



**BUAP**

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**Facultad de Ingeniería**

**Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado**

**“MODELADO Y ANÁLISIS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS  
INTERCONECTADAS A LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN”**

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
CON OPCIÓN TERMINAL EN  
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

**JUAN CARLOS LÓPEZ ÁLVAREZ**

Asesor de tesis:

**M.C. CARLOS MORAN RAMIREZ**

Co- Asesor de tesis:

**DR. JUAN CARLOS ESCAMILLA SÁNCHEZ**

Puebla, Pue.

Agosto 2021



## Agradecimientos

Agradezco a mis padres por tanto apoyo y motivación a lo largo de mi vida.

A mi asesor el Mtro. Carlos Moran Ramírez por el apoyo durante la elaboración de la presente tesis, así como la enseñanza brindada durante mi formación académica.

A mi asesor el Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez por su ayuda en la revisión de la presente tesis y la enseñanza brindada en las materias que curse con él.

Al Dr. Alejandro Bautista Hernández y M.I. Genaro Campos Castillo por la oportunidad y apoyo que me brindaron durante mi estancia en la maestría.

A mis catedráticos y compañeros de la maestría por compartir sus conocimientos y experiencias.

A Jessica Olvera por todo el apoyo que me brindo a lo largo de mi estancia en la maestría.



## Dedicatoria

La presente tesis está dedicada a Dios por darle sentido a mi vida.

A mi madre Guadalupe y mi padre Pedro quienes me acompañaron en todo momento, y sin ellos no lo habría logrado.

A mis hermanos José, Ale y Miguel que son un gran ejemplo en mi vida

A Jessy por confiar siempre en mí.



## Resumen

En el siguiente proyecto de tesis se desarrolla el análisis de una planta fotovoltaica, de la cual se considera que tiene un buen aprovechamiento de la energía solar lo que garantiza el óptimo funcionamiento del sistema fotovoltaico en materia de captación de la energía, por lo que se realizara un análisis sobre la intermitencia respecto a la generación eléctrica en condiciones máximas y mínimas al interconectarla a la red eléctrica.

El comportamiento de la energía fotovoltaica presenta problemas de fluctuaciones de voltaje y frecuencia provocado por la intermitencia debido a las características de la energía renovable.

El análisis de su eficiencia se obtendrá a partir del modelado realizado en el software de simulación ETAP; el cual permite construir diagramas que simulen la generación de la energía fotovoltaica para predecir su comportamiento al ser interconectado a la red eléctrica. Para lograrlo se ha modelado y se realizaron simulaciones de flujos de potencia que permiten determinar la variación de la energía.

Finalmente se analizaron los resultados obtenidos según lo estipulado en las normas nacionales.



## Abstract

The following thesis project develops the analysis of a photovoltaic plant, which is considered to have a good use of solar energy which guarantees the optimal operation of the photovoltaic system in terms of energy generation, so an analysis of the intermittency with respect to electricity generation in maximum and minimum conditions when interconnected to the power grid will be performed.

The behavior of photovoltaic energy presents problems of voltage and frequency fluctuations caused by intermittency due to the characteristics of renewable energy.

The analysis of its efficiency will be obtained from the modeling done in the simulation software ETAP; which allows the construction of diagrams that simulate the generation of photovoltaic energy to predict its behavior when interconnected to the electrical grid. To achieve this, power flow simulations have been modeled and carried out to determine the variation of energy.

Finally, the results obtained were analyzed according to national standards.



## Índice

Agradecimientos .....	i
Dedicatoria.....	ii
Resumen .....	iii
Abstract.....	iv
Índice de figuras.....	viii
Índice de tablas.....	x
Ecuaciones .....	xi
Glosario de términos.....	xii
CAPÍTULO I .....	1
1.1    Introducción .....	1
1.2    Planteamiento del Problema de investigación.....	3
1.3    Justificación .....	4
1.4    Objetivo general.....	5
1.5    Hipótesis .....	6
1.6    Estado del Arte.....	6
1.6.1    Herramientas de diseño y análisis .....	8
CAPÍTULO II Marco Teórico.....	12
Sistemas Fotovoltaicos.....	12
2.1    Efecto fotovoltaico.....	12
2.2    Panel Solar Fotovoltaico .....	17
2.2.1    Principio de funcionamiento.....	20
2.2.2    Parámetros de funcionamiento .....	21
2.3    Módulos .....	23
2.3.1    Curva IV.....	24
2.3.1    Interconexión de módulos .....	30
2.4    Seguidores.....	31
2.5    Caja de conexiones .....	31
2.6    Inversor .....	32
2.7    Subestación seccionadora.....	36
2.8    Subestación eléctrica media tensión .....	38
2.8.1    Transformador .....	40
2.9    Bus infinito .....	40



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**“MODELADO Y ANÁLISIS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS A LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN”**

---

2.10 Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica .....	41
2.10.1 Protecciones.....	44
2.10.2 Sistema de control .....	45
2.10.3 Conexión de una Planta Fotovoltaica en la red .....	47
CAPÍTULO III Modelado de la planta fotovoltaica.....	55
3.1 ETAP .....	55
3.2.1 Modulo fotovoltaico .....	56
3.2.2 Modelado del módulo fotovoltaico .....	57
3.3.1. Modulo del inversor.....	59
3.3.2 Modelado de inversor .....	60
3.4.1 Modulo del transformador .....	62
3.4.2 Modelado del transformador .....	63
3.5.1 Modulo del bus .....	65
3.5.2 Modelado del módulo.....	65
CAPÍTULO IV Procedimiento para la Interconexión de la planta fotovoltaica.....	67
4.1 Impacto de la interconexión de fuentes renovables en la red .....	68
4.1.1 Flujos de potencia .....	69
4. 1.2 Requerimiento de Tensión.....	71
4.1.3 Variación de Frecuencia.....	71
4.1.4 Calidad de energía.....	72
4.2 Operación de la Fuente de Energía ante fallas externas o en el Punto de Interconexión.....	76
4.3 Equipo de protección y medición .....	77
CAPÍTULO V Simulador de la planta fotovoltaica.....	79
5.1 Introducción.....	79
5.2 Datos geográficos.....	79
5.3 Parámetros de funcionamiento .....	82
5.4 Análisis de flujo de potencia .....	84
5.5 Estudio de flujo de cargas .....	85
5.5.1. Flujo de carga en funcionamiento normal sin conectar la Planta Fotovoltaica.....	86
5.5.2 Flujo de carga con sistema fotovoltaico en condiciones normales .....	88
5.5.3 Flujo de carga a una irradiación de 810 W/m <sup>2</sup> .....	89
5.5.4 Flujo de carga a una irradiación de 810 W/m <sup>2</sup> .....	91
5.5.5 Comportamiento del sistema ante la falla de la S.E. Zapata .....	92
5.6 Conclusión.....	94
CAPÍTULO VI Conclusiones.....	95



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**“MODELADO Y ANÁLISIS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS A LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN”**

---

Bibliografía ..... 96





## Índice de figuras

Figura 1.1 CAMBIO OBSERVADO EN LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE 1901 - 2012 [41].2	
Figura 1.2 EMISION DE CO2 RELACIONADO CON LA ENERGIA DE 2020 - 2050 [5] .....	3
Figura 1.3 EVOLUCION DE LA CAPACIDAD Y GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD FOTOVOLTAICA [44] .....	6
Figura 1.4 EVOLUCIONES DE LA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EN MÉXICO 2016 - 2030 [43].....	7
Figura 1.5 PLANTA FOTOVOLTAICA DON JOSÉ [8] .....	7
Figura 1.6 PLANTA FOTOVOLTAICA LOS SANTOS SOLAR 1 [10].....	8
Figura 1.7 PLANTA FOTOVOLTAICA AURA SOLAR 1 [12] .....	8
Figura 2.1 ANUNCIO SISTEMA FOTOVOLTAICO [28] .....	14
Figura 2.2 ESPECTRO DE RADIACION SOLAR [26].....	15
Figura 2.3 TIPOS DE IRRADIANCIA .....	16
Figura 2.4 TIPOS DE IRRADIANCIA [30].....	17
Figura 2.5 ESTRUCTURA DE BANDAS PARA DOS SEMICONDUCTORES CRISTALINOS, (A) Si Y (B)GaAs [26] .....	19
Figura 2.6 INCIDENCIA DE LUZ SOLAR SOBRE LA CELDA FOTOVOLTAICA.....	21
Figura 2.7 CIRCUITO DE MODULO FOTOVOLTAICO.....	24
Figura 2.8 GRAFICA DE LA CURVA IV [31] .....	25
Figura 2.9 CURVA IV .....	29
Figura 2.10 CURVA PV .....	29
Figura 2.11 EJEMPLO DE LAS ESTACIONES DE PODER BT O CENTRO DE INVERSIÓN-TRANSFORMACIÓN [53].....	32
Figura 2.12 ESQUEMA DEL INVERSOR DE DOS NIVELES .....	34
Figura 2.13 MODULACION SPWM [31] .....	35
Figura 2.14 CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	42
Figura 2.15 ESQUEMA DE UN SFVCR .....	43
Figura 2.16 CONTROLADOR DE UN INVERSOR [36] .....	46
Figura 2.17 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL METODO MATEMÁTICO DE SFVCR PARA EVALUACION DE LA CAPACIDAD DE GENERACION .....	47
Figura 2.18 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CON INVERSOR CENTRAL.....	48
Figura 2.19 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CON INVERSOR POR CADA ARREGLO .....	49
Figura 2.20 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CON INVERSOR POR CADA UNO [37].....	50
Figura 3.1 MODELADO DE FOTOVOLTAICO DE ETAP.....	57
Figura 3.2 CURVA VI DEL MODULO FOTOVOLTAICO.....	58



Figura 3.3 CURVA PV DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO .....	58
Figura 3.4 CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO EN ETAP .....	59
Figura 3.5 MODELADO DEL INVERSOR DE ETAP .....	60
Figura 3.6 CARACTERÍSTICAS DEL INVERSOR EN ETAP .....	61
Figura 3.7 MODELADO DE TRANSFORMADOR DE 3 DEVANADOS .....	63
Figura 3.8 MODELADO DE TRANSFORMADOR DE 2 DEVANADOS .....	63
Figura 3.9 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR DE 3 DEVANADOS .....	64
Figura 3.10 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR DE 2 DEVANADOS .....	64
Figura 3.11 MODELADO DE BUS .....	65
Figura 3.12 BUS 34.5kV .....	66
Figura 3.13 BUS 11.5kV .....	66
Figura 4.1 PROCESO DE REGISTRO DE PROYECTOS DE ENERGIA EN MEXICO [39] .....	68
Figura 4.2 GRAFICA DE CAÍDA DE TENSIÓN .....	77
Figura 5.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA P.F.V. SOALR XOXOCOTLA [7] .....	80
Figura 5.2 UBICACIÓN DE LA P.F.V. SOLAR XOXOCOTLA .....	81
Figura 5.3 IRRADIACIÓN PROMEDIO MENSUAL DE LA P.F.V. SOLAR XOXOCOTLA [21] .....	82
Figura 5.4 IRADIACIÓN DIARIA MES JULIO DE LA P.F.V. SOLAR XOXOCORLA [21].....	83
Figura 5.5 EJEMPLO DE UNA INSTALACION FOTOVOLTAICA CON EL SISTEMA DE SEGUIDORES SOLAR A 1 EJE HORIZONTAL.....	83
Figura 5.6 TOPOLOGÍA DE LA RED DE EN 115 KV, ZONA CUAUTLA - MORELOS .....	85
Figura 5.7 PUNTO DE INTERCONEXIÓN DE 115 KV .....	86
Figura 5.8 FLUJO DE CARGA DE LA ZONA CUAUTLA-MORELOS SIN P.F.V. SOLAR XOXOCOTLA.....	87
Figura 5.9 FLUJO DE CARGA CON P.F.V. SOLAR XOXOCOTLA A 1000 W/m <sup>2</sup> .....	88
Figura 5.10 FLUJO DE CARGA CON P.F.V. SOLAR XOXOCOTLA A 810 W/m <sup>2</sup> .....	90
Figura 5.11 FLUJO DE CARGA CON P.F.V. SOLAR XOXOCOTLA A 834 W/m <sup>2</sup> .....	91
Figura 5.12 FLUJO DE CARGA CON FALLA EN ZAP 230 CON P.F.V. ....	93



## Índice de tablas

Tabla 2.1 NIVELES DE AISLAMIENTO EN BOQUILLA Especificación CFE DCDLAD01 .....	38
Tabla 2.2 DISEÑO DE LÍNEAS AÉREAS DE 69 KV A 138 KV, ESPECIFICACIÓN CFE DCDLAD01 .....	38
Tabla 3.1 DATOS DE FABRICA DE PANEL FOTOVOLTAICO.....	57
Tabla 3.2 DATOS DE FABRICA DE INVERSOR .....	60
Tabla 3.3 DATOS DE FABRICA DE TRANSFORMADOR CON DOBLE DEVANADO .....	62
Tabla 3.4 DATOS DE FABRICA DE TRANSFORMADOR CON TRES DEVANADOS.....	62
Tabla 4.1 RANGOS DE VARIACION DE FRECUENCIA CON AJUSTE [39].....	72
Tabla 4.2 VALORES ARMONICOS IMPARES PARA ALTA TENSIÓN.....	74
Tabla 4.3 LIMITES DE EMISION PERMISIBLE .....	75
Tabla 4.4 TIPOS DE FALLA Y TIEMPOS DE DURACION DE FALLA.....	76
Tabla 5.1 SUPERFICIE DE LOS TERRENOS DE LA P.F.V. SOLAR XOXOCOTLA.....	81
Tabla 5.2 IRRADIACIÓN DE LA P.F.V SOLAR XOXOCOTLA EN AÑO 2020 [21].....	82
Tabla 5.3 REPORTE DE DATOS DE BARRAS ANALIZAR DE LA ZONA CUAUTLA-MORELOS EN AÑO 2020 ...	87
Tabla 5.4 DATOS DE BUSES CON IRRADIANCIA DE 1000 W/m <sup>2</sup> .....	89
Tabla 5.5 DATOS DE BUSES CON IRRADIANCIA DE 810 W/m <sup>2</sup> .....	90
Tabla 5.6 DATOS DE BUSES CON IRRADIANCIA DE 834 W/m <sup>2</sup> .....	92
Tabla 5.6 DATOS DE BUSES POR FALLA EN S.E. ZAPATA.....	93



## Ecuaciones

(2.1) Ley de Kirchhoff de corriente .....	18
(2.2) Circuito equivalente no ideal.....	18
(2.3) Cálculo de tensión .....	24
(2.4) Cálculo de corriente.....	24
(2.5) Tensión de punto máxima .....	26
(2.6) Corriente de punto máxima .....	26
(2.7) Potencia de punto máxima.....	26
(2.8) Temperatura de celda .....	27
(2.9) Factor de forma .....	27
(2.10) Eficiencia máxima de potencia eléctricacelda.....	27
(2.11) Coeficiente de variación de tensión .....	30
(2.12) Coeficiente de variación de corriente .....	30
(2.13) Tensión de salida a, b y c de los dispositivos.....	36
(2.14) Tensión de red eléctrica .....	36
(2.15) Aplicando Ley de Kirchhoff en cada fase.....	36
(2.16) Frecuencia mínima, red y máxima.....	39
(2.17) Corriente del generador fotovoltaico.....	43
(4.1) Factor de distorsión.....	74



## Glosario de términos

<b>AC</b>	Corriente Alterna
<b>AT</b>	Alta Tensión
<b>AZEL</b>	Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias
<b>BT</b>	Baja Tensión
<b>C</b>	Capacitor
<b>CENACE</b>	Centro Nacional de Control de Energía
<b>CFE</b>	Comisión Federal de Electricidad
<b>CRE</b>	Comisión Reguladora de Energía
<b>DC</b>	Corriente Directa
<b>FP</b>	Factor de Potencia
<b>FV</b>	Fotovoltaica
<b>IGCT</b>	Tiristor de Conmutación de Puerta de Aislamiento
<b>INEL</b>	Inventario Nacional de Energías Limpias
<b>L</b>	Inductor
<b>LAERFTE</b>	Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética
<b>LVRT</b>	Low Voltage Ride Through
<b>MT</b>	Media Tensión
<b>NBAI</b>	Nivel Básico de Aislamiento por Impulso Tipo Rayo
<b>NBAM</b>	Nivel Básico de Aislamiento por Impulso Tipo Maniobra
<b>NOCT</b>	Temperatura de Operación Normal de la Celda
<b>PV</b>	Potencia activa-tensión
<b>PWM</b>	Pulse Weight Modulated
<b>SEN</b>	Sistema Eléctrico Nacional
<b>SEP</b>	Sistema Eléctrico de Potencia
<b>SFVCR</b>	Sistema Fotovoltaico Conectados a la Red
<b>SIN</b>	Sistema Interconectado Nacional
<b>SIG</b>	Sistema de Información Geográfica
<b>STC</b>	Condición de Prueba Estándar
<b>THD</b>	Distorsión Armónica Total
<b>RAN</b>	Registro Nacional Agrario
<b>R</b>	Resistencia
<b>VSC</b>	Convertidor de Fuente de Voltaje
<b>Z</b>	Impedancia



## CAPÍTULO I

### 1.1 Introducción

El crecimiento del suministro eléctrico y expansión de las energías renovables en México apuntan al incremento de las energías solares por su envidiable zona de radiación a nivel mundial. La capacidad por energías renovables representa más de una cuarta parte de la generación total de energía a nivel mundial de 2009 a 2019, según la ONU medioambiente. Ciertos factores que han impulsado la industria de energía renovables, en concreto la energía solar y eólica, es la reducción de gastos en tecnología, es de ahí el apoyo de los gobiernos (anteriores) para el desarrollo sustentable, por lo que invertir en energías renovables es apostar a un futuro donde se preserva, conserva y protege los Recursos Naturales para el beneficio de la generación presente y las futuras, además de atender el desarrollo sostenible en lo ecológico económico y social.

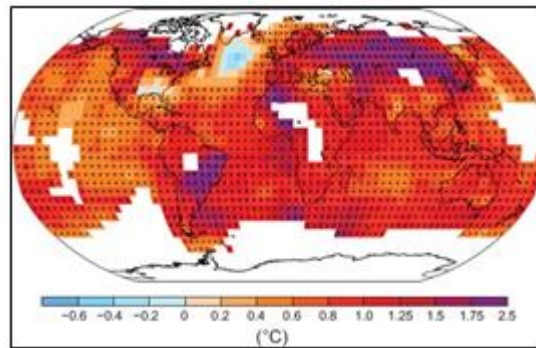
La importancia de la generación de energía eléctrica proporcionada por sistemas fotovoltaicos es una cuestión de necesidad a nivel mundial.

Las tecnologías fotovoltaicas han experimentado un enorme avance científico y tecnológico en los últimos años, donde la reducción de costos y el incremento de eficiencia de los sistemas fotovoltaicos hace que su inversión inicial pueda recuperarse en 10 años, conservando una garantía de que excedan los veinticinco años de vida útil.

El cambio climático es consecuencia del efecto invernadero el cual es un problema que se ha generado con el tiempo y que se ha incrementado. Es sin duda de gran interés darle solución urgentemente, dado que la atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel de mar se ha aumentado y las concentraciones de gases de efecto invernadero se han expandido [1].

Durante la cumbre sobre la Acción Climática de la ONU en el 2019, se establece el Acuerdo de París consecuente de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas

sobre el Cambio Climático (COP25), la Alianza de Ambición Climática tiene como objetivo la aceleración y la transformación necesaria de la urgente reducción de emisiones durante la próxima década, para lograr la meta final de cero emisiones netas de CO<sub>2</sub> en el 2050. Para que esto sea posible más de 120 países se han unido a esta causa además de la unión europea. Además de 15 regiones, 398 ciudades (consumen el 70% de CO<sub>2</sub> [2] ). Por lo que 786 empresas líderes crearon una campaña de “Ambición Empresarial para 1,5°C - nuestro único futuro” [3], y 16 inversionistas se unen a la misma meta.



*Figura 1.1 CAMBIO OBSERVADO EN LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE 1901 - 2012 [41]*

De acuerdo con el mapa, los cambios de temperatura que presentaba la superficie entre los años 1901 a 2012 (figura 1.1) se puede observar la tendencia por regresión lineal. Por esta razón se tiene que fijar el camino a un futuro de las energías renovables para combatir el cambio climático. Debido a que las energías renovables pueden contribuir en el logro de una reducción aproximada del 90% de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [4].

En la figura 1.2, se muestra un panorama en el cual para el 2050 las energías renovables pueden reducir en un 70% las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía.

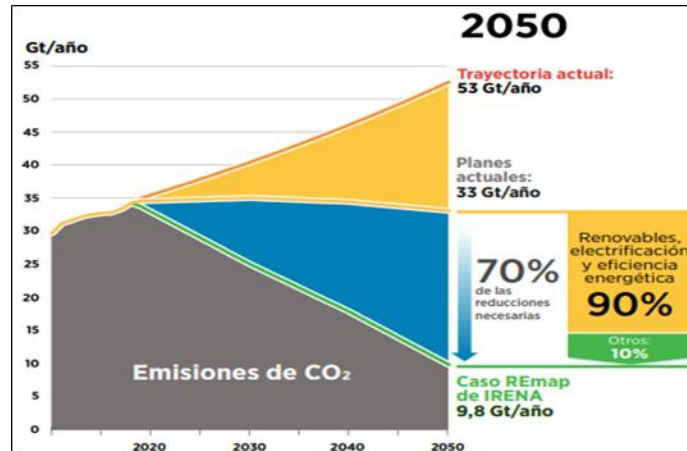


Figura 1.2 EMISION DE CO2 RELACIONADO CON LA ENERGIA DE 2020 - 2050 [5]

El Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (AZEL), proporciona un resumen del potencial de energía solar y los recursos naturales a nivel mundial.

México esta geográficamente dentro de la franja Solar la cual está entre los paralelos 40°N y 35°S, siendo el escenario ideal para la explotación de la energía solar, ya que la irradiación global media es del orden de 5.5 kWh/m<sup>2</sup> del territorio nacional, colocando al país dentro de los más altos del mundo en disponibilidad de recurso solar.

## 1.2 Planteamiento del Problema de investigación

El suministro eléctrico y las energías renovables han dado origen a la necesidad de ser caracterizados, ya que se requiere analizar la problemática de los sistemas fotovoltaicos desde su diseño, equipamiento, instalación, operación y mantenimiento de las centrales fotovoltaicas, así como la evaluación de la radiación solar en su zona de ubicación y de esta forma saber el comportamiento que los caracteriza.

La interconexión de generación fotovoltaica al sistema eléctrico genera un reto por su intermitencia debido a la incorporación y la incapacidad del sistema de almacenar la energía que genera, al igual que las perturbaciones en el suministro eléctrico que pueden producir un apagón





generalizado en el SEN por lo que se requiere un pronóstico de la energía generada por la planta fotovoltaico-interconectada para analizar su confiabilidad.

De igual manera, las características que presenta la red eléctrica con sus elementos implicados en la interconexión (cargas, generadores, líneas, equipos, etc.), por lo que las plantas fotovoltaicas pueden influir en la estabilidad en la red, aumento de generación y el aumento de capacidad de control. En cuanto a la estabilidad en la red son perturbadas por descargas atmosféricas, fallas en sistema eléctrico que se ubican cerca o lejos del parque fotovoltaico y propios de la planta fotovoltaica.

### **1.3 Justificación**

Al diseñar métodos de análisis de centros de suministro de energía fotovoltaica se demostrará que el uso de esta tecnología solar resulta de gran importancia en la economía, bienestar de la sociedad y del ecosistema. Además, se volverá ideal y factible construir más parques fotovoltaicos transformándose en un mercado costeable y amigable con el medio ambiente, mejorando la calidad de vida de las generaciones actuales y futuras.

Desarrollando un análisis de la eficacia técnica de una planta fotovoltaica que será interconectada a la Red Nacional de suministro eléctrico, se tomara la referencia de un mapa solar de la zona por medio de una aplicación digital que brinda información sobre las condiciones y análisis de producción que requiere un estudio de recurso solar dando base a la producción energética y a partir del desarrollo del entorno de trabajo con un simulador que permitirá incorporar modelos para su optimización y diagnóstico. Permitiendo simular un acercamiento al comportamiento del parque fotovoltaico bajo estudio y así poder determinar las principales variables del Sistema Interconectado Nacional (SIN) por plantas fotovoltaicas para conocer la viabilidad y confiabilidad.



Además, con el modelado del comportamiento del parque fotovoltaico que será interconectado a la red, será posible analizar su eficiencia y viabilidad a partir de programas de análisis de las características técnicas que componen al parque fotovoltaico, otorgando la confiabilidad y el crecimiento de energías renovables en el país.

## **1.4 Objetivo general**

Analizar el impacto que produce una planta fotovoltaica al ser interconectada a una red eléctrica. Se desarrolla el estudio de una central fotovoltaica ubicada en el estado de Morelos en la red de transmisión. El trabajo se centra en modelado del sistema eléctrico y en el análisis de los perfiles de tensión. El modelo se realiza en estado estacionario a partir de la programación computacional ETAP. Posteriormente se estudiarán las variables de interconexión relacionadas con tecnología y topología en la que se ubica la planta fotovoltaica desde el punto de vista de optimizar producción de energía y pérdidas del sistema. Por último, se estudiará el comportamiento de la planta fotovoltaica al incorporarla a la red eléctrica.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Realizar el modelado de la red eléctrica del caso bajo estudio a partir de la programación en ETAP
- Desarrollar la simulación de curvas características de paneles fotovoltaicos utilizando la plataforma de modelado ETAP
- Determinar la máxima potencia admisible de interconexión de la planta fotovoltaica y evaluar el impacto en la red



- Analizar los flujos de potencia y perfiles de tensión del sistema en estado estacionario en diferentes estaciones del año por medio de una herramienta digital que brinda información sobre las condiciones de la superficie de la localización de la planta fotovoltaica.

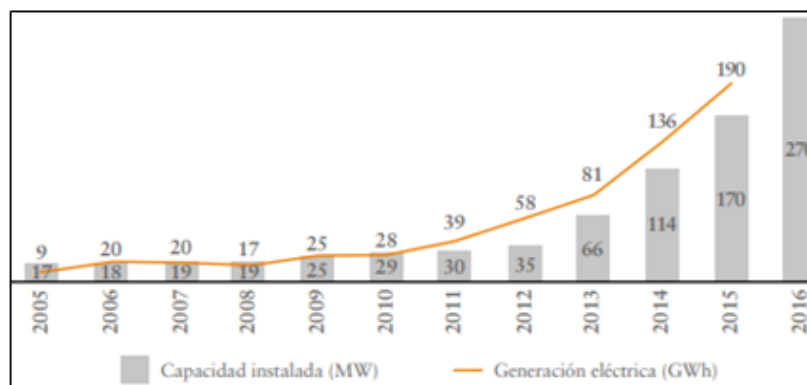
## 1.5 Hipótesis

Al presentar las características del generador fotovoltaico, se podrá crear un modelo que simule el impacto en el Sistema Eléctrico, para predecir los efectos al interconectar a la red en el cual se pretende mejorar la estabilidad en el nivel de tensión de los buses más cercanos.

## 1.6 Estado del Arte

El interés por los sistemas fotovoltaicos integrados en pequeña escala dio apertura a la construcción de la primera central fotovoltaica de gran escala en el 2011. [4]

Se observa en la figura 1.4, el 25% de la capacidad de generación eléctrica en fuentes limpias de energía, en la que la energía solar tuvo una capacidad instalada de 270 MW siendo el 0.38% del total instalado a nivel nacional en el 2010 a 2016. En el 2015 la generación de electricidad fotovoltaica ascendió a 190 GWh siendo el 0.06% de la generación total del SEN.



*Figura 1.3 EVOLUCION DE LA CAPACIDAD Y GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD FOTOVOLTAICA [44]*

Se pretende en México, el incremento de capacidad instalada de energía fotovoltaica de 568.2%,

pasando de 1,031.2 MW en 2016 a 6,890.9 MW en 2030. Cabe señalar que habrá periodos de adición de capacidad de generación eléctrica. Con esto se da paso a la evolución de las adiciones de capacidad instalada y generación de energía solar.



*Figura 1.4 EVOLUCIONES DE LA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EN MÉXICO 2016 - 2030 [43]*

Se han implementado centrales de generación fotovoltaica, las cuales se encuentran distribuidas en el país. Mencionaremos unos casos que ya están interconectados a la red eléctrica.

**Don José:** Tiene una extensión de 1,300 hectáreas, con una capacidad instalada de 260 MW y permiten una producción de 625 GWh al año, y se encuentra ubicada en San Luis de la Paz, Guanajuato. Y cuenta con 850 mil paneles solares, como se puede observar en la figura 1.7.



*Figura 1.5 PLANTA FOTOVOLTAICA DON JOSÉ [8]*

**Los santos solar I:** Tiene una extensión de 1100 hectáreas, como se muestra en la figura 1.8, y cuenta con una capacidad instalada de 13.7 MW y permiten una producción de 40.1 GWh al año, se encuentra ubicada en Chihuahua [9].



*Figura 1.6 PLANTA FOTOVOLTAICA LOS SANTOS SOLAR 1 [10]*

**Aura solar I:** Cuenta con una extensión de 1100 hectáreas, tiene una capacidad instalada de 39 MW y permiten una producción de 82 GWh al año, está ubicada en La Paz, Baja california Sur, como se puede observar en la figura 1.9 [11].



*Figura 1.7 PLANTA FOTOVOLTAICA AURA SOLAR 1 [12]*

### **1.6.1 Herramientas de diseño y análisis**

Uno de los principales retos de la generación de energía es la dificultad de almacenar en grandes cantidades. Esto crea el requisito de que la generación de energía eléctrica debe ser rápidamente igual a la energía consumida y ser precisa, lo que significa que debe mantenerse un equilibrio constante. La persona responsable de crear y comprobar si se ha logrado el equilibrio suele ser el operador del sistema.



En este aspecto, las predicciones para comprender la demanda de energía probable, y luego debe actuar continuamente en las instalaciones de generación y transmisión de energía en tiempo real para hacer coincidir la generación de energía con la demanda.

Si hay una discrepancia entre los dos, se enviarán los comandos necesarios al punto de generación para aumentar o disminuir la generación.

El uso de herramientas para el diseño de y análisis nos ayudan a encontrar algunos requisitos para diferentes etapas de planificación y diseños para la viabilidad de proyectos de sistemas fotovoltaicos; ya que son necesarios para diseños de sistemas, optimización, viabilidad, puesta en marcha o puesta en servicio de instalación fotovoltaica. Por lo que recorro en organizar algunos programas:

#### **Manifestación Ambiental:**

EstimateS: programa útil para la realización de curvas de estimación del número de especies potenciales dentro de un ecosistema esperado de acuerdo con modelos. El software toma la información proveniente de un marco de inspección normalizado, aleatoriza todos los datos y calcula la cantidad de especies observadas y previstas utilizando evaluadores y considerando las desviaciones estándar provenientes del proceso de aleatorización [13].

RAN: (Registro Nacional Agrario) órgano desconcentrado de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, se encarga del control de la tenencia de la tierra ejidal y comunal, y de brindar la seguridad jurídica documental, derivada de la aplicación de la Ley Agraria, de México [14].

INEL: Es una aplicación digital que identifica el potencial probado y probable de las energías eólica, solar, hídrica, geotérmica, de biomasa y oceánica de México. Asimismo, permite ver el



área de localización georreferenciada de plantas generadoras de energías limpias, incorpora mapas de riesgo climático; zonas arqueológicas y zonas naturales protegidas; y archiva la presencia indígena para mostrar dónde debería realizarse una Consulta Previa Libre e Informada [15].

CCUS: Es una aplicación digital que brinda información sobre las condiciones de captura, uso y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en el país. Esta plataforma está elaborada mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), en el que se puede acceder a la información mediante métodos de tablas, mapas interactivos, fichas informativas y sitios ubicados geográficamente [16].

### **Financiera:**

SAM: Programa de diseño y análisis económico de instalaciones; con parámetros técnicos aceptables, proporciona información sobre datos financieros y económicos. Hace análisis a largo plazo que incluye la degradación en la producción del parque e ingresos que producción va a suponer [17].

RETScreen: software de gestión de energías limpias para el análisis de viabilidad de proyectos de eficiencia energética, energías renovables y cogeneración, así como análisis del rendimiento energético operativo [18].

### **Dimensión**

AZEL: El Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (AZEL) es un instrumento tecnológico que contiene datos sobre los destinos o regiones geográficas que contienen alto potencial de aprovechamiento de los recursos energéticos renovables en México [19].

SOLCAST: Evaluación de recursos solares y datos de pronóstico para irradiancia y energía fotovoltaica, a nivel mundial. Creado con satélites. Validado con medidas de superficie [20].

NASA POWER: Conjuntos de datos meteorológicos y solares de la investigación de la NASA para apoyar la energía renovable, la eficiencia energética del edificio y las necesidades agrícolas [21].



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**“MODELADO Y ANÁLISIS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS A**  
**LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN”**

---

SOLAR GIS: Simulador que proporcionan un acceso rápido a estimaciones confiables de la energía esperada [22].





## CAPÍTULO II Marco Teórico

### Sistemas Fotovoltaicos

#### 2.1 Efecto fotovoltaico

Las celdas fotovoltaicas dependen del Efecto Fotovoltaico para su funcionamiento. Este efecto fue descubierto por Edmond Becquerel en 1839, quien observó que se generaba una tensión y corriente cuando se iluminaba uno de los electrodos de cloruro de plata sumergidos en una solución electrolítica acida. Luego, este efecto fue observado en el año 1876 por primera vez en un sólido mientras se realizaban experimentos de fotoconducción con selenio [23]. En el año 1883 el inventor neoyorquino Charles Fritts creó la primera celda solar basada en este material [24], con una eficiencia de conversión estimada entre 1% y 2%.

Dado los problemas del abastecimiento y aumento del precio del petróleo, en la década de los setenta ya se pensaba en la conciencia ecológica y fue en que una alternativa seria la opción solar, por ello se ocupó los módulos fotovoltaicos capaces de convertir la luz directa en electricidad útil, en esa década eran muy caros ya que aún no se había investigado lo suficiente. Las primeras aplicaciones fueron espaciales, por lo que solo se usó exclusivamente en satélites artificiales, pensando que en un futuro ayudaría a solucionar problemas ambientales [25].

Una vez vemos las soluciones y aceptación de las celdas fotovoltaicas en las aplicaciones anteriores, se observó que cumplían satisfactoriamente además del suministro de energía de la carga, y fue posible utilizarlos en aplicaciones diarias.

Una de las aplicaciones más sencillas que se buscaron para este tipo de unidades es la fuente de alimentación para calculadoras.

Con la madurez de la tecnología y la reducción de los costos de producción, se decidió comenzar a utilizar la tecnología en diferentes campos, como los equipos de aislamiento en el mundo de las telecomunicaciones, electrificación rural, en diversas aplicaciones de transporte, integrarla en



edificios, entre otros.

El mayor interés de diferentes empresas de esta industria eléctrica es el desarrollo de sistemas fotovoltaicos integrados a la red. Este tema es delicado, porque implica una serie de cambios en el nivel de normativas y la propia instalación, porque deben poder adaptarse a las necesidades de la red.

La energía solar es una de las principales opciones energéticas en la actualidad, ofrece una progresión de circunstancias favorables tales como:

- Utiliza ilimitados recursos naturales inagotables: la luz del solar.
- Es una energía limpia que no crea emisiones de gases contaminantes o diferentes tipos de residuos.
- Es una respuesta ideal para disponer de electricidad en zonas segregadas.
- Es la única energía sostenible que puede ser introducida con un alcance dentro de las zonas urbanas.
- En el tema de instalaciones conectadas a la red, hay asistencias públicas y primas a la producción.
- Los paneles y la estructura de soporte pueden desarmarse al final de la vida útil y pueden ser reutilizadas [26].

El flujo de electrones en el circuito exterior se llama corriente de la celda y su producto por el voltaje con el que se liberan los electrones por los contactos específicos determina la potencia generada. Todo esto ocurre a temperatura ambiente y sin partes móviles, las celdas solares que convierten en electricidad sólo una parte de la energía de los fotones absorbidos se calientan sólo unos 25-30°C por encima de la temperatura ambiente.



El efecto fotovoltaico se puede definir como "el proceso por el cual se genera una diferencia de potencial entre dos puntos de un material cuando sobre él incide la radiación electromagnética" [27].

El efecto fotovoltaico fue descubierto en 1839 por el científico francés, Henri Becquerel. Las iniciales celdas solares de selenio fueron creadas en 1880, sin embargo, no fue sino hasta 1950 que se crearon las celdas de silicio monocristalino que actualmente abruma el negocio fotovoltaico. Las primeras celdas de este tipo tenían una eficiencia de conversión de sólo 1%; ya para 1954 se había logrado incrementar la eficiencia al 6% en condiciones actividad normal de operación, mientras en el centro de investigación se lograron eficiencias cercanas a 15% [28].



Figura 2.1 ANUNCIO SISTEMA FOTOVOLTAICO [28]

En este efecto se producen actividades químicas de agrupaciones de átomos en las que están involucrados el silicio, fosforo, galio germanio, etc., la cual tiene la capacidad de absorber fotones y libera una corriente continua de electrones. Para causar el efecto es necesario el sol, ya que libera energía denominada radiación solar. Esta llega de acuerdo con los porcentajes de la figura 2.2.

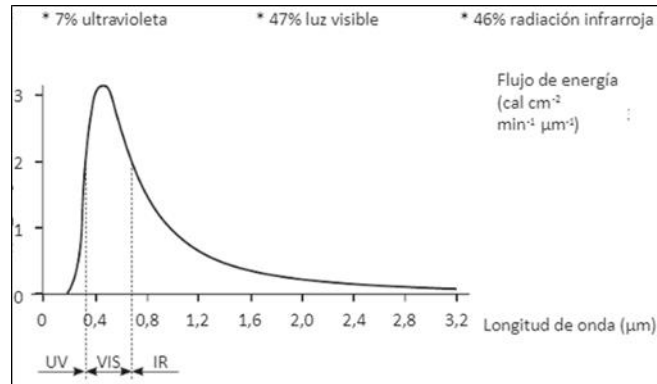


Figura 2.2 ESPECTRO DE RADIACION SOLAR [26]

-Radiación solar: Energía del Sol como ondas electromagnéticas.

-Irradiancia (S): Densidad de potencia incidente en una superficie, se mide en kW/m<sup>2</sup>.

La irradiancia que conseguimos del sol constantemente a la superficie de la tierra es 1,000 W/m<sup>2</sup>, con el cual el fabricante determina su potencia nominal del módulo fotovoltaico [26].

Hay tres tipos de radiación incidente, como nos muestra en la figura 2.3:

- Radiación directa (I): Es la que se recibe directamente del Sol
- Radiación difusa (D): Es la que se obtiene del Sol después de ser desviada por la dispersión atmosférica, se obtiene desde todas las direcciones (nubes, cielo, etc.)
- Radiación reflejada (R): Es la que ha sido reflejada por el suelo

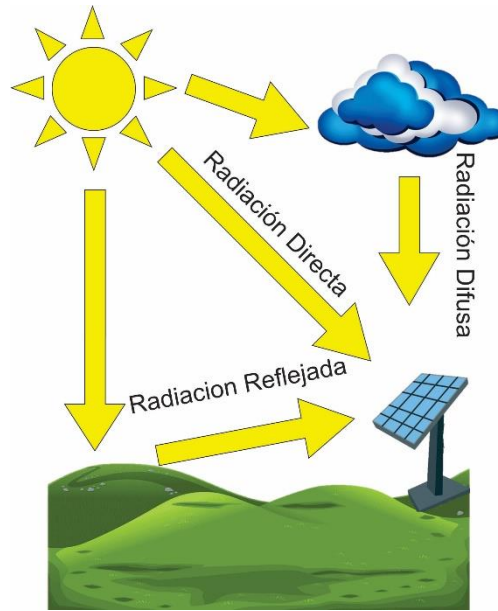


Figura 2.3 TIPOS DE IRRADIANCIA

La estimación de la irradiancia anual que incide sobre las plantas fotovoltaicas son las siguientes:

- Irradiancia global (G): Es la suma de la irradiancia directa  $I$  más la difusa  $D$
- Factor de irradiancia (FI): Las pérdidas debidas a la inclinación y orientación no óptimas.
- Irradiancia: Energía incidente en una superficie, se mide en kWh/m<sup>2</sup> o MJ/m<sup>2</sup> [29]

De forma básica, se puede decir que la irradiancia es el valor instantáneo y la irradiancia el valor durante un tiempo de radiación, ambos para una superficie de 1 m<sup>2</sup> [26].

En la industria eléctrica se busca generar energía renovable en cual se pueda usar como opción la energía solar en grandes escalas, el cual genera grandes cantidades de energía.

Un generador fotovoltaico es una agrupación en serie-paralelo de módulos fotovoltaicos. Una celda fotovoltaica es un semiconductor que pasa una corriente eléctrica cuando incide una radiación solar en esta. Existen varios tipos de celdas fotovoltaicas, las más usuales son de silicio monocristalino y silicio policristalino. La corriente que se genera en los módulos es en forma de



corriente continua. El cual se requiere un convertidor de potencia (inversor) para pasar la corriente continua a corriente alterna.

## 2.2 Panel Solar Fotovoltaico

La celda solar es el elemento base del proceso de transformación de la radiación solar en energía eléctrica debido al efecto fotoeléctrico. La celda solar está formada por una delgada lámina de un material semi-conductor hechas de silicio que es el material que ayuda a crear la energía eléctrica. Una celda solar no es capaz de generar una cantidad importante de energía, por lo que en un panel solar es un conjunto de celdas solares.

El modelo matemático de una celda solar que se plantean debe demostrar un comportamiento a similar a un real. Con una fuente de corriente continua ideal con un flujo unidireccional de electrones de la región p y n, ya que intentar simular en la realidad con ecuaciones matemáticas normalmente dan resultados erróneos ya que en campo es totalmente diferente ya que no se toman en cuenta fenómenos que pasan en el sistema, al igual otros fenómenos que ignoramos.

Por lo que, se propone una aproximación que son complementarios y con objeto de estudio.

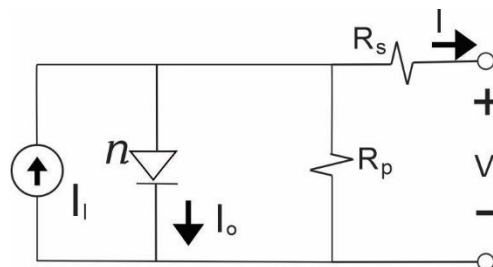


Figura 2.4 TIPOS DE IRRADIANCIA [30]

En la figura 2.4 se muestra el circuito eléctrico equivalente básico de una celda solar, tiene los elementos fundamentales formados por fuentes de corriente dependiente ( $I_l$ ) y un diodo de real, que está caracterizado por una corriente de saturación ( $I_p$ ) y factor idealidad ( $\eta$ ); y dos resistencias de peritadas que están en paralelo ( $R_p$ ) que proviene de la resistencia del emisor n y contacto del semiconductor y serie ( $R_s$ ) de la resistencia de la base p; por la resistencia de contacto entre



semiconductores y contactos metálicos, y de la resistencia de los nodos que constituyen la superficie metálica.

Para analizar el proceso de un circuito eléctrico, podemos ocupar leyes de Kirchhoff:

$$I = I_l - I_o - I_p \quad (2.1)$$

$$I = I_l - I_o - \frac{V + (R_s * I_p)}{R_p} \quad (2.2)$$

La ecuación 2.1 y 2.2 describen el comportamiento físico del circuito equivalente no ideal de la celda solar. En cualquier caso, de resistencias para que la corriente generada se ve disminuida.

Como ya se observó, el proceso de generación de energía solar fotovoltaica se necesita materiales semiconductores para el proceso de la energía fotovoltaica.

El silicio, que es un elemento químico, tiene propiedades fotoeléctricas. Esto implica que el silicio es capaz de convertir la luz en energía. Al calentar la arena a 1300 ° C, se rescata el silicio líquido y posteriormente el silicio se enfría.

El método de enfriamiento determina en última instancia si se convierte en una celda mono o policristalina. Dependiendo del proceso de fabricación la pureza del silicio y la eficiencia de los paneles solares se clasifican en las más comerciales:

- Silicio monocristalino: El silicio se refina hasta obtener un bloque de cristal puro, tiene muy pocas imperfecciones y se corta en láminas. Tienen un índice mayor de eficiencia, entre el 15 y 18%, en generar electricidad a partir de la luz y son una solución más eficiente en uso del espacio.

- Silicio policristalino: Es menos puro, ofrecen menor eficiencia, entre el 10 a 16%, son fáciles de producir y ofrecen una opción versátil y menor en costos. Por lo que el bloque de cristal no es tan uniforme. Este tipo de panel se encuentra en una gama de tamaños y tonos.
- Silicio amorfo: Las celdas solar más recientes ocupan este producto, y se puede reconocer por la película delgada. Su eficiencia es del 7 a 10% pero su costo es menor que las anteriores. No encontramos red cristalina.
- Arseniuro de galio (GaAs), se trata de una aleación binaria con propiedades semiconductoras, capaz de garantizar eficiencia muy alta, entre 19 y 24%, debido a la propiedad de tener una brecha directa (a diferencia del silicio).

Se utiliza exclusivamente para aplicaciones militares o científicas avanzadas (como misiones de exploración planetarias automatizadas o fotodetectores especialmente sensibles) [31].

En la figura puede observarse el diagrama de bandas para el Si y el arseniuro de galio (GaAs). A partir de estas bandas, también, se pueden diferenciar metales, aislantes y semiconductores.

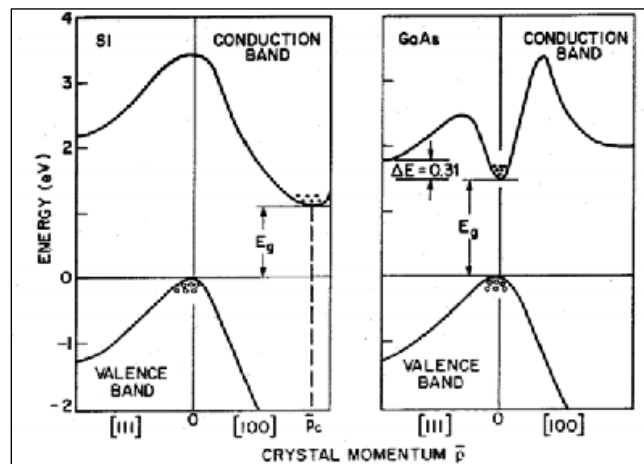


Figura 2.5 ESTRUCTURA DE BANDAS PARA DOS SEMICONDUCTORES CRISTALINOS, (A) Si Y (B) GaAs [26]

En la figura 2.5 pueden verse dos casos diferentes de conformación de bandas, dependiente de tipo de estructura cristalina del semiconductor. Cuando el mínimo de la banda de conducción está alineado con el máximo de la banda de valencia (es decir cuando no hay diferencia en el





momento), se dice que es un semiconductor de gap directo. Cuando el mínimo y máximo no están alineados, se denomina semiconductor de gap indirecto, como en el caso del silicio.

Celda solar es el elemento más importante de una instalación solar. Es el encargado de generar corriente mediante el efecto fotovoltaico en la instalación eléctrica resultado de asociar un conjunto de celdas solares en serie.

### **2.2.1 Principio de funcionamiento**

La luz del sol incide sobre la celda fotovoltaica en la que los fotones generan pares de huecos de electrones en los semiconductores.

Los electrones en exceso en la capa n que es cargada negativamente en el semiconductor migran hacia p que está cargada positivamente, y los huecos en la capa p del semiconductor migran hacia n. De esta forma, se establece un campo eléctrico fijo en la unión pn que permite que la corriente circule a través de un circuito externo. Donde los electrones se liberan de sus enlaces y se comportan como electrones libres, difundiéndose a través del material. De esta forma se consigue el efecto fotovoltaico como se muestra en la figura 2.6.

El potencial asociado con la unión pn depende de los materiales que componen la disposición de la celda, la concentración de impurezas y los portadores intrínsecos. Los portadores de carga minoritarios en cada uno llegan a la unión, donde el campo eléctrico existente es responsable de moverlos al área donde estos electrones y huecos son portadores de carga mayoritarios.

Sin embargo, no toda la energía del sol se puede convertir en energía eléctrica, porque parte de ella se reflejará en la celda o pasará a través de ella y, en algunos casos, los electrones se recombinarán antes de alcanzar la región p o n. Además, cuando la radiación solar es muy débil, no basta con liberar electrones, pero cuando la radiación solar es alta, solo una parte de la energía se utiliza para liberar electrones y la otra parte convierte en calor.

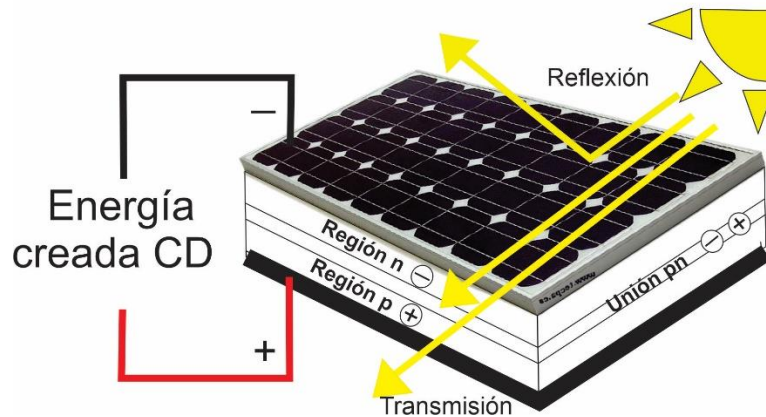


Figura 2.6 INCIDENCIA DE LUZ SOLAR SOBRE LA CELDA FOTOVOLTAICA

### 2.2.2 Parámetros de funcionamiento

En la mayoría de las Plantas Fotovoltaicas en México ocupan los paneles tipo silicio policristalinos que brindan un comportamiento térmico que nos brinda un rango de temperatura de operación del módulo, coeficientes de ajuste y comportamiento de su producción de acuerdo con dos pruebas:

1.- Condiciones de Prueba Estándar (STC= STANDAR TEST CONDITIONS), es la prueba de rendimiento de salida para un módulo fotovoltaico, usada por los fabricantes y organismos de prueba garantizando la comparación independiente y permite evaluar los módulos en condiciones ideales.

Las condiciones de prueba estándar (STC) constan de tres especificaciones. La primera es que el nivel de radiación que debe ser de 1000 W/m<sup>2</sup>. La segunda condición es que el espectro de la luz que utilizamos para iluminar las celdas fotovoltaicas debe corresponder al espectro solar conocido como calidad global del aire AM1.5G. La tercera condición es que la temperatura de la celda fotovoltaica debe ser de 25°C.

2.- Temperatura de Operación Normal de la Celda (NOCT= NORMAL OPERATION CELL



TEMPERATURE), es un estándar de prueba situado a los estados operacionales de las celdas solares, caracterizado como la temperatura a la que llega por las celdas de circuito abierto en un módulo.

Se representa los parámetros de funcionamiento dependiendo de la configuración y su condición de las celdas fotovoltaicas de los sitios ubicados en la Planta, primero por STC y posteriormente NOCT, que son:

-Potencia pico ( $W_p$ ): Potencia eléctrica máxima que puede generar un panel solar.

-Potencia nominal  $P_{max}(kW_n)$ : Potencia eléctrica extraída de la celda corresponde al producto del voltaje y corriente por el inversor. La potencia es cero en el circuito abierto como en cortocircuito de la celda. La potencia nominal es la que marca el límite de producción, ya que no se puede producir más de lo que el inversor puede convertir; por lo regular las instalaciones fotovoltaicas instalan una potencia pico superior a la nominal para tratar de cubrir al 100% de la capacidad del inversor.

-Tensión en el punto  $V_{mpp}(V)$ : La tensión en el punto máximo pico eléctrico de la celda corresponde.

-Corriente en el punto  $I_{mpp}(A)$ : La corriente en el punto máximo pico eléctrico de la celda corresponde.

-Potencia máxima  $P_{max}(kW_p) =$  Potencia máxima eléctrica de una celda de un módulo fotovoltaico. Potencia mayor a la nominal.

-Tensión en circuito abierto  $V_{oc}(V)$ : Tensión de circuito abierto de una celda de un módulo fotovoltaico, tras haber cortocircuitado sus terminales y la intensidad es nula.



- Intensidad de cortocircuito  $I_{sc}$  (A): Es la intensidad de corriente eléctrica que se obtiene de la celda fotovoltaica, tras haber cortocircuitado sus terminales, la tensión nula de sus bornes. Por lo que es la máxima corriente obtenible.

-Eficiencia del módulo  $\eta_m(\%)$ : Eficiencia de conversión energética de una celda.

### 2.3 Módulos

Los módulos fotovoltaicos es la que une varias celdas solares y es el alma de los generadores fotovoltaicos ya que son los encargados de transformar la energía solar en energía eléctrica, generando una corriente continua proporcional a la irradiación solar recibida.

Los módulos son interconectados eléctricamente en serie hasta conseguir el aumento de la tensión esperado y en paralelo para obtener la intensidad deseada, definiendo a lo que va a trabajar el sistema fotovoltaico [30].

El módulo fotovoltaico representa los paneles solares individuales conectados en serie como en paralelo. La figura 2.7 presenta la estructura de  $N_{sg}$  células en serie agrupadas en  $N_{pg}$  ramas. Las ventajas de esta agrupación son evidentes: mientras que asociar en serie  $N_{sg}$  células permite fijar la tensión nominal de trabajo del panel, la agrupación de  $N_{pg}$  ramas permite obtener la corriente de salida suficiente para las necesidades del sistema.

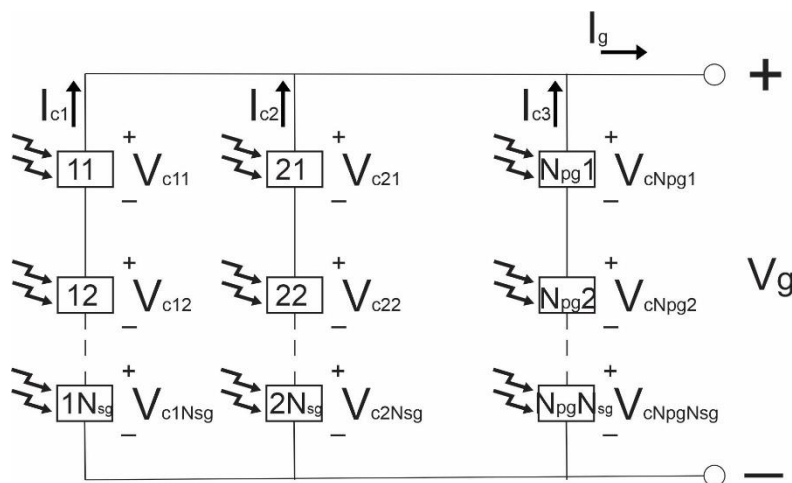




Figura 2.7 CIRCUITO DE MODULO FOTOVOLTAICO

Si los paneles solares se conectan en serie podría ayudar si están en el mismo ángulo, no se hacen sombras y se tiene distancias apropiadas para los paneles.

Entonces se puede expresar en el cálculo de corriente y voltaje como se observa en las formula 2.3 y 2.4:

$$V_g = \sum_{i=1}^{Nsg} V_{ci} \approx N_{sg} * V_c \quad (2.3)$$

$$I_g = \sum_{i=1}^{Npg} I_{ci} \approx N_{pg} * I_c \quad (2.4)$$

### 2.3.1 Curva IV

Las celdas fotovoltaicas usan la curva IV (figura 2.8) ya que es el análisis fundamental en la caracterización de un generador fotovoltaico, ya que con esto se puede obtener parámetros que determina su desempeño y calidad.

Teniendo un estudio de cortocircuito, se tiene un corriente contante y una tensión decreciente hasta llegar a la “rodilla”, el cual posteriormente a eso disminuye abruptamente. Multiplicando la tensión y la corriente fotogenerada, da como resultado un máximo localizado cerca a la “rodilla” de la curva IV.

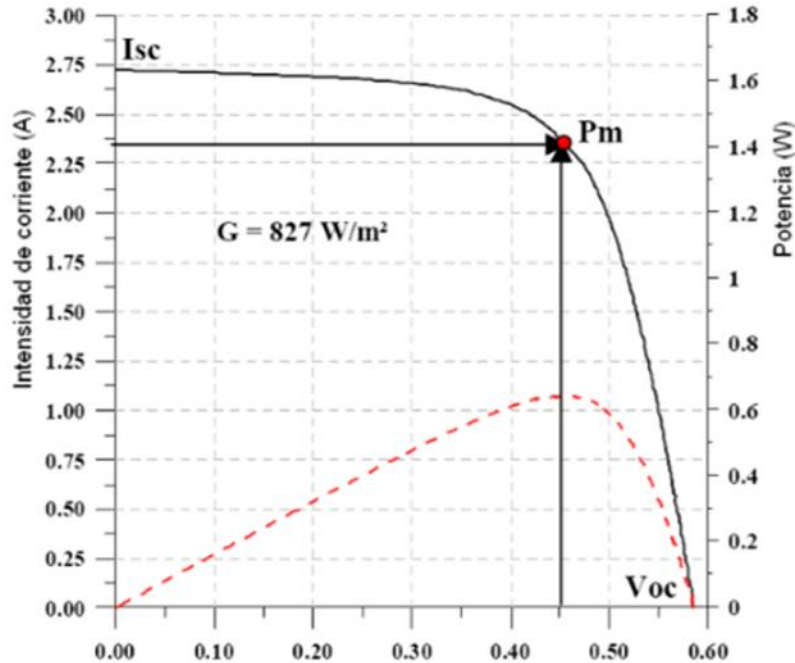


Figura 2.8 GRAFICA DE LA CURVA IV [31]

Observamos la Curva característica (continua) y potencia (discontinua) de una celda fotovoltaica de 100cm<sup>2</sup>

Las curvas de potencia contra la de tensión es la potencia generada para obtener la resistencia de carga. En la zona de la rodilla de la curva existe el punto de tensión de potencia máximo tensión ( $V_{mp}$ ) y la corriente de potencia máxima ( $I_{mp}$ ). La potencia nominal de los módulos está determinada por el poco de watios pico ( $W_p$ ), el cual define las condiciones estándares de operación (NOCT): temperatura e irradiación constantes a 25°C y 1000 W/ m<sup>2</sup>.

Los puntos que determinan evaluar y caracterizar la calidad de las celdas fotovoltaicas son:

- Una de las principales ventajas de los sistemas fotovoltaicos es la flexibilidad, que por su modularidad permite prever su diseño y posterior instalación. En otras palabras, la configuración del módulo se puede establecer en función de los parámetros de potencia del inversor al que se conectará el arreglo de módulos.



La curva corriente-voltaje (IV) del dispositivo es similar a la curva del módulo, y se proporcionarán los parámetros para el número de módulos conectados en serie y en paralelo. Si es voltaje, el voltaje se modificará cuando los módulos estén conectados en serie. Por tanto, la tensión del sistema fotovoltaico vendrá dada por la siguiente ecuación 2.5.

$$V_{m_{p_{pt}}SFV} = V_{m_{p_{pt}}} \text{ del modulo} * \text{No. de modulos en serie} \quad (2.5) \text{ Tensión de punto máxima}$$

Donde:

- $V_{m_{p_{pt}}SFV}$  Tensión en Punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico (V).
- $V_{m_{p_{pt}}}$  Tensión en Punto de máxima potencia (V).

En el caso de la corriente nominal, su valor vendrá determinado por el número de módulos conectados en paralelo del sistema fotovoltaico, como se muestra en la ecuación 2.6:

$$I_{m_{p_{pt}}SFV} = I_{m_{p_{pt}}} \text{ del modulo} * \text{No. de modulos en paralelo} \quad (2.6) \text{ Corriente de punto máxima}$$

Donde:

- $I_{m_{p_{pt}}SFV}$  Corriente en Punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico (A).
- $I_{m_{p_{pt}}}$  Corriente en Punto de máxima potencia (A).

Para su potencia nominal, dependerá de la cantidad de potencia nominal de cada módulo, como se expresa en la ecuación 2.7:

$$P_{m_{p_{pt}}SFV} = P_{m_{p_{pt}}} \text{ del modulo} * \text{No. de modulos en paralelo} \quad (2.7)$$

Donde:

- $P_{m_{p_{pt}}SFV}$  Potencia nominal en Punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico (W).



- $P_{mppt}$  Potencia nominal en Punto de máxima potencia (W).

-La curva IV está definida por los valores de corriente y voltaje, el cual es afectada por la temperatura de las celdas, circunstancias de radiación y temperatura ambiente.

El voltaje es proporcional con respecto a la temperatura de la celda (ecuación 2.8), y la corriente aumenta si la temperatura de la celda aumenta. En la siguiente ecuación se observa como afecta la irradiancia (S) en la temperatura de la celda con respecto a la temperatura ambiente, el cual varía conforme avance el día.

$$T_{cel} = T_{amb} \frac{NOCT - 20}{80} S \quad (2.8)$$

Donde:

- $T_{cel}$  Temperatura de celda (°C).
- $T_{amb}$  Temperatura ambiente (°C).

-El factor de forma (FF), el cual se parece a un rectángulo que presenta la curva IV. En cuanto más se parezca a una forma rectangular la curva IV, mayor de 0.7 para conocer la calidad de la celda fotovoltaica está en buenas condiciones (ecuación 2.9).

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.9)$$

-La eficiencia ( $\eta$ ), es la máxima potencia eléctrica que una celda fotovoltaica puede entregar y la potencia de radiación solar incidente (ecuación 2.10).

$$\eta = \frac{V_{mp} I_{mp}}{AG} \quad (2.10)$$





Donde:

A= Área útil del módulo ( $m^2$ )

G= Irradiancia incidente ( $W/m^2$ )

### **Efecto de temperatura y de la intensidad de radiación**

La mayoría de los módulos fotovoltaicos se fabrican en condiciones de prueba estándar (abreviatura en inglés de STC). Estas condiciones son: la irradiancia es de  $1000 W / m^2$ , la incidencia de la luz es perpendicular al módulo y la distribución espectral es de 1,5 AM. La temperatura de funcionamiento (NOCT) se llama  $25^\circ C$ . Estas condiciones no se cumplirán en la práctica, por lo tanto, la corriente y el voltaje del módulo se verán afectados, por lo que se reducirá el rendimiento. Se tiene un coeficiente de rendimiento el cual la temperatura por lo que este siempre afectará el rendimiento de los módulos fotovoltaicos. El tamaño de  $V_{oc}$  es inversamente proporcional a la temperatura de la batería. En la mayoría de las células de silicio cristalino, el cambio de  $V_{oc}$  con respecto a la temperatura es de  $-0.5\% / ^\circ C$ . Con un rango de temperatura más efectivo es  $-0.35\% / ^\circ C$ . Para las celdas de silicio amorfo, varían de  $-0,2$  a  $-0,3\% / ^\circ C$ .

Los efectos de la intensidad y temperatura de la radiación son varían constantemente ya que las condiciones de cada lugar son diferentes por las estaciones del año en México, lo cual alternan el comportamiento de los parámetros de las celdas fotovoltaicas durante la generación eléctrica.

Las figuras 2.9 y 2.10 nos muestran las curvas características de los módulos bajo diferentes regímenes de iluminación. El cual observamos un comportamiento de aumento de la  $I_{sc}$  proporcional a la intensidad de la radiación solar incidente. La  $V_{oc}$  aumenta en forma logarítmica cuando la radiación va en crecimiento. Para valores altos de irradiación aquella variación es pequeña y crece para los valores de irradiación bajos.

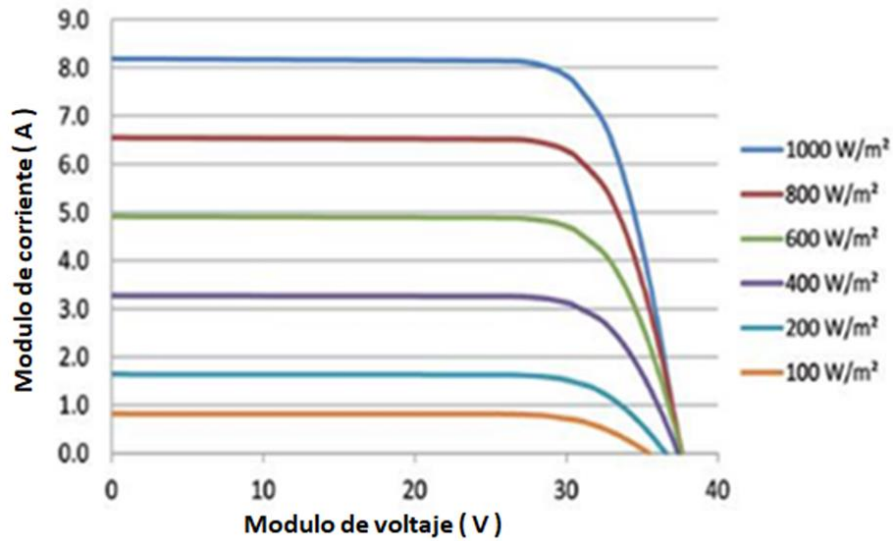


Figura 2.9 CURVA IV

En la figura 17 encontramos la variación de la curva característica IV para diferentes valores de irradiancia de un modulo

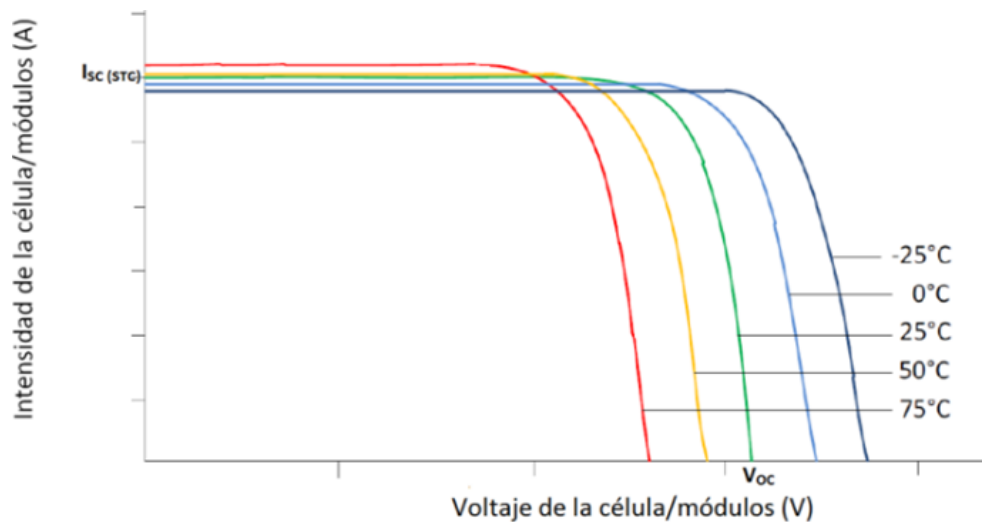


Figura 2.10 CURVA PV

En la figura 18 observamos la variación de la curva característica IV para diferentes valores de temperatura de un módulo bajo una intensidad de radiación constante y con variación  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$ .



La variación de  $V_{oc}$  con la temperatura es la siguiente ecuación 2.11:

$$\beta = \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} = \frac{mV}{^{\circ}C} \quad (2.11)$$

Y encontramos más acentuada la variación  $V_{oc}$  en, la ecuación 2.12:

$$\alpha = \frac{\partial I_{sc}}{I_{sc} \partial T} = \frac{\%}{^{\circ}C} \quad (2.12)$$

Donde:

$B(V_{oc})$ : Coeficiente de variación de la tensión de circuito abierto tomando en cuenta temperatura.

$\alpha(I_{sc})$ : Coeficiente de variación específica de la corriente de corto circuito con la temperatura.

Es necesario seguir el movimiento del sol en el cielo de Norte a Sur para captar la mayor incidencia de intensidad luminosa en el panel, ya la latitud y de periodo de demanda de carga.

La curva I-V de un módulo fotovoltaico está basada en las condiciones estándar de irradiancia y temperatura. Se toma en cuenta que el módulo está expuesto al sol.

### **2.3.1 Interconexión de módulos**

Cuando los paneles no son iguales y no coincide la misma radiación, por lo que el módulo produce pérdidas. Las pérdidas que se van a producir serán:

- Por dispersión, ya que todos los generadores no producen la misma potencia (la suma de las potencias de los módulos es inferior a la potencia entregada). Un enfoque para disminuir las



pérdidas por dispersión consiste en clasificar los módulos en función del valor de cada rama en serie con módulos de la misma categoría.

- Por punto caliente, algunas celdas solares se convierten en cargas disipando la energía generada por las demás, elevando la temperatura y dañando el panel. Para evitar este inconveniente (sobrecalentamiento indeseado), se conectan diodos de paso (diodos Bypass) en paralelo con los grupos de celdas asociadas en serie. También se usa diodos de bloqueo en serie dependiendo la situación [31].

## **2.4 Seguidores**

El diseño de un seguidor solar es importante en un proyecto ya que se espera obtener una eficiencia considerable con su implementación, por lo que, es una estructura mecánica capaz de orientar los paneles solares de forma que éstos logren una incidencia perpendicular de los rayos solares, siguiendo al sol desde su salida hasta su puesta [32], ayudando al inversor a alcanzar el punto de máxima potencia en cada momento.

## **2.5 Caja de conexiones**

Con el fin de perfeccionar las secciones del cableado en la parte de corriente continua, se instalan cajas de conexionado intermedio entre las series de módulos e inversores.

La caja de conexión DC está comprende un máximo de 16 entradas de corriente continua incluso de  $6 \text{ mm}^2$  y una salida de líneas DC de hasta  $150 \text{ mm}^2$ .

En las cajas de conexión se encuentran instalados diodos en los paneles fotovoltaicos sirven para prevenir una disipación de potencia excesiva cuando las celdas están sombreadas o dañadas.



## 2.6 Inversor

El inversor o convertidor VSC es un dispositivo electrónico capaz de transformar una corriente directa, procedente por los módulos fotovoltaico, a una corriente (CA) a un voltaje y frecuencia determinado para interconectarse a la red eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), como se ve en la figura 11.

Un inversor contiene diferentes sistemas de protección para certificar la seguridad de las personas, entre ellos el sistema anti-isla y la protección por falla de tierra.

El uso de inversores tipo centrales son de mayor potencia, eficiencia, simplicidad no sólo por las pérdidas derivadas por la conmutación, sino también por las pérdidas debidos a elementos pasivos, como son los transformadores, filtros, condensadores, etc.

En general la eficiencia de un inversor es mayor en los inversores con bajas pérdidas en vacío, y la eficiencia crece si la tensión en continua de entrada crece [33].



*Figura 2.11 EJEMPLO DE LAS ESTACIONES DE PODER BT O CENTRO DE INVERSIÓN- TRANSFORMACIÓN [53]*

En la caseta de inversores se unen distintos ramales en la entrada al inversor en una caja de paralelos en DC o caja de segundo nivel, en la cual se encuentra una única línea hacia el inversor.



La figura muestra un ejemplo de las estaciones de poder o Centro de inversión- Transformación. Los modelos "contenedor" son aptos para su transporte hasta cualquier parte, y tienen opciones de solución para inversores FV de intemperie y otra solución con inversores FV de interior.

Se minimizan las distancias de conexiones por canaleta para obtener las menores pérdidas posibles. En los tramos subterráneos los conductores parten en zanja protegidos bajo tubo. Se conectan a tierra todas las áreas de la instalación fotovoltaica, tanto de la parte de corriente continua como de la de corriente alterna, de tal forma que no se produzcan transferencias de defectos a la red de distribución.

Se instalarán interruptores generales magnetotérmicos de accionamiento manual, tipo bipolar por cada inversor y cuadro de protección, estos interruptores serán accesibles en todo momento, con objeto de poder realizar la desconexión manual.

Para la conmutación del inversor, se utilizan transistor bipolar de puerta de aislamiento (IGBT) o tiristor de conmutación de puerta de aislamiento (IGCT) y modulación SPWM para garantizar una salida de onda sinusoidal pura con bajo contenido de distorsión armónica total (THD).

Por lo general, se utiliza un transformador de potencia para el acoplamiento con la red. El transformador tiene dos funciones, una es aumentar el nivel de voltaje de la salida del inversor al valor de voltaje del nodo del sistema que se va a conectar, y la otra es limitar la corriente de cortocircuito a través de su impedancia efectiva.

Para la conmutación del inversor, se utilizan transistor bipolar de puerta de aislamiento (IGBT) o tiristor de conmutación de puerta de aislamiento (IGCT) y modulación SPWM para garantizar una salida de onda sinusoidal pura con bajo contenido de distorsión armónica total (THD).

Se utiliza un transformador de potencia para el acoplamiento con la red. El transformador tiene dos funciones, una es aumentar el nivel de voltaje de la salida del inversor al valor de voltaje del

nodo del sistema que se va a conectar, y la otra es limitar la corriente de cortocircuito a través de su impedancia efectiva. En la figura 2.12 se puede observar el esquema de un inversor de dos niveles.

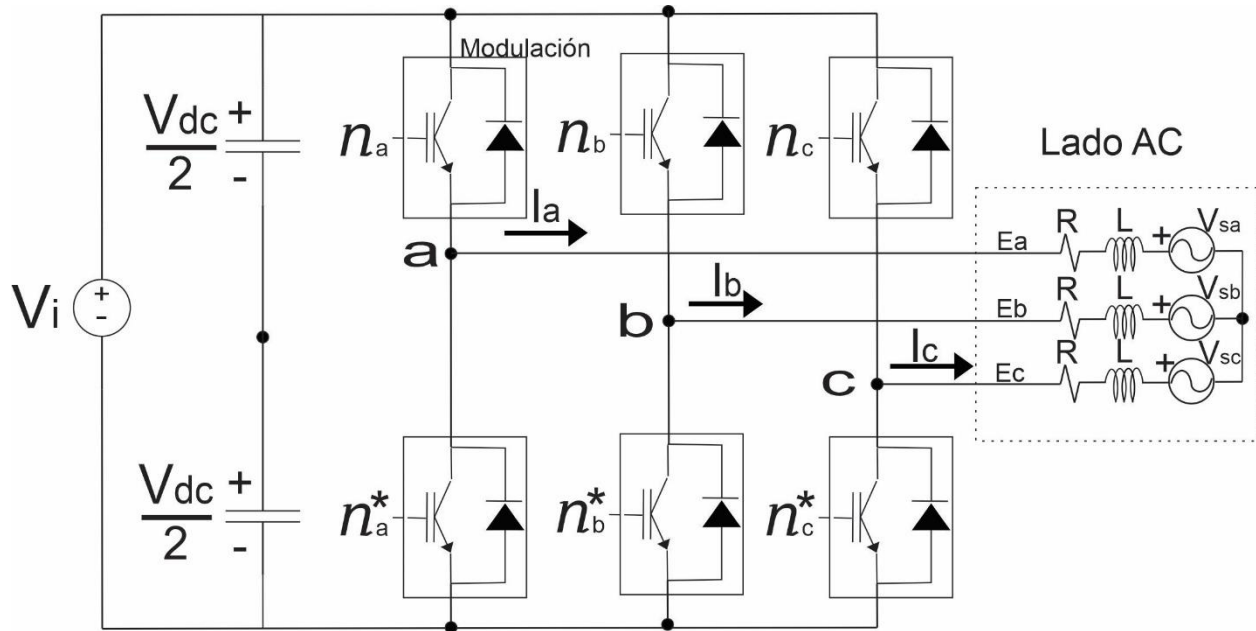


Figura 2.12 ESQUEMA DEL INVERSOR DE DOS NIVELES

Donde:

$\eta$ : Índice de modulación del IGBT

$V_{dc}$ : Tensión directa del condensador

$\varepsilon$  : Tensión de salida de los dispositivos IGBT de DC/AC

$V_s$ : Tensión en la red eléctrica

Para la modulación SPWM se obtiene una onda sinusoidal a la salida del inversor, mediante la generación de un ancho de pulso para controlar el encendido y apagado del IGBT. Para generar el ancho de pulso, se compararán dos señales. Como se ilustra en la figura 2.13.

La primera (a) llamada onda portadora es la onda triangular, que controlará la frecuencia de conmutación del IGBT; la señal de onda sinusoidal se llamará modulador o referencia. La segunda

(b) Muestra la señal de control de encendido y apagado aplicada al IGBT. Cuando la amplitud de la señal de referencia es mayor que la amplitud de la señal portadora, la señal de control proporcionará un flanco ascendente y el IGBT se encenderá. En el caso contrario, si la señal es menor que la señal portadora. La amplitud de la señal tendrá un flanco descendente y el IGBT se apagará. La figura muestra la señal de salida del convertidor con un filtro paso bajo que reduce el nivel de THD y obtiene una señal sinusoidal en la salida que permanecerá constante. Esta tecnología proporciona una forma de reducir el contenido de THD de la corriente, reduciendo así el tamaño del filtro armónico y puede controlar mejor la amplitud de salida.

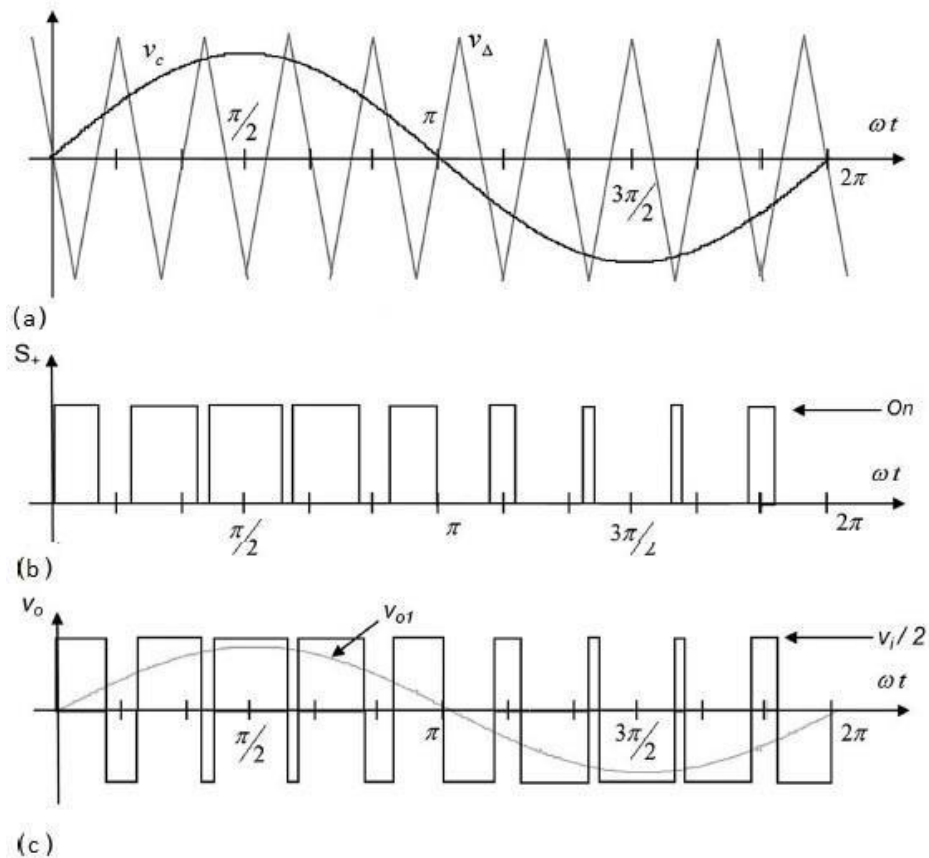


Figura 2.13 MODULACION SPWM [31]

Los inversores se deben especificar por voltaje, corriente, potencia y eficiencia.

En cuanto a voltaje se refiere se especifican dos valores de voltaje de entrada DC y salida en CA





con una frecuencia que sea compatible con la frecuencia de la red a la que se conecta (60 Hz para México).

Para nuestro caso de estudio ocupamos inversores de dos niveles, explicado en modelo de la figura 2.12. Es un circuito RL que posee dos fuentes de tensión directa del condensador. Para obtener  $\varepsilon_{abc}$ , ocuparemos la ecuación 2.13:

$$\begin{aligned}\varepsilon_a &= \eta_a \frac{Vdc}{2} \\ \varepsilon_b &= \eta_b \frac{Vdc}{2} \\ \varepsilon_c &= \eta_c \frac{Vdc}{2}\end{aligned}\tag{2.13}$$

Y los valores de tensión en la red eléctrica, ecuación 2.14:

$$\begin{aligned}V_{sa} &= V \sin \theta \\ V_{sb} &= V \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ V_{sc} &= V \sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right)\end{aligned}\tag{2.14}$$

Aplicando la segunda ley de Kirchhoff (ecuación 2.15) en cada una de las fases nos queda [34]:

$$\begin{aligned}L \frac{dI_a}{dt} &= \varepsilon_a - RI_a - V_{sa} \\ L \frac{dI_b}{dt} &= \varepsilon_b - RI_b - V_{sb} \\ L \frac{dI_c}{dt} &= \varepsilon_c - RI_c - V_{sc}\end{aligned}\tag{2.15}$$

## 2.7 Subestación seccionadora

Se colocará equipos eléctricos necesarios para la transformación segura del voltaje generado por



la Planta Fotovoltaica al voltaje de servicios propios.

Los transformadores de aplicación solar fotovoltaica trabajan bajo un perfil de carga muy específico por sus condiciones de intensidad y voltaje, y sólo durante un tiempo específico del día, ya que estos transformadores se capaz de dimensionar de acuerdo particularmente al perfil de carga del parque y sus condiciones climáticas durante el año.

Las configuraciones más usadas para la distribución de en la red de BT/ MT y MT/AT depende a si es a media o alta tensión. Para ello es necesario el empleo de transformadores de potencia, que transformen la tensión de salida de los inversores a la tensión de la red de distribución [35].

El punto de interconexión se considera la conexión de la línea de transmisión, que sale de la subestación de planta, con la subestación seccionadora.

La planta que están en la red de distribución del Sistema Nacional Eléctrico de CFE a través de una subestación seccionadora construida para abrir una línea próxima de CFE, se puede interconectar diferentes tipos de tensiones.

Para una red de tensión de 115 kV, es necesario realizar una elevación por medio de un transformador de potencia trifásico de 85 MVA de tipo exterior bañado en aceite mineral con tensión de entrada en 34.5 kV nominal y salida en 115 kV y en una frecuencia de 60 Hz, que contará con las características necesarias para la operación de la central de transformación: registro en media y alta tensión.

El seccionador se encuentra dentro de la subestación. La función del seccionador es concentrar todas las energías provenientes del sistema de media tensión (caseta concentradora del seccionador), que contiene un tablero general concentrador de energía para, como su nombre lo indica, concentrar y seccionar los 80 generadores de 1 MW, la cual ya está adecuada a la corriente y tensión requerida por la CFE para posteriormente ser conducida hasta la interconexión de la línea de transmisión que sale desde la subestación de planta, con la subestación seccionadora,



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**“MODELADO Y ANÁLISIS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS A LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN”**

como se muestra en la tabla 2.1.

Niveles de aislamiento para boquillas y aislamiento externo de transformadores de potencia							
Tensión nominal del equipo [kV] (valor eficaz)	Tensión máxima del sistema [kV] (valor eficaz)	Altitud de la instalación [msnm]	Tensión nominal de aguante de corta duración a 60 Hz [kV] (Valor eficaz)		Tensión nominal de aguante al impulso por rayo [kV] (valor cresta)		
			En seco 1 [min]	En húmedo 10 [s]	Onda completa	Onda cortada	
						Tiempo mínimo de flameo	
						2 [μs]	3 [μs]
34.5	38	Hasta 2500	80	75	200	258	290
		Más de 2500	105	95	250	322	402
115	123	Hasta 2500	260	230	550	710	632
		Más de 2500	310	275	650	838	750

*Tabla 2.1 NIVELES DE AISLAMIENTO EN BOQUILLA Especificación CFE DCDLAD01*

En los parques interconectado a Subestaciones Eléctricas se tiene diferentes Niveles básicos de aislamiento por impulso tipo rayo, NBAI y niveles básicos de aislamiento por impulso tipo maniobra, NBAM, de fase a tierra y distancias mínimas de fase a fase y de fase a tierra para diferentes niveles de tensión para líneas de alta tensión (tabla2.2).

Tensión nominal [kV]	Tensión mínima [kV]	NBAI fase-tierra [kV]	NBAM fase-tierra [kV]	NBAI fase- fase [kV]	NBAM fase- fase [kV]	Distancia fase-tierra [mm]	Distancia fase-fase [mm]
69	72.5	350	-	350	-	630	630
115	123	450	-	450	-	900	900
		550		550		1100	1100
138	145	450	-	550	-	1100	1100
		550		650		1300	1300
		650		650		-	-
		550		650		1100	1300

*Tabla 2.2 DISEÑO DE LÍNEAS AÉREAS DE 69 KV A 138 KV, ESPECIFICACIÓN CFE DCDLAD01*

## 2.8 Subestación eléctrica media tensión



El parque estará interconectado a una Subestación Eléctrica, siendo en esta en la que se interconectará con la red nacional de la CFE.

En el caso de la red eléctrica, el dispositivo deberá monitorizar las tensión, corriente y frecuencia para evitar situaciones de caídas de la red, islanding, y consumos excesivos. En el caso de las baterías, tiene dos alternativas: o bien utilizar su tensión en bornes, o bien el nivel de energía, LOE, para mantenerla en una zona de funcionamiento óptima. En el caso de paneles y cargas la clave se encuentra en la potencia que generan o consumen. Nótese también, que el modelo no contempla teóricamente el control del punto de trabajo de los paneles solares, ya que se considera que de ser necesario se introduciría un convertidor entre paneles y el punto de conexión a red. A partir de estas consideraciones iniciales, el funcionamiento del punto de conexión a red dependerá de la topología en que se integre.

En la primera topología planteada en la introducción, los paneles solares y las cargas se encuentran conectados a la red eléctrica. El sistema de ecuación formula las leyes de control ante posibles caídas de la red eléctrica, como se observa en la ecuación 2.16.

$$f_{c \min} \leq f_{red} \leq f_{c \max} \quad (2.16)$$

Obsérvese que ante la caída de la red eléctrica el interruptor  $Int_{red}$  se abrirá, pero las cargas podrían continuar alimentadas gracias a los paneles solares. En caso de que los paneles no pudieran aportar suficiente potencia, los interruptores  $Int_{panel}$  e  $Int_{carga}$  también se abrirían y el sistema quedaría completamente desconectado. El sistema de ecuación describe este comportamiento, monitorizando la tensión y corriente en las cargas.



### **2.8.1 Transformador**

Transformador trifásico reductor de tensión con neutro accesible en el secundario, de potencia kVA y refrigeración natural aceite, de tensión primaria 115 kV y tensión secundaria 34.5 kV y 34.5 kV en vacío (B1 y B2).

### **2.9 Bus infinito**

Constantemente al crear un estudio en media o alta tensión, debemos considerar una interconexión con un sistema que aportan energía en el Sistema Eléctrico Nacional, en algunas ocasiones para estudios no se cuentan con los de corriente (A) o potencia (MVA) máximo que puede suministrar la Sistema Eléctrico de donde nos vamos a conectar a la par de impedancias de secuencia positiva (directa), secuencia negativa (inversa) y secuencia cero (homopolar) en la interconexión. Y al no poder contar con los datos suficientes se considera un bus infinito que esta suministra y admite una calidad ilimitada de energía al bus.

Un bus infinito es un sistema de potencia tan grande que su voltaje y frecuencia no cambia sin importar que tanta potencia real y potencia reactiva se le demande o le suministres.

En caso de que un generador opera en paralelo con un bus infinito:

- El sistema al que se conecta el generador controla la frecuencia y voltaje en las terminales de generador
- La corriente de campo en el generador controla la potencia reactiva suministrada al sistema por el generador
- Los puntos de ajuste del mecanismo regulador del generador controlan la potencia real suministrada al sistema por el generador.

Los generadores fotovoltaicos (PV) al convertir luz solar en energía eléctrica por medio del efecto fotoeléctrico y por eso no hay conversión electromecánica de potencia. El comportamiento de los generadores DC se comportan diferente a los generadores de AC ya que su interconexión a la red



es a través de un inversor y esto caracteriza el comportamiento de estos generadores frente a perturbaciones.

Un generador fotovoltaico consiste en un conjunto de celdas fotovoltaicas que generan una corriente continua al recibir luz solar por medio de la irradiancia y temperatura; estos parámetros varían constantemente en función de la estación del año y la ubicación geográfica. Se convierte las corrientes y tensiones a alterna mediante un inversor, controlando una tensión y flujos de potencia.

## **2.10 Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica**

La interconexión es uno de los desafíos más importantes a los que se enfrentan las energías renovables, porque es uno de los mayores desafíos para asegurar que el suministro de energía esté dentro de un rango aceptable.

Una mayor penetración de la generación de energía a través de recursos renovables requiere un cambio en la forma en que estamos acostumbrados al funcionamiento de la red, lo que puede convertirse en un obstáculo para su desarrollo.

Por ello, estamos desarrollando nuevos sistemas y equipos para solucionar los problemas actuales y poder contribuir al desarrollo anterior.

Para desarrollar la interconexión de todo el sistema solar fotovoltaico se debe poner especial énfasis en minimizar las pérdidas DC y AC generadas por la conexión. Los pasos para seguir son los siguientes: la interconexión de los paneles solares, la conexión del módulo al inversor de corriente, la conexión del inversor y el contador eléctrico en el cuadro de protección, el punto de conexión con la red

Los sistemas fotovoltaicos se pueden dividir en dos categorías: según su distribución y sus aplicaciones.

Dependiendo de la aplicación, el sistema fotovoltaico puede estar conectado o no conectado a la red. Los Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red (SFVCR) suelen estar diseñados para



producir siempre el máximo rendimiento energético y ayudar a satisfacer la carga eléctrica, para este tipo de sistemas no es necesario incorporar equipos de almacenamiento de energía. Para acoplarse correctamente a la red, el inversor fusiona estos sistemas.

Los sistemas fotovoltaicos autónomos funcionan independientemente del suministro de la red y generalmente se ubican donde no hay red o donde es difícil conectarse a la red. Por tanto, casi todos los sistemas autónomos incluyen dispositivos de almacenamiento de energía.

La figura 2.14 muestra la clasificación general de los sistemas fotovoltaicos.

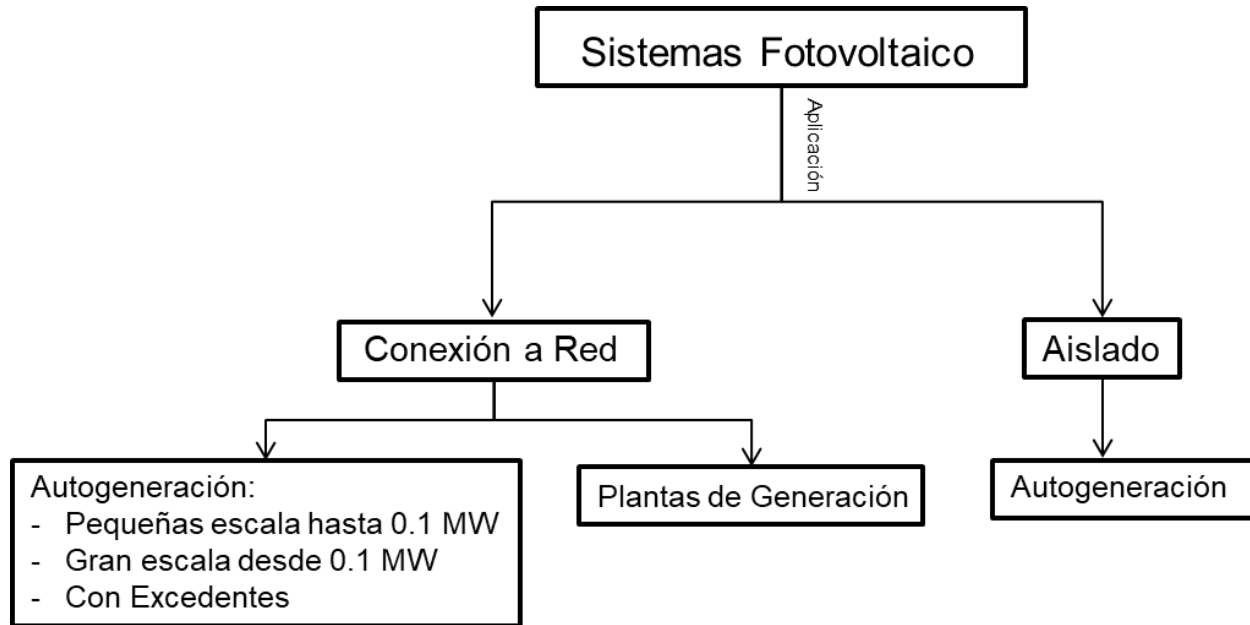
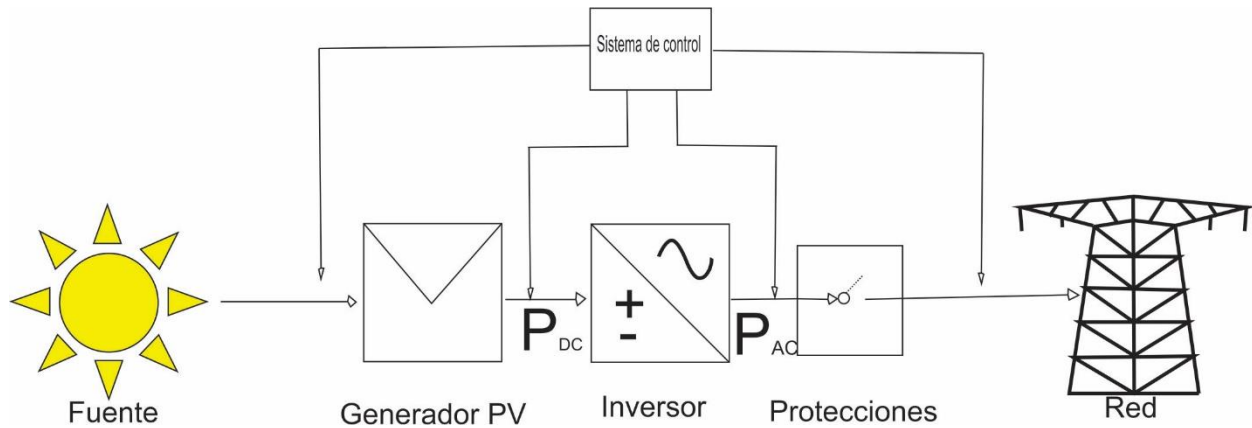


Figura 2.14 CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Los SFVCR constan de generadores fotovoltaicos, inversores DC / AC, un conjunto de dispositivos de protección eléctrica y sistemas de control y monitoreo, se puede observar en la figura 2.15. SFVCR se puede utilizar para satisfacer total o parcialmente la demanda de energía, entregar el exceso de energía a la red en momentos específicos del día y entregar toda la energía generada a la red a través de planes de mercado.



*Figura 2.15 ESQUEMA DE UN SFVCR*

Los valores de operación de un generador fotovoltaico se pueden considerar relacionados mediante la siguiente expresión, que define la característica I – V:

$$I_{pv} = N_{mp}N_{cp}I_{sc} \left[ 1 - \exp \left( \frac{\frac{V_{pv}}{(N_{cs}N_{ms})} - V_{oc} + \frac{I_{pc}R_s}{(N_{cp}N_{mp})}}{V_t} \right) \right] \quad (2.17)$$

Donde:

- $I_{pv}$  Corriente del generador fotovoltaico (A).
- $V_{pv}$  Tensión del generador fotovoltaico (V).
- $N_{cp}$  Número de celdas en paralelo del módulo fotovoltaico.
- $N_{cs}$  Número de celdas en serie del módulo fotovoltaico.
- $N_{mp}$  Número de módulos en paralelo del generador fotovoltaico.
- $N_{ms}$  Número de módulos en serie del generador fotovoltaico.
- $I_{sc}$  Corriente de cortocircuito de una celda del módulo fotovoltaico (A).
- $V_{oc}$  Tensión de circuito abierto de una celda del módulo fotovoltaico (V).
- $R_s$  Resistencia serie de una celda del módulo fotovoltaico ( $\Omega$ ).
- $V_t$  Tensión térmica (V).





### **2.10.1 Protecciones**

Para cualquier sistema eléctrico, la protección juega un papel importante en la seguridad de los usuarios y del personal de mantenimiento, diseñado para proteger los equipos y mantener la integridad de todos los seres vivos y el medio ambiente. Las protecciones están diseñadas para detectar y eliminar fallas en sistemas eléctricos. En el sistema fotovoltaico, dado que se procesa el valor de DC, se presta más atención a la protección.

El SFVCR debe tener un sistema de protección integral y debe estar centrados en los principales puntos que son:

-Los paneles fotovoltaicos:

- Diodo de bloqueo: Mientras exista radiación solar los módulos producen corriente el cual protege los módulos de corrientes inversas en caso de falla a tierra de los paneles FV, así como proteger el cableado de DC en caso de una sobre corriente.
- Diodos de Bypass: Protege a los módulos que producen el efecto de “sombreado” por basura, aves, celdas defectuosas o dañadas, lo cual da “puntos calientes”.
- Interruptor Termomagnético: Interrumpe un circuito cuando se sobrepasa la corriente directa en los paneles en valores preestablecidos.
- Pararrayos: Protege a los módulos FV de descargas atmosféricas
- \*Sistema de puesta a tierra: Limitar el daño a equipos por tensiones inducidas, estabilizar el voltaje del sistema eléctrico, detectar y eliminar las corrientes de falla y reducir los efectos de la Interferencia Electromagnética.



#### -Inversor

- Protección contra operación en modo isla: Protege a los equipos de tensión y frecuencia fuera de los límites especificados
- Varistores o Supresores de picos: Protección en las terminales de línea de AC contra sobretensiones en la salida del inversor y en la entrada dependiendo la función.
- Protección contra sobrecarga: Es un sensor de temperatura asociado a un circuito de desconexión o en su defecto será desplazado el punto de operación del generador del punto de máxima potencia cuando su potencia de salida sobrepasa la capacidad del inversor.

#### -Punto de conexión a la red:

- Interruptor de potencia: Interruptor de desconexión del SFVCR cuando la tensión de la red está fuera de márgenes. Este interruptor está asociado a varios relés (Sincronismo, sobrecorriente, sobretensión, frecuencia, entre otros)

### **2.10.2 Sistema de control**

Dado que el sistema fotovoltaico debe estar conectado a la red mediante parámetros de calidad y adaptarse a las variables de frecuencia, tensión y ángulo de fase impuestas por la red, el inversor debe contar con un controlador que pueda servir como interfaz eficaz entre el sistema fotovoltaico y la red, se puede observar como es que el controlador está integrado a la red en la figura 2.16.

La mala interconexión de SFVCR causará fuertes interferencias e inestabilidad en la red. Por lo tanto, debe haber un controlador de alta velocidad para garantizar un funcionamiento seguro y confiable en la red.

Las principales funciones del controlador incluyen: controlar la potencia activa entregada a la red, controlar la transmisión de potencia reactiva entre el SFVCR y la red, controlar la sincronización de la red, controlar el voltaje de estado estable y LVRT (Low Voltage Ride Through) durante una falla cerca de la planta de energía. Las regulaciones en algunos países requieren servicios auxiliares, como inercia virtual y compensación armónica

Uno de los principales métodos de control en SFVCR es el marco de referencia síncronas. Esta conversión hace que las formas de onda de voltaje y corriente de la red se conviertan en un marco de referencia que gira simultáneamente con el voltaje de la red. De esta forma, la variable de control se convierte en una variable de DC que es fácil de filtrar y controlar. Esta transformación se puede realizar mediante la transformación Park.

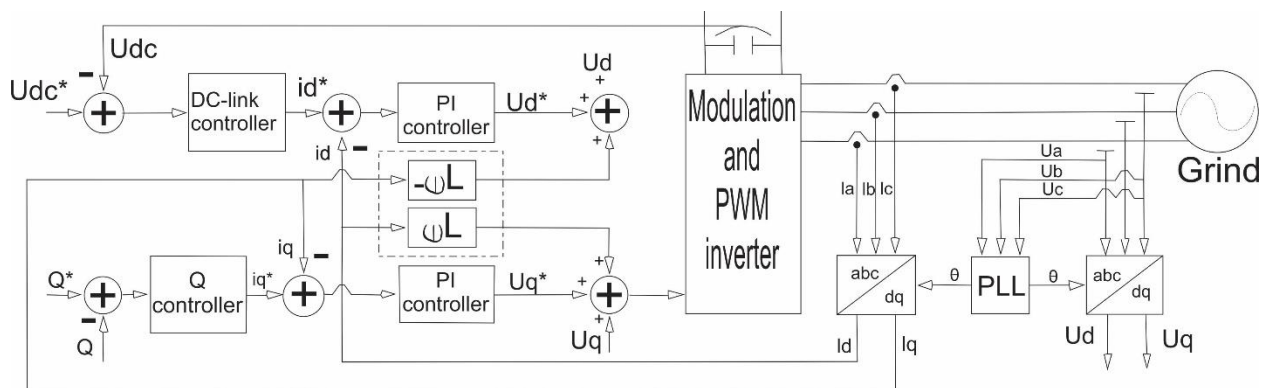


Figura 2.16 CONTROLADOR DE UN INVERSOR [36]



### 2.10.3 Conexión de una Planta Fotovoltaica en la red

Conectar el sistema fotovoltaico a la red varía de la cantidad de energía a inyectar, que será proporcional en la cantidad de módulos disponibles. Varios módulos en serie son conocidos como una cadena o string y varias string conectados en paralelo para formar un arreglo fotovoltaico.

El voltaje generado por la Planta fotovoltaica requiere de inversor, que puede regular el voltaje generado dando corriente alterna, los parámetros que lleva un diagrama de bloques sirve para evaluar la capacidad de generación como se ve en la figura 2.17.

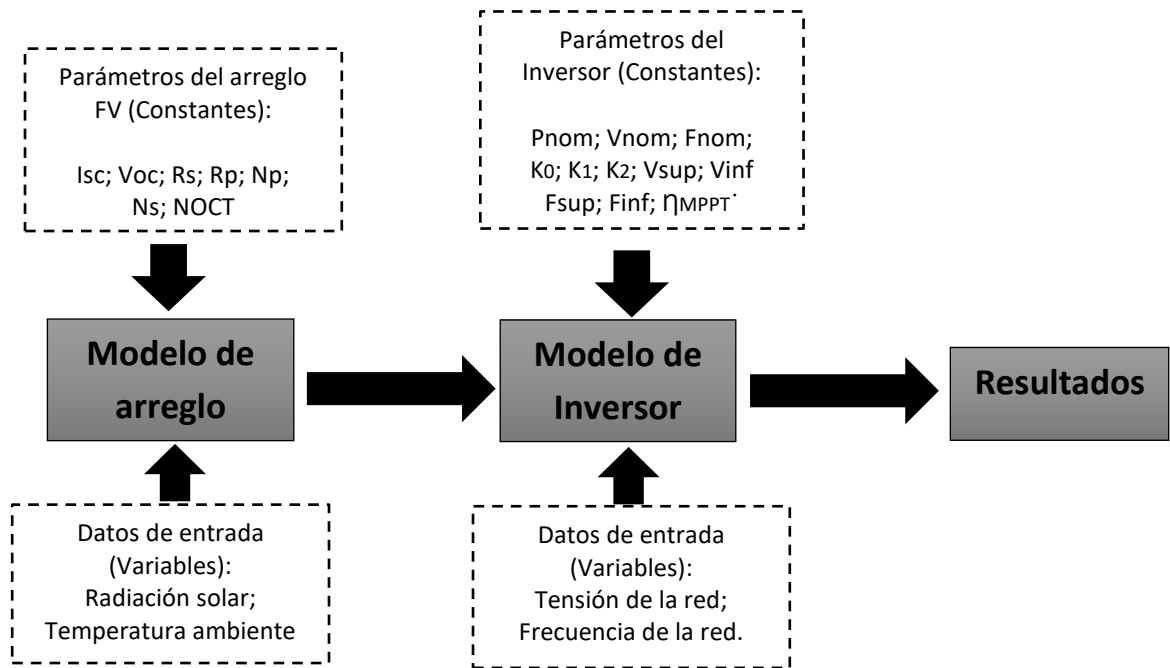


Figura 2.17 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL METODO MATEMÁTICO DE SFVCR PARA EVALUACION DE LA CAPACIDAD DE GENERACION

Donde:

$F_{nom}$  = Frecuencia nominal (Hz)

PFV= Potencia de salida del Módulo fotovoltaico

$P_{oinv}$ =Potencia de salida del inversor normalizada a la potencia nominal

Para aumentar la potencia entregada a la red y mejorar la eficiencia del sistema, el inversor contiene un MPPT, detecta la señal actual proporcionado por el arreglo fotovoltaica, y se esfuerzan por maximizar la potencia de entrega.

Todos los módulos fotovoltaicos se pueden conectar a uno o más inversores de varias formas para maximizar la potencia que entregan. Se muestran tres configuraciones posibles principales:

1.-Todo el campo fotovoltaico está conectado a un inversor, se denomina inversor centralizado. Esta configuración tiene la ventaja del bajo costo, ya que solo se requiere un inversor para conectarse a la red, pero todos los módulos deben ser del mismo tipo, deben tener la misma posición angular y dirección de voltaje generado por cada string. Los módulos deben tener el mismo valor y número, se puede visualizar en la figura 2.18.

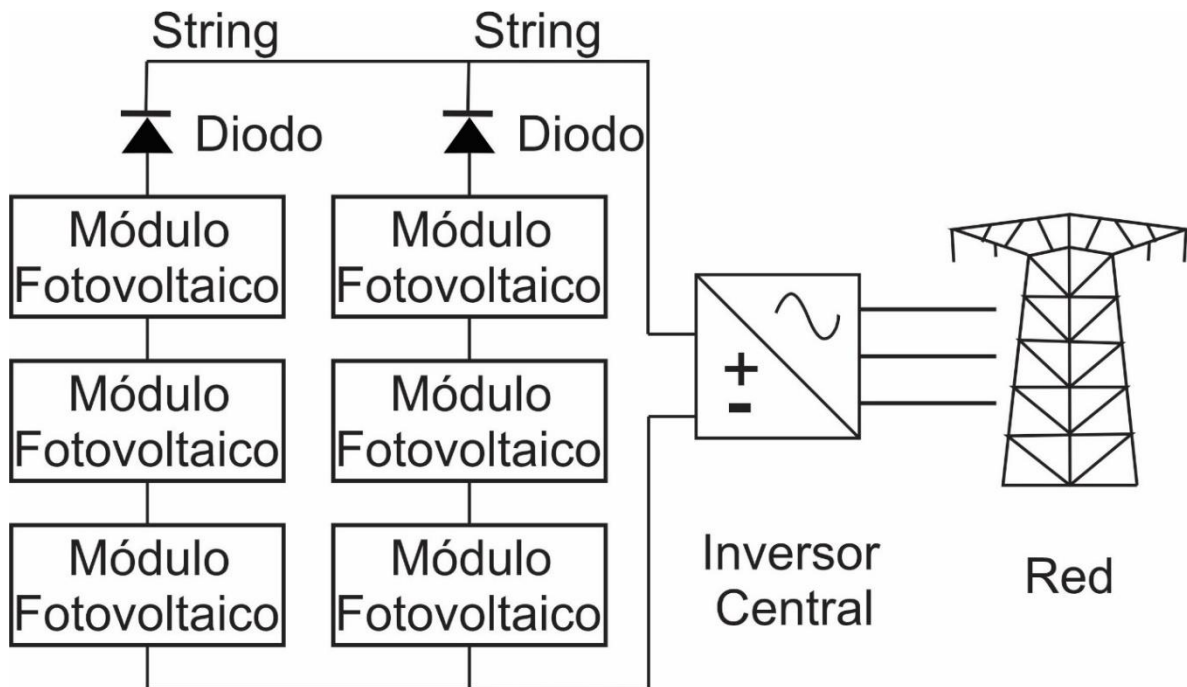


Figura 2.18 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CON INVERSOR CENTRAL



La principal desventaja es que, dado que debe aumentarse la tensión para asegurar una conexión adecuada a la red, el inversor debe ser muy robusto (también se pueden utilizar transformadores de potencia para aumentar la tensión en la salida del inversor, pero esto aumentará la pérdida de tensión).

Aunque el inversor es altamente eficiente para esta configuración, no se puede decir que los módulos fotovoltaicos en paralelo sean iguales, porque puede producirse una diferencia de voltaje en los módulos fotovoltaicos, lo que da como resultado una disminución de la eficiencia.

2.- En esta configuración (fig.2.19), cada arreglo o cada cadena está conectado entre sí y cada módulo o inversor conectado a la red. Todos los módulos fotovoltaicos de la misma cadena deben tener el mismo tipo, la misma posición angular y la misma dirección. Por otro lado, de una cadena a otra, el tipo y ubicación de los módulos pueden ser diferentes. Dado que la salida de cada cadena requiere más inversores, esta conexión es más cara. Otra ventaja es que la falla del inversor puede hacer que la cadena se interrumpa por completo, y la falla de un solo módulo fotovoltaico es más fácil de localizar.

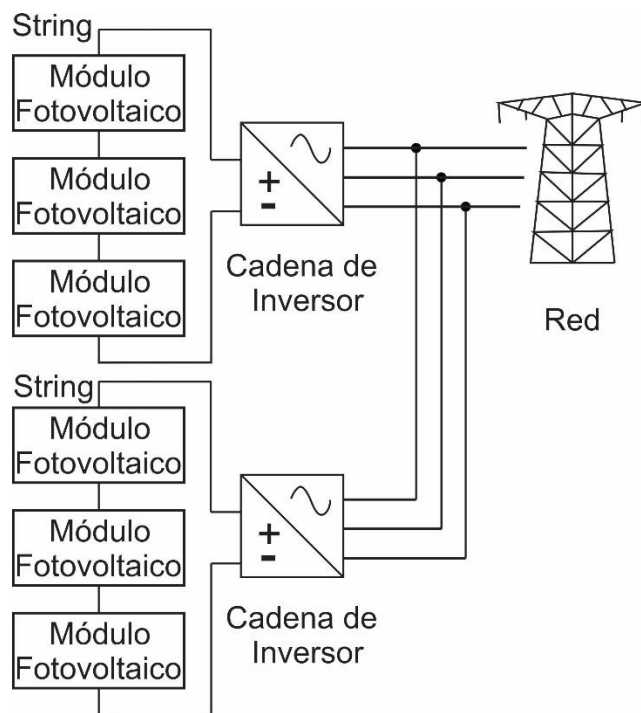
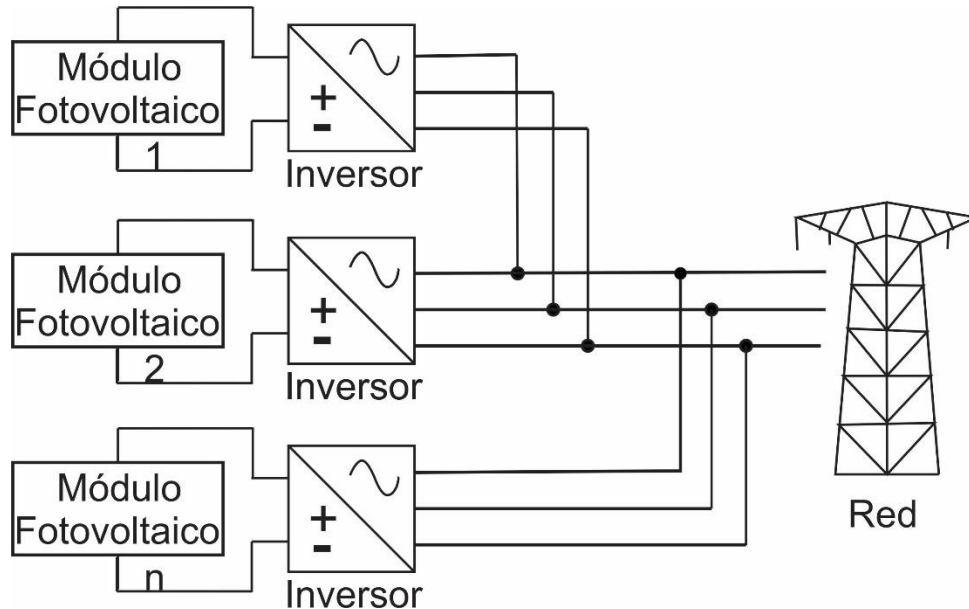


Figura 2.19 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CON INVERSOR POR CADA ARREGLO

- En esta configuración, cada módulo fotovoltaico está conectado al inversor para garantizar la flexibilidad y estabilidad del sistema, como se ve en la figura 2.20. Aquí, dado que todos los módulos son independientes, pueden tener diferentes tipos y se pueden colocar de diferentes formas. Cuando uno o más módulos fallan, hay equipos de respaldo en generación de energía e inversión energética, por lo que tiene confiabilidad. La influencia de la sombra es muy limitada, por lo que, dado que cada inversor es responsable de mantener un voltaje estable en la salida, la pérdida causada por el cambio de voltaje del módulo fotovoltaico es baja. Esta topología facilita agregar o conectar más módulos fotovoltaicos en serie con los módulos existentes. El alto costo es la principal desventaja de esta solución, pero tiene la mayoría de las ventajas.



*Figura 2.20 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CON INVERSOR POR CADA UNO [37]*

## 2.11 Estudio de interconexión al Sistemas eléctricos nacional

El Sistema Eléctrico de Potencia(SEP) abastece a todos los usuarios con energía eléctrica tan económicamente como sea posible, en la cantidad deseada y con un nivel aceptable de calidad, seguridad y confiabilidad, por medio de un conjunto de instalaciones y equipos para producir, transportar y distribuir energía eléctrica con relativa facilidad con altos niveles de eficiencia y seguridad, a los usuarios de una zona, ciudad, región o país.



Con el desarrollo y progreso de las energías renovables y su posterior penetración en la red, el tema de la calidad del suministro se vuelve cada vez más importante. Este es un tema trascendente porque un porcentaje cada vez mayor de la energía total que penetra en la red proviene de fuentes de energía renovables.

El problema se deriva del hecho de que la tasa de penetración de los sistemas de energía renovable es variable porque sus fuentes de energía son cambiantes.

El Código de la Red especifica un conjunto de requisitos que deben cumplir los titulares de permisos y las comisiones que utilizan los generadores de energía fotovoltaica para poder estar interconectados con la red. Por lo que se crean los “Criterios P”, para establecer los criterios técnicos para asegurar la integridad del SEN, agilizar el tiempo que este se encuentre en estado operativo normal, y reducir riesgos de daños en equipos y personal operativo.

Con la entrada de energías renovables se hizo un acuerdo que emite el "Manual para la Interconexión de Centrales Eléctricas y Conexión de Centros de Carga", el cual se ocupara para tensiones conectadas a 115 kV y mayores.

Se apoyará en las "Reglas Generales para la Interconexión de los Sistemas Eléctricos Nacionales" que se dictarán se basan en el artículo 7 fracción VI de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) y el artículo 31 fracción IV del Reglamento.

Además del artículo 7 fracción artículo 7, fracción VII y artículo 20, otorga la Comisión Reguladora de Energía (CRE) poder para emitir procedimientos de intercambio de energía y





relacionados Compensación para todos los proyectos y sistemas combinados y energía SEN; Del mismo modo, para un sistema combinado de calor y energía eficiente.

Con la Normas oficiales mexicanas y normas mexicanas en materia de electricidad establece las necesidades técnicas y legales para la interconectar al Sistema de las instalaciones de Generadores o Permissionarios con fuentes de Energía Renovables o Cogeneración Eficiente al sistema.

El SEP debe cumplir con los siguientes requisitos básicos:

- El sistema debe cumplir con los requisitos de carga cambiantes. A diferencia de otros tipos de energía, la energía eléctrica no se puede almacenar en cantidades suficientes, por lo que se requiere suficiente "reserva móvil" para mantener el control de SEP en cualquier momento.
- El sistema debe proporcionar energía con un costo mínimo y un impacto ecológico mínimo.
- El suministro de energía se debe de ofrecer y mantener al servicio de corriente alterna en todas sus tensiones, cumpliendo el Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, de acuerdo con el artículo 18: con los siguientes factores:
  - a) Voltaje constante (dentro de la zona de tolerancia  $\pm 0.8\%$ ) y tienda a reducirse progresivamente.
  - b) Frecuencia constante de 60 Hz (dentro de la zona de tolerancia  $\pm 0.8\%$ ) y tienda a reducirse progresivamente.

El SEP se compone de partes o subsistemas fundamentales para su función en diferentes niveles de tensión: generación, transmisión, subtransmisión y distribución, donde la red eléctrica de distribución pertenece al sistema eléctrico de potencia.

-Generación: Es la producción de electricidad en las Centrales eléctricas donde una forma de energía primaria se convierte a electricidad. El voltaje generado normalmente de 6 a 40 kV.



-Transmisión: Igualmente llamada red troncal, se integra por líneas de transmisión y subestaciones de potencia de tensión de 400 kV a 230 kV, que son transportadas en grandes cantidades a distancias lejanas. Abastece al sistema de subtransmisión, así como algunos usuarios. Se encuentra en alta tensión.

-Subtransmisión: Maneja las tensiones de 138 kV, 115 kV y 69 kV, suministran energía a distribución de media tensión y a cargas conectadas a estos voltajes

-Distribución: En la red de distribución aérea o subterránea de primer nivel, la mayoría de las veces estamos comprometidos con el valor de la estandarización, los materiales y equipos estandarizados, teniendo en cuenta el ahorro de la cantidad de materiales y equipos (es decir, el diseño a medida de la red) costosos. En el contexto de la estandarización, el cálculo y la planificación de la red se puede simplificar, por ejemplo, la tensión utilizada para la red trifásica es: 6,6 kV, 13,8 kV, 23 kV, 34,5 kV. Se encuentra en media tensión mayores de 1 kV al igual que subtransmisión.

Equipo de protección necesario para la interconexión de subestaciones y las partes de las líneas conectadas a ellas debe cumplir con la normativa del proyecto y ser aprobada por el proveedor, Según las siguientes normativas:

- NRF-041-CFE Esquemas Normalizados de Protección para Líneas de Transmisión.
- Especificación CFE G0000-81 Características Técnicas para Relevadores de Protección.
- LAPEM-05L Listado de Relevadores Aprobados.
- Especificación CFE V6700-62 Tableros de Protección, Control y Medición para Subestaciones



- Eléctricas.
  - Especificación CFE G0000-62 Esquemas Normalizados para Protección de Transformadores de
- Potencia.
  - Especificación CFE-GAHRO-89 Registradores Digitales de Disturbio para Sistemas Eléctricos [38]



## CAPÍTULO III Modelado de la planta fotovoltaica

En Ingeniería de Potencia es necesario realizar cálculos, técnicos, científicos es trascendente ya que se integran diferentes operaciones para conseguir un objetivo en particular.

Realizar un modelado en Ingeniería es necesario ya que va más allá de aplicar ecuaciones que proyecten resultados para la predicción de un comportamiento ya que los softwares en ingeniería integran diferentes cálculos, visualizaciones y variantes que permiten construir y simular diferentes modelos mediante diagramas de bloques su comportamiento se define mediante operaciones matemáticas, señales y funciones. Así que se puede analizar y observar el comportamiento de un modelo.

### 3.1 ETAP

El ETAP un software usado como herramienta de análisis y control para la simulación, control y operación sistemas eléctrico de potencia en todos sus niveles. En software es usado por ingenieros, docentes y técnicos para diseños eléctricos, seguimiento de sistemas de energía, potencia, redes AC o DC, flujos de potencia, entre otros, para diseñar y operar sistemas eléctricos.

En el software existe una opción de ETAP Real- time, en donde se usan datos en tiempo real para plasmar estudios de sistemas de potencia y evaluación de eventos.

El modelado de la planta fotovoltaica se realizará con el software ETAP, para analizar:

- El impacto de una planta fotovoltaica al ser interconectada a una red eléctrica bajo la condición de sol y temperatura.
- Desarrollo de la simulación de las curvas características de los paneles fotovoltaicos usados en esa red.
- La potencia máxima admisible en la penetración fotovoltaica en la red.



- Los flujos de potencia y perfiles de voltaje del sistema en estado estacionario en diferentes estaciones del año, sobre el área de localización de la planta fotovoltaica modelada.

### 3.2.1 Modulo fotovoltaico

Para determinar el tipo de panel solar, que se ocupara paneles de silicio policristalino porque son de mejor rendimiento en eficiencia, calidad y tiempo de vida útil. Este tipo de paneles deben ser fáciles de obtener y buena calidad cumpliendo con las pruebas de funcionamiento como IEC61215, IEC61730, UL1730, IEC61701, IEC62716 y pruebas en ISO 9001: Sistema de manejo de calidad, ISO 14001: Sistema de gestión ambiental, ISO 14064: Verificación de emisiones de gases de efecto invernadero y OHSAS 18001: Sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional.

El módulo fotovoltaico que se recomienda por sus características STD (estándar) se tomara los paneles TALLMAX TSM-340-PD14 (tabla 3.1) tipo silicio policristalinos.

<b>Fabricante Panel</b>	Trina Solar
Modelo Panel	TSM-340 PD14
<b>Datos Eléctricos STC</b>	
Máxima Potencia de Voltaje $V_{MPP}$ [V]	37.79
Potencia pico Watts $P_{MAX}$ [(W_p) ]	340
Máxima Potencia de corriente $I_{sc}$ [A]	8.84
Eficiencia del Panel FV $\eta_m$ [%]	17,18
STC: Irradiación 1000 W/m <sup>2</sup> . Temperatura en celdas 25°C. Masa de aire AM1.5	
*Tolerancia de medición +-3%	
<b>Datos Eléctricos NOCT</b>	
Máxima Potencia $P_{MAX}$ [Wp]	250
Máxima Potencia de Voltaje $U_{MPP}$ [V]	34
Máxima Potencia de Corriente $I_{MPP}$ [A]	7.21
NOCT: Irradiación 800 W/m <sup>2</sup> . Temperatura ambiente 20C. Vel. Viento 1 m/s.	



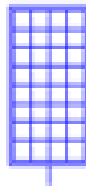
<b>Datos Mecánicos</b>	
Área total [m <sup>2</sup> ]	19,443
Tecnología	Policristalino
Número de celdas	72

*Tabla 3.1 DATOS DE FABRICA DE PANEL FOTOVOLTAICO*

### **3.2.2 Modelado del módulo fotovoltaico**

El software ETAP proporciona a los usuarios modelar módulos preestablecidos o modelar manualmente el módulo (figura 3.1) a utilizar para simular su funcionamiento en el sistema eléctrico, es necesario agregar parámetros básicos de tabla como el tipo de panel, temperatura nominal de operación, entre otros; esto se encuentra en la hoja de datos del proveedor.

PVA



*Figura 3.1 MODELADO DE FOTOVOLTAICO DE ETAP*

Para el modelado resulta de las curvas y datos obtenidos del panel fotovoltaico que se utilizara y estos son acumulados estadísticamente para un mejor comportamiento característico de los paneles, determinadas por la potencia pico de los paneles, dado los datos del proveedor.

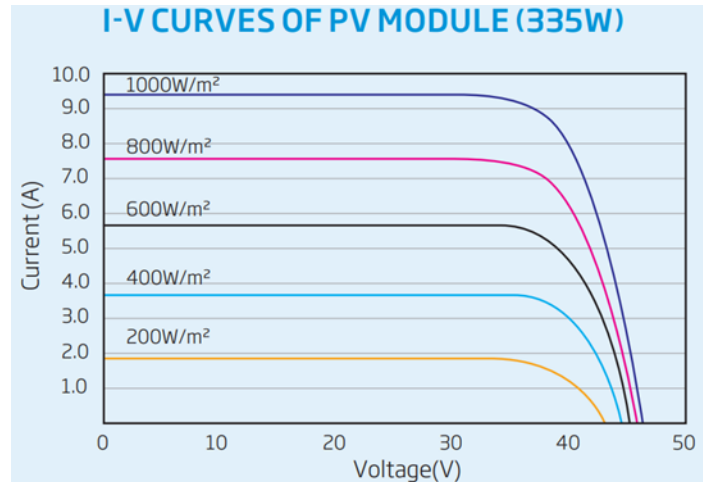


Figura 3.2 CURVA VI DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO

Se observa la curva experimental de potencia eléctrica contra la de tensión eléctrica que se muestra en las características del panel.

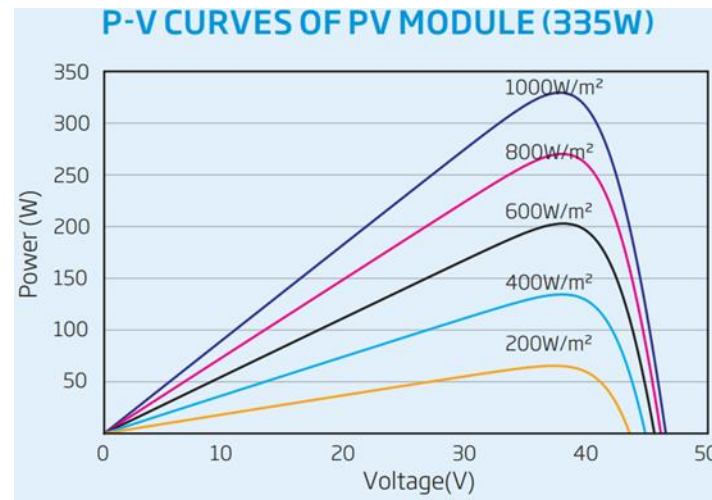


Figura 3.3 CURVA PV DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO

La curva I-V (figura 3.2) características a diferentes niveles de irradiación y temperaturas, lo que permite el análisis en diferentes momentos. En ETAP se definirán la curva de voltaje de potencia (P-V), como se ve en la curva de la figura 3.3.

En la figura 3.4 podemos observar como se agrega las características de un módulo fotovoltaico en el software ETAP.

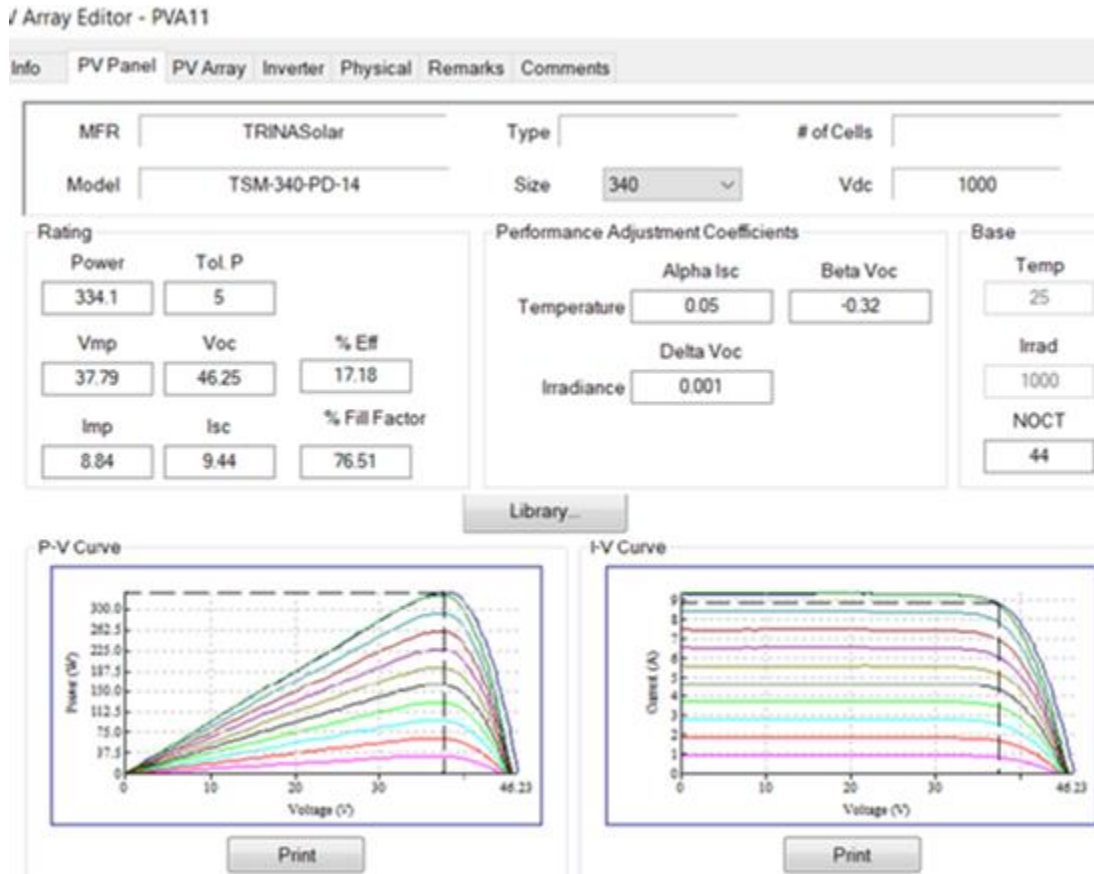


Figura 3.4 CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO EN ETAP

### 3.3.1. Modulo del inversor

Para determinar el tipo de inversor se ocupará inversor en BT, por su rendimiento en eficiencia y calidad con los módulos seleccionados en las cadenas y su mejor eficiencia; se selecciona el modelo Sun2000-100KTL-M1 de HUAWEI (Tabla 3.2), el cual cumple con las pruebas.

Este tipo de paneles deben ser fáciles de obtener y buena calidad cumpliendo con las pruebas de funcionamiento como IEC61215, IEC61730, UL1730, IEC61701, IEC62716 y pruebas en ISO 9001: Sistema de manejo de calidad, ISO 14001: Sistema de gestión ambiental, ISO 14064: Verificación de emisiones de gases de efecto invernadero y OHSAS 18001: Sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional.



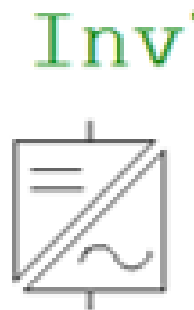


<b>Fabricante Inversor</b>	HUAWEI
Modelo Panel	SUN2000-100KTL-M1
<b>Datos eléctricos Entrada</b>	
Máxima Voltaje entrada [V]	1,100
Máxima Potencia de Corriente MPPT [A]	26
Voltaje inicio	200
Eficiencia Máxima [%]	90
<b>Datos eléctricos Salida</b>	
Potencia Activa Nominal AC [kW]	100
Potencia Aparente Máxima AC [KVA]	110
Voltaje Nominal de salida [V]	400
Rango de Frecuencia [Hz]	60

*Tabla 3.2 DATOS DE FABRICA DE INVERSOR*

### 3.3.2 Modelado de inversor

El software ETAP proporciona a los usuarios el modelado de inversores preestablecidos o modelado manual para simular su funcionamiento en el sistema eléctrico, como se ve en la figura 3.5. Se deben agregar parámetros básicos del inversor como tipo de inversor, eficiencia, tensión en DC y AC, etc.



*Figura 3.5 MODELADO DEL INVERSOR DE ETAP*

Los módulos de la generación de los paneles fotovoltaicos de corriente directa durante el día que serán 400 V, el cual estará formada por 35 centros de inversión- transformación de 2,200 MWn



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**“MODELADO Y ANÁLISIS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS A LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN”**

conectadas a 70 inversores centrales de 1,100 kW potencia nominal (cada inversor con 60 seguidores), se observa en la figura 3.6.

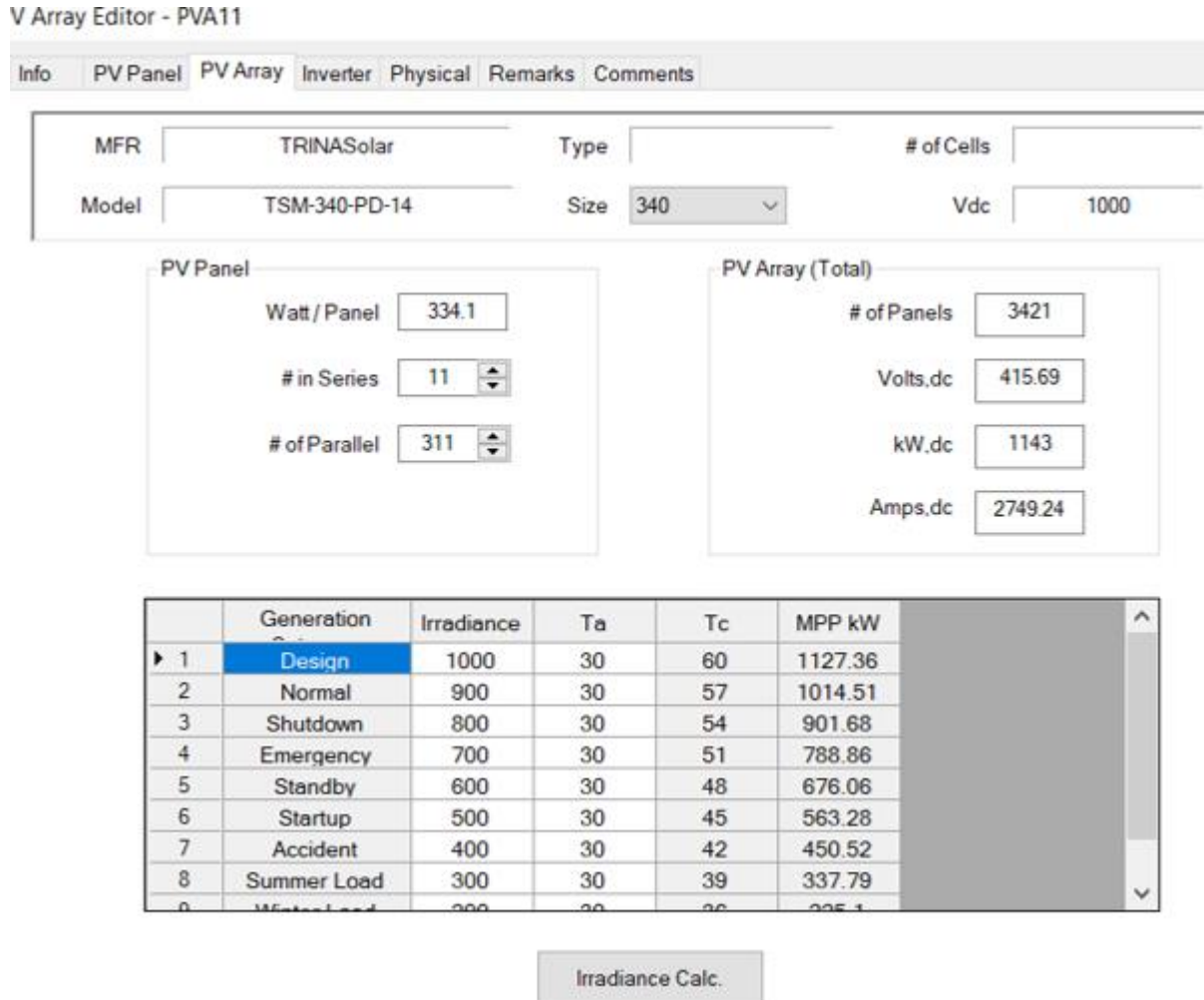


Figura 3.6 CARACTERÍSTICAS DEL INVERSOR EN ETAP

Se observa en la figura 3.6 una corriente nominal de 2749.24 A, tensión de operación de 415.69 DC y potencia nominal de 1143 kW en DC. Estos valores son aceptables ya que están por debajo de los valores máximos de entrada al inversor.

El inversor está preparado para ser instalado en instalaciones conectadas a la red para que el panel reciba el consumo de radiación solar durante el día.



### 3.4.1 Modulo del transformador

Al definir los inversores se debe ocupar un transformador adecuado para el proyecto el que es tipo trifásico en operación radial, conexión delta estrella (Tabla 3.3) y con un doble devanado en baja tensión (Tabla 3.4). También se ocupará un transformador trifásico reductor de tensión con neutro accesible en el secundario con refrigeración de aceite natural.

<b>Fabricante Transformador</b>	<b>SHENTAI</b>
Fase	3
Alto Voltaje	34.5 kV hasta 115 kV
Bajo Voltaje	34.5 kV a .266 kV
Enfriamiento	ONAN o FA1/FA2
Frecuencia	60 Hz
Capacidad Nominal	10 kVA a 20 MVA
Simbología de conexión	Delta Estrella

*Tabla 3.3 DATOS DE FABRICA DE TRANSFORMADOR CON DOBLE DEVANADO*

<b>Fabricante Transformador</b>	<b>Zhongyi</b>
Modelo Transformador	S9/ S10
Fase	3
Estructura de la bobina	Toroidal
Alto Voltaje	10 kV hasta 35 kV
Bajo Voltaje	10 kV a 0.4 kV
Enfriamiento	Sumergido en Aceite
Frecuencia	60 Hz
Capacidad Nominal	10 kVA a 20 MVA
Simbología de conexión	Yd11 YNd11 Dyn11

*Tabla 3.4 DATOS DE FABRICA DE TRANSFORMADOR CON TRES DEVANADOS*



### 3.4.2 Modelado del transformador

En ETAP se modela ese modulo manualmente, donde se agregan parameros de impedancia, disparo, etc. En el cual podremos encontrar transformadores de 3 devanados (figura 3.7) y de 2 devanados (figura3.8).

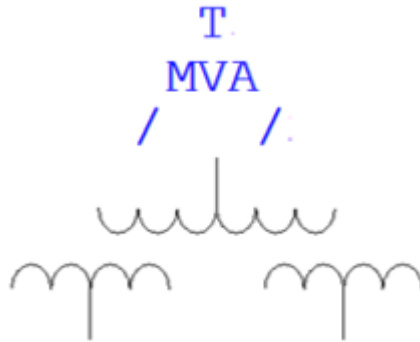


Figura 3.7 MODELADO DE TRANSFORMADOR DE 3 DEVANADOS

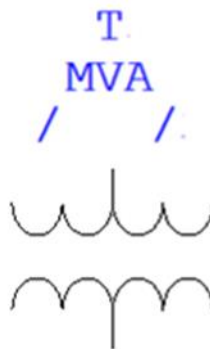


Figura 3.8 MODELADO DE TRANSFORMADOR DE 2 DEVANADOS

La Planta Fotovoltaica está formada por una salida de corriente alterna de los 2 inversores de 1100 kW se dirigirán a un transformador de 2500, que transforma la tensión de salida del inversor de 0.4 kV a una tensión más próxima a la tensión de conexión a la red de distribución, en este caso 34.5 kV, como se observa en la figura 3.9. Con por 70 inversores de 1100 kW de potencia nominal. Los inversores de 1100 kW se conectan a transformadores de (BT/BT/MT) de 2,500 kVA.



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**“MODELADO Y ANÁLISIS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS A LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN”**

-Winding Transformer Editor - T6

Info	Rating	Impedance	Tap	Grounding	Protection	Harmonic	Reliability	Remarks	Comment	
2.5 2.5 2.5 MVA								34.5	0.4	0.4 kV

Rating					Connected Bus	
	kV	MVA	Max MVA	FLA	Nom. kV	
Prim.	34.5	2.5	2.5	41.84	34.5	
Sec.	0.4	2.5	2.5	3608	0.4	
Ter.	0.4	2.5	2.5	3608	0.4	

Figura 3.9 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR DE 3 DEVANADOS

Transformador trifásico reductor de tensión primaria 115 kV y tensión secundaria 34.5 kV y 34.5 kV en vacío (B1 y B2), figura 3.10.

Winding Transformer Editor - 115 KV/34.5KV

Info	Rating	Impedance	Tap	Grounding	Sizing	Protection	Harmonic	Reliability	Remarks	Comment
80 MVA ANSI Liquid-Fill Other 65 C									34.5	115 kV

Voltage Rating				Z Base	
	kV	FLA	Bus kVnom	MVA	
Prim.	34.5	1339	34.5	80	
Sec.	115	401.6	115		
Other 65					

Power Rating		Alert - Max	
	MVA	MVA	
Rated	80	6.25	
Other 65		<input type="radio"/> Derated MVA	
Derated	80	<input checked="" type="radio"/> User-Defined	

Installation	
Altitude	Ambient Temp.
3300 ft	30 °C

MFR

Type / Class			
Type	Sub Type	Class	Temp. Rise
Liquid-Fill	Other	Other	65

Figura 3.10 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR DE 2 DEVANADOS



### **3.5.1 Modulo del bus**

Consiste en un sistema trifásico que básicamente opera a voltaje constante.

### **3.5.2 Modelado del módulo**

El software ETAP proporciona a los usuarios modelar nodos (Figura 3.11) o buses manualmente en su funcionamiento en el sistema eléctrico, es necesario agregar parámetros básicos. Se modela el bus tomando como dispositivos de conmutación, una central de conmutación o cualquier punto entre dispositivos de tipo derivación.

Bus'  
kV



*Figura 3.11 MODELADO DE BUS*

Se conectará a un bus de 34.5 kV (figura 3.12) para posteriormente conectarse a un transformador de 115 kV/34.5 kV en el cual se conecta a un bus de 115 kV (figura 3.13) es donde se conectará al Sistema Eléctrico.



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**“MODELADO Y ANÁLISIS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS A LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN”**

Bus Editor - Bus8

Reliability		Remarks			Comment		
Info	Phase V	Load	Motor/Gen	Rating	Arc Flash	Protection	Harmonic

34.5 kV 0 Amps Asymmetrical 0 kA

Info

ID Bus8

Nominal kV 34.5

Revision Data

Base

Bus Voltage

	% V	kV	Angle
Initial	100	34.5	0
Operating	0	0	0

Condition

Service  In  Out

State As-built

Figura 3.12 BUS 34.5kV

Bus Editor - Bus73

Reliability		Remarks			Comment		
Info	Phase V	Load	Motor/Gen	Rating	Arc Flash	Protection	Harmonic

115 kV 0 Amps Asymmetrical 0 kA

Info

ID Bus73

Nominal kV 115

Revision Data

Base

Bus Voltage

	% V	kV	Angle
Initial	100	115	0
Operating	0	0	0

Condition

Service  In  Out

State As-built

Figura 3.13 BUS 11.5kV



## **CAPÍTULO IV Procedimiento para la Interconexión de la planta fotovoltaica**

El aumento en México en la tasa de penetración de las energías renovables se debe en parte en la energía fotovoltaica, en el sistema eléctrico de muchos países y regiones, el cual ha estado sujeta a los requisitos establecidos en esta resolución y se ha operado de acuerdo con la seguridad, confiabilidad y economía especificada en la normativa vigente. Sin embargo, el código de red está diseñado para sistemas generación síncrona. Debido a su naturaleza asincrónica, su variabilidad y su dependencia del clima, la normativa no cubre tecnologías de generación de energía como la solar fotovoltaica.

La interconexión se debe explicar en detalle los requisitos técnicos específicos que forman parte del código de red para conectar este tipo de parques, proporciona al operador Sistema de transmisión que sea exitosa, como es una energía intermitente puede proporcionar problemas en la operación de la red.

La fuente de energía puede estar compuesta por una o más unidades generadoras de energía con diferentes capacidades, por lo que cuando el valor efectivo de la tensión en la fuente de alimentación cambia repentinamente, cuando cambia la amplitud de la tensión, nos enfrentaremos a un cambio de tensión. La fuente de alimentación, en este caso, utilizaremos para alta tensión de 69 kV a 400 kV. La amplitud y la duración son parámetros característicos, por lo que se utilizan como referencias a la hora de agrupar las distintas distorsiones que podemos encontrar.

Para conectar un proyecto de generación de energía a un SIN se debe la metodología, que describe los pasos a seguir ante la planta generadora y el operador de red o transmisor nacional. Un estudio de conexión que demuestra la calidad, seguridad y confiabilidad del sistema y el funcionamiento económico pueden garantizarse mediante la conexión de nuevos generadores eléctrico. El centro de registro de proyectos de generación de energía se divide en la siguiente tabla:





**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**“MODELADO Y ANÁLISIS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS A LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN”**

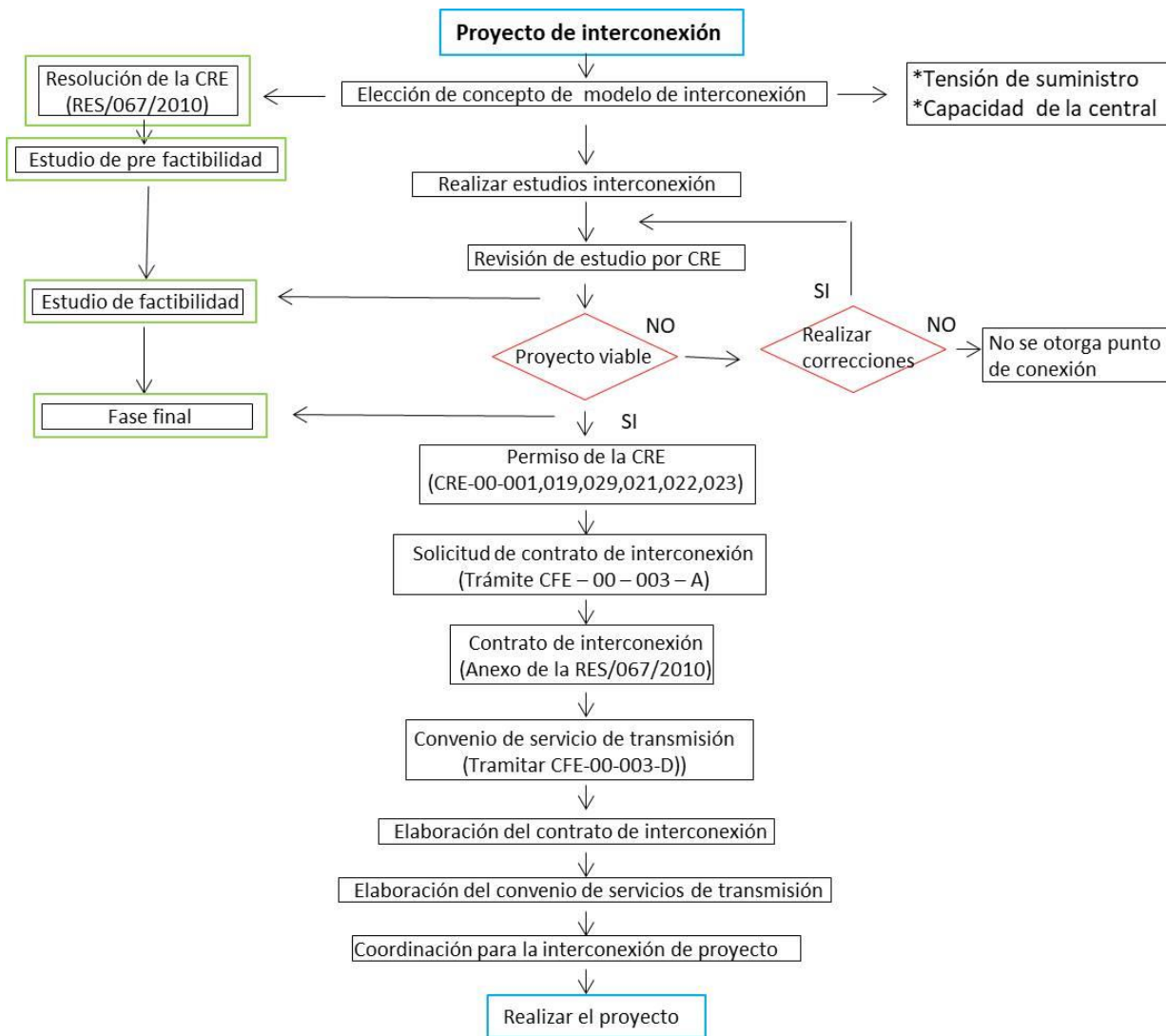


Figura 4.1 PROCESO DE REGISTRO DE PROYECTOS DE ENERGIA EN MEXICO [39]

Una vez que la entidad de transporte haya emitido el concepto de viabilidad, se enviará al CENACE junto con una copia de la investigación para obtener el concepto de conexión.

#### 4.1 Impacto de la interconexión de fuentes renovables en la red

Al incorporar energías renovables en el estudio de generación de energía Sistema eléctrico, es necesario analizar el impacto de generación que tiene con la red, ya que tiene formas tanto



positivas como negativas, de igual manera los parámetros que deben tenerse en cuenta antes de la instalación para conocer la cantidad correcta de generación de energía a generar y la ubicación de la planta.

Algunos aspectos para tomar en cuenta del impacto en la interconexión de este tipo de fuentes de generación en la red son:

#### **4.1.1 Flujos de potencia**

Uno de los análisis más utilizados en sistema de potencia es el cálculo de carga o flujo de potencia. El cual nos ayuda a planificar, diseñar y verificar las operaciones de un sistema eléctrico de potencia.

Para entender los efectos de generación en los sistemas eléctricos de potencia se debe tener una operación exitosa en condiciones normales balanceados se requiere lo siguiente:

- La generación producida deberá abastecer la carga más las pérdidas.
- Las magnitudes de voltaje en las barras deben permanecer a sus valores nominales
- Los generadores deben permanecer en los límites especificados a la potencia real y reactiva
- Líneas de transmisión y transformadores no sobrecargados

Para flujos de potencia se calcula la magnitud de voltaje y el ángulo de cada bus en un sistema de potencia en condiciones balanceadas de estado estable. Una vez conocido el voltaje, se debe calcular los flujos de potencia real y activa en todas las líneas. Principalmente define las potencias activas, potencias reactivas y el vector de tensión en cada bus en el sistema.



El estudio de flujos de potencia es aplicar los cálculos de flujo de potencia a las variaciones de carga, configuración en la red y condiciones de generación en el sistema, también sirven para análisis de fallas.

La potencia reactiva está asociada al cambio oscilante de la energía almacenada en componentes capacitivos (cables, capacitores, etc.) e inductivos (motores, transformadores, etc.) en un sistema de potencia.

El generador síncrono produce potencia reactiva cuando es sobre magnetizado o consume potencia reactiva cuando es bajo magnetizado. El control de voltaje es efectuado en el generador al controlar su nivel de magnetización y en la producción de potencia reactiva.

La potencia activa transferida está en función del valor de voltaje y el desfase, normalmente se hace desde un punto de voltaje mayor a uno menor, pero no puede ser transmitida a grandes distancias, por lo que se requiere un gradiente alto de tensión. En los nodos no debe tener una desviación tan significativa con el voltaje nominal, si no es así produce un funcionamiento inadecuado del sistema de potencia.

Para disminuir las pérdidas de energía es fundamental mantener las corrientes reactivas bajas y eso se obtiene al compensar el consumo de reactivos al instalar capacitores lo más cerca de las cargas inductivas. Las corrientes de reactivos en cargas inductivas son causas principales de inestabilidad de voltaje en la red debido a las caídas asociadas a la potencia en las líneas de transmisión. De igual modo, los bancos de capacitores instalados localmente atenúan esta tendencia e incrementan la estabilidad de voltaje en el punto de instalación.



#### **4.1.2 Requerimiento de Tensión**

Es muy importante y necesario controlar la tensión en los puntos de interconexión de la red:

- Considerando que los equipos de la instalación eléctrica y los componentes utilizados por el usuario están diseñados para funcionar dentro de un cierto rango de voltaje, el voltaje en el nodo debe mantenerse dentro de un rango aceptable. Si estos elementos funcionan fuera del rango determinado, puede afectar su funcionamiento.
- Si conseguimos mantener un buen nivel de tensión, mejoraremos la estabilidad del sistema.
- Si no podemos obtener una distribución de tensión estable, se generará un flujo de potencia reactiva que provocará una pérdida de línea por el llamado efecto Joule.

La planta de fotovoltaica debe tener la capacidad de proporcionar alta corriente reactiva durante una falla del SIN para soportar el voltaje en el punto de conexión. Podemos decir que para aumentar la tensión en el punto de interconexión es necesario inyectarle potencia reactiva, por el contrario, para reducir su tensión hay que extraer potencia reactiva. Esta es la razón por la que las expresiones "control de voltaje" y "control de potencia reactiva" a menudo se usan indistintamente.

Las plantas de energía fotovoltaica deben proporcionar el soporte dinámico necesario durante la caída de tensión para proporcionar corriente reactiva adicional en el punto de interconexión.

La carga del sistema eléctrico aumenta todos los días, por lo que la potencia reactiva también aumenta al igual el voltaje en el SEP se corrige.

#### **4.1.3 Variación de Frecuencia**

La importancia de mantener la frecuencia de la onda de voltaje dentro de los límites es esencial para proporcionar una fuente de energía con un nivel de calidad aceptable. El posible cambio del valor nominal puede provocar varios fallos en el equipo. Por un lado, el control de frecuencia debe



lograr un equilibrio entre la generación de energía y la demanda; por otro lado, debe mantener una frecuencia de referencia en el sistema. Otro aspecto que se debe cumplir son los compromisos de intercambio energético asumidos con las regiones vecinas. Con el aumento de las instalaciones de energía renovable conectadas a la red, los inversores buscan participar en la regulación primaria.

Analizar cuáles son los requisitos para las instalaciones para que puedan cumplir con los requisitos para conectar correctamente el equipo, que son:

- Variación de tensión, la instalación podrá resistir en el menor tiempo posible y no se desconectará de la red.
- Aumento y disminución de la potencia activa es una función de la desviación de la frecuencia de la unidad.

La energía debe poder operar frente a los cambios de frecuencia de acuerdo con los cambios de frecuencia, como se muestra en la tabla 4.1. La configuración de la hora la determinará el proveedor.

Rango de Frecuencia	Tiempo mínimo de ajuste
Mayor de 62 Hz	Disparo Instantáneo
De 57.5.7 Hz a 62 Hz	Operación continua
Menor de 57.5 HZ	Disparo Instantáneo

*Tabla 4.1 RANGOS DE VARIACION DE FRECUENCIA CON AJUSTE [39]*

#### **4.1.4 Calidad de energía**

La generación de fuentes renovables produce impactos en la calidad de energía debido a la introducción de armónicos por los bancos de capacitores o por los inversores que no presentan una buena señal senoidal en la salida. También variaciones en la tensión o en la frecuencia.

orden de los armónicos, pueden causar diferentes tipos de daños en la red eléctrica y equipos. Todos los armónicos de diferentes tipos de equipos eléctricos conducirán a un aumento



#### **4.1.4.1 Armónicos**

El armónico es un fenómeno relacionado con la distorsión de la onda fundamental. El voltaje de la red es puramente una onda sinusoidal en condiciones ideales. Dependiendo del orden de los armónicos, pueden causar diferentes tipos de daños en la red eléctrica y equipos. Todos los armónicos de diferentes tipos de equipos eléctricos conducirán a un aumento de la corriente. Y la impedancia del capacitor puede causar un sobrecalentamiento por lo que aumenta la frecuencia.

Se tienen sobretensiones transitorias por oscilación o no oscilatorias de pocos milisegundos. Que depende de su origen.

- Transitorias por fenómenos atmosféricos: Es exterior del sistema eléctrico y su fuente principal es la descarga atmosférica.
- Transitorias por maniobra: Es dentro el sistema eléctrico, en su mayoría son por diferentes maniobras.

El nivel de distorsión armónica se mide en el punto de interconexión, para evitar que le inversor y los equipos que están asociados a la central fotovoltaica inyecten armónicas al sistema eléctrico, se debe instalar un filtro de armónicos. El nivel de distorsión causado por a tensión de armónicas debe cumplir con las normas IEC 61400-3-6 e IEC 61400-21. De acuerdo con las normas IEC-61400-21 e IEC-61000-3-6, se describe el límite del nivel de armónicos en la tensión, expresado como porcentaje de la amplitud nominal de la tensión, recordando que el nivel de distorsión armónica total permitido es  $THD = 3\%$  en alta tensión. En la tabla 4.2 podremos ver los niveles de armónicos partiendo de la fundamental:



Orden de la armónica	Nivel de armónica (% de la tensión fundamental)
3	2.00
5	2.00
7	2.00
9	1.00
11	1.50
13	1.50
15	0.30
17	1.20
19	1.07
23	0.89
25	0.82
29	0.70
31	0.66
33	0.20
35	0.58
37	0.55
39	0.20
41	0.50
43	0.47
45	0.20
47	0.43
49	0.42

*Tabla 4.2 VALORES ARMONICOS IMPARES PARA ALTA TENSIÓN*

Para poder calcular la relación entre todas las componentes de las armónicas, es la siguiente formula:

$$THD = \sum_{n=2}^H \left( \frac{U_n}{U_1} \right)^2 \quad (4.1)$$



Donde:

Un: valor eficaz de la suma de todos los componentes armónicos de voltaje

H: orden especificado

U1: valor eficaz del componente.

#### **4.1.4.2 Variaciones periódicas de amplitud de la tensión**

Debido al efecto de parpadeo (Flicker) causado por las fluctuaciones de voltaje, las centrales fotovoltaicas pueden afectar la calidad del voltaje de la red de energía, que es el grado de molestia causado por los cambios en el brillo humano. La interconexión de centrales eléctricas en alta tensión no debe resultar en un solo nivel de emisión, que debe permanecer dentro del nivel de severidad establecido en la norma IEC 61000-3-7 (es decir, el nivel de severidad variable; podemos ver con detalle en la tabla 4.3).

Indicador	Límite
<b>EPsti</b>	0.35
<b>EPlti</b>	0.25

*Tabla 4.3 LIMITES DE EMISION PERMISIBLE*

Dónde:

Pst: indicador de cambio de voltaje a corto plazo, que evalúa la gravedad de los cambios periódicos en la amplitud del voltaje a corto plazo en un intervalo de observación de 10 minutos.

Plt: Indicador de cambio de voltaje a largo plazo, utilizado para evaluar la severidad de los cambios periódicos en la amplitud del voltaje a largo plazo El intervalo de observación es de 2 horas. Se calcula en base al valor continuo de Pst

Se encontrar una gran integración fotovoltaica su desconexión puede originar problemas en el balance P-f y Q-V.





## **4.2 Operación de la Fuente de Energía ante fallas externas o en el Punto de Interconexión**

El parque fotovoltaico debe tener la capacidad de permanecer conectado a la red en la caída brusca de tensión en una o más fases, de modo que caerá por debajo del valor de 85% de la tensión nominal, durante fallas transitorias externas durante un tiempo determinado; donde debe proporcionar la potencia reactiva y disminuir la potencia activa necesaria, podemos ver en la tabla 4.4 los tipos de falla y tiempos de duración. Una vez que se elimina la falla temporal, la planta fotovoltaica debe proporcionar energía activa y mantener la tasa de flujo de reactivo antes de la falla. La tensión residual y la profundidad de la caída de la tensión mínima durante la caída de tensión será la diferencia entre el valor de la tensión nominal y la tensión residual. Como muestra en la siguiente tabla los tiempos máximos en lo que dura las diferentes fallas en el punto de interconexión.

<b>Punto de interconexión a nivel de 69 kV a 161 kV</b>	
<b>Fallas Transitorias Tipo de Falla</b>	<b>Tiempo máximo de duración de Falla (milisegundos)</b>
Falla Trifásica a tierra	150
Bifásica con o sin conexión a tierra	150
Monofásica a tierra	150

*Tabla 4.4 TIPOS DE FALLA Y TIEMPOS DE DURACION DE FALLA*

Después de la resolución de la falla, la planta debe proporcionar energía activa de acuerdo con las condiciones de funcionamiento actuales. Dentro de 1 segundo después de que ocurra la falla, el sistema eléctrico se debe recuperar al 80% del voltaje, y todos los componentes conectados al sistema. Posterior de alcanzar una amplitud de 0,95 pu en un tiempo igual o inferior a 500 ms, se debe restaurar al menos 0,9 pu de la amplitud de la potencia activa generada inmediatamente antes

del fallo. Si la falla se origina en el interior de la planta fotovoltaica, debe desconectarse del sistema inmediatamente, como se puede ver en la figura 4.2.

El hueco de tensión incluye efectos de falla en el punto de interconexión y externas que soporta la planta en el rango de tensiones de 69 kV a 400 kV sin desconectarse en la red, se muestra en la siguiente figura.

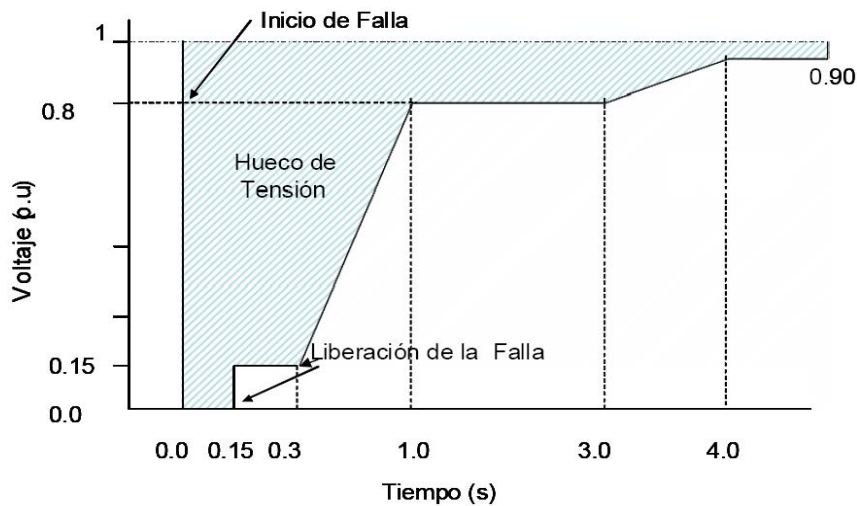


Figura 4.2 GRAFICA DE CAÍDA DE TENSIÓN

Cuando ocurren dos fallas consecutivas (monofásica, bifásica, trifásica o alguna combinación), la fuente de alimentación debe permanecer conectada al sistema. Afectan a los equipos electrónicos, porque en los sistemas eléctricos los equipos son sensibles a las caídas de voltaje, como los componentes quipos de control. En caso de falla del sistema, mientras no se libere la falla, se debe minimizar el consumo de energía activa de la planta fotovoltaica.

### 4.3 Equipo de protección y medición

En plantas fotovoltaicos que se deseen interconectar a la red serán participados por diferentes proveedores que esos a su vez deberán cumplir con diferentes normas en los dispositivos a ocupar, el cual debe de cumplir con todos los estándares del Código de Red el cual es la resolución por la Comisión Reguladora de Energía que emitirá las reglas de Interconexión en la red.



Los requerimientos en el código de Red estipula que, para conexiones de Baja Tensión en estado permanente inferior a 1 kV, la fuente de alimentación debe ser operada y mantenida conectada, y no excede + 5% a - 10% de la tensión nominal del punto de interconexión.

Para Media Tensión superior a 1 kV y en el caso de menor a 69 kV deben permanecer conectados de la misma forma que en el caso de Baja Tensión, y el rango de tensión nominal es el mismo.

Los requisitos para la interconexión de Alta Tensión pueden estar compuesto por uno o varias unidades generadoras, como se muestra en el código de red, pueden estar interconectados con una tensión de 69 a 400 kV, en estado permanente según la norma NMX- J-098 ANCE 1999, el tipo de fuente de alimentación debe poder operar dentro del rango de + 5% a - 10% del voltaje nominal y mantener la conexión ante fluctuaciones.

Para el equipo de Los módulos los módulos fotovoltaicos, las normas aplicables son: UL 1703, UL 4703, IEC 61215 ED.2, IEC 61730. Del mismo modo, los postes pueden elegir el estándar NMX-J-618/1-ANCE.

Para los inversores, el estándar aplicable es UL-1741. Por motivos de seguridad PES, se debe cumplir la norma IEC 60364.

La verificación y prueba de sistemas fotovoltaicos debe ser para equipos y paneles de generación de energía, generalmente con referencia a las normas de instalación IEC 60364-6, especialmente IEC 60364-7-712.

Además, de acuerdo con el protocolo de prueba establecido por el proveedor, los equipos de comunicación, protección, señalización y medición se prueban en el punto de interconexión.



## **CAPÍTULO V** Simulador de la planta fotovoltaica

### **5.1** Introducción

Las centrales eléctricas pueden generar energía a través de diferentes tecnologías como son la fotovoltaica. La energía proveniente del sol es convertida en energía eléctrica usando las celdas solares que es entregada a la red de suministro eléctrico para que se conviertan en electricidad de generación. [39]

Una central de generación fotovoltaica conectada a la red está formada por: generador fotovoltaico que tiene un número determinado de módulos fotovoltaicos conectados en serie y paralelo, que se interconectan a un inversor y un transformador, permitiendo acoplar a la instalación en paralelo de la red eléctrica.

Para hacer un análisis de la aplicación de la energía renovable con generación fotovoltaica usaremos como punto de partida la planta fotovoltaica ubicada en Morelos, dicha planta se considera que tiene un excelente aprovechamiento de la energía solar lo que garantiza el óptimo funcionamiento del parque en materia de captación de la energía. Este parque esta interconectado al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) a través de una línea de transmisión que une a la subestación elevadora del parque con la Subestación Eléctrica Xoxocotla Maniobras.

### **5.2** Datos geográficos

La Plata Fotovoltaica Solar Xoxocotla (P.F.V. Solar Xoxocotla) está ubicada en el Municipio de Ayala, Estado de Morelos, aproximadamente a 7.5 km al Suroeste de la población de Ayala, entre la Av. José María Morelos y la Carretera Yautepec – Jojutla [6], como se observa en la figura 5.1.

Las coordenadas geográficas de referencia para su localización son:

18°45'22.658" de latitud norte (18.756294).

99°04'13.123" de longitud oeste (-99.070312).

1101 – 1,200 m s n.m. y una pendiente máxima de 10%

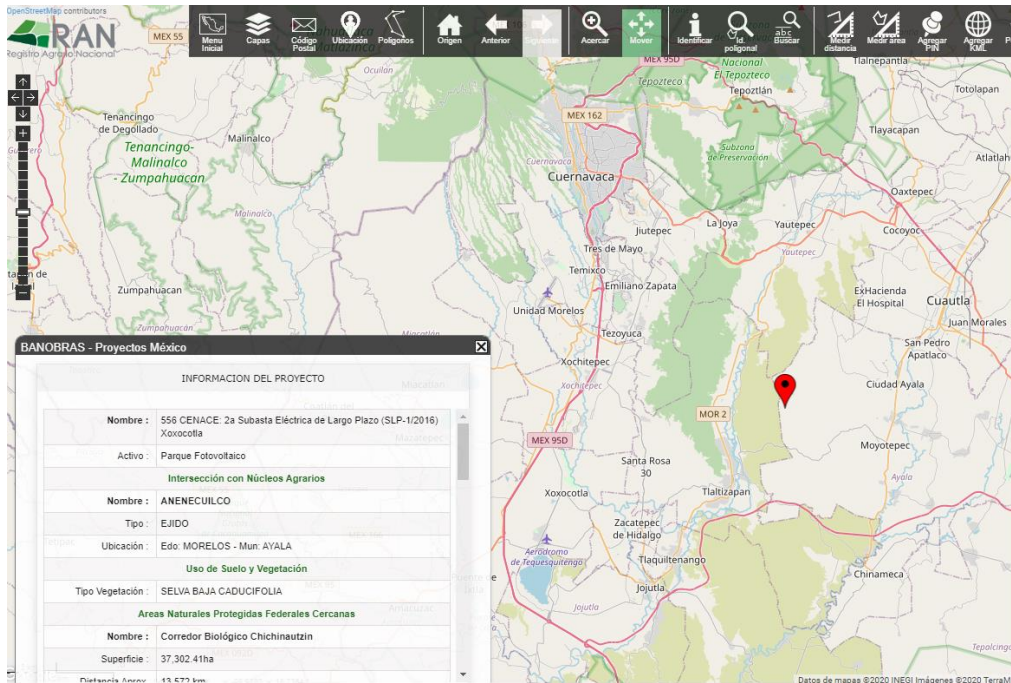
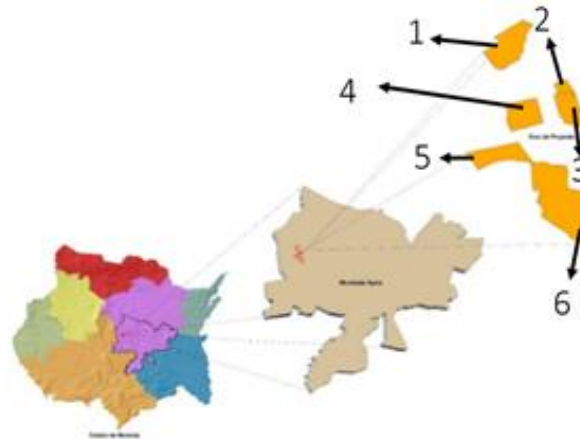


Figura 5.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA P.F.V. SOALR XOXOCOTLA [7]

Este proyecto se basa en el desarrollo del modelado para el diseño, construcción, equipamiento, instalación, operación y mantenimiento de la planta fotovoltaica Solar Xoxocotla que se interconecta a través de una línea de transmisión dentro del parque fotovoltaico, siendo esa línea la que se conecte con la Red Nacional de Transmisión de la CFE, la figura 5.2 muestra la ubicación de la central fotovoltaica a estudiar.



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**“MODELADO Y ANÁLISIS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS A LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN”**



*Figura 5.2 UBICACIÓN DE LA P.F.V. SOLAR XOXOCOTLA*

La superficie de la Planta Fotovoltaica Solar Xoxocotla es de 239.72 ha, en los que se encuentran divididos en (figura 5.1) 6 polígonos de terreno con una superficie de 75.625 ha. En la tabla 1, se muestra con detalle cada superficie:

Polígono	HA	M2	%
1	10.6440	106440.0	14.07
2	0.0050	50.0	0.01
3	0.3540	3540.0	0.47
4	0.0242	241.7	0.03
5	3.5530	35530.0	4.70
6	61.0451	610451.0	80.72
<b>TOTAL</b>	<b>75.6253</b>	<b>756252.7</b>	<b>100</b>

*Tabla 5.1 SUPERFICIE DE LOS TERRENOS DE LA P.F.V. SOLAR XOXOCOTLA*

La irradiación que tiene el proyecto durante el año 2020 lo podremos apreciar en la tabla 5.2.

Mes	Irradiación (kWh/m2)		Promedio diario de temperatura (°C)
	Óptimo	Normal	
Ene	197.92	196.85	19.3
Feb	189.53	187.83	19.4
Mar	216.42	210.24	20.1
Abr	209.25	199.07	23.6
May	193.78	152.09	21.3
Jun	181.21	155.91	20.4
Jul	199.01	183.87	20.3



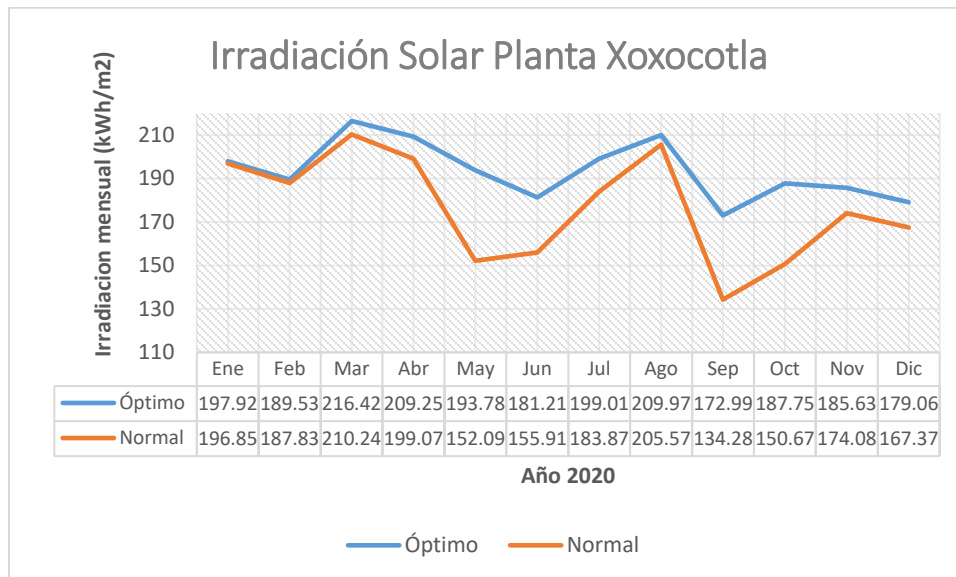
Ago	209.97	205.57	20.6
Sep	172.99	134.28	19.2
Oct	187.75	150.67	19.9
Nov	185.63	174.08	19.5
Dic	179.06	167.37	17.5

*Tabla 5.2 IRRADIACIÓN DE LA P.F.V SOLAR XOXOCOTLA EN AÑO 2020 [21]*

### 5.3 Parámetros de funcionamiento

En la Planta Fotovoltaica Solar Xoxocotla ocupan los paneles TALLMAX TSM-340-PD14 tipo silicio policristalinos.

En la superficie de la planta fotovoltaica entre mayor sea la radiación del lugar, es mayor la energía generada. Como se muestra en la figura 5.3, se observa la irradiación que se obtuvo en el año 2020 en el punto del proyecto y en la figura 5.4 podemos encontrar la irradiación en un día en el mes de julio, ya que este mes es representativo de la tendencia predominante.



*Figura 5.3 IRRADIACIÓN PROMEDIO MENSUAL DE LA P.F.V. SOLAR XOXOCOTLA [21]*



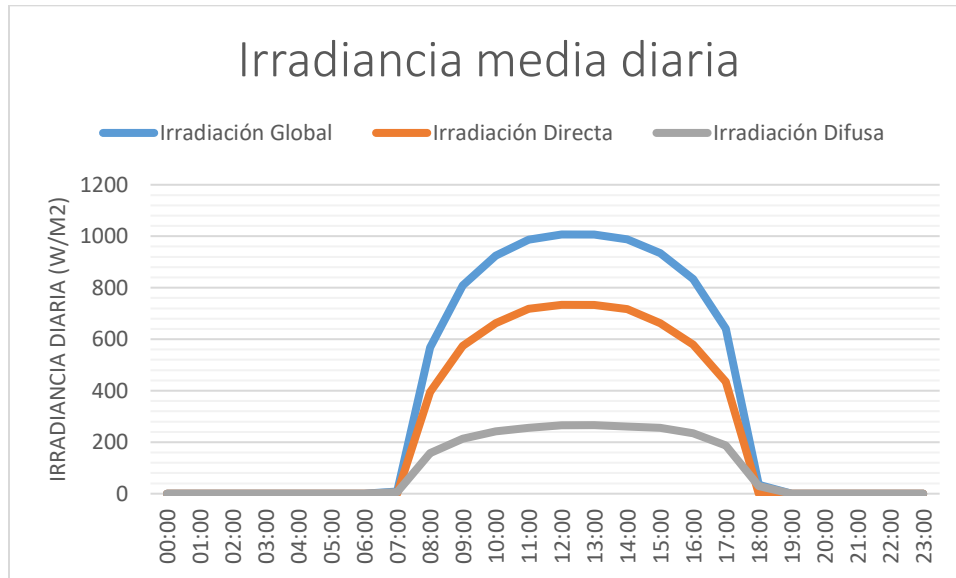


Figura 5.4 IRADIACIÓN DIARIA MES JULIO DE LA P.F.V. SOLAR XOXOCORLA [21]

Se instalarán aproximadamente 239,400 módulos policristalinos de  $340 W_p$  (Watts pico) cada uno, que estarán agrupados por 35 grupos de 120 seguidores (57 módulos por seguidor); y generarán una capacidad de  $81.396 MW_p$  en corriente directa en la Planta Fotovoltaica Solar Fotovoltaica y  $70 MW_n$  (esta última, será limitada mediante el Power Plant Controller en el Punto de Interconexión).

La figura 15 muestra un ejemplo de una instalación de este tipo, en la cual se puede apreciar el arreglo y disposición general del seguidor y las estructuras de los paneles solares o fotovoltaicos.



Figura 5.5 EJEMPLO DE UNA INSTALACION FOTOVOLTAICA CON EL SISTEMA DE SEGUIDORES SOLAR A 1 EJE HORIZONTAL





La planta se conectará a la red de subtransmisión del Sistema Nacional Eléctrico al seccionar una línea de tensión a 115 kV próxima a la ubicación del parque solar.

Es necesario realizar una elevación de esta por medio de un transformador de potencia trifásico de 85 MVA con enfriamiento por aceite mineral a tensión de entrada en 34.5 kV nominal y salida en 115 KV y en una frecuencia de 60 Hz, que contará con las características necesarias para la operación de la central de transformación.

#### **5.4 Análisis de flujo de potencia**

Para evaluar el comportamiento y rendimiento del sistema fotovoltaico en una Planta fotovoltaica, se requieren varios análisis que sin la ayuda del software ETAP sería muy complicado.

Los diferentes módulos proporcionados por ETAP permitirán evaluar el sistema de diferentes condiciones: carga máxima, carga mínima, entre otras cosas, permite la detección de posibles fallas potenciales y de igual modo nos dará una hoja de datos con reportes sobre los modelos del proyecto en el que se trabaja.

En el software ETAP se modela parte de la red a 115 kV de las zonas de carga Cuautla y Morelos, como muestra en la figura 5.6, donde las fuentes de energía son la S.E Zapata, S.E. Yautepec Potencia y P.F.V Solar Xoxocotla.

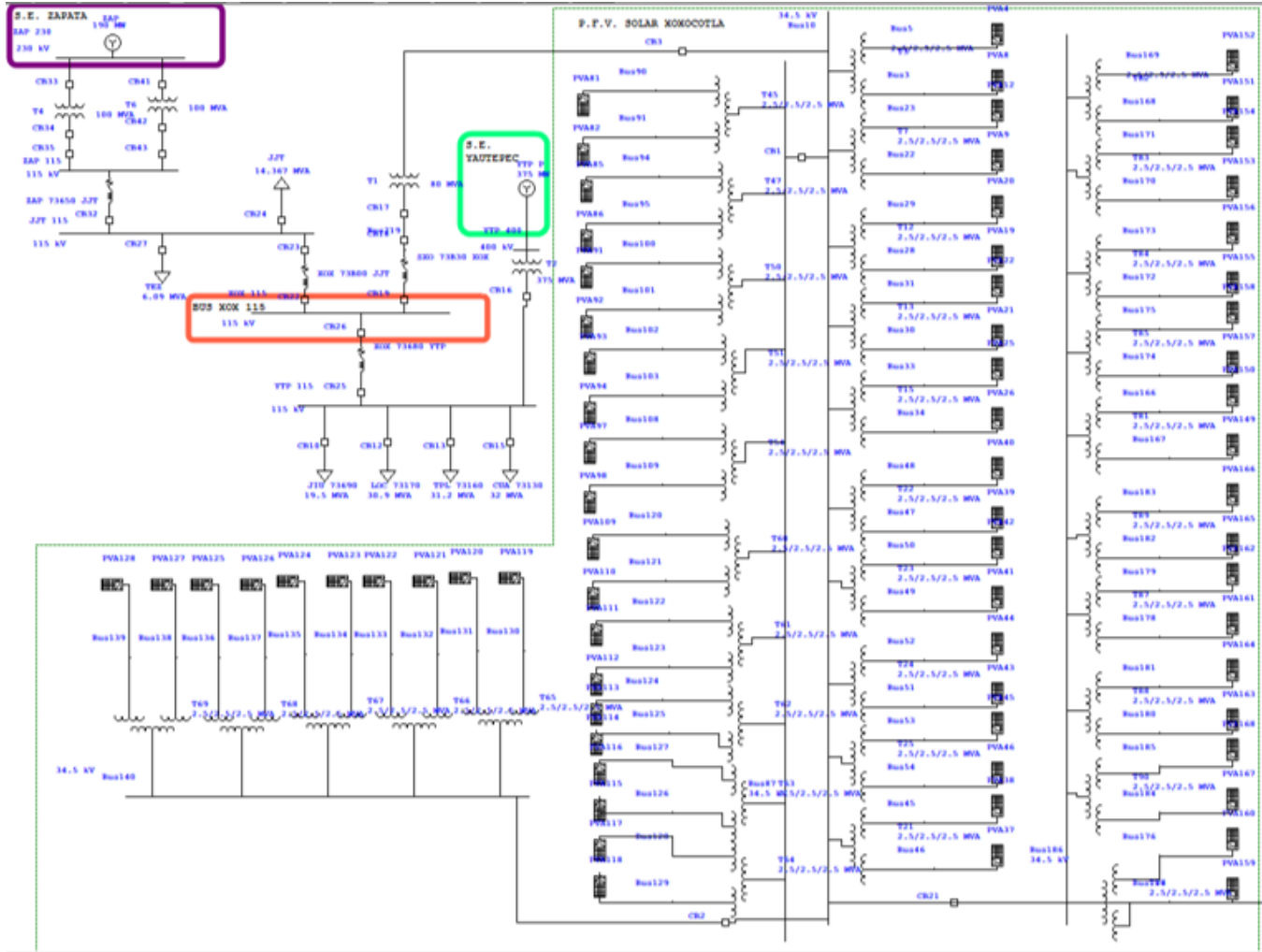


Figura 5.6 TOPOLOGÍA DE LA RED DE EN 115 KV, ZONA CUAUTLA - MORELOS

### 5.5 Estudio de flujo de cargas

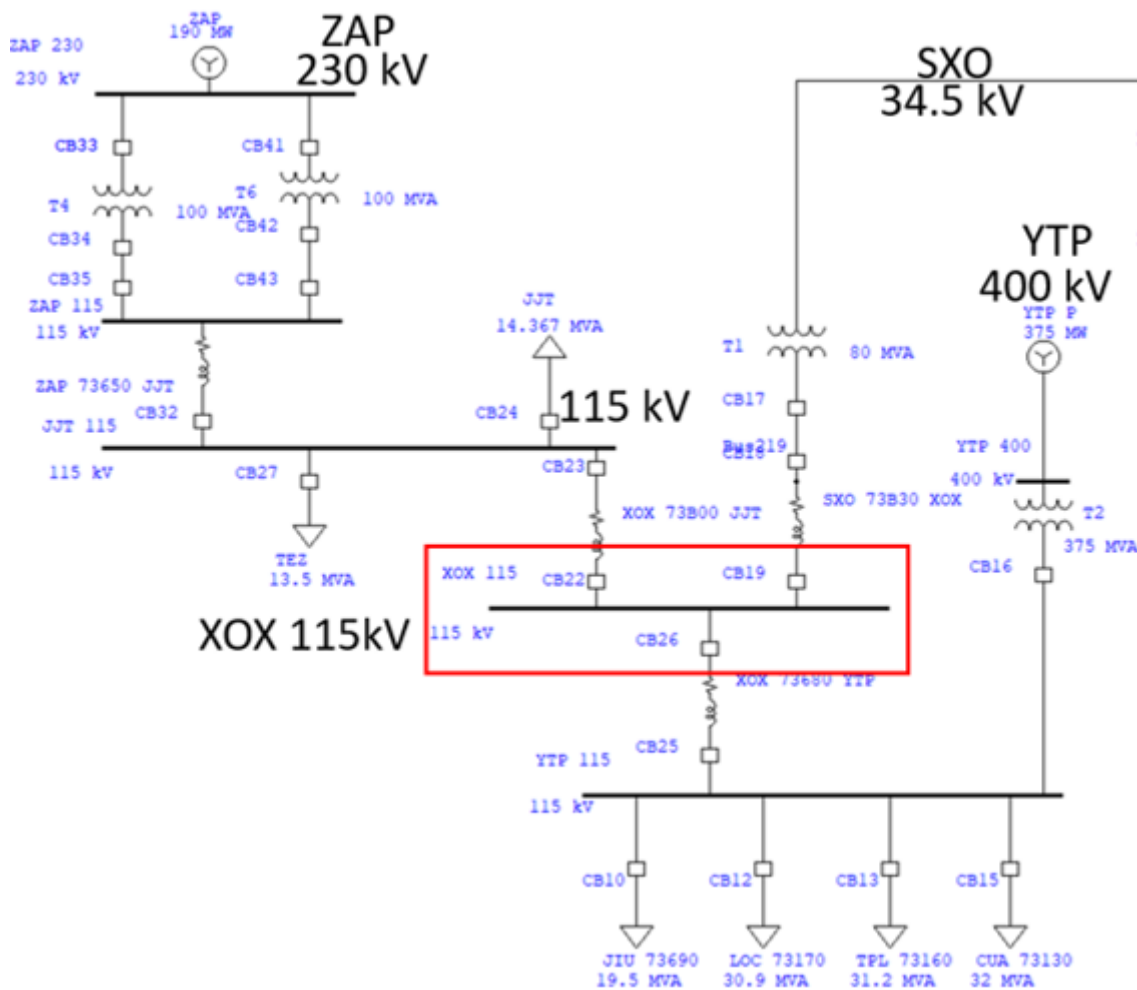
Para analizar este parque fotovoltaico es importante tomar en cuenta la variación de generación fotovoltaica, ya que no es constante conforme pasa el día y las estaciones del año. Se considera para el flujo de carga varios escenarios operativos: Sin la incorporación de la planta fotovoltaica, la planta entrando a en la mañana cuando se conecta a la red, cuando la planta está saliendo al final del día y cuando encontramos una falla en la S.E Zapata y tenemos que desconectar esa carga; con esto podremos



observar si se invierten flujos los flujos en alguna línea, si se mejora el perfil de voltaje en un bus o nodo y analizar que sucede con las potencias del sistema.

Con los flujos de potencia, se evaluará la mejora con el sistema interconectado.

En la figura 5.7 podemos observar el punto de interconexión de las fuentes de energía, el cual se va a analizar.



*Figura 5.7 PUNTO DE INTERCONEXIÓN DE 115 KV*

### 5.5.1. Flujo de carga en funcionamiento normal sin conectar la Planta Fotovoltaica

En la figura 5.8 podemos observar la introducción de la planta fotovoltaica en condiciones normales con demanda máxima promedio.

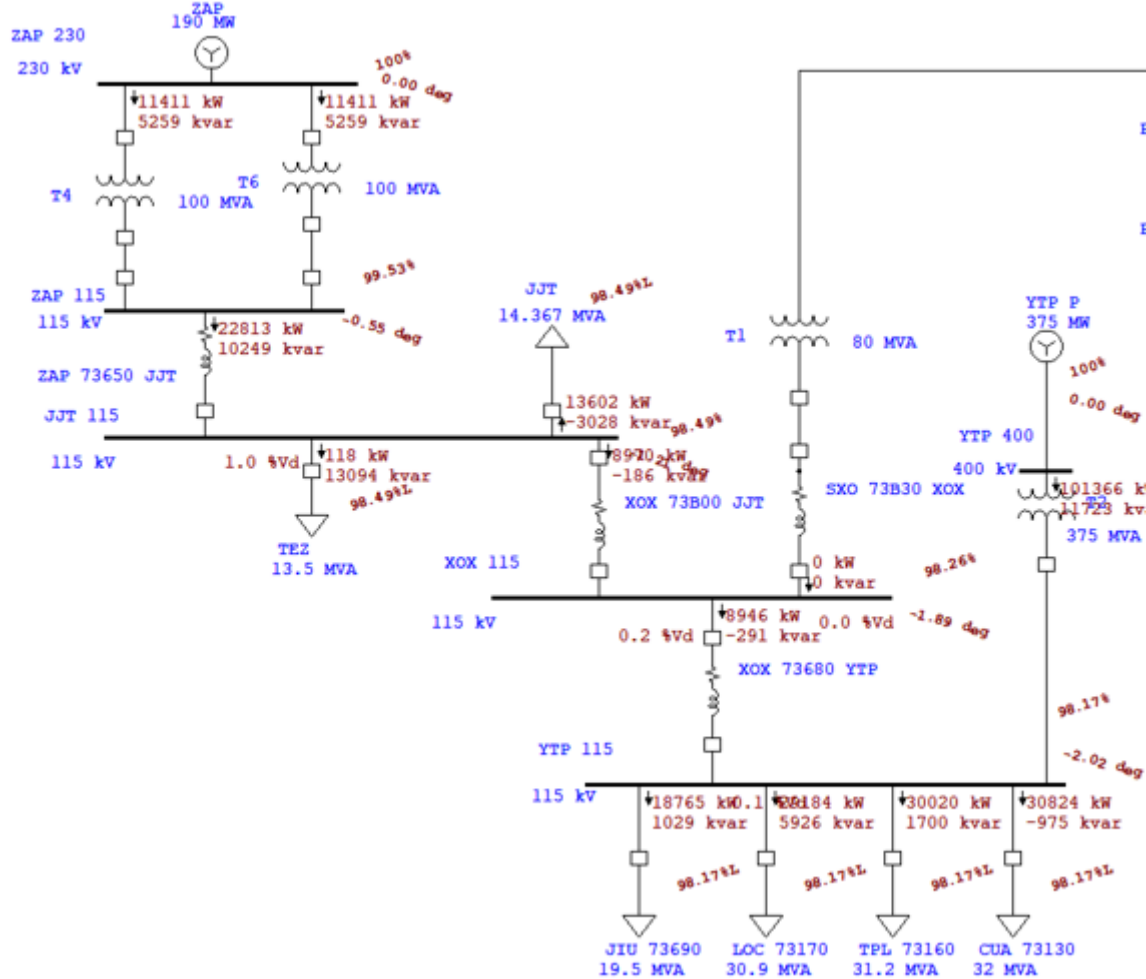


Figura 5.8 FLUJO DE CARGA DE LA ZONA CUAUTLA-MORELOS SIN P.F.V. SOLAR XOXOCOTLA

Nodos Principales	Voltaje		P. Activa MW	P. Reactiva MVAR
	kV	p.u.		
ZAP 115	115	0.99	22.8	10.3
JJT 115	115	0.98	22.7	9.9
XOX 115	115	0.98	8.9	-0.3
YTP 115	115	0.98	109.1	7.702

Tabla 5.3 REPORTE DE DATOS DE BARRAS ANALIZAR DE LA ZONA CUAUTLA-MORELOS EN AÑO 2020



Podemos observar en la tabla 5.3 los flujos de potencia que se encuentran en esa zona sin la incorporación de la planta solar, donde podemos observar que se encuentran las cargas balanceadas.

### 5.5.2 Flujo de carga con sistema fotovoltaico en condiciones normales

En la inserción de la planta fotovoltaica en condiciones normales, como se aprecia en la figura 5.9, en un horario de 12:00 p.m. con su punto de irradiancia  $1000 \text{ W/m}^2$ , en el caso con demanda normal promedio, con un  $\text{f.p} = .9$ , a la red de 115 kV en el bus XOX 115.

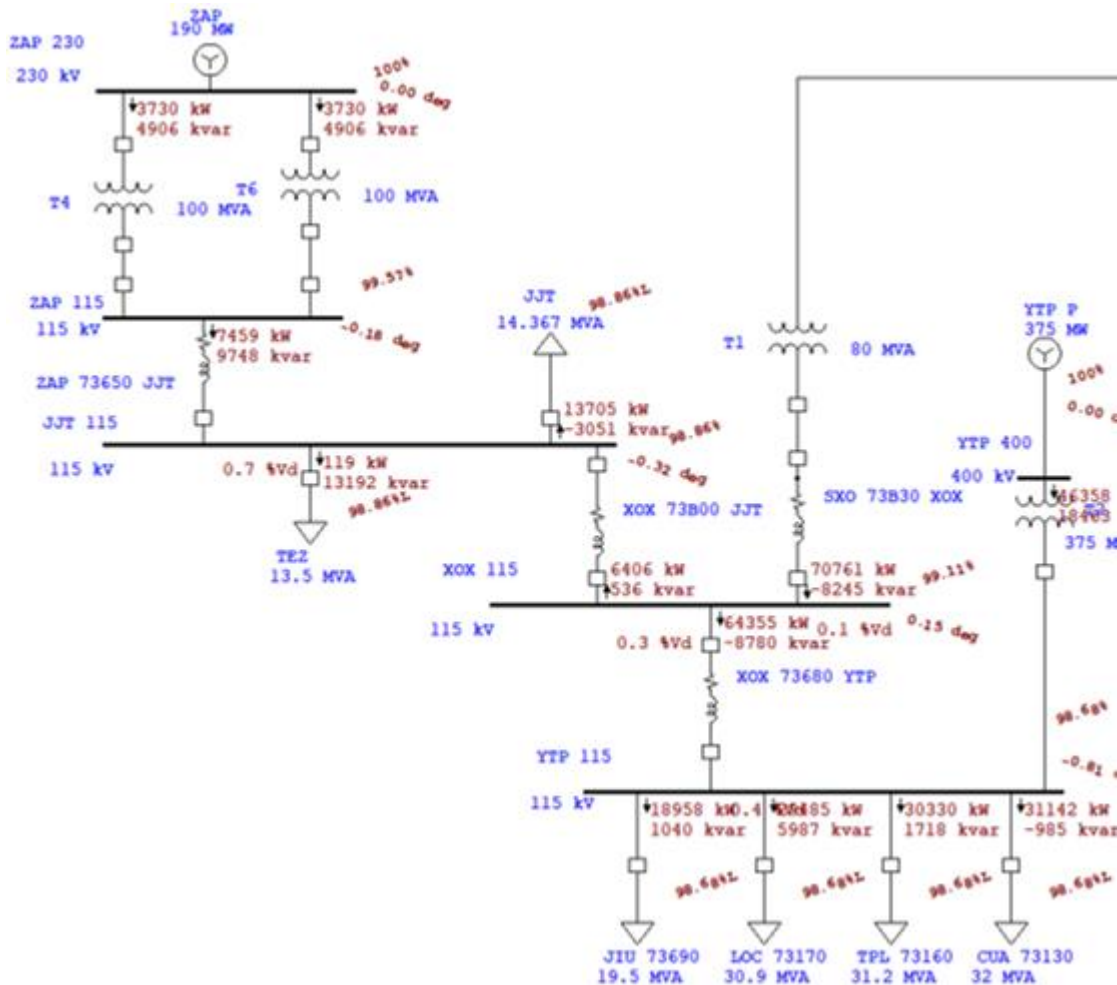


Figura 5.9 FLUJO DE CARGA CON P.F.V. SOLAR XOXOCOTLA A  $1000 \text{ W/m}^2$



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**“MODELADO Y ANÁLISIS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS A LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN”**

---

Nodos Principales	Voltaje		P. Activa MW	P. Reactiva MVAR
	kV	p.u.		
ZAP 115	115	0.99	7.457	9.811
JJT 115	115	0.98	7.427	9.722
XOX 115	115	0.99	77.169	-18.09
YTP 115	115	0.98	109.913	7.76

*Tabla 5.4 DATOS DE BUSES CON IRRADIANCIA DE 1000 W/m<sup>2</sup>*

Se puede observar en el estudio del comportamiento de la planta fotovoltaica la mejora el perfil de voltaje en las barras más cercanas al punto de interconexión, el bus XOX 115 como se observa en la tabla 5.4, de igual modo se aprecia que hay menos perdidas de potencia en el mismo bus, ayuda al bus YTP 115 y JJT 115 en el perfil de voltaje y aporta potencia activa.

### **5.5.3 Flujo de carga a una irradiación de 810 W/m<sup>2</sup>**

Tomando en cuenta que al introducir la Planta fotovoltaica a las 9:00 a.m., con irradiancia de 810 W/m<sup>2</sup>, con un f.p.= 0.9 y una demanda normal promedio acorde al horario, se tiene que inyectar al bus XOX 115, como se observa en la figura 5.10. Se muestra la reducción de potencia activa en la línea que se conecta al bus. Podemos ver en la tabla 5.5, que el perfil de voltaje se mantiene en 0.98, sin embargo, aporta potencia a los buses a los que se encuentra conectado.



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**“MODELADO Y ANÁLISIS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS A LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN”**

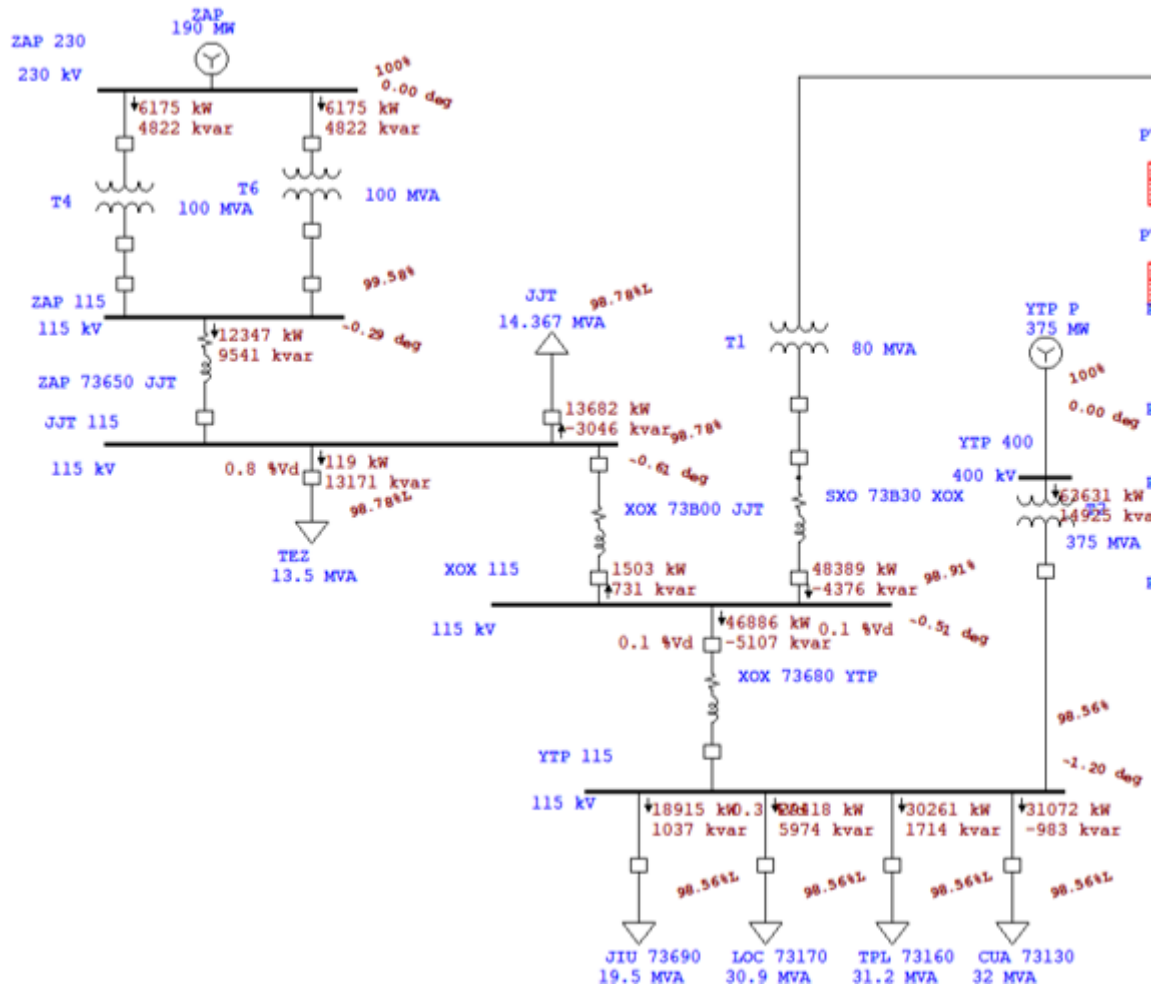


Figura 5.10 FLUJO DE CARGA CON P.F.V. SOLAR XOXCOTLA A 810 W/m<sup>2</sup>

Nodos Principales	Voltaje		P. Activa MW	P. Reactiva MVAR
	kV	p.u.		
ZAP 115	115	0.99	11.947	9.544
JJT 115	115	0.98	13.801	10.125
XOX 115	115	0.98	48.376	-4.376
YTP 115	115	0.98	109.667	7.741

Tabla 5.5 DATOS DE BUSES CON IRRADIANCIA DE 810 W/m<sup>2</sup>





### 5.5.4 Flujo de carga a una irradiación de 810 W/m<sup>2</sup>

Cuando termina empieza a terminar su horario de funcionamiento de producción de energía permitida para inyectar al sistema, alrededor de las 4:00 p.m. y la irradiancia baja aproximadamente a 834 W/m<sup>2</sup> con un f.p.= 0.9 conectado al bus de XOX 115. Observaremos en la figura 5.11 el siguiente comportamiento:

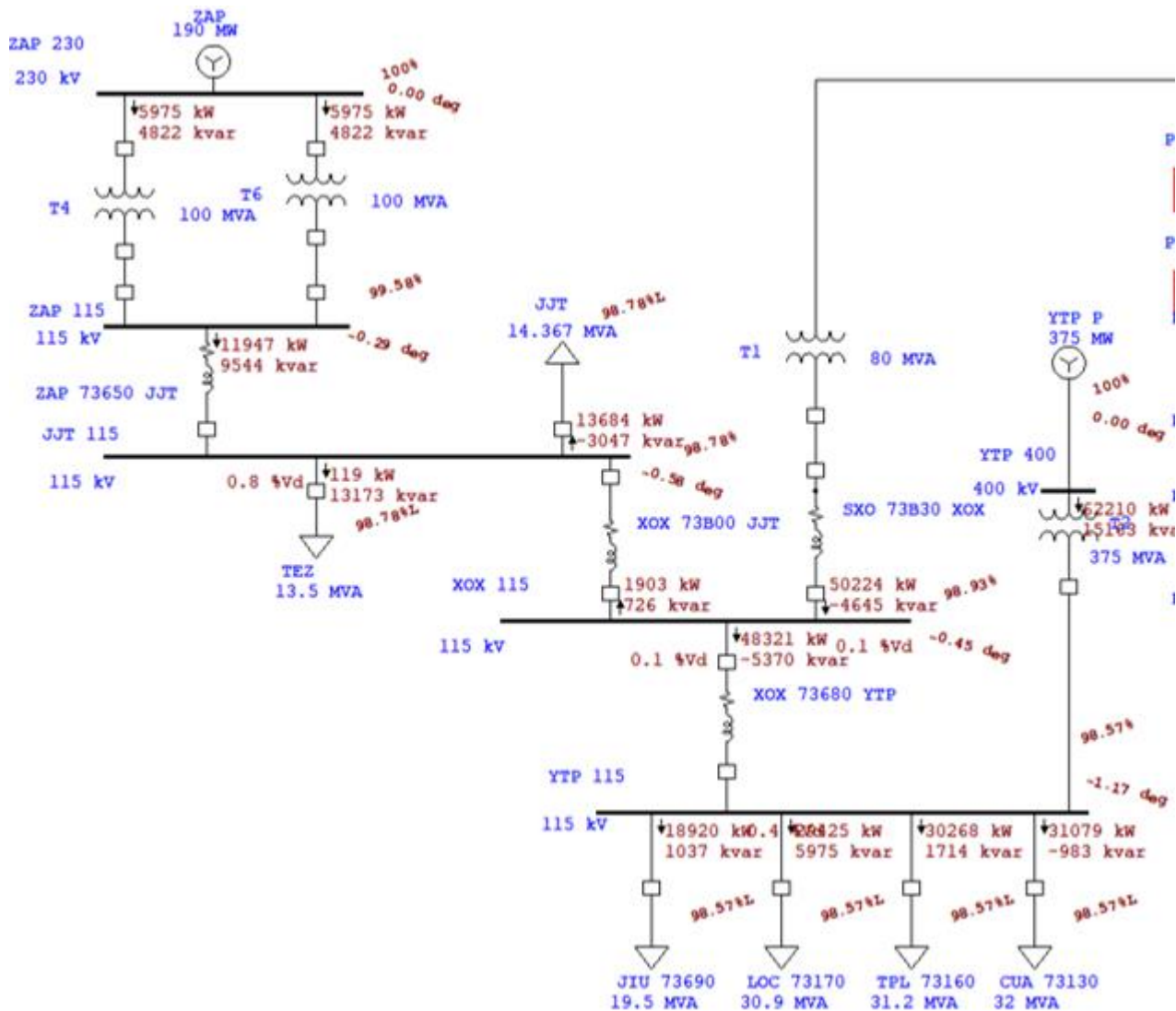


Figura 5.11 FLUJO DE CARGA CON P.F.V. SOLAR XOXOCOTLA A 834 W/m<sup>2</sup>





Podemos observar que el comportamiento que encontramos en el caso anterior se repite, mejorando solo por un poco la potencia activa que entra al sistema, recordemos que está a punto de salir de la red. Se menciona que en México la mayor demanda de energía es en la noche a partir de las 9:00 p.m. hasta 10:30 p.m., por lo tanto, la planta fotovoltaica no ayudaría al sistema cuando tiene su mayor demanda de carga.

Nodos Principales	Voltaje		P. Activa	P. Reactiva
	kV	p.u.	MW	MVAR
ZAP 115	115	0.99	12.347	9.541
JJT 115	115	0.98	13.803	10.126
XOX 115	115	0.98	50.224	-4.645
YTP 115	115	0.98	109.961	7.744

*Tabla 5.6 DATOS DE BUSES CON IRRADIANCIA DE 834 W/m<sup>2</sup>*

### **5.5.5 Comportamiento del sistema ante la falla de la S.E. Zapata**

Se analiza el parque fotovoltaico ante una falla en la S.E. Zapata como se muestra en la figura 5.12, podemos observar que se abre el interruptor de la línea ZAP 73650 JJT, de igual modo tenemos que reducir la carga de TEZ hasta el 45.1% para poder mantener su perfil de voltaje, como lo podemos observar en la tabla 5.7, y tener las menores pérdidas posible para mantener estable el sistema.

Podemos observar que la planta fotovoltaica que mantiene el aportando potencia al BUS YTP y es el encargado de mantener las cargas de JJT y TEZ del BUS JJT 115.

En dado caso que tuviéramos este caso, pero sin la planta fotovoltaica, se requiere desconectar la carga del bus JJT 115 y algunas cargas de YTP 115 para mantener el perfil de voltaje estable, o ajustar la posición del TAP del transformador a 2.5, para mantener estale la red.



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**“MODELADO Y ANÁLISIS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS A LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN”**

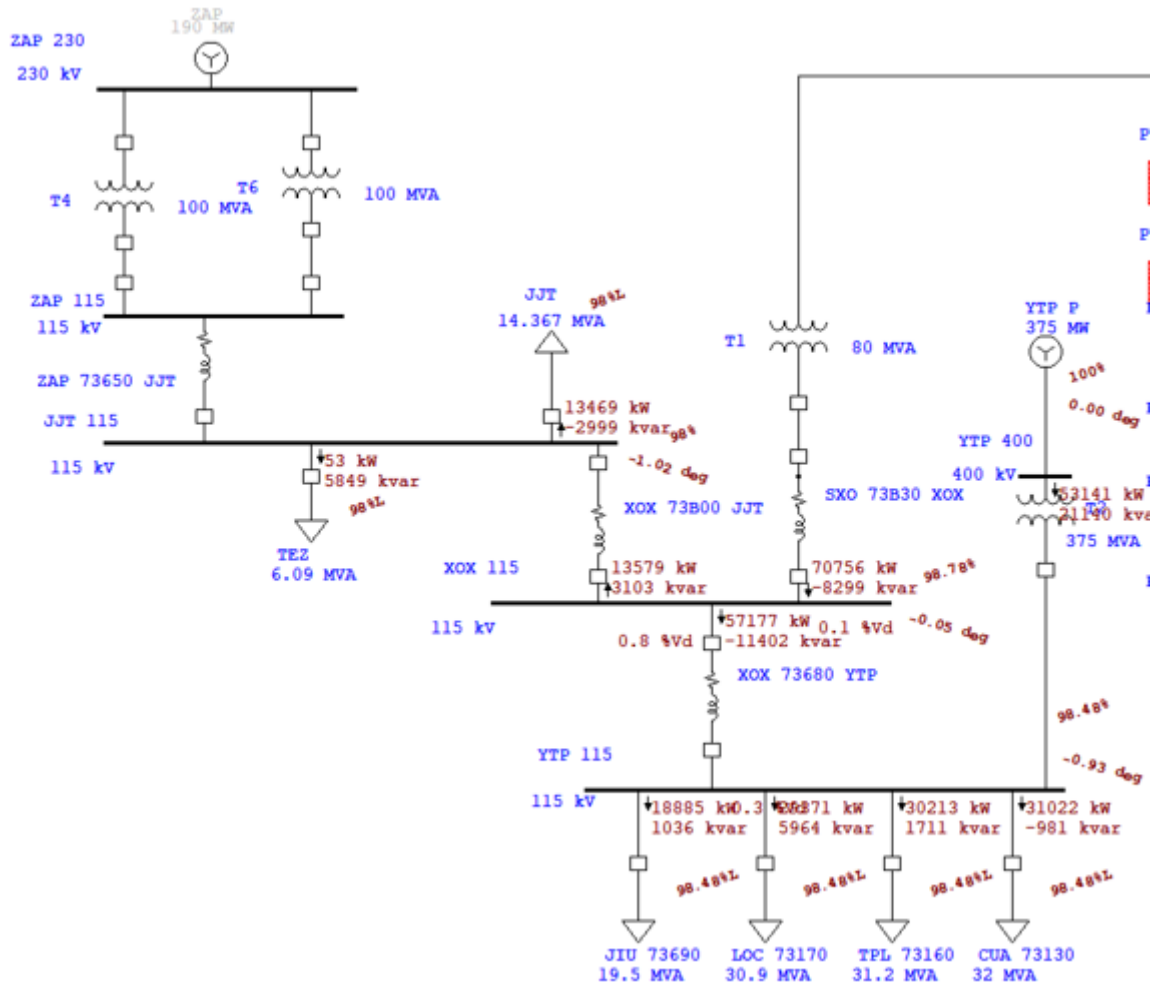


Figura 5.12 FLUJO DE CARGA CON FALLA EN ZAP 230 CON P.F.V.

Nodos Principales	Voltaje		P. Activa MW	P. Reactiva MVAR
	kV	p.u.		
ZAP 115	115	-	-	-
JJT 115	115	0.98	13.521	2.85
XOX 115	115	0.98	70.756	-8.299
YTP 115	115	0.98	109.965	19.917

Tabla 5.6 DATOS DE BUSES POR FALLA EN S.E. ZAPATA



## **5.6 Conclusión**

Se puede observar en el caso de la incorporación de la generación fotovoltaica en la red que mejora muy poco el perfil de voltaje ya que solo aporta potencia activa y la reactiva es nula, aunque en las simulaciones nos percatamos que no fue necesario agregar compensaciones de potencia reactiva ya que el tipo de generador utilizado regula su factor de potencia.

Con los resultados obtenidos podemos concluir que la generación solar fotovoltaica conectada a la red de 115 kV ayudo a que entregara mayor potencia a otras líneas y de igual modo a que las perdidas disminuyeran en los elementos de carga, debido a que la energía no tiene que ser aportada de los buses más lejanos, en este caso de YTP 400 y/o ZAP 230 y ayuda a la distribución de potencia a otros puntos de carga.



## CAPÍTULO VI Conclusiones

La interconexión de energía fotovoltaica cada vez es más común en México y es necesario analizar modelos de generación solar por medio de simuladores en el cual podremos tener una mejor visión de cómo impactara en el SEP por medio de estudios de flujos de potencia ya que son importantes para evaluar el funcionamiento del sistema y su planificación.

El uso de simuladores de flujos de potencia nos ayuda en la ejecución de un modelo que se representa en la vida real y por lo tanto ayudo al desarrollo de esta tesis. Los datos conseguidos y sugeridos por el simulador ETAP son valores muy cercanos a los prácticos, el cual nos da confiabilidad en los modelos.

Con análisis de los resultados del estudio se observa que la planta mejora el perfil de voltaje llevando parte de la carga de los buses cercanos.

El parque Solar aporta una considerable cantidad de potencia activa de manera variable a la red y la potencia reactiva es fija. El resto de la potencia reactiva necesaria para el correcto funcionamiento de la red es aportado por otros generadores conectados a la red a través de los buses de Yautepec y Zapata.

Es importante resaltar que los beneficios no solo serán económicos por el tipo de fuente de energía ya que es predecible su comportamiento sino por el impacto ambiental donde es necesario ver los beneficios que estos generadores. De igual modo se están haciendo avances en la eficiencia de los paneles fotovoltaicos y en inversores que ayuden en la mejora en la potencia de la red.



## Bibliografía

- [1] Thomas F. Stocke, Qin Dahe , Gian-Kasper Plattner , «United Nations,» United Nations, Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>. [Último acceso: 01 Abril 2020].
- [2] A. H. Celedón, «CLIMATE AMBITION ALLIANCE: NATIONS RENEW THEIR PUSH TO UPSCALE ACTION BY 2020 AND ACHIEVE NET ZERO CO2 EMISSION BY 2050,» de *COP 25: CHILE UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE*, Chile, Diciembre 2019.
- [3] «UN GLOBAL COMPACT,» RED PACTO MUNDIAL MÉXICO, 15 JULIO 2018. [En línea]. Available: <http://www.pactomundial.org.mx/site/unete-a-la-campana-por-nuestro-unico-futuro/>. [Último acceso: 03 ABRIL 2020].
- [4] V. Jorge Magaña Salgado, «PROSPECTIVA DE ENERGÍAS RENOVABLES 2012 - 2016,» SENER, MÉXICO, 2012.
- [5] IRENA, «PEOPLE, PLANET AND PROSPERITY 2019,» IRENA, 2019.
- [6] PROYECTOS MÉXICO OPORTUNIDADES DE INVERSIÓN, «PROYECTOS MÉXICO,» BANCO NACIONAL DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS, S.N.C., 2020. [En línea]. Available: [https://www.proyectosmexico.gob.mx/proyecto\\_inversion/556-cenace-subasta-electrica-de-largo-plazo-parque-solar-fv-xoxocotla/](https://www.proyectosmexico.gob.mx/proyecto_inversion/556-cenace-subasta-electrica-de-largo-plazo-parque-solar-fv-xoxocotla/). [Último acceso: 22 05 2020].
- [7] RAN (Registro Agrario Nacional), «SIG (SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOESPACIAL DEL CASTRO RURAL,» DESARROLLO TERRITORIAL, 13 01 2020. [En línea]. Available: <https://sig.ran.gob.mx/map.phtml?reset=session=GEOEXT,groups&config=default&intExt=00&intCE=556>. [Último acceso: 22 05 2020].
- [8] SENER, «La planta solar fotovoltaica Don José, localizada en Guanajuato, cuenta con una inversión alrededor de 220 millones de dólares,» 2018.
- [9] BANCO DE DESARROLLO DE MÉXICO, «BANCO DE DESARROLLO DE MÉXICO,» BANCO DE DESARROLLO DE MÉXICO, 2016. [En línea]. Available: <https://www.nadb.org/es/nuestros-proyectos/proyectos-de-infraestructura/parque-solar-los-santos-solar-i-en-ahumada-chihuahua>. [Último acceso: 20 04 2020].
- [10] EL PUNTERO, «EL PUNTERO,» EL PUNTERO, 14 04 2016. [En línea]. Available: <http://elpuntero.com.mx/n/16103>. [Último acceso: 21 04 2020].
- [11] AURORA SOLAR, «AURORA SOLAR,» AURORA SOLAR, 2016. [En línea]. Available: <http://www.aurasolar.com.mx/aura-solar-i.html>. [Último acceso: 21 04 2020].
- [12] BCS NOTICIAS, «BCS NOTICIAS,» BCS NOTICIAS, 10 03 2014. [En línea]. Available: <https://www.bcsnoticias.mx/planta-aurora-solar-producira-el-62-de-la-energia-de-la-paz/>. [Último acceso: 21 04 2020].
- [13] R. K. COLWELL, «ESTIMATES: STATICAL ESTIMATION OF SPECIES RICHNESS AND SHARED SPECIES FROM SAMPLES,» ESTIMATES 9.1.0, 09 05 2019. [En línea]. Available: <http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates/>. [Último acceso: 02 05 2020].



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**  
**“MODELADO Y ANÁLISIS DE LAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INTERCONECTADAS A LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN”**

---

- [14] GOBIERNO DE MÉXICO, «RAN: REGISTRO NACIONAL DE AGRARIO,» SENER, 02 05 2020. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/ran>. [Último acceso: 02 05 2020].
- [15] GOBIERNO DE MÉXICO, «INEL: INVENTARIO NACIONAL DE ENERGÍAS LIMPIAS,» SENER, 02 05 2020. [En línea]. Available: <https://dgel.energia.gob.mx/qa/INEL/INELV5/mapa.html?lang=es>. [Último acceso: 02 05 2020].
- [16] GOBIERNO DE MÉXICO, «CCUS: CAPTURA, USO Y ALMACENAMIENTO DE CO<sub>2</sub>,» SENER, 02 05 2020. [En línea]. Available: <https://dgel.energia.gob.mx/ccus/mapa.html?lang=es>. [Último acceso: 02 05 2020].
- [17] SUELO SOLAR, «SYSTEM ADVISOR MODEL (SAM), DISEÑADOR Y ANÁLISIS ECONÓMICO DE INSTALACIONES,» SUELO SOLAR, 19 03 2016. [En línea]. Available: <https://suelosolar.com/programas/eficiencia-energetica/system-advisor-model-diseno-y-analisis-economico-instalaciones>. [Último acceso: 02 05 2020].
- [18] RECURSOS NATURALES CANADA, «CANADA,» RETSCREEN, 18 12 2019. [En línea]. Available: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465>. [Último acceso: 02 05 2020].
- [19] GOBIERNO DE MÉXICO, «AZEL: ATLAS NACIONAL DE ZONAS CON ALTO POTENCIAL DE ENERGÍAS LIMPIAS,» SENER, 02 05 2020. [En línea]. Available: <https://dgel.energia.gob.mx/azel/mapa.html?lang=es>. [Último acceso: 02 05 2020].
- [20] SOLCAST, «SOLCAST,» SOLCAST, 14 10 2019. [En línea]. Available: <https://solcast.com/>. [Último acceso: 05 02 2020].
- [21] NASA POWER, «NASA POWER: PREDICTION OF WORLDWIDE ENERGY RESOURCES,» POWER, 26 04 2020. [En línea]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/>. [Último acceso: 02 05 2020].
- [22] SOLARGIS, «SOLAR GIS,» PROSPECT, 2020. [En línea]. Available: <https://solargis.com/es/products/prospect/overview>. [Último acceso: 02 05 2020].
- [23] M. A. GREEN, «IEEE Conference on photovoltaic Specialist,» *Photovoltaics: coming of age*, vol. 1, p. 8, 1990.
- [24] C. FRITTS, «ON THE FRITTS SELENIUM CELLS AND BATTERIES,» *FLANKLIN INSTITUTE*, vol. 119, nº 3, pp. 221-232, 1885.
- [25] PROGNSA, «LA ENERGÍA SOLAR,» de *LA ENERGÍA SOLAR. APLICACIONES PRÁCTICAS*, SEVILLA(ESPAÑA), COLECTIVO, 2009, p. 152.
- [26] M. BARRIO y M. Casa Vilaseca, «Conceptos basicos de instalacion,» de *Instalaciones solares fotovoltaicas*, Barcelona, España, Alfaomega, Marcombo, 2017, p. 208.
- [27] F. J. H. S. R. C. DOUGLAS A. SKOOG, de *PRINCIPLES OF INSTRUMENTAL ANALYSIS*, 2006, p. 1056.
- [28] LOOK MAGAZINE, «SISTEMA FOTOVOLTAICO,» *LOOK MAGAZINE*, 1956.
- [29] SOLARTRONIC, «IRRADIACIONES GLOBAL, DIRECTA Y DIFUSA, EN SUPERDICIES HORIZONTALES E INCLINADAS, ASI COMO IRRADIACION DIRECTA NORMAL, EN LA REPUBLICA MEXICANA,» SOLARTRONIC, CUERNAVACA, MORELOS, 2003.
- [30] T. C. GM. Diaz, «Componentes de una instalacion solar fotovoltaica,» de *Instalaciones solares fotovoltaicas*, España, ba, Mc Graw Hill, 2010.



- [31] ADEVASU, «ENERGÍA SOLAR,» FREEPILK, ESPAÑA, 2011.
- [32] SOTYSOLAR, «SEGUIDORES SOLARES: TODO LO QUE NECESITAS SABER,» SOTYSOLAR, 2018.
- [33] SUNFIELDS EUROPE, «SUNFIELDS EUROPE,» SUNFIELDS, 2015. [En línea]. Available: <https://www.sfe-solar.com/inversores-solares-fotovoltaicos/>. [Último acceso: 20 04 2020].
- [34] A. M. Cano, «Estudio y simulación de Métodos de detección de isla para convertidores,» Sevilla, 2017.
- [35] SCHNEIDER ELECTRIC, «SCHNEIDER ELECTRIC SOLUCIONES PARA LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA,» 2014. [En línea]. Available: [https://www.voltimum.es/sites/www.voltimum.es/files/pdflibrary/she\\_catalogo\\_solar\\_2013-2014.pdf](https://www.voltimum.es/sites/www.voltimum.es/files/pdflibrary/she_catalogo_solar_2013-2014.pdf). [Último acceso: 25 04 2020].
- [36] «RENEWABLE SOURCES EFFICIENT ELECTRICAL ENERGY,» de *MATLAB/SIMULINK*, ECEN2060, 2009.
- [37] D. M. R.W. ERICKAON, «GRID CONNECTED PV SYSTEM,» de *FUNDAMENTALS OF POWER ELECTRONICS*, SPRINGER, 2000.
- [38] D. O. D. L. FEDERACION, «OFERTA PUBLICA DE INTERCONEXION,» SEGOB, MEXICO, 2018.
- [39] M. A. ABELLA, «SISTEMAS FOTOVOLTAICOS,» de *SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: INTRODUCCIÓN AL DISEÑO Y DIMENSIONADO E INSTALACIONES DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA*, MADRID(ESPAÑA), SAPT, 2005, p. 312.
- [40] SEL, «SEL 387, Manual de instrucciones,» 2004.
- [41] D. Q. G.-K. P. M. M. T. Thomas F. Stocker, «CLIMATE CHANGE 2013: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS,» IPCC, vol. 1, nº 1, p. 34, 2013.
- [42] GLOBAL SOLAR ATLAS, «GLOBAL SOLAR ATLAS,» SOLAR ATLAS, 008 04 2020. [En línea]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map?s=18.75335,-99.052656&m=site&c=18.75335,-99.052656,11>. [Último acceso: 28 04 2020].
- [43] E. V. A. L. A. M. F. R. B. J. S. R. A. Rafael Alexandri Rionda, «PROSPECTIVA DE ENERGÍAS RENOVABLES 2017-2030,» SECRETARIA DE ENERGÍA, MÉXICO, 2017.
- [44] E. E. N. R. O. O. N. J. Santiago Rodríguez Suárez, «LA INDUSTRIA SOLAR FOTOVOLTAICA Y FOTOTÉRMICA EN MÉXICO,» *PRO MÉXICO*, vol. 1, nº 1, p. 172, 2017.
- [45] SISIFO, «SISIFO,» MASLOWATEN, 2020. [En línea]. Available: <https://www.sisifo.info/es/default>. [Último acceso: 02 05 2020].
- [46] PV SYST, «PVSYST,» PVSYST, 05 02 2020. [En línea]. Available: <https://www.pvsyst.com/>. [Último acceso: 02 05 2020].
- [47] MATHWORKS, «MATHWORKS,» THE MATHWORKS, 2020. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. [Último acceso: 02 05 2020].
- [48] PSPICE, «PSPICE,» CANDENCE PSPICE, 2020. [En línea]. Available: <https://www.pspice.com/>. [Último acceso: 02 05 2020].
- [49] C. D. R. FOTOVOLTAICOS, «NORMATIVA DE CODIGO DE REDES FOTOVOLTAICOS,» NOM, MEXICO, 2017.