago	NL	1,358,437	
San Pedro Ahuacatlán II	QRO	2,261,199	Constitución 1917 Potencial de generación en embalse de 45GWh anual. Localizada aprox. a 10 km de la PTAR.
Norte	Q-ROO	3,861,417	Se podría utilizar el porteo para ingresar la energía en un sitio donde si cuente con infraestructura hidráulica y aprovecharla en las PTAR ´s
Caribe 2000	Q-ROO	2,363,819	
Playa del Carmen II (SaasTunJa)	Q-ROO	2,309,650	
Río Mayo	SON	2,349,074	Adolfo R. Cortines Potencial de generación en cortina de 29 GWh anual. Utilizando el porteo para abastecer a las dos PTAR ´s.
Los Alisos	SON	1,086,629	
Tierra Negra	TAMPS	5,791,149	Estudiante Ramiro Caballero Do Potencial de generación en cortina de 80 GWh anual.
Norponiente Laredo	TAMPS	946,260	
Internacional (Sur-Ote)	TAMPS	8,911,527	
Osiris	ZAC	3,092,250	Palomas 7 Potencial de generación en embalse de 7 GWh anual.
Total		109,581,124	

8.3. Plantas de Potabilización

Como se mencionó en el Capítulo III, de acuerdo con el estudio del centro Mario Molina ICE del ciclo integral del agua, el consumo en plantas equivale a 1.32 kWh por cada metro cúbico. Para un caudal potabilizado de 101.4 m³/s, se requiere 4,221.03 GWh por año.

Únicamente el embalse de la presa Miguel de la Madrid tiene suficiente área para alojar una planta fotovoltaica flotante que generaría 4,842.51 GWh por año, lo que abastecería la demanda de energía eléctrica para la potabilización del agua de la totalidad de plantas potabilizadoras reportadas.

8.4. Sistema Cutzamala

El sistema Cutzamala es un caso particular, tiene un consumo de 2,200 GWh al año, que equivale al 5% del total del potencial de generación estimado, de igual forma al utilizar las presas y embalses que lo conforman se podría cubrir aproximadamente el 28 % del total de consumo.

A continuación se presentan las cortinas y los embalses del sistema Cutzamala propuestos para la instalación de sistemas de paneles:

Tabla 8.3.- Cortinas y embalses propuestos para satisfacer el 28% de la demanda del sistema Cutzamala.

EMBALSE			
Clave	Presa	Capacidad Instalable (MW)	Potencial de Generación de electricidad anual (GWh/año)
403BOS	EL BOSQUE	143.30	313.83
401VBR	VALLE DE BRAVO	70.00	153.31
402VIV	VILLA VICTORIA	64.75	141.80
SUBTOTAL		278.05	608.94
CORTINA			
479	EL BOSQUE	7.16	15.70
1602	TUXPAN	1.94	4.25
1612	VALLE DE BRAVO	1.30	2.85
1644	VILLA VICTORIA	0.63	1.37
344	COLORINES	0.60	1.32
SUBTOTAL		11.63	25.48
TOTAL		289.68	634.42

IX. CONCLUSIONES

Las cortinas de las presas de México tienen un alto potencial fotovoltaico que no ha sido aprovechado y podría satisfacer la demanda de energía eléctrica para bombeo en el sector agrícola, adicionalmente el potencial de generación en los embalses podría satisfacer la demanda de energía de las plantas de tratamiento de aguas residuales a nivel nacional.

Al comparar las necesidades energéticas identificadas como posible destino de la energía resultante de los sistemas fotovoltaicos propuestos, podemos decir que el potencial de generación nacional fotovoltaico en cortinas (3793.3 GWh/año) puede cubrir el 44 % de la demanda para bombeo en el sector agrícola, igual a 8,580.1 GWh/año.

Por otro lado, el potencial de generación de electricidad anual nacional por embalse, 40,346.28GWh, cubriría aproximadamente el 19.6% de la energía proveniente de recursos renovables proyectada para el 2031 en el programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional.

El potencial de generación total nacional es de 44,139.58GWh, una oferta considerable ya que representa el 9.5% del consumo de energía total en México (SENER, 2017). Sin embargo, la distribución por entidad federativa de la demanda no es siempre equiparable a la oferta, por lo que cabe mencionar que existe la posibilidad de contratar el servicio de porteo. En México, este servicio es usado por la iniciativa privada en sistemas de generación eólica y consiste en entregar la energía generada en un punto y poder consumir la misma cantidad en otro, con un costo asequible por el uso de la red de transmisión.

De acuerdo a la experiencia en los proyectos similares realizados en países como Japón, China, Inglaterra y España, las cortinas y los embalses de las presas no necesitan ser modificados ni sufren daños como consecuencia de la instalación de sistemas fotovoltaicos, por lo que resulta viable hacer uso de estas instalaciones para este fin.

X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Anh T. N.D.** (2017). *The global evolution of floating solar PV*. Sitio web: https://www.researchgate.net/publication/321461989_The_global_evolution_of_floating_solar_PV
- **Aseem K., S. y Kothari D.,P.** (2016). *Floating Solar PV Potential in Large Reservoirs in India*. International Journal for Innovative Research in Science & Technology. Volume 2
- **Biomass Users Network (BUN-CA).** *Manuales sobre energía renovable: Solar Fotovoltaica/* Biomass Users Network (BUN-CA), -1 ed. - San José, C.R.: 2002.
- **Bourguett O. V. J.** (2018). *Las presas en México y su comportamiento ante los sismos de septiembre de 2017*. Tlaloc, 4. México.
- **Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (2017).** *Energía Solar: Tecnologías y Aplicaciones. Módulo 3.Energía solar fotovoltaica*. Pp. 82. España.
- **Comisión Nacional del Agua** (2016). *Diagnóstico del Programa Presupuestal S218 Tratamiento de Aguas Residuales*. Pp. 24. México.
- **Comisión Nacional del Agua** (2016). *Diagnóstico para el manejo integral de las subcuencas pertenecientes al Sistema Cutzamala*. Pp. 70. México.
- **Comisión Nacional del Agua** (2016). *Estadísticas del Agua 2016*. Pp. 24. México.
- **Comisión Nacional del Agua** (2016). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. Diciembre 2016. México.
- **Comisión Nacional del Agua** (2018). *Inventario de Seguridad de Presas*. México. revisado en el sitio web: <http://201.116.60.136/inventario/hinicio.aspx>.
- **Instituto Mexicano de Tecnología del Agua** (2017). *Revisión y actualización del potencial de biomasa para generación de energía eléctrica a partir de plantas de tratamiento de aguas residuales presentado en el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE)*. México.
- **Instituto Nacional de Estadística y Geografía** (2018). *Banco de Información económica*. México.
- **Ioannis K., Bódis K., Jäger-W. A., Monforti F. y Szabó S.** (2015). *Exploiting existing dams for solar PV system installations*. European Commission Joint Research Centre. Italy.
- **Jinyoung S. y Yosoon C.** (2016). *Analysis of the Potential for Use of Floating Photovoltaic Systems on Mine Pit Lakes: Case Study at the Ssangyong Open-Pit Limestone Mine in Korea*. Pukyong National University.

- **Martín A.A.M. & Domínguez B. J.** (2015). Desarrollo de un modelo geográfico para la evaluación del potencial fotovoltaico en entornos urbanos. *Congreso AGE: Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*. Universidad de Zaragoza pp.709-718.España.
- **National Renewable Energy Laboratory** (2016). Geospatial Data Science. National solar radiation Database Data Viewer en el sitio web: <https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer/?aL=8VWYIh%255Bv%255D%3Dt&bL=groad&cE=0&lR=0&mC=40.21244%2C-91.625976&zL=4>
- **Organización de las Naciones Unidas, (ONU).** *Objetivos de desarrollo del milenio. Informe de 2015.* (2015).
- **Roca S. A.** (2017). Periódico de la energía en sitio web <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-de-fotovoltaica-flotante-del-mundo/>
- **Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación** (2018). 5^{TO} Informe de labores 2016 -2017. México.
- **Secretaria de Economía** (2017). La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México.
- **Secretaria de energía** (2016). Prospectiva de energías renovables 2016-2030. México.
- **Secretaria de energía** (2017). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional. 2018-2032. México.
- **Secretaria de energía** (2017). Prospectiva del sector Eléctrico 2017-2031. México.
- **Secretaría de Energía** (2017). Reporte de avance de Energías limpias 2016. México.
- **Secretaria de energía** (2018). Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias. Metodología Solar. México.
- **Trapani K.** (2014). *Flexible Floating Thin Film Photovoltaic (Pv) Array Concept For Marine And Lacustrine Environments*. Laurentian University. Pp.17. Ontario, Canada.