



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de ingeniería

Incorporación de plantas de generación fotovoltaica en  
redes modernas de suministro eléctrico

TESIS

Para obtener el título de ingeniero eléctrico-electrónico

Presenta:

**CHRISTIAN BELTRAN BEDOLLA**

Director: M.I Esther Barrios Martinez

02-05-2014





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## Agradecimientos

Primero mi gratitud entera con Dios y con la vida, por darme la fuerza y el entendimiento necesario para enderezar el camino y lograr las metas que me he propuesto. Por darme la oportunidad de forjar mi destino y enseñarme que a veces es necesario remar contra corriente para ser feliz. Pero sobretodo por brindarme la oportunidad de vivir 24 años, rodeado de salud y amor, con personas maravillosas a las que puedo llamar familia y amigos. Gracias Señor por la vida llena de bendiciones que he tenido y hacerme una persona de bien para la sociedad.

A mis padres. Quiero expresarles de la forma más sincera, el gran amor, la satisfacción y el agradecimiento que tengo de tenerlos como padres, sepan que este trabajo se los dedico con todo mi cariño en respuesta al apoyo, amor y a las sabias palabras que me han brindado siempre. Este escrito expresa la culminación de un ciclo, un lapso de mi vida en el que fui muy feliz, en el que tuve momentos de desánimo y sin embargo no tendría los frutos de mi esfuerzo, si ustedes no fueran parte primordial en mi vida. Es por esta razón que quiero agradecerles individualmente.

A mi padre Carlos Beltran Rodriguez, gracias papa por enseñarme a tu manera, el amor a la familia, el respeto a Dios y el poder de la voluntad. Gracias por mostrarme que en los momentos difíciles se debe tener temple y confiar en uno mismo, gracias porque en estos 24 años, me diste más que lujos y bienestar; me diste amor y enseñanzas inigualables.

Gracias por las miles de horas que me dedicaste platicando conmigo.

A mi madre Judith Bedolla Miranda, gracias mami por brindarme paciencia, amor y paz a lo largo de mi vida, por enseñarme el respeto y amor a Dios. Gracias por enseñarme a ser fuerte y a confiar en mi potencial a pesar de lo difícil que se vea el camino, pero sobretodo porque en mis momentos más difíciles me enseñaste a forjar mi carácter, a luchar por mis ideales y construir mi propia valía. Gracias por las miles de horas dedicadas a mi bienestar físico y mental.

A mi hermana Daniela, sabes que te amo mucho, y te tengo un agradecimiento enorme por el apoyo y amor incondicional que siempre me has brindado, también te dedico este trabajo, porque fuiste una de las piezas clave para dar inicio a otra etapa de mi vida, quiero que sepas también que estaré siempre contigo y te apoyare de la misma forma.

**A TODA MI FAMILIA QUE SIEMPRE HA ESTADO CONMIGO, CULTIVANDO EN MI LOS VALORES DE RESPONSABILIDAD, VALOR, AMISTAD, AMOR, CONFIANZA, AGRADECIMIENTO, RESPETO, HONESTIDAD Y PERSEVERANCIA. UN AGRADECIMIENTO TAMBIEN A LA FAMILIA KIST DE RIO GRANDE DO SUL, POR HABERME MOSTRADO LOS MISMOS VALORES A PESAR DE NO ESTAR EN MI PAIS**

A la mejor facultad de ingeniería UNAM en CIUDAD UNIVERSITARIA Gracias por instruirme en el arte del conocimiento, la pasión por mejorar la calidad de vida humana, Y POR ENSEÑARME EL VALOR DEL ESFUERZO. Muchas gracias por enseñarme más que matemáticas, física y razonamiento lógico. Prometo enaltecer tus colores y vivir conforme a tus valores.

**A LA M.I. ESTHER BARRIOS MARTINEZ A LA QUE EXPRESO MI PROFUNDA ADMIRACION Y AGRADECIMIENTO, POR SU APOYO INCONDICIONAL A LO LARGO DE TODO ESTE PROCESO, SIENDO UNA DE LAS MEJORES PROFESORAS CON LAS QUE TUVE EL HONOR DE INSTRUIRME**

A TODOS LOS PROFESORES Y ALUMNOS DE LA FACULTAD DE INGENIERIA,  
QUE CON SU EJEMPLO DE FORTALEZA ME FORZARON A DAR MI MAXIMO  
ESFUERZO SIEMPRE MUCHAS GRACIAS

#### DEDICATORIAS

A mi abuelito Carlitos Gracias por todas tus enseñanzas y hacerme una persona valiente.  
Quiero que sepas que siempre te llevo conmigo, no sabes cómo diste alegría a mi corazón.  
Yo sé que algún día te volveré a ver, pero por ahora, te dedico por el cariño y respeto que  
tengo a tu recuerdo, este escrito porque fue un proceso que se hizo *poco a poquito*,  
*GRACIAS ABUELITO YA SOY INGENIERO GRACIAS POR TODO!!!*

DEDICATORIAS.....	1
AGRADECIMIENTOS.....	2
INDICE.....	8
SIMBOLOS Y ACRÓNIMOS .....	3
INTRODUCCION.....	4
OBJETIVOS.....	4
SOLUCION .....	3
METODOLOGIA.....	4
ANTECEDENTES .....	4
DESCRIPCION DE LOS CAPITULOS .....	4
<b>CAPÍTULO 1 MODELOS DE FOTOCELIDAS .....</b>	<b>2</b>
Estructura y fabricación de módulos fotovoltaicos .....	2
Funcionamiento de modulo fotovoltaico.....	5
Parámetros de los módulos fotovoltaicos .....	10
Modelo en estado estable .....	12
Modelo dinámico .....	14
Equipos auxiliares de los sistemas solares .....	16
Baterías .....	16
Inversores .....	18
Inversores DC DC .....	18
Inversores DC AC .....	19
Equipo de seguimiento .....	20
Equipo de control .....	21
Topología de red.....	26
Instalaciones aisladas.....	26
Instalaciones conectadas a red.....	27
Tecnología reciente en panel fotovoltaico.....	28
<b>CAPÍTULO 2 NORMALIZACIÓN VIGENTE PARA LA UTILIZACIÓN DE PANEL FOTOVOLTAICO .....</b>	<b>34</b>
NOM 001.....	34
El panel fotovoltaico.....	36
estructura .....	36
cables .....	37
inversor o acondicionador de potencia .....	39

Proteccion.....	40
Medios de desconexión DSC.....	41
Proteccion contra descargas atmosfericas .....	43
Protección contra fallas a tierra .....	44
Sistemas de puesta a tierra.....	46
Electrodos de puesta a tierra.....	46
Conductores de puesta a tierra.....	46
Pruebas de seguridad y desempeño .....	49
IEC.....	50
IEC 60904.....	50
IEC 61215.....	51
IEC 61646.....	52
IEC 61215:2005.....	54
IEC 61646/61215.....	52
IEC61730/en 61730 IEC .....	55
IEC 60364-4-41 .....	55
IEC 62108.....	55
IEC61701 .....	55
IEC BIPV .....	56
IEC 61683.....	56
IEC 60364-7-712 .....	56
IEC 61853.....	56
Pruebas al medio donde se pondrán en servicio el panel fotovoltaico .....	57
<b>CAPÍTULO 3 PUESTA EN SERVICIO DE REDES ELÉCTRICAS CON SISTEMAS FOTVOLTAICOS .....</b>	<b>60</b>
Documentos técnicos a entregar, instrucciones y garantías. ....	60
Puesta En Servicio De Los Equipos Auxiliares.....	62
Operación De Sistemas Fotovoltaicos Independientes .....	63
Sistema Fotovoltaico Independiente Con Dos Generadores .....	66
sistema fotovoltaico independiente con panel fotovoltaico.....	68
Operación de sistemas generadores en red .....	70
Sistema fotovoltaico conectado a red .....	76

CAPÍTULO 4 PROBLEMAS TÉCNICOS DE LA UTILIZACIÓN DE SISTEMAS FOTVOLTAICOS .....	<b>83</b>
Problemas En Estado Estable. ....	83
Problemas En Estado Dinámico. ....	85
CAPÍTULO 5 CASOS DE ESTUDIO .....	90
Panel tipo 1 .....	90
Panel tipo 2.....	91
Panel tipo 3 .....	93
Sistemas Fotovoltaicos Independientes .....	94
Análisis en estado estable.....	97
Análisis en estado dinámico .....	98
Análisis en estado dinámico con panel 1 .....	98
Análisis en estado dinámico con panel 2.....	99
Análisis en estado dinámico con panel 3.....	99
Comparación del uso de los paneles bajo distintos tipos de falla .....	100
Voltajes de bus con panel 1 .....	101
Voltajes de bus con panel 2 .....	101
Voltajes de bus con panel 3 .....	102
Graficas con valores medibles de cada panel .....	102
Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la red.....	105
Análisis en estado estable.....	108
Análisis en estado dinámico .....	110
Análisis en estado dinámico con panel 1 .....	111
Análisis en estado dinámico con panel 2.....	111
Análisis en estado dinámico con panel 3.....	112
Comparación del uso de los paneles bajo distintos tipos de falla .....	112
Voltajes de bus con panel 1 .....	114
Voltajes de bus con panel 2 .....	115
Voltajes de bus con panel 3 .....	116
Graficas con valores medibles de cada panel .....	116
Conclusiones a los estudios de caso .....	119
Conclusiones.....	122
Apéndices .....	124
Apéndice A Medidas usuales en paneles fotovoltaicos conclusiones .....	125
Apéndice B. Mapa de radiación solar .....	126
Apéndice C. Clase solar .....	127
Bibliografía Y Referencias .....	128

SB	base de potencia la cual se está trabajando en MW
KI	controlador integral de ganancia de potencia
KP	controlador proporcional de ganancia de voltaje
KPQ	regulador de ganancia de voltaje AC
KIQ	Regulador de ganancia integral de voltaje AC
VL2	Punto de disparo de baja tensión en P.u 1
VL1	Punto de disparo de baja tensión en P.u 2
VTL1	Demora mínima de tensión 1
VTL2	Demora mínima de tensión 2
FLOW	Punto de disparo de baja frecuencia en P.u.
FTL	Demora de baja frecuencia en segundos
VTL3	Demora mínima de tensión 3
VL3	Punto de disparo de baja tensión en P.u 3
WR	Relación de la base de potencia en MW
IIR	Proporción entre corto circuito y el pico de corriente de potencia máxima de salida
TDC	Inversor DC con banco de capacitores y constante de tiempo en segundos
Max	Máximo voltaje DC en P.u.
Min	Mínimo voltaje DC en P.u.
KPI	Regulador de ganancia de voltaje CD
Imax	Máximo límite de corriente rms en AC
Imin	Mínimo límite de corriente rms en AC
VLOW2	Punto de disparo de bajo voltaje 2
VLOW1	Punto de disparo de bajo voltaje 1
VTLOW1	Protección de bajo voltaje en segundos
VTLOW1	Protección de sobrevoltaje en segundos
VTLOW2	Segunda protección de sobrevoltaje en segundos
FTLOW	Protección de sobrefrecuencia en segundos
KWp	Kilowatts pico
s	Segundos
A	Amperes
J	Joules
gap	La diferencia entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción

ANCE	Asociación nacional de normalización y certificación del sector eléctrico
STC	Standard test condition
CENELEC	comité europeo de normalización electrotécnica
USd	umbral de voltaje de descarga
USc	umbral de voltaje de carga

## Introducción

El uso de nuevas tecnologías en el ámbito energético, es uno de los temas más polémicos e interesantes actualmente, el proceso de revolución en la generación de energía es un cambio que debe hacerse con un cuidado muy especial, tanto en técnica como en desarrollo científico; esto se debe en gran medida a la innovación de nueva maquinaria, infraestructura, electrónica, tecnología de servicios, etc. Es decir mecanismos que suponen un bienestar y calidad de vida mejor para la población de cualquier país.

Sin embargo, así como se demandan nuevos procesos de tecnología, se demanda también la capacidad eléctrica suficiente para poder soportar y proveer del servicio a todos los mecanismos mencionados esto tomando en cuenta que los procesos de generación predominantes actuales, como el petróleo son muy contaminantes. Por esta razón nos disponemos a analizar una nueva forma de generación de energía ... la solar.

El propósito de este trabajo es proporcionar al lector los beneficios que conlleva la incorporación de los módulos o paneles fotovoltaicos a la red eléctrica. Sin embargo debemos entender que a pesar de ser una forma de energía limpia, debe hacerse un estudio muy cuidadoso de la eficiencia, costo de montaje, periodos de uso, etc, etc, de los módulos fotovoltaicos, y medir esos resultados en contra de los beneficios del petróleo y gas, ya que por más de un siglo el combustible fósil ha hecho un trabajo extraordinario cumpliendo su función: energizar a la población mundial.

Este cambio energético tan radical a pesar de ayudar al planeta; no puede hacerse de la noche a la mañana, sin que se logre una eficiencia igual o mayor a lo acostumbrado con los procesos actuales y por lo menos con un costo igual o menor. La demanda energética aumentara a niveles muy superiores, casi exponenciales eso es un hecho; por los que debemos decidir si continuamos con los Procesos energéticos actuales, su gran eficiencia y la tradición técnica que poseen o nuevas formas de generación que aparentemente muestran un costo mayor, menor eficiencia pero que su funcionamiento es a base de un recurso inagotable y gratis, aunado a que también puede hacer a nuestros sistemas eléctricos más robustos como lo veremos a lo largo de la tesis.

### I. Objetivos

- Proporcionar las herramientas necesarias para que pueda ejercerse una opinión más analítica acerca de los beneficios de esta nueva forma de energía.

- Establecer los parámetros bajo los cuales se fabrican, certifican y comercializan los paneles solares.
- Mostrar cómo se comportan los sistemas fotovoltaicos en sus diferentes topologías, bajo los criterios de estado transitorio y estado estable.
- Implementar casos de estudio para el análisis y diagnóstico de distintos paneles solares.

## II. Formulación del problema

Las redes modernas de suministro eléctrico apuntan a la incorporación de un porcentaje mayor de energías renovables. La energía radiante del sol se considera como energía renovable no convencional y su adición a los sistemas eléctricos ha cobrado relevancia gracias a que en nuestro país se cuenta con zonas de radiación altas.

A este respecto, las fotoceldas se han posicionado como un convertidor de energía que requiere un mantenimiento mínimo y que además, se encuentran comercialmente en capacidades de energía diferentes lo que le da la ventaja de visualizarse en aplicaciones también diversas.

La inherente característica difusa de la energía solar, hace que en la actualidad se presente como apoyo de otros sistemas más confiables. Por lo tanto, la solución de los problemas técnicos que se presentan en su incorporación a las redes modernas de suministro eléctrico la muestran como una de las mejores opciones para generar electricidad.

## III. Solución

Mediante la normativa vigente, se expondrán casos de sistemas en servicio de plantas fotovoltaicas modernas, en el que distintos modelos fotovoltaicos serán evaluados mediante análisis de respuesta en estado dinámico y estático.

## IV. Metodología

El presente trabajo tendrá el método siguiente:

- Revisión bibliográfica
- Establecer modelos de fotoceldas
- Establecer topologías y equipos de los Sistemas solares
- Identificar las recomendaciones y la normalización vigentes para la utilización de fotoceldas
- Establecer la puesta en servicio, que incluya los protocolos de las pruebas primarias
- Determinar los problemas técnicos de la utilización de fotoceldas.

- Validar el procedimiento anterior con un caso de estudio que describa el comportamiento de un sistema de prueba.

## V. Antecedentes

Corría el año de 1955, cuando científicos de la U.S. Signal Corps se les fue asignada la tarea de construir fuentes de poder para satélites espaciales. Los estudios de esta compañía comenzaron con celdas de una eficiencia de un 4,5%, y en tres años lograron que esta eficiencia subiera hasta un 9%.

Fue entonces cuando en 1958 fue lanzado al espacio el primer satélite que utilizaba celdas fotovoltaicas, el Vanguard I. Éste tenía un sistema de poder de 0.1 W, en aproximadamente 100 cm<sup>2</sup> y estuvo operativo por 8 años. Ese mismo año se lanzaron 3 satélites con esta misma tecnología, el Explorer III, el Vanguard II y el Sputnik-3. Desde este año las celdas solares aumentaron su utilización en naves espaciales, y el aumento de eficiencia seguía subiendo a pasos agigantados. Tal es así que actualmente se destinan fondos por sobre los 300 millones de dólares por año, para encontrar beneficios extra a los paneles solares de tipo policristalino, monocristalino, y amorfo, con el fin de mejorar la eficiencia y el precio al público.

Hoy en día las celdas fotovoltaicas son utilizadas en prácticamente todo el mundo, generan el 2,1 % de la energía total producida en el mundo. Es una industria que en 25 años pasó a fabricar 70 - 80 MW anuales y con un costo que bajó desde \$50/W, hasta los 5 \$/W.

El constante cambio en el uso de mejores elaborados y herramientas tecnológicas, trae consigo la aplicación de normativa moderna, capaz de crear una relación solidaria entre fabricantes, proveedores y clientes, con el fin de explotar los beneficios de la celda solar y mejorar la calidad de vida en el planeta. Es por esta razón que se expone a lo largo de la tesis los organismos internacionales con la capacidad de mantener a los módulos fotovoltaicos bajo los estándares más altos de calidad.

Así mismo desde que se inició el análisis de los sistemas eléctricos de potencia se conoce que un mecanismo está sujeto a señales de externas que tienen mayor impacto dependiendo del lugar donde se encuentre dicho mecanismo. En la mayoría de los casos, no es posible anticipar estas señales externas, pero es posible simularlas y estudiar su comportamiento para saber cómo enfrentar una situación adversa. En el presente trabajo, el panel fotovoltaico está sujeto a diversos casos de análisis en estado dinámico y estático, que muestra su proceder, y la relación que tiene con otros sistemas incluidos en una red eléctrica de potencia.

El conocimiento que proporciona el análisis en estado dinámico y estático, da las herramientas para conocer un equipo eléctrico a fondo frente a condiciones adversas de trabajo. Tal es así que es posible mediante la tecnología actual mejorar las condiciones de uso y fabricación, ganando confianza ente clientes que buscan un servicio pleno.

Conocer el funcionamiento de la fotocelda, la normativa actual y el comportamiento de este mecanismo, exhiben la gran gama de aspectos que existen para seguir estudiando la energía solar con el objetivo de mantener al panel, a la vanguardia en los cambios energéticos globales actuales y con una perspectiva sustentable a futuro.

## VI. Descripción de los capítulos

El primer capítulo realiza una descripción teórica del funcionamiento de la celda solar de silicio, en este capítulo se sientan las bases para comprender el funcionamiento de celdas mono y multicristalino así también como mejoras técnicas y la utilización de otros compuestos en la construcción de celdas más eficientes.

El segundo capítulo presenta un análisis técnico de la normativa vigente en el desarrollo, desde la instalación, la mantención y la vida útil de estos sistemas al momento de contextualizar el sistema fotovoltaico como solución a un suministro de electricidad, por lo que también se presenta un análisis de todos los elementos que intervienen en la implementación.

El tercer capítulo, expone diversos tipos de pruebas de simulación en las topologías que presentan los paneles fotovoltaicos, se realiza una comparación necesaria con los sistemas convencionales y puntualizan sus diferencias, para posteriormente realizar un caso de estudio.

En el cuarto capítulo se analiza el porqué del estudio dinámico, y en que consiste un análisis de flujos de potencia, de tal forma, que se den las herramientas teóricas suficientes para entender y sustentar los criterios de solución en los casos de estudio,

En la parte final del trabajo se exponen casos de estudio en el que se realizan test comparativos de distintos modelos de paneles solares. De tal forma que se manejan varios estudios de estado dinámico y estático y se da una solución a cada estudio de caso.

2014

MODELOS DE PANEL  
FOTOVOLTAICO



## CAPÍTULO 1 MODELOS DE PANEL FOTOVOLTAICO

Una celda fotovoltaica es un dispositivo que convierte la energía de la luz del sol, en energía eléctrica en forma directa. Este proceso se lleva a cabo gracias a materiales conocidos como semiconductores, los cuales cambian su conductividad en función de distintos factores externos, de tal manera que pueden generar una corriente eléctrica.

### 1.1. ESTRUCTURA Y FABRICACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

La parte primordial de las celdas fotovoltaicas son los elementos semiconductores. Un semiconductor es aquel que puede comportarse como aislante o conductor dependiendo de la temperatura, el campo electromagnético, la presión y la radiación que le incide.

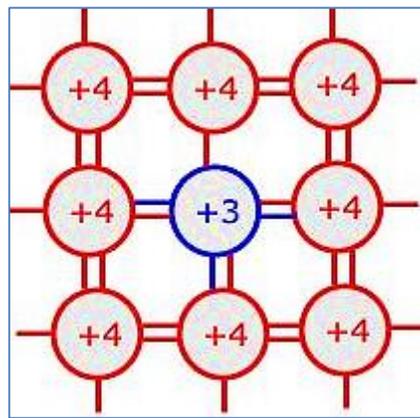
Los materiales semiconductores más utilizados son el Silicio (Si) y el Germanio (Ge). En el planeta el silicio está por todas partes, un 27% de la corteza terrestre está hecha de silicio. El equilibrio eléctrico que proporciona la estructura molecular cristalina característica de esos átomos en estado puro, no les permite ceder, ni captar electrones. Sin embargo, la mayor o menor conductividad eléctrica que pueden presentar los materiales semiconductores depende en gran medida de su temperatura interna, pues mientras su temperatura aumenta, la conductividad también aumenta. Caso contrario a los metales que mientras su temperatura aumenta su conductividad disminuye. A continuación se muestra la tabla con los semiconductores actualmente conocidos y utilizados en la industria.

número atómico	nombre del elemento	Grupo en la tabla periódica	electrones en la última orbita	números de valencia
48	cadmio (Cd)	IIa	2	+2
5	Boro (B)	IIIa	3	+3
13	Aluminio (Al)	IIIa	3	+3
31	galio (Ga)	IIIa	3	+3
49	Indio (In)	IIIa	3	+3
14	silicio (Si)	IVa	4	+4
32	Germanio (Ge)	IVa	4	+4
15	Fosforo (P)	Va	5	+3,-3,+5
33	Arsénico (As)	Va	5	+3,-3,+5
51	Antimonio (Sb)	Va	5	+3,-3,+5
16	Azufre (S)	VIa	6	+2,-2,+4,+6
34	Selenio (Se)	VIa	6	+2,-2,+4,+6
52	Telurio (Te)	VIa	6	+2,-2,+4,+6

**Tabla 1 Semiconductores**

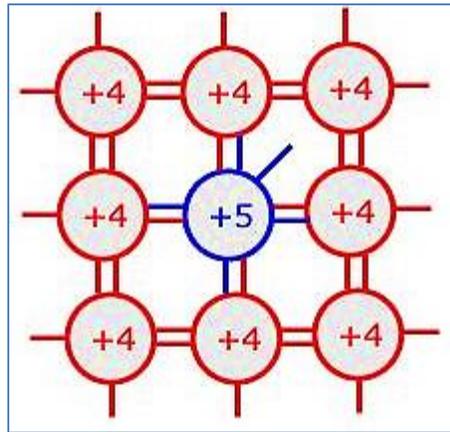
Para poder realizar el proceso de mandar electrones a la banda de conducción, creando huecos en la banda de valencia, se requiere de cierta energía. Estos elementos tienen una órbita incompleta con un número menor de electrones, que son los electrones de valencia. Por lo que es un proceso delicado, pero natural a la vez.

Un semiconductor tipo P, es aquel elemento al que intencionalmente, se le añaden impurezas que permiten la creación de huecos. Los átomos de este tipo se les pueden llamar aceptores, ya que “aceptan” un electrón. Normalmente en este proceso de dopado en el caso del silicio; se le une un átomo con tres electrones de valencia, tales como los del grupo 13 de la tabla periódica, como Al, Ga, B, In, y se incorpora a la red cristalina en el lugar de un átomo de silicio, entonces ese átomo tendrá tres enlaces covalentes y un hueco producido que se encontrará en condición de aceptar un electrón libre. Tal como se puede ver en la ilustración 1.



**Ilustración 1 Semiconductores Dopados Tipo P**

Un semiconductor tipo N es aquel donde se obtiene un número mayor de electrones intencionalmente, llevando a cabo un proceso de dopado, añadiendo un cierto tipo de átomos al semiconductor para poder aumentar el número de portadores de carga. En este caso se realiza el proceso inverso al de semiconductor tipo P. Si se considera de nuevo al silicio; los átomos del silicio tienen un número atómico de cuatro, por lo que se forma un enlace covalente con cada uno de los átomos de silicio adyacentes. Si un átomo con cinco electrones de valencia, tales como los del grupo 15 de la tabla periódica como son el P, As y el Sb, se incorpora a la red cristalina en el lugar de un átomo de silicio, entonces ese átomo tendrá cuatro enlaces covalentes y un electrón no enlazado. Este electrón extra da como resultado la formación de "electrones libres", el número de electrones en el material supera ampliamente el número de huecos. En la ilustración 2 se observa dicho enlace.



**Ilustración 2 Semiconductor Dopado Tipo N**

La razón principal de que se use un elemento tetravalente, es la mayor facilidad con que es posible doparlo, es menos costoso y más eficiente en términos de producción. Es decir dopar un número mayor de electrones es un proceso más complejo y dopar un número menor no daría el efecto esperado. El silicio y el germanio son la mejor opción para la producción de semiconductores.

Las celdas fotovoltaicas que se ofrecen en el mercado actual están clasificadas en 3 tipos; monocristalinas, policristalinas y amorfas. Las celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino se obtienen a partir de barras largas y cilíndricas, producidas mediante procesos complejos y muy costosos; cada barra se corta en forma de obleas de medio milímetro de espesor, para su posterior uso en la fabricación de circuitos integrados. Este tipo de celdas alcanzan eficiencias de alrededor 16%. Además, producen entre 0.5 y 0.6 W cada una por lo que **36** celdas fotovoltaicas son necesarias para producir un voltaje de aproximadamente 20 W, esto es suficiente para cargar una batería de 12 V.

Por otro lado las celdas fotovoltaicas de tipo policristalino, se obtienen fundiendo el material semiconductor, que se vierte en moldes rectangulares y su estructura cristalina no es uniforme. El silicio policristalino está conformado por pequeños cristales de enorme pureza que hace que sus propiedades eléctricas superen a las de tipo amorfo. Para que un electrón recorra una micra por un cristal ordenado, es un trayecto menos abrupto comparado con el que se realiza en el silicio amorfo. Cabe destacar que es el más utilizado en paneles solares. Los dos tipos pueden ser identificados a simple vista, ya que la estructura monocristalina provee una superficie de brillo uniforme, mientras que la policristalina muestra zonas de brillo diferente.

Las celdas fotovoltaicas policristalinas son más baratas, sin embargo menos eficientes que las celdas fotovoltaicas monocristalinas; son cuadradas, de modo que cubra mayor área del panel fotovoltaico, alcanzando eficiencias de conversión de alrededor 14%.

El ultimo tipo ó versión es la de tipo amorfo. Estas, normalmente se utilizan en pequeños paneles solares, como los de las calculadoras, relojes o las lámparas de jardín, aunque cada

vez son más utilizadas en aplicaciones de mayor tamaño. Se fabrican depositando una película delgada de silicio sobre una hoja de otro material tal como acero. Su proceso de fabricación es similar al del diodo. La siguiente tabla muestra las características de cada tipo de celda.

CELDA	MONOCRISTALINO	POLICRISTALINO	AMORFO
<b>Ventajas</b>	-Buen rendimiento. -Buena relación Wp m <sup>2</sup> (~150 WC/m <sup>2</sup> ). -Número de fabricantes elevado	-Paneles cuadradas que permiten un mejor uso del módulo. -Eficiencia de conversión óptima, alrededor de 100 Wp/m <sup>2</sup>	-funciona con luz difusa muy baja(días nublados) -menos costosa -integración sobre soporte flexible o rígido
<b>Desventajas</b>	-Costo más elevado	-Bajo rendimiento en condiciones de iluminación baja	-rendimiento bajo el sol de 5%-7% -rendimiento decrece con el tiempo

**Tabla 2 Ventajas Y Desventajas De Los Tipos De Celdas Fotovoltaicas**

## 1.2 FUNCIONAMIENTO DE MODULO FOTOVOLTAICO

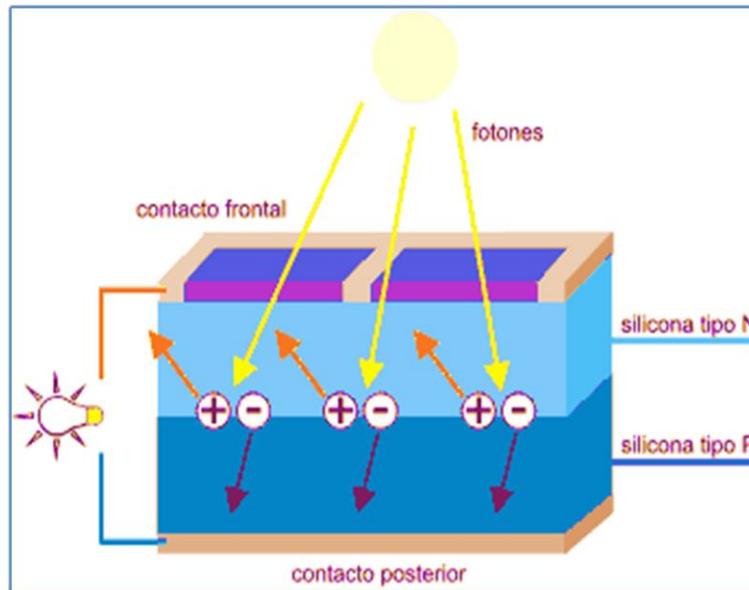
El funcionamiento del panel fotovoltaico es un proceso delicado que requiere más técnica y control que otras formas de generación, pues la energía generada por el sol, posee parámetros no lineales, que requieren mucho más análisis al momento de poner en servicio estos mecanismos. El fenómeno fotoeléctrico no podría llevarse a cabo sin un estudio meticulado de la luz. El componente que da energía a los rayos solares, es llamado fotón, y tiene su explicación por la siguiente ecuación:

$$E = h * f = hc/\tau \quad [1]$$

Donde  $h$  es la constante de Planck,  $c$  es la velocidad de la luz y  $\tau$  es la longitud de onda. Esto difiere de lo que ocurre con las ondas clásicas, que pueden ganar o perder cantidades arbitrarias de energía. Para la luz visible, la energía portada por un fotón es de alrededor de  $4 \times 10^{-19}$  J; esta energía es suficiente para excitar un ojo y dar lugar a la visión.

Ahora bien cuando la energía proveniente de los rayos solares llega a la celda fotovoltaica, los electrones inciden en el panel fotovoltaico y son sacados de los átomos del material semiconductor. El resultado de este proceso es forzar a los electrones a pasar a la banda de conducción, creando huecos en la banda de valencia, que en términos físicos estos componentes poseen carga positiva. De esta manera, se moverán hacia el lado opuesto del material, para que así se produzca una diferencia de potencial entre las dos partes del componente tal como ocurriría en una pila. Cabe destacar que para evitar que vuelvan a recombinarse se debe contar con un campo eléctrico interno. Inmediatamente después, la energía proporcionada por el fotón se disipa, un fenómeno muy similar al de una resistencia, cuando disipa el calor.

Como se muestra en la ilustración 3, la capa se compone de silicio dopado tipo N, un dopado de un átomo de fosforo en la red cristalina de la estructura de silicio. En esta capa existe un mayor número de electrones libres, se puede asociar esta proporción como carga negativa de ahí el nombre de dopaje tipo N. Es decir, el material se encuentra eléctricamente neutro; la red cristalina es quien tiene globalmente una carga negativa.



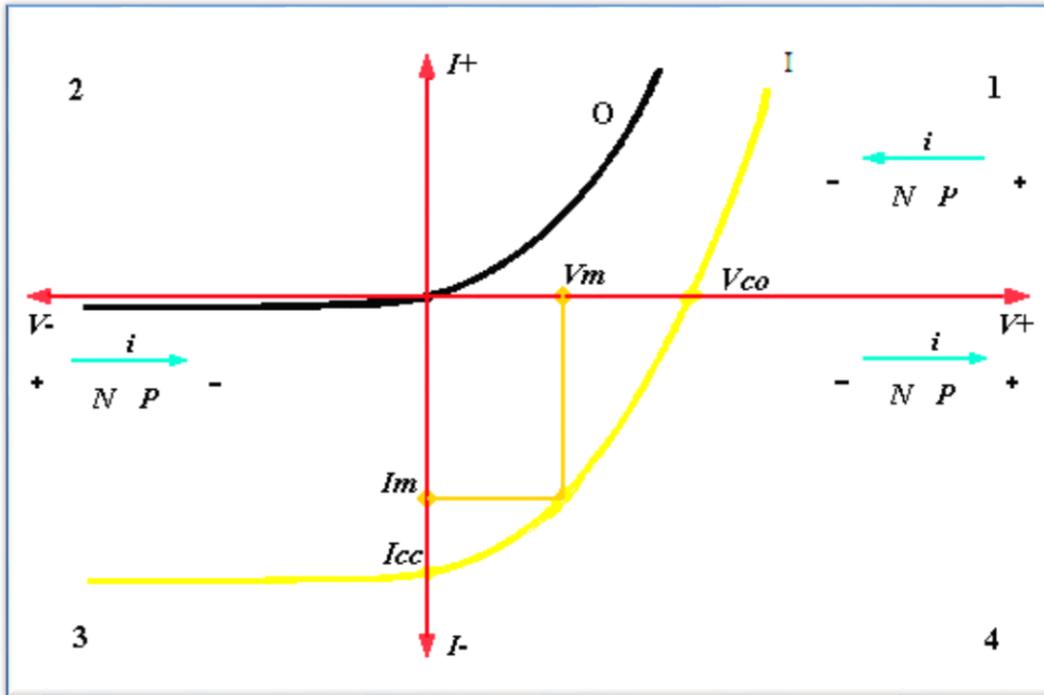
**Ilustración 3 Capas De Semiconductores Tipo P Y Tipo N**

La capa siguiente se compone de silicio dopado tipo P, un dopado de un átomo de aluminio en la red cristalina del silicio, en este caso los electrones poseen una cantidad menor que en el silicio puro por tanto la red cristalina está cargada positivamente, en este caso la conducción eléctrica es realizada por los huecos. Los semiconductores tipo P y tipo N separados no tienen mucha utilidad, pero si un cristal se dopa de tal forma que una mitad sea tipo n y la otra mitad de tipo p, esa unión PN tiene unas propiedades muy útiles que son aplicadas a los diodos y en especial a los paneles solares.

En el momento de la unión la diferencia de concentración de electrones y huecos, entre ambas regiones provoca un campo eléctrico permanente que se encarga de separar nuevos huecos o electrones cuando los fotones llegan al panel fotovoltaico.

Cabe destacar que el efecto fotovoltaico produce un desplazamiento de portadores que da lugar a una diferencia de potencial aprovechable de alrededor de 0,5 V entre los electrodos a circuito abierto. La barrera de potencial impide que el proceso se revierta, aunque puede existir una pequeña corriente de fuga. En circuito cerrado la corriente pasa por la carga del borne P al N, por el exterior del panel fotovoltaico.

Las celdas fotovoltaicas pueden compararse con los fotodiodos de silicio normales como se puede inferir en la siguiente ilustración:



**Ilustración 4 Curvas Características De Los Elementos Semiconductores**

En la ilustración 4, es posible ver cómo queda establecida la gráfica de la curva voltaje y corriente trazada en la oscuridad (O), que es igual a la de un diodo ordinario, mientras que la curva correspondiente a la incidencia sobre la celda en un ambiente con una determinada iluminación I, resulta del cambio ó traslación de la curva anterior, proporcional a la energía luminosa recibida.

Analizando la curva I se observa, que el primer cuadrante, correspondiente a la polarización directa, la curva característica no sale del origen, y a corriente nula la tensión en límites es  $V_{co}$ . En el tercer cuadrante, la curva O indica la corriente inversa de fuga en la oscuridad en función de la tensión inversa, mientras que la curva I da la variación de esa corriente con la iluminación, de un modo proporcional.

Finalmente, en el cuarto cuadrante, la celda funciona como generador de energía, siendo la región de trabajo normal de las celdas fotovoltaicas. En estas condiciones, la potencia que entrega pasa por un máximo  $P_m$  para determinados valores de tensión  $V_m$  y corriente  $I_m$ ,  $P_m = V_m * I_m$ ; fijados en función de la resistencia óptima de carga  $R_m = \frac{V_m}{I_m}$ .

Las celdas fotovoltaicas trabajan con dificultad fuera del cuarto cuadrante, ya que la tensión inversa que pueden soportar es pequeña, lo que obliga a la instalación de un diodo de protección en serie para prevenir daños.

Un daño común en las celdas fotovoltaicas, ocurre si una de las celdas conectadas en serie queda oscurecida, de forma que sólo recibe una parte de la energía solar, en ese caso sólo podrá generar una corriente limitada. Si la carga aplicada al panel fotovoltaico es tal que demanda una corriente superior a dicha corriente limitada, la celda afectada funcionará en sentido inverso, lo que provoca su calentamiento y su destrucción.

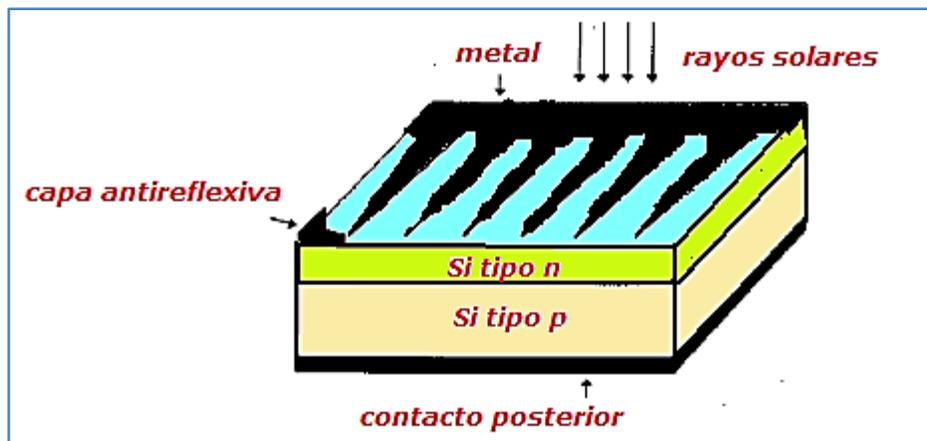
La diferencia de potencial en las celdas fotovoltaicas es el principal objeto de estudio ya que permite adaptar estos componentes para la generación de energía. Este es el por qué grandes compañías gastan millones de dólares tratando de mejorar la unión de dopados de los diferentes elementos cristalinos semiconductores y también es él por qué aun no es una industria tan comercial como el petróleo y el carbón. Es de vital importancia exponer que para lograr optimizar la transformación energética solar, es necesario mejorar la absorción del cristal tipo P ya que es él quien recibe la energía de los fotones. Se han ideado distintas soluciones para resolver este problema como lo es añadir contactos eléctricos que permitan mejorar el paso de luz por la fotocelda, como son la capa anti reflejante, contacto de rejilla e incluso aumentar las uniones a fin de explotar el espectro de energía que proporciona los fotones, entre otras [Pereda Soto, I.E. 2005. Celdas fotovoltaicas en generación distribuida. Tesis, Univ. Católica de Chile, Fac. Ingeniería 173 p.]

Los contactos eléctricos son los elementos de conexión entre la carga eléctrica externa y el material semiconductor, algunos de los contactos más simples son los que se encuentran en la parte trasera de la celda, estos están hechos de una capa de metal de aluminio. Sin embargo, el contacto delantero es más complejo; cuando la luz golpea a la celda esta recorre toda la superficie, si se unen solamente contactos en los bordes no trabaja bien debido a la gran resistencia que esta presenta en la capa superior del semiconductor, por lo que se debe poner más contactos a través de la lámina, pero sin crear efecto de sombra pues se perdería eficiencia.

La capa anti reflejante, como se observa en la ilustración 5, tiene una gran importancia ya que para tener una absorción aceptable de energía solar no se debe rechazar a los fotones que golpean la lámina semiconductor, existen dos técnicas para este proceso:

- a. Cubrir la capa superior de una capa de monóxido de silicio ( $\text{SiO}$ ), una sola capa puede bajar el índice de reflexión en un 10%, una segunda capa reduce la reflexión en menos de un 4%.

- b. Recombinar la textura de la capa superior en formas geométricas rectangulares haciendo que se pueda absorber de nuevo los rayos solares, es decir la reflexión de reflexión.



**Ilustración 5 Textura De La Capa Superior, Segunda Técnica De Capa Anti Reflejante**

Los paneles solares más comunes tienen 30 o 36 celdas de silicio cristalino. Todas las celdas son del mismo tamaño. Ellas están conectadas en serie y encapsuladas entre hojas de vidrio.

La suposición de que las celdas y los módulos que constituyen un generador fotovoltaico trabajan bajo las mismas condiciones, no es totalmente correcta, ya que las características de las celdas y módulos están sujetas a diversas variaciones. Existen dos razones que lo explican:

- La variación natural de los parámetros esperados desde los diversos procesos de manufacturado
- Las condiciones variantes de operación que ocurren dentro del panel fotovoltaico. Un ejemplo del punto ocurre cuando parte de un panel fotovoltaico está ensombrecida por una nube, o cuando algunos módulos están más sucios que otros y reciben menos luz.

Estas variaciones tienen los siguientes efectos:

- La máxima potencia que el generador puede entregar es más baja que la suma de las máximas potencias de salida de los módulos constituyentes. Esta diferencia es llamada pérdidas de desajuste, Se entiende como pérdidas de desajuste, cuando la impedancia de la carga es de valor incorrecto para máxima transferencia de potencia.
- Algunas celdas pueden funcionar como cargas disipando la potencia producidas por otras. Esto conduce a una elevada temperatura que afecta a las celdas. Si la

temperatura excede los 85 °C. Los materiales del encapsulamiento son dañados irreparablemente haciendo que el módulo no sirva más. El término punto caliente es usado para describir este fenómeno.

El módulo fotovoltaico debe proveer un voltaje y corriente adecuada para la topología que se utilice. Debido a que el encapsulamiento protege las celdas contra las variaciones del medioambiente, aislándolas eléctricamente y proporcionando resistencia mecánica. La vida de un módulo debería exceder los 20 años bajo condiciones normales, sin embargo esta duración depende principalmente de la encapsulación para que el agua no entre, no exista desgaste ante resistencia térmica, ni deterioro provocado por la erosión y la abrasión mecánica.

### 1.3 PARÁMETROS DE LOS MODELOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

En la industria existen diferentes clasificaciones para las características que poseen los módulos fotovoltaicos, como son: tamaño, forma y precio. Sin embargo los valores medibles en términos de generación eléctrica son los que se puede establecer como parámetros estandarizados para analizar a la celda fotovoltaica.

El primer punto a analizar es la potencia pico. En un sistema fotovoltaico se define como la potencia eléctrica máxima que se puede generar con base en condiciones especiales para la medición como son:

- a. irradiación:  $1 \frac{Kw}{m^2}$
- b. temperatura: 25° C
- c. masa de aire: 1.5

En un día soleado, el Sol irradia alrededor de  $1 \frac{Kw}{m^2}$  a la superficie de la Tierra. Considerando que los paneles fotovoltaicos actuales tienen una eficiencia típica entre el 12%-25%, esto supondría una producción aproximada de entre 120-250  $\frac{W}{m^2}$  en función de la eficiencia del panel fotovoltaico.

Masa de aire, es una medida de la distancia que recorren las ondas electromagnéticas solares al atravesar la atmósfera y que varía según el ángulo de incidencia, siendo  $\theta$  el ángulo de incidencia del rayo del Sol en la vertical del lugar, de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$MA = \frac{1}{\cos \theta} \quad [2]$$

Independiente del semiconductor con el que se fabrican las celdas, todas deben poseer valores adecuados para su correcta instalación como lo son:

- a. Tensión en circuito abierto, que es la magnitud es la diferencia de potencial entre los bornes de la celda en ausencia de consumo, con una iluminación fija y a una temperatura determinada. Su valor depende de la unión utilizada. No varía con la intensidad luminosa en gran medida.
- b. Corriente de cortocircuito, que es la intensidad de corriente que circula con la celda en una anulación parcial o total de la resistencia del circuito, con una iluminación determinada y fija. Su valor es directamente proporcional a la superficie total y al nivel de iluminación.
- c. Corriente óptima, que es la intensidad que circula por la celda en el punto de funcionamiento óptimo, teniendo aplicada una carga de valor óptimo, elegida de modo de que la potencia eléctrica sea máxima.
- d. Tensión óptima. Es la tensión que origina la corriente óptima, al ser aplicada sobre una carga de valor óptimo, elegida de modo de que la potencia eléctrica sea máxima
- e. Punto de máxima potencia. Es el punto de máxima potencia teórica, en el que la carga para el panel fotovoltaico puede entregarla máxima potencia eléctrica para un determinado nivel de radiación. Cabe destacar que no es el límite de generación de potencia que es capaz de generar el Panel fotovoltaico, si las condiciones especiales son superadas, por ejemplo, con una radiación mayor, el panel podrá generar más potencia que la potencia pico.
- f. Eficiencia. Es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica de la luz solar total absorbida por un panel, cuando está conectado a un circuito eléctrico. Este término se calcula usando la relación del punto de potencia máxima,  $P_m$ , dividido entre la luz que llega a la celda, irradiación ( $E$ , en  $W/m^2$ ), bajo condiciones especiales y el área superficial de la panel solar ( $A_c$  en  $m^2$ ).y se define por la fórmula siguiente:

$$\epsilon = \frac{P_m}{E * A_c} \quad [3]$$

- g. Factor de llenado. Se define como la relación entre el máximo punto de potencia dividido entre el voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y la corriente en cortocircuito  $I_{sc}$ . Se define por la fórmula siguiente:

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{\epsilon * A_c * E}{V_{oc} * I_{sc}} \quad [4]$$

- h. Temperatura de operación nominal. Se define como la temperatura que alcanzan los paneles solares cuando se somete al módulo a una radiación de  $800 \frac{W}{m^2}$  con distribución espectral AM 1,5, la temperatura ambiente es de  $20^\circ C$  y la velocidad del viento de 1 m/s. Esta magnitud llega los  $100^\circ C$ .

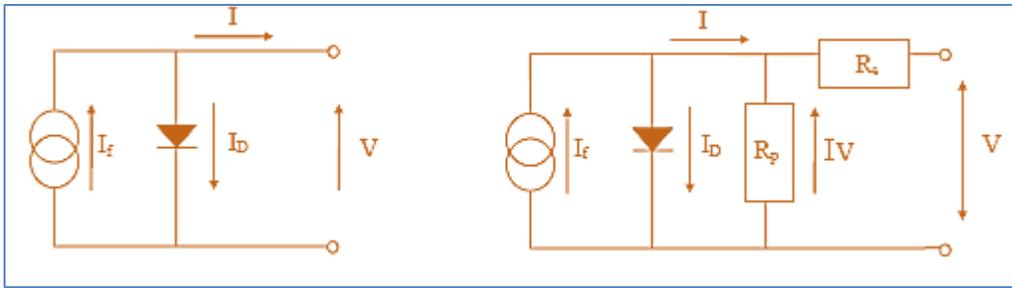
Un panel fotovoltaico puede operar en un amplio rango de voltajes y corrientes. Esto puede lograrse variando la resistencia de la carga, en el circuito eléctrico y variando la impedancia del panel, desde el valor cero, a valores muy altos.

Como se puede observar los parámetros más significativos están función de la radiación solar y porcentaje de absorción que se tiene en la celda fotovoltaica

#### 1.4 MODELO EN ESTADO ESTABLE

El comportamiento de las celdas fotovoltaicas es representado mediante ecuaciones tanto en estado estacionario como en dinámico, primero se realizara un análisis del modelo estacionario. Se dice que un sistema físico está en estado estacionario cuando se considera que las características del mismo no varían con el tiempo.

El comportamiento del panel fotovoltaico puede ser descrito en términos de un circuito equivalente. El cual está constituido por un diodo de unión PN y por una fuente de corriente  $I_f$ . Como se muestra en la ilustración 6, en un panel fotovoltaico real existen otros efectos, que afectan el comportamiento externo de la misma. Estos efectos se tienen en cuenta al considerar la resistencia serie  $R_s$  y la resistencia paralelo  $R_p$ . La primera proviene de la resistividad del emisor n y de la base p, de las resistencias de contacto entre el semiconductor y los contactos metálicos, y de la resistencia de los dedos metálicos que constituyen la superficie metálica, la segunda es debida a pérdidas en los bordes y a la presencia de defectos cristalinos debidos a la unión.



**Ilustración 6 Modelo Sin Efectos Externos A Y Con Efectos Externos B**

Para analizar este proceso las leyes de kirchoff son:

$$I = I_f - I_D - I_V \quad [5]$$

Por tanto

$$I = I_f - I_D - \frac{V + (R_s * I_V)}{R_p} \quad [6]$$

Esta relación se mantendrá a lo largo de todo el proceso. La corriente del diodo por ahora solo se caracterizara por el modelo matemático de Shockley en honor a William Bradford Shockley. La ecuación que liga la intensidad de corriente y la diferencia de potencial es:

$$I_D = I_s(e^{V_D/(nV_t)} - 1) \quad [7]$$

Dónde:

$I_D$  Es Intensidad de la corriente que atraviesa el diodo

$V_D$  Es Diferencia de tensión entre sus extremos.

$I_s$  Es Corriente de saturación aproximadamente  $10^{-12}$  A

$n$  Es Coeficiente de emisión, dependiente del proceso de fabricación del diodo y que suele adoptar valores entre 1 para el germanio y del orden de 2 para el silicio.

$V_t$  Es aproximadamente 25.85mV en 300K. Para cada temperatura existe una constante conocida definida por:

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad [8]$$

Donde  $k$ ; es  $1.3806504 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$ ,  $T$  es la temperatura absoluta de la unión PN, y  $q$  es la magnitud de la carga de un electrón.

En conexiones serie y paralelo de estos dispositivos, se tienen variaciones de corriente o de voltaje que mejoran la utilidad de la celda; es decir, que en las conexiones en paralelo las corrientes se suman y el voltaje resultante es el mismo en todas las partes del circuito. Estas conexiones se realizan comúnmente en las baterías de la celda, para aumentar la capacidad de almacenamiento y prolongar el tiempo de funcionamiento del sistema. Además, si los paneles solares se conectan en paralelo puede ser muy benéfico ya que, si están en el mismo ángulo, no se hacen sombra y se tiene una distancia apropiada en los paneles. Matemáticamente se puede expresar la conexión en paralelo de la siguiente forma:

$$I_f = \sum_{i=1}^{N_{cel}} i_{cel} \quad [9]$$

La ecuación 9 describe como, la corriente aumenta proporcionalmente al número de paneles. La conexión en serie es la más común ya que de esta manera se logra un valor de tensión muy elevado y menos riesgo de una corriente muy alta. Así mismo el voltaje final aumenta proporcionalmente al número de paneles.

$$V_f = \sum_{i=1}^{N_{cel}} V_{cel} \quad [10]$$

## 1.5 MODELO DINÁMICO

En el análisis dinámico, el panel cuenta con un número mayor de parámetros a analizar. El dinamismo de estos parámetros hace que la corriente fotogenerada dependa de la radiación que el panel recibe. Este movimiento es expresado en las siguientes fórmulas:

$$I_f = area \left( J_{sc} \frac{G}{1000} \right) + \alpha_{J_{sc}} (T - T_{ref}) \quad [11]$$

$$I_D = \frac{J_{sc} * (área) * T_k^3 \times e^{-E_g/V_t}}{\left( e^{\frac{V_{oc}}{nV_t^*}} - 1 \right) * 300^3 * e^{-E_g^*/V_t^*}} \quad [12]$$

$$V_t = \frac{KT_k}{q}, V_t^* = V_t |_{T_k=300} \quad [13]$$

$$T_k = T + 273 \quad [14]$$

$$E_g = E_{g0} - \frac{\alpha_{gap} T_k^2}{\beta_{gap} + T_k}, E_g^* = E_g |_{T_k=300} \quad [15]$$

La corriente fotogenerada  $I_f$  se determina en función del área en  $cm^2$ , de la densidad de corriente en corto circuito  $J_{sc}$  en  $A/cm^2$ , de la temperatura del proceso, T en °C y un factor de temperatura  $\alpha_{JSC}$  en  $A/°C * cm^2$ , y la radiación que incide en el panel,  $G$   $W/cm^2$ .

La corriente de saturación  $I_D$ , se obtiene de la tensión térmica  $V_t$  en V,  $E_g$  es la energía del gap (se conoce como energía del gap a la diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción) en eV. La expresión de energía del gap se desarrolla en donde se encuentran coeficientes de temperatura siendo la temperatura en 0°C, en  $V_t^*$ , la expresión de energía en gap tiene  $\alpha_{gap}$  y  $\beta_{gap}$  como coeficientes de temperatura a 0°C y  $E_{g0}$  también se particularización de la expresión a 0°C.

$V_{oc}$ , es la tensión en circuito abierto, en V, y  $T_k$  la temperatura en °K.  $V_t$  se definen en otra expresión donde K es la constante de boltzman y q es la carga del electrón.

Además, la corriente de saturación está sustituida en la ecuación de shockley. La tabla 3 muestra el conjunto de valores que caracterizan a las celdas, cuando están puestas en servicio.

$K=1.38e^{-23} J/°K$	$R_s = 10K\Omega$	$\beta_{gap} = 1100°K$
$q=1.6e^{-19}C$	$n=1.18$	$J_{sc}=28.16e^{-3} A/cm^2$
Área= $156.25cm^2$	$E_{g0} = 1.16eV$	$\alpha_{JSC}=e^{-6} A/°Kcm^2$
$R_s=10.5e^{-3}\Omega$	$\alpha_{gap}=7e^{-14} V/°K$	$V_{oc}=0.57V$

**Tabla 3 Parámetros Más Empleados En El Uso De Paneles Solares**

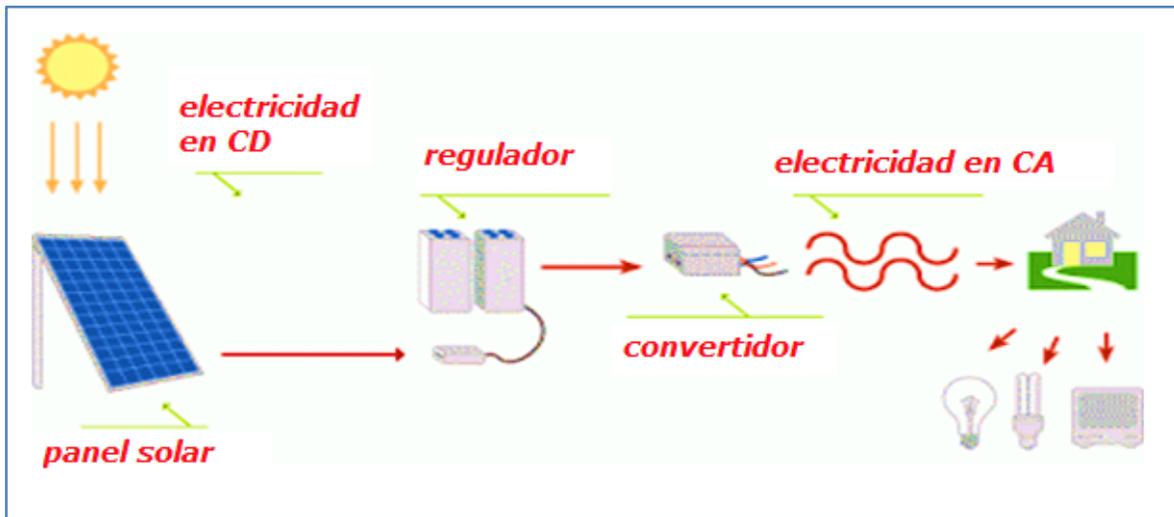
La expresión que modela el comportamiento de la corriente en el panel es la siguiente:

$$I = \text{area} \left( J_{sc} \frac{G}{1000} \right) + \alpha_{JSC} (T - T_{ref}) - \frac{J_{sc} \times (\text{area}) \times T_K^3 \times e^{-E_g/V_t}}{\left( \frac{V_{oc}}{e n V_t^*} - 1 \right) \times 300^3 \times e^{-E_g^*/V_t^*}} - \frac{V + (R_s \times I)}{R_p} \quad [16]$$

Cabe destacar que en condiciones de trabajo normales, el uso diario provoca un deterioro y envejecimiento desigual en los módulos fotovoltaicos, provocando que se genere una temperatura superior a la normal, que puede destruir el panel, por lo que se utilizan diodos de paso que limitan la potencia disipable.

## 1.6 EQUIPOS AUXILIARES DE LOS SISTEMAS SOLARES

El panel fotovoltaico debe ser incorporado en la red eléctrica, con elementos auxiliares que le permitan proveer un voltaje y corriente adecuada para su uso. Los módulos fotovoltaicos, entonces poseen equipos de seguimiento, de almacenamiento de energía, convertidores de voltaje y topologías de instalación. En la ilustración 7 se observa la puesta en servicio con el equipo auxiliar.



**Ilustración 7 Equipo Auxiliar En La Instalación Fotovoltaica**

### 1.6.1 BATERÍAS

Las baterías o son elementos de origen alcalino y las más utilizados están hechas de la unión plomo-ácido, estas funcionan como almacén de la energía eléctrica ya transformada de la celda y su vida depende de las condiciones del mantenimiento. Otro rasgo a destacar es la eficiencia de la conexión; esta se calcula averiguando el cociente entre la potencia que realmente es entregada a la batería y la potencia máxima que debería entregar el módulo fotovoltaico como si estuviera polarizado en el punto de máxima potencia:

$$\mu = \frac{P_{bateria}}{P_{in}} \quad [17]$$

Existen 3 componentes para calcular el rendimiento de la batería, el primero es el cociente entre la potencia entregada a la batería y la potencia proporcionada por el módulo en las condiciones de trabajo concretas; la segunda componente es el cociente entre la potencia generada por el módulo en ese punto de trabajo y la potencia que generaría si estuviera polarizado en el punto de máxima potencia:

$$\mu_2 = \frac{P_m}{P_{max}} \quad [18]$$

La tercera componente es el cociente entre la potencia máxima del módulo y la potencia incidente en el módulo.

$$\mu_3 = \frac{P_{mMax}}{P_{in}} \quad [19]$$

La operación en instalaciones fotovoltaicas somete a las baterías a trabajar bajo condiciones que son caracterizadas por:

a. Ciclos diarios suaves.

Los ciclos diarios suaves son los que debido al uso continuo de la electricidad durante la noche, la profundidad de descarga asociada con este ciclo,  $PD_d$ , depende sólo de la razón entre el consumo nocturno y la capacidad de la batería. En particular, es independiente del tamaño del generador y del clima local. Por tanto

$$PD_d = L_n / C_B \quad [20]$$

Donde  $L_n$  es la energía consumida cada noche

$C_B$  capacidad nominal de la batería

b. Períodos estacionales largos con bajo nivel de carga.

Ahora bien, los periodos estacionales largos están asociados con los períodos de reducción de la radiación, estos son en extremo importantes ya que la profundidad  $PD_e$  de descarga estacional y la duración  $D$  depende del consumo de día y de noche; del tamaño del generador y del clima local. La terminología es potencialmente engañosa y estos ciclos no coinciden generalmente con las estaciones del año. Ello ocurre cuando hay un día con más baja radiación que el valor medio usado en el diseño del sistema. Naturalmente, esto ocurre más a menudo en invierno que en verano. Para evitar que demasiado material activo se pierda en la batería, normalmente se incluyen algunos elementos de control para limitar  $PD_e$  a un cierto máximo  $PD_{Max}$ .

El suministro a la carga tiene que ser cortado cuando se alcanza este límite. La capacidad disponible o utilizable de la batería es, por lo tanto, menor que la capacidad nominal e igual al producto  $C_B PD_{Max}$ .

La relación entre costo y seguridad en una instalación típica fotovoltaica lleva a elegir baterías con capacidades de 3 a 8 veces la energía diaria que consume la carga. Valores típicos de  $PD_d$  oscilan entre 0,05 y 0,2, mientras que para  $PD_{Max}$  entre 0,5 y 0,75.

la elección de la batería es en función de la durabilidad en los diferentes ciclos explicados, el poco mantenimiento, y la disponibilidad de obtener la batería.

### 1.6.2 INVERSORES

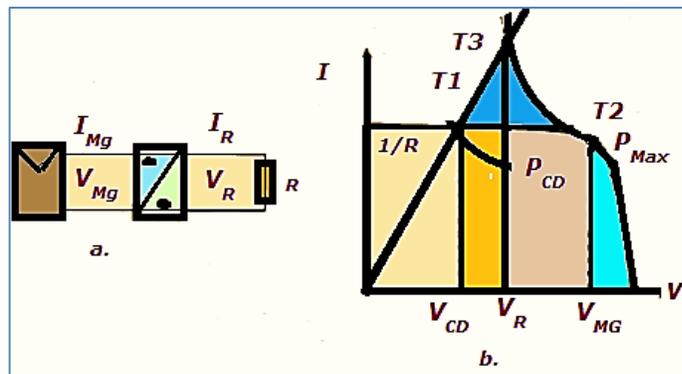
Los inversores se emplean para transformar la corriente continua generada por las celdas fotovoltaicas en corriente alterna.

### 1.6.2.1 INVERSORES DC-DC.

La conexión directa entre el panel fotovoltaico y la carga lleva a un punto de trabajo que implica pérdidas de operación.

Para evitar estas pérdidas, se pueden usar convertidores DC-DC. El caso de un panel fotovoltaico conectado a una pequeña carga resistiva  $R$ , como se muestra en la ilustración 9(a) da un ejemplo de cómo funcionan estos convertidores. Los diferentes puntos de trabajo para conexión directa y conexión vía convertidor DC-DC.

Como se observa en la ilustración 9 (b), en el primer caso, el generador y la resistencia operan al mismo voltaje,  $V_{CD}$  (punto T1). Si este valor es significativamente menor que el punto de máxima potencia correspondiente al voltaje  $V_{MG}$  del generador, entonces la energía obtenida  $P_{CD}$  será menor que lo que el generador es capaz de suministrar, y el generador es usado por debajo de su capacidad. Un convertidor DC-DC presenta al generador con una impedancia tal que el punto de trabajo coincide con el punto de máxima potencia (punto T2). Esto resuelve el problema de las pérdidas de operación. Los convertidores DC-DC se aplican en aquellos casos donde la ganancia en potencia entregada a la carga, es grande, es decir que si se obtiene un valor de potencia lo suficientemente mayor en primera instancia; es razón suficiente para incorporar este sistema. Usualmente no son justificados a menos de 10 o 20 kWp



**Ilustración 9 a) Principio De Operación De Un Convertidor Dc/Dc, b) Puntos De Trabajo Con Y Sin Convertidor**

### 1.6.2.2 INVERSORES DC-AC

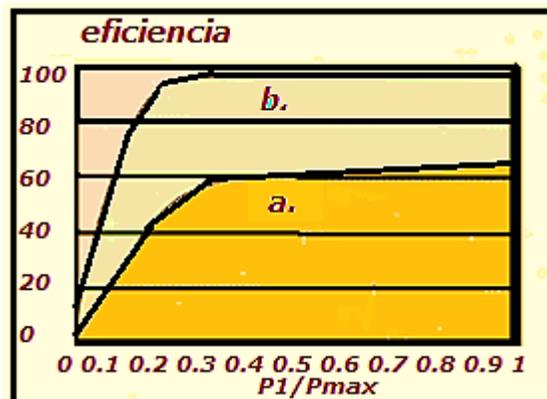
Para conectar un sistema fotovoltaico a una red en AC se requieren, convertidores de DC a AC. Los cuales consisten en un grupo de interruptores electrónicos controlados; que cuando se generan impulsos de generación modulada, se utiliza un filtro que incorpora los picos de

onda en una forma senoidal muy tenue. En la ilustración 10, se observa el diagrama de bloques de un convertidor DC-AC.



**Ilustración 10 Convertidor Dc/Ac**

Los sistemas en lugares aislados, presentan demandas altas a los inversores. Existe el hecho de que la potencia extraída por la carga varía en un rango muy amplio, esto hace necesario que el inversor sea eficiente en todas las salidas de energía menores o iguales al máximo. Aunado a lo anterior, el inversor debe resistir altas demandas de carga, por ejemplo motores encendidos y cortocircuitos accidentales en el sistema. Así mismo las armónicas en la red suponen una pérdida de eficiencia muy grande. En la ilustración 11 la eficiencia típica que tienen los inversores, y la eficiencia que tienen cuando se reducen armónicas



**Ilustración 11 a) Eficiencia Típica De Inversores, B) Eficiencia Con Armónicas Reducidas**

Una aplicación es el uso de inversores para alimentar motores de jaula de ardilla acoplados a bombas, El uso de estas bombas es sacar agua de un pozo para utilizarla como potable. Los inversores que se usan convierten DC del panel fotovoltaico en AC de frecuencia variable. La frecuencia establece la velocidad del motor y la bomba funciona en relación a la intensidad de la luz solar que cae en el panel fotovoltaico. Los sistemas de bombeo resultantes son, confiables y eficientes.

Es común integrar convertidores DC-DC y DC-AC al mismo inversor, en aplicaciones donde no se usan baterías, tal como la conexión a la red o el bombeo de agua, debido a que

el costo, es similar al de la conversión tradicional. Por lo tanto, el diseño de convertidores da como resultado que la energía eléctrica no se desperdicie.

### 1.6.3 EQUIPO DE SEGUIMIENTO

Un equipo de seguimiento, orienta los paneles solares de forma que éstos permanezcan perpendiculares a los rayos solares, siguiendo al sol desde el este en la salida, hasta el oeste en la puesta.

Dependiendo del eje que el seguidor utiliza para cambiar de posición, es posible hacer la siguiente clasificación:

- a. En dos ejes (2x) la superficie se mantiene siempre perpendicular al sol. Existen de dos tipos:
  - a) Monoposte. consiste en un único apoyo central.
  - b) Carrousel. consiste en varios apoyos distribuidos a lo largo de una superficie circular.
- b. En un eje polar la superficie gira sobre un eje orientado al sur e inclinado un ángulo igual a la latitud. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al Sol.
- c. En un eje azimutal la superficie gira sobre un eje vertical, el ángulo de la superficie es constante e igual a la latitud. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano local que contiene al Sol.
- d. En un eje horizontal la superficie gira en un eje horizontal y orientado en dirección norte-sur. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al Sol.

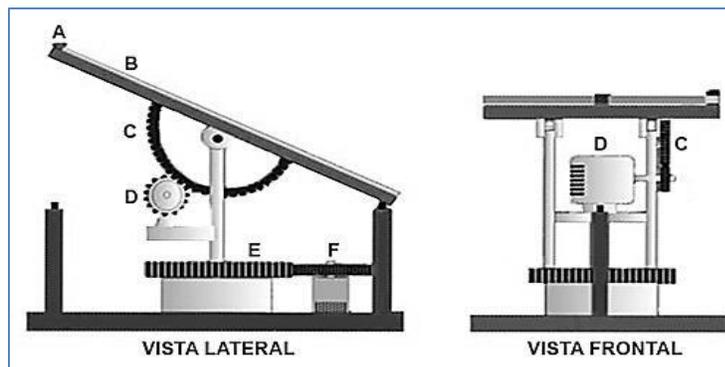
El uso de seguidores a uno o dos ejes permiten aumentar la eficiencia con que se capta la energía solar, un 30% para los de un eje y un 6% adicional para los de dos ejes, siempre que se ubiquen en lugares de elevada radiación directa, ya que la superficie se mantiene perpendicular al Sol. De forma similar el seguimiento azimutal asimila luz solar, de un 10% a un 20% más que las estructuras fijas. Los seguidores azimutales pueden llegar hasta el 25%.

Entre los distintos seguidores a dos ejes existen variaciones de entre el 30% y el 45% de incremento de producción frente a las instalaciones fijas, así como variaciones importantes en el costo de los equipos y de las cimentaciones. Los parámetros más importantes para comparar los seguidores solares son:

- a. Incremento de producción de energía
- b. Costo del equipo e instalación del mismo

- c. Resistencia al viento
- d. Disponibilidad
- e. Fácil mantenimiento

A continuación se muestra un sistema seguidor de control electrónico, que funciona con dos fotorreceptores, la diferencia de la radiación solar entre ellos provoca el movimientos de los motores que regulan la posición del seguidor solar. Cuando la intensidad solar captada por ambos sensores es igual, los motores se detendrán y el seguidor solar queda posicionado de tal forma que el sol incidirá perpendicularmente sobre ello



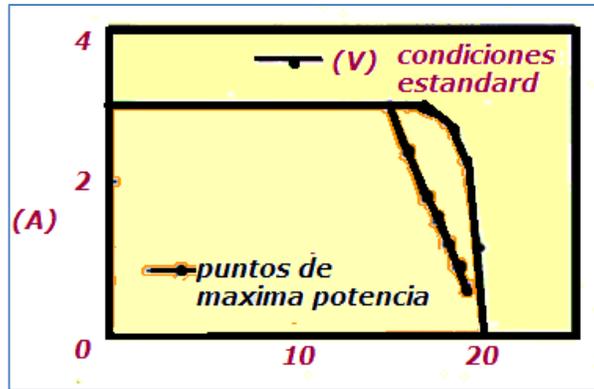
**Ilustración 12 Sistema Seguidor Solar Electromecánico Dónde:**

- A sensores**
- B panel fotovoltaico**
- C engranajes para movimiento de inclinación**
- D motor de inclinación**
- E corona para movimiento acimutal**
- F motor acimutal**

#### 1.6.4 EQUIPO DE CONTROL

El subsistema electrónico de regulación de carga está compuesto por elementos que permiten conocer cuál es el estado de carga de la batería, poniendo en marcha eventualmente una protección de sobrecarga. La detección del estado se hace mediante la medida de la tensión de la batería y la comparación de la misma respecto a una referencia.

La acción de protección de la batería puede consistir en ofrecer un camino alternativo a la corriente del subsistema fotovoltaico de forma que no siga cargando la batería, o bien en implementar una interrupción del circuito de carga mediante la desconexión de los módulos fotovoltaicos. El mejor sistema de regulación es aquel que mantiene a los módulos fotovoltaicos trabajando en su punto de máxima potencia.

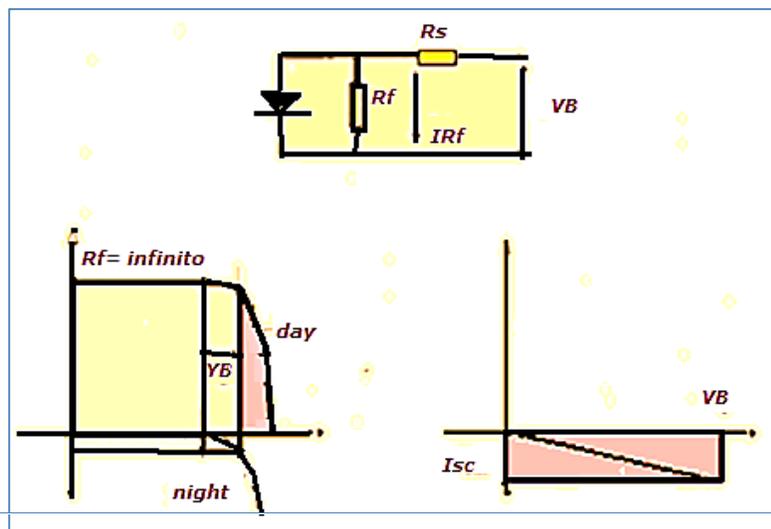


**Ilustración 13 Característica I(V) En Condiciones Normales Correspondientes Al Punto De Máxima Potencia Para Condiciones Variables De Radiación Y Temperatura.**

La característica representada en la ilustración 13 es útil a la hora de diseñar las estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia en los reguladores, puesto que tiene en cuenta la temperatura y la radiación. Así también se utilizan diodos para bloquear corrientes dañinas que eleven la temperatura de la celda.

Los diodos de bloqueo son usados en generadores que están conectados a baterías; su función es evitar las descargas de las celdas a través de la batería, cuando las celdas no están iluminadas y la tensión que producen puede ser más pequeña que la de la batería.

La ilustración 14, muestra el circuito equivalente de un generador fotovoltaico en la oscuridad mostrando las dos vías posibles de descarga: primero a través del diodo; segundo, a través de la resistencia paralela  $R_f$ . Para analizar la primera vía por separado, que la resistencia paralela  $R_f = \infty$ . La característica I-V para la noche se puede obtener moviendo la característica de la hora del día hacia abajo, de modo que  $I_{SC} = 0$ , puesto que no hay corriente generada por la celda. También, debido al enfriamiento de las celdas, hay un desplazamiento, hacia voltajes más altos. Más aún, voltajes de trabajo de la batería tienden a avanzar hacia el origen mientras que la batería está sujeta a la descarga más que a la carga. Estos desplazamientos de la curva resultan en un sistema capaz de cargar durante el día y de bloquear la descarga durante la noche.



#### Ilustración 14 Bloqueo De Generador Y Batería

Además la inclusión de un diodo de bloqueo resulta en una pérdida potencial, típicamente entre 0,9 y 1,2 V. Esto aumenta el voltaje de las celdas comparados con el de la batería y consecuentemente reduce la corriente de carga. Para conservar la vida de la batería, se debe evitar la sobrecarga y la excesiva descarga.

Para baterías de plomo-ácido, hay una relación directa entre el voltaje y el estado de la carga que hace fácil detectar si la batería está en una situación satisfactoria. La sobrecarga viene acompañada de un excesivo alto voltaje. Se puede evitar ya sea incorporando un equipo electrónico para disipar el exceso de potencial generado por los módulos, o desconectando las baterías del generador. El método más común de protección electrónica es un transistor conectado en paralelo con el generador fotovoltaico. El transistor conduce la corriente cuando el voltaje de la batería excede cierto umbral,  $U_{sc}$ . Para evitar la sobrecarga sin perder los beneficios del gas generado en baterías, es conveniente un valor de  $U_{sc} = 2,35 \text{ V}$  por celda a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . A otras temperaturas se debería aplicar una corrección de  $-5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ .

Con este tipo de regulador, es recomendable instalar un diodo de bloqueo entre el transistor y la batería, como se observa en la ilustración 15. Esto previene que la batería se descargue debido a una falla del transistor, el diodo de bloqueo causa una pérdida de corriente de carga. A esto se añade una pérdida de energía en el transistor. Este tipo de regulador llamado regulador paralelo, no es muy eficiente. Los reguladores paralelos se usan solamente en generadores fotovoltaicos pequeños normalmente de menos de 10 A de corriente de salida.

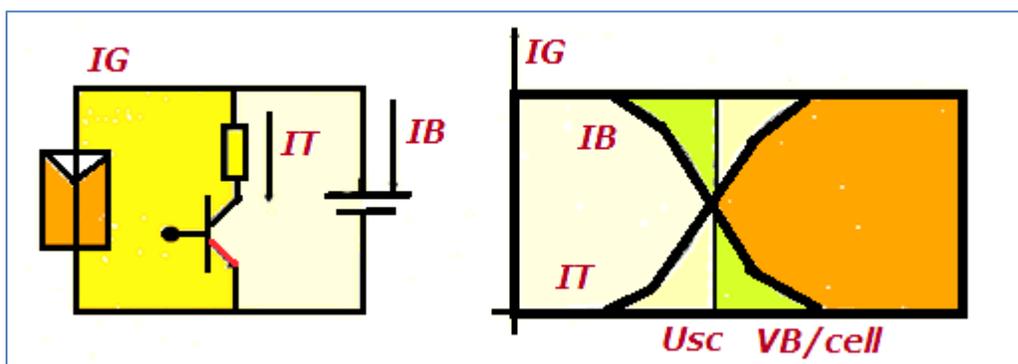
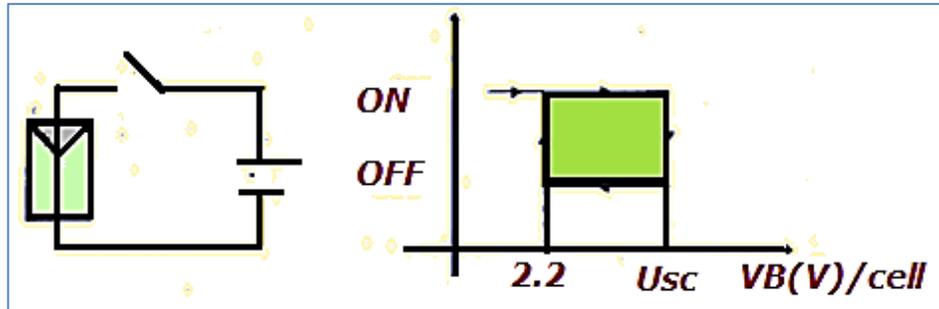


Ilustración 15 Transistor Como Protección De Sobretensión

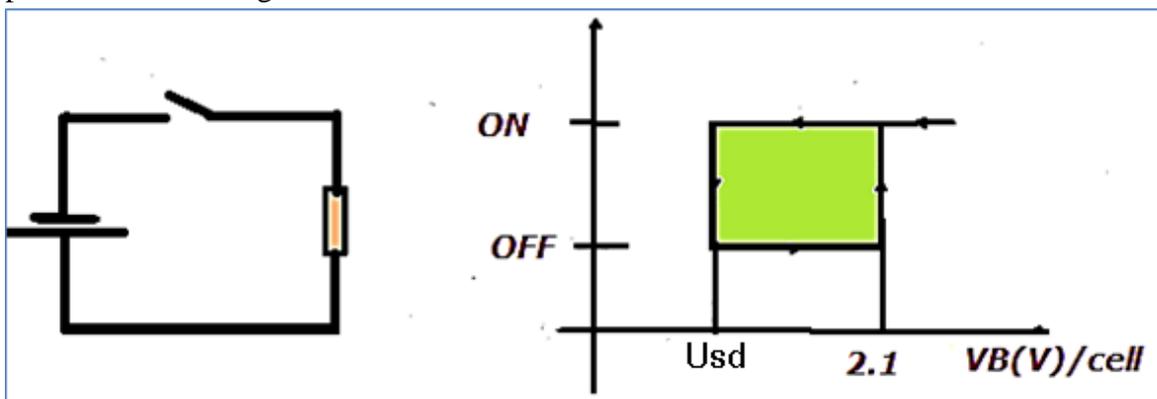
Para generadores más grandes es mejor desconectar la batería del generador usando un interruptor que tenga histéresis. En este caso el valor recomendado de  $U_{sc}$  a 25 °C es de 2,45 V, y se debería aplicar una corrección de  $-5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . A los dispositivos basados en este principio se le llama reguladores en serie. Tal como se observa en la ilustración 16.



**Ilustración 16** Batería Con Interruptor

El interruptor puede ser electromecánico o de estado sólido como transistores bipolares, ó MOSFET. Los dispositivos electromecánicos tiene la ventaja de no introducir bajas de voltaje entre el generador y la batería. Sin embargo, en ambientes expuestos a polvo y a arena, puede ser difícil mantener contactos limpios y eso puede hacerlos inseguros.

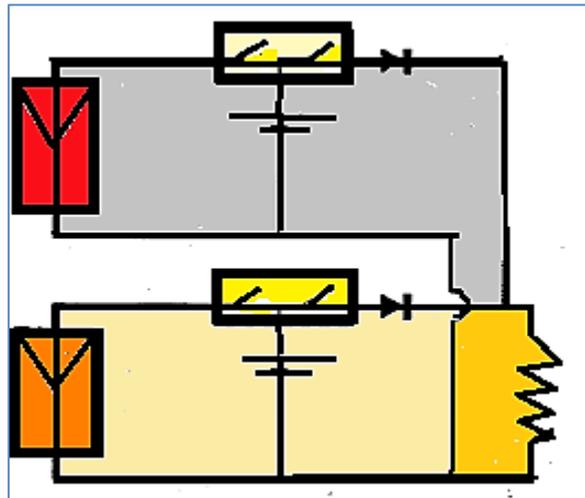
Para proteger la batería contra la descarga excesiva, la carga se desconecta cuando el voltaje terminal cae por debajo de cierto umbral,  $U_{sd}$ . Esto se hace conectando, entre la batería y la carga, un interruptor con un ciclo de histéresis. Así como con el protector de sobrecarga se puede usar ya sea un dispositivo electromecánico o de estado sólido. Se incluye frecuentemente una alarma o una advertencia de algún tipo para alertar al usuario del sistema fotovoltaico cuando las baterías se están agotando. Si es necesario, el usuario puede reducir la carga del sistema. En la ilustración 17 se observa tal ciclo.



**Ilustración 17** Protección Con Ciclo De Histéresis

No se recomienda conectar las baterías en paralelo. Si por alguna razón se decide hacerlo, entonces se deberían evitar las corrientes entre las baterías usando generadores

independientes para cada batería, y diodos entre las baterías y la carga, como en la ilustración 18.



**Ilustración 18 Baterías Conectadas En Paralelo**

El regulador de carga es un elemento esencial en cualquier sistema fotovoltaico que use baterías. Porque asegurando que la máxima tensión producida por el generador era menor que el voltaje de sobrecarga.

#### 1.6.5 TOPOLOGÍA DE RED

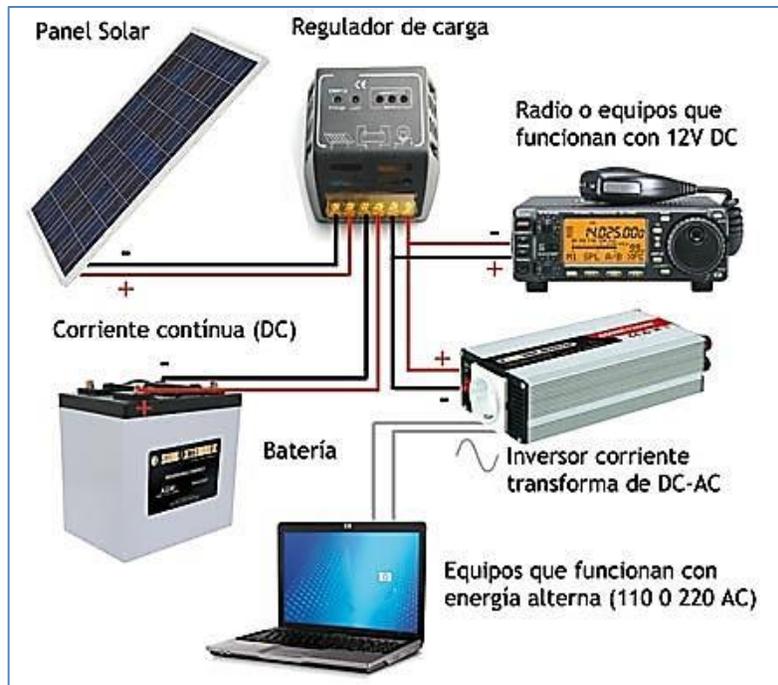
Cuando se plantea la instalación de generadores de energía solar fotovoltaica, fundamentalmente se atiende a dos razones:

- a. La necesidad de proporcionar energía eléctrica a una zona aislada o de difícil acceso para la red de distribución.
- b. La posibilidad de inyectar energía eléctrica a la red de distribución.

En función de estos criterios, existen dos topologías básicas de instalaciones fotovoltaicas: instalaciones aisladas e instalaciones conectadas a la red. Desde un punto de vista económico las instalaciones conectadas a la red son más adecuadas que las instalaciones aisladas cuando el objetivo de la instalación es también obtener un beneficio de la venta de energía.

##### 1.6.5.1 INSTALACIONES AISLADAS

Estas instalaciones hacen posible la electrificación de manera autónoma, en aquellos lugares donde no llega la red eléctrica o en los que conectarse a la red de distribución no es viable técnica o económicamente. Sus aplicaciones fundamentales son domésticas, instalaciones agrícolas y ganaderas, bombeo de caudales e iluminación. Como se ve en la ilustración 19



**Ilustración 19 Conexión Aislada De Sistema Fotovoltaico**

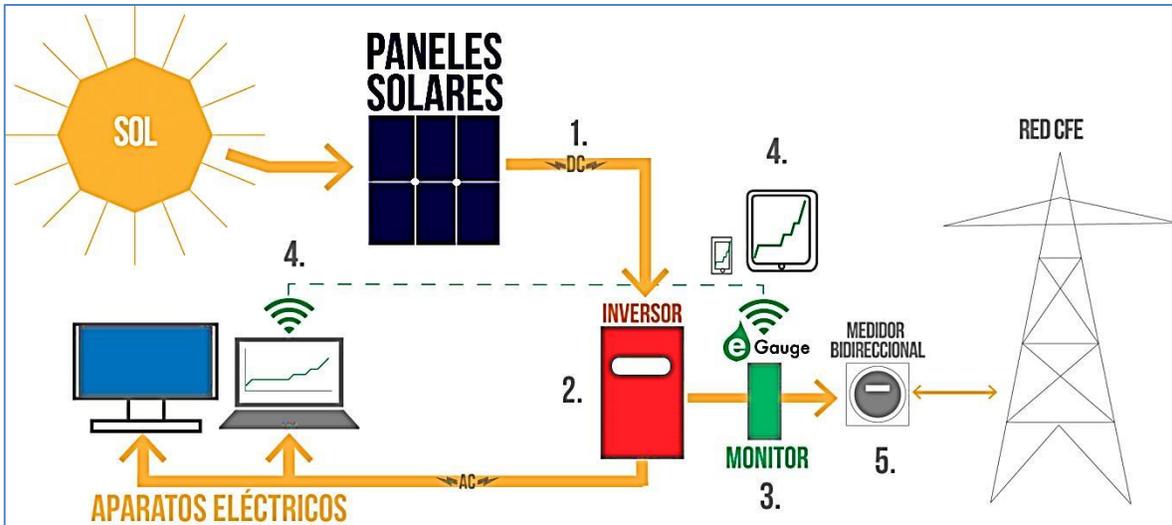
Para el diseño de este tipo de instalaciones es necesario estimar el consumo medio de energía diario del emplazamiento, determinar la eficiencia de la instalación, calcular el generador mínimo requerido y adecuar el tamaño del generador y de la batería en función de las necesidades de autonomía del sistema y de la probabilidad de pérdida de carga requerida.

### 1.6.5.2 INSTALACIONES CONECTADAS A RED

Los sistemas de conexión a la red eléctrica son los que han experimentado mayor desarrollo en los últimos años. Estos sistemas se caracterizan por su simplicidad constructiva, la generación de energía eléctrica silenciosa y no contaminante, una gran fiabilidad, larga duración y poco mantenimiento. El generador fotovoltaico transforma la energía solar incidente en los módulos de corriente continua, que es convertida por el inversor en corriente alterna de la misma tensión y frecuencia que la red eléctrica.

Para contabilizar la energía eléctrica inyectada a la red se utiliza un medidor intercalado entre la red de baja tensión y el inversor. También es necesario instalar un medidor de entrada, para contabilizar el posible consumo de la instalación.

El mantenimiento de estas instalaciones es mínimo, y consiste básicamente en la limpieza periódica de los módulos y en la comprobación de las conexiones eléctricas y el buen funcionamiento del inversor, estimándose su vida útil en más de 30 años. Ilustración 20



**Ilustración 20 Conexión De Sistemas Fotovoltaicos Conectados A Red**

### 1.7 TECNOLOGÍA RECIENTE EN PANEL FOTOVOLTAICO

Gracias al uso de herramientas electrónicas y al estudio exhaustivo de diferentes materiales y aleaciones encontradas de forma natural o creada artificialmente en laboratorios, las celdas fotovoltaicas presentan continuamente mejoras.

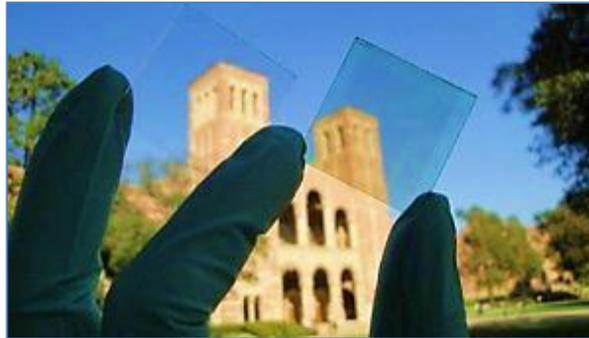
Una de las mejoras está hecha por mexicanos; es la incorporación de modelos inteligentes a panel fotovoltaico que son capaces de seguir los rayos solares desde el punto más alto de la elevación sobre el horizonte como se puede ver en la ilustración 21.



**Ilustración 21 Modelo Se Guimiento Solar Del IPN 2011**

Otro desarrollo importante fue el de un equipo de científicos de la Universidad de Los Angeles (UCLA) el cual ideó un nuevo tipo de panel fotovoltaico que es transparente casi

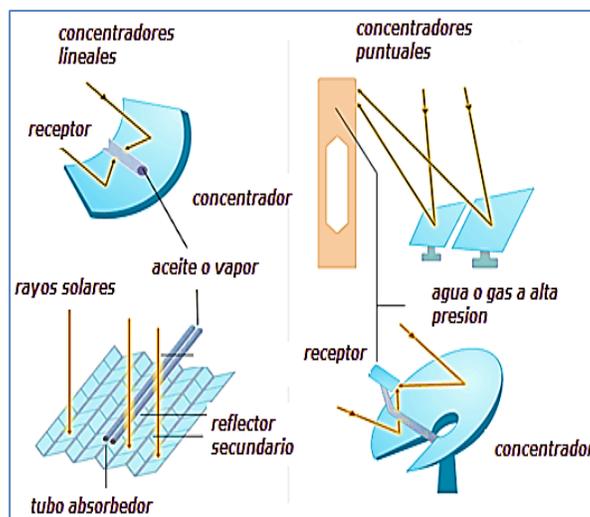
en un 70 por ciento a simple vista. Como se ve en la ilustración 22. Las celdas plásticas, que emplean luz infrarroja en vez de luz visible, también son más económicas que otros tipos de celdas debido a que están hechas por medio de un proceso de solución de polímero bastante barato y tecnología de nanocables, lo que podría llevar al desarrollo de ventanas solares más baratas. Este pequeño panel fotovoltaico cuenta con un plástico foto activo que actúa como una panel fotovoltaico transparente de alto desempeño que deja pasar un porcentaje de luz mucho mayor. La razón es que esta celda no genera electricidad de la luz visible, en su lugar absorbe la radiación infrarroja y la convierte en electricidad, por lo que tanto se establece una mejor forma física de las celdas así como también un aumento exponencial de la absorción de los espectros de luz solar no visible.



**Ilustración 22 Panel Fotovoltaico Infrarrojo**

Otro avance importante es el concentrador solar MIT, se aprovechó los recientes avances de la tecnología láser y la ciencia material para desarrollar una ventana que concentra la luz solar que normalmente pasaría a través de una lumbre, y empuja algo de luz solar a los bordes de los vidrios. Como se ve en la ilustración 23.

El concentrador pasa una primera prueba por su económica producción, e incluso puede ser efectivo al eficacia de los existentes. La idea concentrador solar eficacia de las



incrementar la paneles fotovoltaicos es que el incremente la celdas fotovoltaicas.

### **Ilustración 23 Concentrador Solar**

El Laboratorio Nacional de Idaho, en los Estados Unidos, reveló una nueva variedad de colector solar que ofrece niveles de eficiencia altos y que podría ser tan eficiente como para funcionar incluso durante la noche.

Esta nueva tecnología funciona a través de bancos de microantenas conformadas a su vez por millones de pequeñas fibras metálicas. Los bancos de microantenas pueden ser montados sobre diversos materiales, como el plástico. Estas pequeñas microantenas, de alrededor de 1/25 del espesor de un cabello humano, pueden resonar al interactuar con los rayos infrarrojos del sol, lo que a su vez puede convertirse en energía. Dado que la tierra absorbe una gran cantidad de esta energía durante el día, la cual es irradiada a la atmósfera durante la noche, las microantenas pueden seguir absorbiendo energía durante la noche, como se observa en la ilustración 24



**Ilustración 24 Iluminación Con Panel  
Fotovoltaico En Un Medio Sin Luz**

Los investigadores esperan que este tipo de paneles solares puedan llegar a convertir hasta el 80% de la energía que reciben del sol, mucho más que el 20% que actualmente captan los paneles existentes. Además, el costo de producción sería mucho más bajo que los paneles de silicio.

Pero quizá el proyecto más ambicioso es el de implementar un concentrador solar con el que podamos generar calor y electricidad como se ve en la ilustración 25:

panel solar  
termico

seguidor solar

estructuras de soporte

# MODELOS DE PANEL FOTOVOLTAICO



**Ilustración 25** Generador Solar De Calor Y Electricidad

El producto consiste en un concentrador cilíndrico parabólico que concentra la luz del sol diez veces sobre el receptor. Está equipado con la última tecnología fotovoltaica y con un sistema de seguimiento solar. El sistema de seguimiento tiene incorporado un programa que permite proteger las paneles fotovoltaicos del sobrecalentamiento o de las tormentas. Si el sensor detecta un exceso de temperatura, el seguidor desvía el aparato del sol directo de forma directa. También dispone de un servidor integrado, de forma que es posible el control remoto de la instalación a través de internet.

# 2014



CHRISTIAN BELTRAN BEDOLLA

Microsoft

13/01/2014

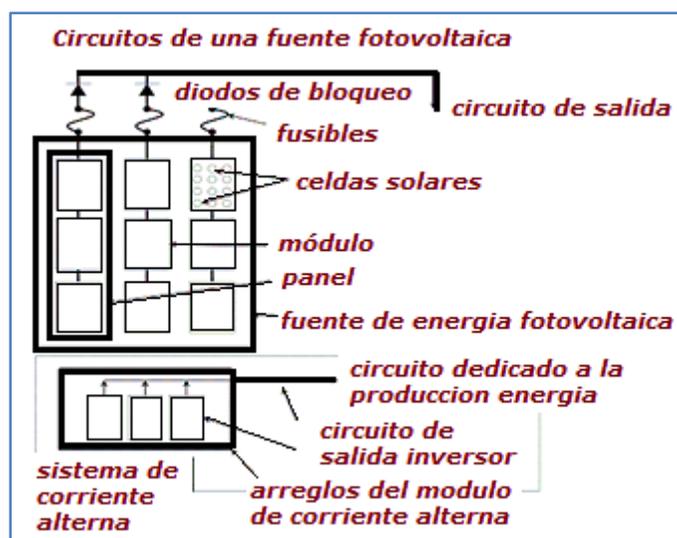
## CAPÍTULO 2 NORMALIZACIÓN VIGENTE PARA LA UTILIZACIÓN DE PANEL FOTOVOLTAICO

Las normas son el instrumento para regular la fabricación, instalación y mantenimiento de diversos productos. En el uso de esta nueva forma de generación de energía. Las normas utilizadas en el territorio nacional aplicadas a los paneles fotovoltaicos son las siguientes:

### 2.1 NORMA OFICIAL MEXICANA 001

La NOM 001, es una guía para el diseño de instalaciones eléctricas, el artículo 690 explica las disposiciones generales para la instalación de paneles fotovoltaicos en la red.

Con 85 apartados diferentes, se definen los conceptos de los componentes y el nivel de importancia de cada parámetro de la instalación, como el cálculo del calibre del cable, el nivel de eficiencia de las protecciones, y la potencia total instalada. Como se observa en la ilustración 1.



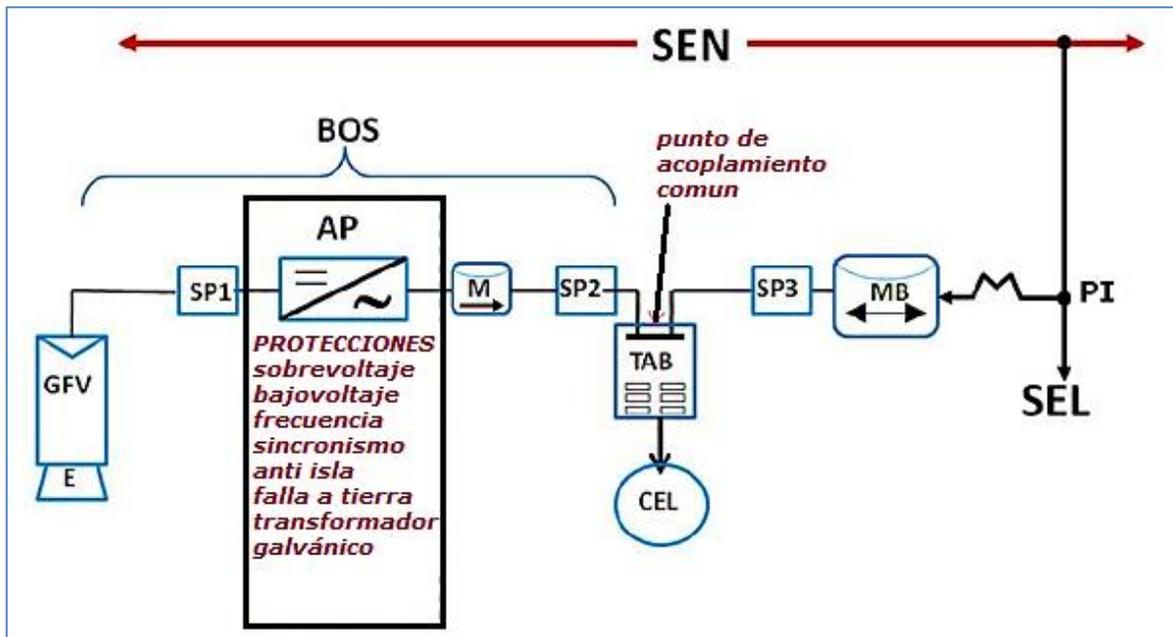
**Ilustración 1 Circuito De Fuente Fotovoltaica**

Así mismo, se llegó a un FIRCO (Fideicomiso de riesgo compartido) con el gobierno alemán en el que se especifica a detalle cómo deben de ser la puesta en servicio de los módulos fotovoltaicos a nivel nacional.

En primera instancia para conectar un módulo fotovoltaico al sistema eléctrico nacional se debe contar con un contrato de interconexión dependiendo con el tipo de voltaje con el que se esté trabajando... “los sistemas fotovoltaicos de Pequeña Escala con una capacidad menor o igual a 30.0 kW deben interconectarse a la red de Baja tensión y satisfacer la Especificación CFE G0100-04; mientras que los sistemas fotovoltaicos de Mediana Escala, cuya capacidad es menor o igual a 500kW y tensión mayor a 1kV y menor a 69kV, deben

satisfacer los requerimientos contemplados en el Anexo E-RDT “Requisitos Técnicos para la Interconexión”, del contrato correspondiente (Resolución Núm. RES/054/2010) [fuente: Nom-001-sede- 2012 séptima sección artículo 690-7]

En este acuerdo internacional queda especificado que la topología con la que se instalara el panel fotovoltaico tendrá la siguiente forma:



**Ilustración 2 Topología De Celdas Fotovoltaicas Incorporadas A La Sen**

Dónde:

GFV: es el Módulo, arreglo o panel fotovoltaico, GFV.

E: es la Estructura de soporte para el GFV.

SP: es el Sistema de protección para seguridad.

SEN: es el Sistema Eléctrico Nacional Red de Distribución Eléctrica.

AP: es el Acondicionador de potencia o inversor.

TAB: es el Tablero de distribución o interfaz entre el GFV y el SEN

MB: es el Medidor bidireccional de energía.

M: es el Medidor de energía eléctrica.

CEL: son las Cargas Eléctricas Locales.

BOS: son las Siglas de Balance del Sistema.

### 2.1.2 EL PANEL FOTOVOLTAICO.

Al adquirir un panel fotovoltaico, el distribuidor debe garantizar lo siguiente, para asegurar la calidad en el producto:

- a. Ser moderno, estar a la vanguardia tecnológica.

- b. Estar contruidos de acuerdo a la Norma NMX-J-618/1-ANCE-2010 y IEC 61730-1 Tener placa de identificación indicando: especificaciones eléctricas, fabricante, marca, modelo, clase y número de serie.
- c. Los módulos pueden ser flexibles o rígidos; de silicio cristalino o de película delgada. Si tienen marco metálico, este debe ser de aluminio anodizado. En caso de que el módulo este encapsulado en vidrio, éste debe ser del tipo templado.
- d. Si los módulos son de película delgada, deben satisfacer los requerimientos de la Norma NMX-J-618/3-ANCE-2012. Evaluación de la seguridad en módulos fotovoltaicos ó FV: Requisitos para módulos fotovoltaicos de película delgada-Calificación del diseño (silicio amorfo, cobre-indio-galio-selenio y telurio de cadmio; o bien si son de silicio cristalino, deben satisfacer la NMX-J-618/4-ANCE-2012 IEC 61215 - Evaluación de la seguridad en módulos fotovoltaicos FV, Requisitos para módulos fotovoltaicos de silicio cristalino-Calificación del diseño.
- e. Tener caja de conexiones para intemperie del tipo IP65 a prueba de lluvia y polvo con las terminales de salida debidamente marcadas identificando la terminal negativa y la positiva. Si tiene cables de salida, estos deben ser adecuados para intemperie clase II marcados como resistentes a la luz solar, el calibre debe corresponder a la capacidad de conducción calculada en términos de la corriente de corto circuito del panel 1.56 la corriente de corto circuito del panel bajo condiciones normalizadas de prueba según Art. 690 de la NOM 001-SEDE 2012 demás, deben estar identificados la terminal positiva y negativa, y tener conectores rápidos para intemperie con las siguientes características mínimas: sistema de bloqueo, tensión eléctrica de aislamiento mínimo 600 V, temperatura de operación hasta de 90°C, protección para el enchufado IP65 o superior, y estar certificados bajo estas características con conectores del tipo MC4 o MC3 u otro equivalente.

### 2.1.3 ESTRUCTURA

La estructura donde se monte el panel fotovoltaico debe durar mínimo 20 años bajo condiciones ambientales y de uso establecido. Además, deben contar con los siguientes requisitos:

- a. Pueden ser fijas o con seguimiento solar con uno o dos ejes.
- b. Debe estar orientada tal que la superficie activa de los módulos este hacia el sur verdadero  $\pm 5^\circ$ .
- c. Ser de metal: aluminio anodizado, acero al carbón galvanizado en caliente o acero al carbón con un recubrimiento anticorrosivo y pintura acrílica anticorrosiva o acero inoxidable.
- d. Debe de ser de aluminio anodizado o acero inoxidable en regiones de ambiente salino.
- e. Puede contar con un sistema de ajuste  $\pm 15^\circ$  de acuerdo a la latitud del lugar.

- f. En cuanto a soportes el de tipo pedestal debe estar hecho de concreto armado o metálico y la altura con todo y panel fotovoltaico no deben ser inferiores al 1:60 m.
- g. Cuando se usan soportes con varios puntos de apoyo la parte baja del módulo fotovoltaico no deben ser inferiores a los 50 cm sobre el nivel del suelo.
- h. La estructura debe de estar diseñada para soportar bajo condiciones de trabajo, corrosión, deformaciones mecánicas tanto estáticas como dinámicas con un anclaje que soporte cargas de viento de acuerdo a las características climatológicas del sitio de instalación. La estructura y colocación de los módulos debe diseñarse tal que un módulo no soporte cargas de viento superiores a los 2400 Pa.

#### 2.1.4 CABLES

El cableado debe realizarse de acuerdo a lo especificado en la Norma Internacional IEC 60364-4-41, IEC 60364-7-712 y cumplir con lo requerido en el Art. 690 y 705 de la Norma NOM 001-SEDE 2012 dentro del cual se destaca lo siguiente:

- a. Todo el cable que se use en la instalación fotovoltaica debe ser de cobre, formado por alambres de cobre temple suave trenzados Clase B, con 7 alambres trenzados por conductor para cables calibre AWG #18 al #2, con 19 alambres trenzados por conductor para cables calibre AWG #1 al #4/0, y con 37 alambres trenzados por conductor para cables calibre #250 kcmil al #1000 kcmil.
- b. El cable conductor debe tener aislante certificado para 600V o superior y contar con certificación NOM-063-SCFI vigente.
- c. Todo cable conductor expuesto a la intemperie, además de satisfacer la Norma NOM-063-SCFI, debe estar certificado para ser expuesto a la radiación solar resistentes a la luz solar como del tipo USE, UF, TWD-UV, grado solar o equivalente.
- d. En los circuitos de la fuente y de salida fotovoltaica la ampacidad o capacidad de conducción de los conductores debe seleccionarse con un valor de 1.56 veces la corriente de corto circuito,  $I_{sc}$ , del módulo, panel o arreglo fotovoltaico.
- e. En el circuito de salida del inversor, la capacidad de conducción de los conductores debe seleccionarse con un valor de 1.25 veces la corriente a la potencia nominal del inversor.
- f. Todo cable conductor que no sea para intemperie y que no sea resistente a la luz solar debe estar contenido en tubería conduit adecuada al tipo de instalación interior o exterior y a las condiciones ambientales. Puede ser del tipo flexible de aluminio con recubrimiento de PVC para intemperie del conocido como liquidtight para longitudes máximas de 3 m, o rígida de PVC ó metálica galvanizada para más de 3 m.

Para temperaturas ambiente que excedan de 30°C, la capacidad de conducción de corriente debe corregirse, reduciendo su valor, con los factores dados por la Tabla No. 310-15(b)(2)(a) de la NOM-001-SEDE 2012, que se presenta en la siguiente tabla.

<b>Factores de corrección basados en temperatura ambiente de 30°C. No más de tres conductores monopolares aislados</b>			
<b>Rango de temperatura del conductor</b>	<b>60°C</b>	<b>75°C</b>	<b>90°C</b>
<b>21-25</b>	1.08	1.05	1.04
<b>26-30</b>	1,0	1,0	1,0
<b>31-35</b>	0,91	0,94	0,96
<b>36-40</b>	0,82	0,88	0,91
<b>41-45</b>	0,71	0,82	0,87
<b>46-50</b>	0,58	0,75	0,82
<b>51-55</b>	0,41	0,67	0,76

**Tabla1 Factores De Corrección De Temperatura**

Para canalizaciones circulares expuestas a la luz solar colocados en o por encima de azoteas, la temperatura “ambiente” de los cables conductores dentro de la canalización debe incrementarse por los valores proporcionados por la Tabla 310-15(b)(3)(c) de la NOM-001-SEDE 2012, para referencia se presenta en la siguiente tabla:

<b>Distancia por encima del techo hasta la base del tubo conduit. (mm)</b>	<b>Sumar a la temperatura ambiente. (°C)</b>
De 0 hasta 13	33
Más de 13 hasta 90	22
Más de 90 hasta 300	17
Más de 300 hasta 900	14

**Tabla 2 Distancia De Tubo Conduit**

Para más de tres cables conductores portadores de corriente en una canalización o cable, la capacidad de conducción de corriente debe corregirse, reduciendo su valor, con los factores dados por la Tabla No. 310-15(b)(3)(a) de la NOM-001-SEDE 2012, que se presenta en la siguiente tabla:

Número de conductores	Porcentaje de los valores en las Tablas 310-15(b)(16) a 310-15(b)(19), ajustadas para temperatura ambiente, si es necesario
4-6	80
7-9	70
10-20	50
21-30	45
31-40	40
41 y más	35

**Tabla 3 Número De Correcciones**

Cabe destacar que el calibre de los conductores del circuito de salida fotovoltaico hacia el inversor debe ser seleccionado para evitar una caída de tensión no mayor al 1%.

### 2.1.5 INVERSOR DE POTENCIA

El Inversor de potencia debe cumplir con lo siguiente:

- a. Satisfacer los requerimientos exigidos en la Especificación CFE G0100-04 contemplada en los Requisitos Técnicos para la interconexión entre una fuente de energía distribuida en pequeña ó mediana escala y el SEN.
- b. Satisfacer los requerimientos técnicos de la Norma internacional IEC 62109 Parte 1 y Parte 2, o alternativamente, de la Norma UL 1741 basada en la Norma IEEE 1547 los que deben comprobarse mediante el certificado de conformidad emitido por un Organismo Nacional de Certificación acreditado en términos de la Ley LFMN Ley Federal de Metrología y Normalización. En caso de no existir infraestructura de certificación en el país, el inversor debe estar certificado por un organismo NCB National Certification Body, miembro de IECEE, CB Scheme, así como el informe de pruebas emitido por un laboratorio CBTL Certification Body Testing Laboratory que sea acreditado bajo ISO/IEC 17025.
- c. Contar con el certificado correspondiente que garantice el cumplimiento de los requerimientos eléctricos para la función anti-isla de acuerdo a la Norma IEC 62116:2008 Ed 1, o la Norma UL 1741 que permite su conexión a la red, emitido por un organismo nacional o internacional del NCB National Certification Body, miembro de IECEE, CB Scheme, así como el informe de pruebas emitido por un laboratorio CBTL Certification Body Testing Laboratory que sea acreditado bajo ISO/IEC 17025.
- d. Tener una eficiencia igual o mayor del 95% a la potencia nominal del sistema.
- e. Tener una placa de identificación que incluya información de la marca, modelo, especificaciones, fabricante o importador responsable

- f. Tener la capacidad para el manejo de energía de acuerdo al diseño del sistema fotovoltaico. La potencia de salida del inversor no debe ser menor a la potencia de operación del arreglo fotovoltaico.
- g. El distribuidor del equipo debe garantizar que la tensión eléctrica en el punto de máxima potencia de la Fuente de Energía FV, a cualquier temperatura ambiente, debe ajustarse al intervalo de tensión eléctrica de operación del inversor.
- h. Debe contar con un gabinete con grado de protección IP54 si su uso es en interiores ó IP65 o superior si es para uso en intemperie.
- i. La Tensión de salida del inversor debe ser aquella a la que el usuario tiene contratada su suministro: 127 V en sistemas monofásico a 2 hilos para consumidores con potencias instaladas no mayores a 5.0 kW; 120 V/240 V en sistemas monofásico tres hilos ó bifásicos tres hilos para consumidores con potencias instaladas entre 5.0 kW hasta 10.0 kW; 220 V/ 127 V en sistemas trifásicos 4 hilos para consumidores con potencias instaladas mayores de 10.0 kW.
- j. El inversor puede ser monofásico ó bifásico si la potencia nominal del sistema fotovoltaico no excede de 10.0 kWp; y debe ser trifásico si la potencia nominal del sistema fotovoltaico es superior a 10.0 kWp.
- k. El inversor no debe ser una fuente de inyección de corriente directa hacia la red de corriente alterna del SEN por lo cual debe tener a su salida un transformador que provea un medio de aislamiento galvánico. El valor máximo permisible es de 0.5% de la corriente de salida nominal del inversor Art. 5.2 de la Norma IEEE Std 929-2000. Si el inversor NO incluye el transformador de salida, el distribuidor debe incluir en la instalación, antes del Punto de Acoplamiento Común, un medio de aislamiento galvánico con una potencia igual a 1.25 veces la potencia nominal del inversor.

### 2.1.6 PROTECCIÓN

Toda instalación eléctrica debe contener algunas particularidades mínimas de protección, las cuales son:

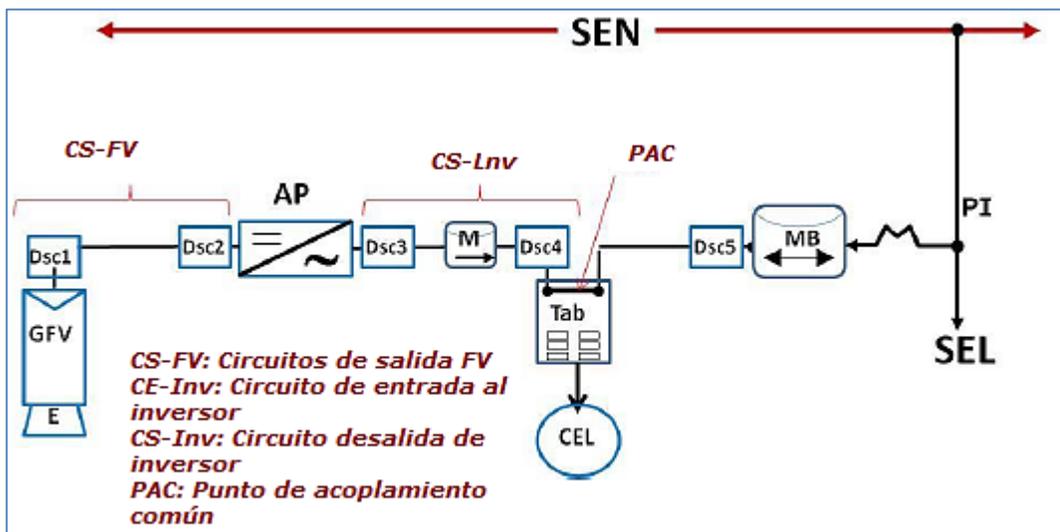
- a. Alcance. Se aplica a sistemas eléctricos de energía fotovoltaica incluyendo circuitos del sistema, unidades de acondicionamiento de potencia y controladores para tales sistemas. Los sistemas solares fotovoltaicos pueden ser interactivos con otras fuentes de producción de energía eléctrica o autónoma, con o sin almacenamiento de energía eléctrica, como baterías. Estos sistemas pueden tener salidas para utilización en AC ó DC.
- b. Conductores de Sistemas Diferentes. Los circuitos de la fuente fotovoltaica y los circuitos de salida fotovoltaica no deben estar contenidos en la misma canalización, charola, cables, cajas de salida o cajas de empalme o accesorios similares, junto con los circuitos alimentadores o derivados de otros sistemas.

- c. Detección e interrupción de fallas a tierra. Los sistemas fotovoltaicos montados en techos de casas habitación deben tener protección contra fallas a tierra para reducir el riesgo de incendio. Además el circuito de protección contra falla a tierra debe ser capaz de detectar una falla a tierra, interrumpiendo la trayectoria de la falla y desconectando el sistema.
- d. Punto de conexión de la puesta a tierra del sistema. La conexión de puesta a tierra del circuito de DC debe hacerse en un solo punto del circuito de salida fotovoltaica.

El sistema queda mejor protegido contra transitorios de sobretensiones por descargas eléctricas atmosféricas si el punto de conexión de puesta a tierra se localiza tan cerca de la fuente fotovoltaica como sea posible.

### 2.1.6.1 MEDIOS DE DESCONEXIÓN

De acuerdo a la NOM 001-SEDE 2012, se requiere de un Medio de Desconexión (Dsc) para abrir los conductores eléctricos NO puestos en tierra en todas las fuentes de energía. En consecuencia, todos los SFV-IR deben tener medios de desconexión en los circuitos de salida del GFV ó entrada del inversor, y salida del inversor, como un Sistema de Protección para seguridad del usuario; es decir, tanto el circuito de salida fotovoltaica como el del inversor deben satisfacer dicho requerimiento. En la ilustración 3 se muestra un diagrama esquemático de un SFV-IR en donde se muestra las posiciones sugeridas en donde deben localizarse los Medios de Desconexión.



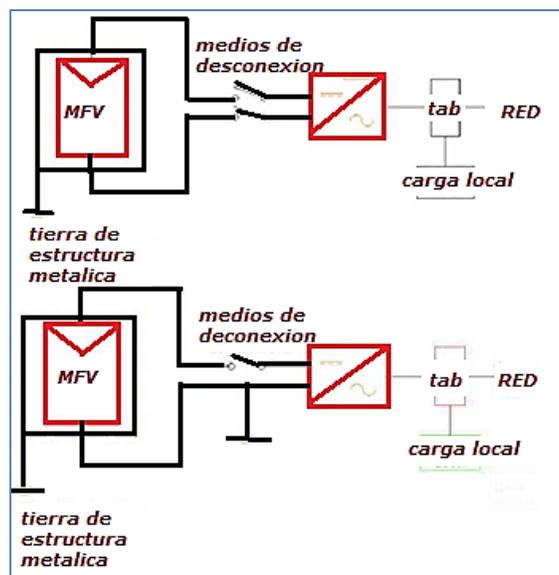
**Ilustración 3 Circuito Del Sistema Inversos**

Los Dsc pueden ser interruptores de cuchilla, interruptores termomagnéticos, ó interruptores de palanca y deben seleccionarse de acuerdo al tipo de corriente a manejar ya sea corriente alterna ó corriente continua.

Los Dsc para el circuito de salida fotovoltaico que se refiere a la zona de corriente continua. Deben ser del tipo de Interrupción con carga; debiendo ser bipolares para interrumpir efectivamente tanto el conductor positivo como el conductor negativo. En el circuito de salida fotovoltaico se recomienda que el Dsc sea multipolar para evitar el arqueo.

El circuito de salida fotovoltaico debe tener un Medio de Desconexión Dsc1 tan cerca como sea posible al GFV.

Cuando el Inversor NO se encuentre a la vista del Medio de Desconexión del GFV y el inversor NO incluya un Medio de Desconexión en su circuito de entrada, se requiere a la entrada del inversor un Medio de Desconexión. Como se observa en la ilustración 4.



**Ilustración 4 Medios De Desconexión Del Sistema Fotovoltaico**

Cuando el Inversor NO tenga un Medio de Desconexión en su Circuito de Salida, se requiere a la salida del inversor un medio de desconexión Dsc3 tan cerca como sea posible de éste.

La conexión del circuito de salida del inversor en el Punto de Acoplamiento Común, que se sugiere sea en el Tablero de Distribución General, debe hacerse a través de un Medio de Desconexión.

El Medio de Desconexión Dsc5 lo exige CFE como el interruptor de servicio de la acometida que debe estar instalado de manera accesible al personal del Suministrador de energía eléctrica también llamado CFE.

Los Medios de Desconexión deben estar contenidos en una caja con grado de protección de acuerdo a su ubicación; interior IP54 NEMA tipo 2 o exterior IP65 NEMA tipo 4 ó 4X en

ambientes salinos o superior. Alternativamente, pueden instalarse en o dentro del inversor siempre y cuando se pueda garantizar la desconexión eléctrica para realizar trabajos de servicio y mantenimiento.

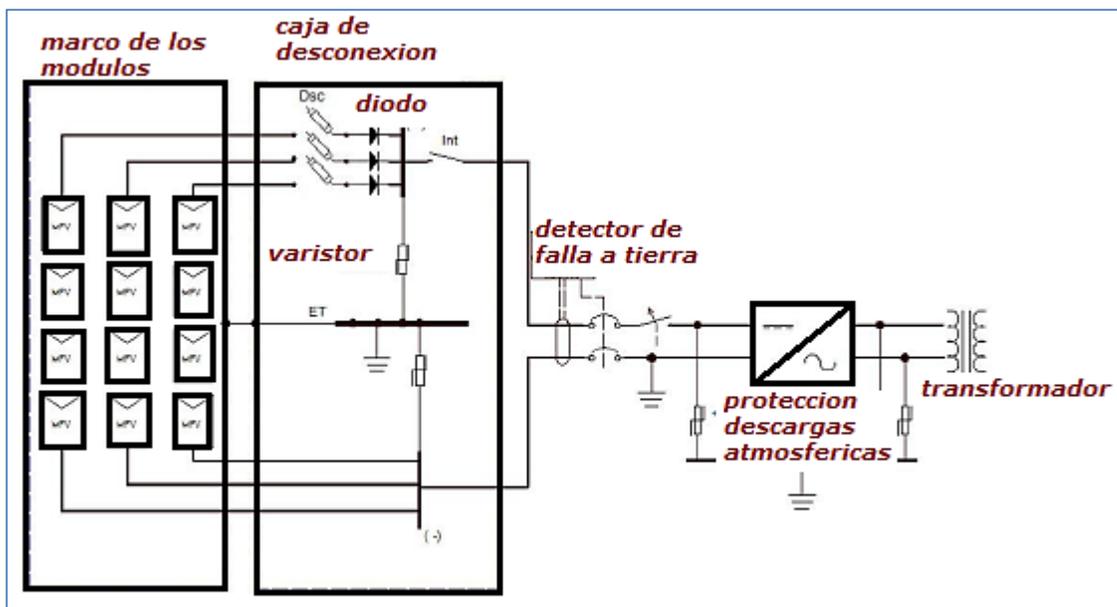
La Capacidad de Conducción de los Medios de Desconexión debe seleccionarse de acuerdo a la Norma NOM 001 SEDE 2012; es decir: en el circuito de salida de la fuente fotovoltaica con una ampacidad de 1.56 veces la corriente de corto circuito del GFV; y en el circuito de salida del inversor, con un valor de 1.25 veces la corriente a la potencia nominal del inversor

Si en el circuito de salida fotovoltaica es decir circuito de entrada al inversor, el conductor negativo está conectado a tierra, ambos conductores deben tener el medio de desconexión y la puesta a tierra del conductor negativo debe hacerse entre el medio de desconexión y el inversor ó dentro del inversor.

Si ninguno de los conductores de electricidad del sistema FV del circuito de salida está conectado a tierra, ambos conductores deben tener un medio de desconexión.

### 2.1.6.2 PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

El circuito de salida fotovoltaica debe tener instalado un dispositivo de protección contra descargas atmosféricas. En la caja que contiene al medio de desconexión del circuito de salida fotovoltaica. El dispositivo de protección contra descargas atmosféricas debe instalarse antes del medio de desconexión principal del circuito de salida fotovoltaico. Como se muestra en la ilustración 5.



**Ilustración 5 Sistemas De Protección En Sistemas Fotovoltaicos**

Si ninguno de los conductores de electricidad del sistema FV del circuito de salida está aterrizado, ambos conductores deben tener un dispositivo de protección contra descargas atmosféricas. Si uno de los conductores de electricidad esta puesto a tierra en la terminal de puesta a tierra de la caja de desconexión, el otro conductor debe tener un dispositivo de protección contra descargas atmosféricas. En caso contrario, ambos deben tener el dispositivo de protección contra descargas atmosféricas.

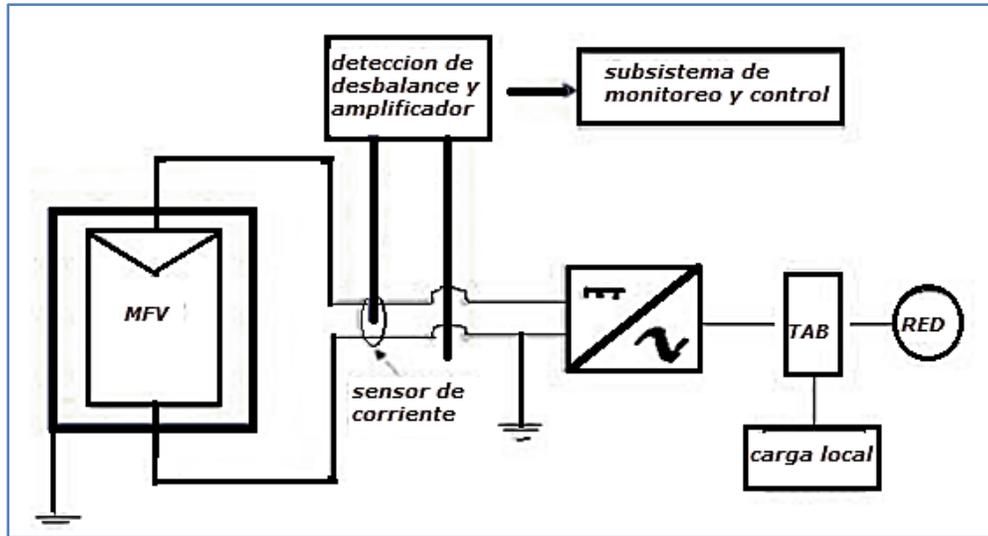
El dispositivo contra descargas atmosféricas debe seleccionarse de tal forma que actúe a un tensión eléctrica mayor que 1.25 la tensión eléctrica a circuito abierto de la fuente fotovoltaica bajo condiciones de temperatura ambiente local mínima anual, con una capacidad mínima de 5kA.

### 2.1.6.3 PROTECCIÓN CONTRA FALLAS A TIERRA

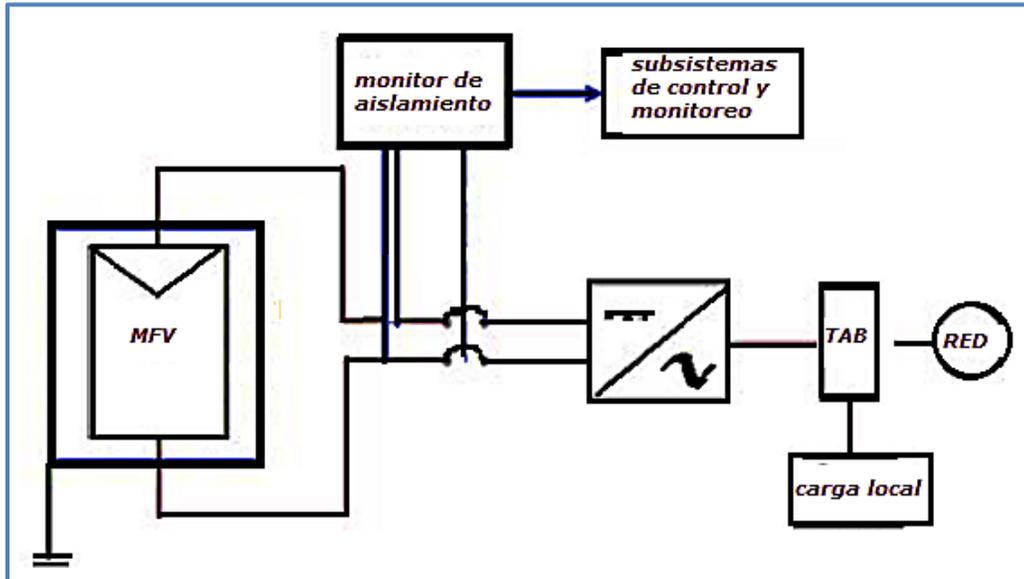
Todo Panel fotovoltaico debe contar con un SDFT ó Sistema de Detección de Fallas a Tierra de acuerdo al Art. 690-5 de la Norma NOM 001-SEDE 2012. Como en la ilustración 6.

El SDFT debe constar de un sensor de corriente, un sistema de detección con indicador del tipo de falla y un contacto o interruptor automático. El sensor de corriente debe instalarse entre la salida del arreglo FV y el punto de conexión a tierra para un arreglo FV aterrizado mientras que el contacto o interruptor debe instalarse entre el arreglo FV y el inversor.

Para un GFV flotante se puede instalar un dispositivo, monitor de aislamiento permanente que verifique la resistencia a tierra de ambos polos con una frecuencia predeterminada o instalar un dispositivo de corriente residual a la salida del subsistema de acondicionamiento de potencia según se especifica en CFE G0100-04 y la ilustración 7. Se puede omitir el dispositivo de detección de falla a tierras si todos los componentes del GFV cuentan con doble aislamiento y si se ha realizado un buen cableado de acuerdo a lo especificado en la NOM-001-SEDE-2012 y por CFE.



**Ilustración 6 Dispositivo Para Detectar Fallas A Tierra En Un Sistema Fotovoltaico Conectado A Tierra**



**Ilustración 7 Dispositivo Para Detectar Fallas A Tierra En Un Sistema Flotante**

### 2.1.7 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

El Panel fotovoltaico debe contar con un Sistema de puesta a tierra con una resistencia no mayor a  $25 \Omega$  según se especifica en el Art. 250-84 de la NOM 001-SEDE 2012.

El Sistema de Tierra puede componerse de uno o varios electrodos de puesta a tierra y conductores de puesta a tierra.

Toda fuente de energía fotovoltaica de más de 50 V de dos conductores, debe tener un conductor puesto a tierra sólidamente; o en sistemas de tres conductores, positivo, negativo y neutro; el neutro debe estar puesto a tierra sólidamente, según lo indica en Art. 690-41 de la NOM 001-SEDE 2012.

#### 2.1.7.1 ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA.

El electrodo de puesta a tierra, según se establece en el Art. 250-81 de la NOM 001-SEDE 2012, puede ser uno o alguna combinación de los que se indican a continuación. En ningún caso se permite que el valor de resistencia a tierra del sistema de electrodos de puesta a tierra sea superior a 25  $\Omega$ .

Una varilla de acero cobrizada del tipo Copper Weld de 5/8" de diámetro y 3 m de longitud enterrada de manera vertical por lo menos 2.4 m, si no se puede enterrar por ser el terreno material rocoso, se debe clavar a un ángulo oblicuo que no forme más de 45° con la vertical; o bien, enterrarla en una zanja que tenga como mínimo 80.0 cm de profundidad; según se establece en el Art. 250-83-3 de la NOM 001-SEDE 2012.

Además deberá tener una estructura metálica de un edificio si éste está puesto a tierra eficazmente.

#### 2.1.7.2 CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA.

Los materiales de los conductores de puesta a tierra pueden ser de cobre o de cualquier material resistente a la corrosión. El conductor puede ser: alambre o cable, aislado, forrado o desnudo; y debe ser de un solo tramo continuo, sin empalmes ni uniones.

Si el conductor de puesta a tierra está forrado, el color del forro de aislamiento debe ser verde, o verde con franjas amarillas.

En circuitos de corriente directa, el calibre del conductor de puesta a tierra no debe ser inferior al calibre del conductor que tiene la mayor capacidad de conducción o sea cable más grueso, según se establece en el Art. 250-93 de la NOM 001 SEDE 2012. En ningún caso menor a 8.37 mm<sup>2</sup> de sección transversal de calibre 8AWG, para conductores de cobre. Para el caso de los equipos, el tamaño nominal de los conductores de puesta a tierra de equipo, de cobre o aluminio, no debe ser inferior a lo especificado en la siguiente Tabla Tabla 250-95 de la NOM 001 SEDE 2012:

Capacidad o ajuste del dispositivo automático de protección contra sobrecorriente en el circuito antes de los equipos, canalizaciones, etc. Sin exceder de:	Calibre Nominal mm2 (AWG)
15 A	2.08 (14)
20 A	3.31 (12)
30 A 60 A	5.26 (10)
40 A	5.26 (10)
100 A	8.37 (8)
200 A	13.3 (6)

**Tabla 4 Ajuste Contra Sobrecorriente**

Para circuitos en corriente alterna, el calibre nominal del conductor del electrodo de puesta a tierra de una instalación puesta o no puesta a tierra, no debe ser inferior a lo especificado en la tabla siguiente (Tabla 250-94 de la NOM 001 SEDE 2012).

Calibre nominal del mayor conductor de entrada a la acometida o circuito equivalente de conductores en paralelo mm2 (AWG). Conductor de cobre.	Calibre Nominal del conductor al electrodo de puesta a tierra mm2 (AWG)
33.6 (2 o menor))	8.37 (8)
42.4 o 53.5 (1 ó 1/0)	13.3 (6)
67.4 o 85.0 (2/0 ó 3/0)	21.2 (4)
Más de 85 a 177 (3/0 a 350 kcmil)	33.6 (2)
Más de 177 a 304.0 (350 a 600)	53.5 (1/0)

**Tabla 5 Calibre Nominal De Entrada A La Cometida**

En una instalación eléctrica se debe tener en cuenta la tensión máxima del sistema fotovoltaico. Para calcularla se suma la tensión de circuito abierto de los sistemas fotovoltaicos en serie, haciendo correcciones para la temperatura ambiente más baja. Sin embargo para los módulos cristalinos multiplicamos la tensión nominal en circuito abierto por el factor de corrección expuesto en la norma:

<b>Factores de corrección para temperaturas ambiente menores a 25 °C (Se multiplica el tensión nominal de circuito abierto por el factor de corrección aplicable que se muestra a continuación)</b>	
<b>Temperatura ambiente (°C)</b>	<b>Factor</b>
19 a 15	1.04
14 a 10	1.06
9 a 5	1.08
4 a 0	1.10
-1 a -5	1.12
-6 a -10	1.14
24 a 20	1.16
-11 a -15	1.18
-16 a -20	1.20
-21 a -25	1.21
-26 a -30	1.23
-31 a -35	1.25
-36 a -40	1.02

**Tabla 6 Factores De Correcciones De Tensión Tabla 690-7 NOM 001**

Otro punto particular es el que en instalaciones de vivienda sin contactos o accesorios; el sistema fotovoltaico debe tener como tensión máxima los 600 V, si se desea superar esta tensión los sistemas pueden tener interacción con otras forma de generación, o bajo cuidados más especiales en el aumento de carga. Es decir, que si existe un máximo de voltaje para poder manejar el sistema.

Siguiendo con los parámetros de la instalación, se encuentra ahora el cálculo de corriente máxima del circuito, y se debe realizar según la capacidad de conducción de corriente eléctrica de los conductores y la especificación o ajuste de los dispositivos de protección contra sobrecorriente en un circuito de un panel fotovoltaico no deben ser menores a 125% de la corriente eléctrica calculada de acuerdo a lo siguiente:

- a. Circuitos de la fuente fotovoltaica. La suma de la corriente eléctrica especificada de cortocircuito de los módulos en paralelo multiplicado por 1.56 de acuerdo a la Norma NOM 001-SEDE 2012.
- b. Circuito de salida fotovoltaica. La corriente eléctrica especificada de corto circuito de la fuente de energía fotovoltaica multiplicada por 1.56 de acuerdo a la Norma NOM 001-SEDE 2012.

- c. Circuito de salida del inversor. La corriente eléctrica de salida del inversor o de la unidad de acondicionamiento de potencia especificada por el fabricante; o bien, la corriente de salida calculada mediante la potencia nominal especificada por el fabricante.
- d. Circuito de entrada de un inversor autónomo. La corriente eléctrica especificada de entrada del inversor autónomo cuando el inversor está produciendo su potencia especificada a la menor tensión eléctrica de entrada.
- e. Sistemas con tensiones eléctricas múltiples de corriente directa. En una fuente fotovoltaica que tiene múltiples tensiones eléctricas de salida y que emplea un conductor común de retorno, la capacidad de conducción de corriente del conductor de retorno no debe ser menor que la suma de las capacidades de los dispositivos de protección contra sobrecorriente de los circuitos individuales de salida.

#### 2.1.8 PRUEBAS DE SEGURIDAD Y DESEMPEÑO.

Todos los sistemas fotovoltaicos deben cumplir con las pruebas de desempeño siguientes:

El certificado de la Medición de la característica corriente tensión de dispositivos fotovoltaicos de acuerdo a la NMX-J-643/1-ANCE-2011 Aplicada únicamente al Modulo Fotovoltaico y obtenida por el laboratorio de ANCE y/o laboratorio nacional evaluado y aprobado por ANCE.

Certificado de la Prueba de rendimiento de energía y caracterización del sistema de los módulos fotovoltaicos y de eficiencia de la conversión Corriente Directa / Corriente Alterna realizado por el laboratorio de ANCE y/o laboratorio nacional evaluado y aprobado por ANCE. Prueba de funcionamiento realizada por el Distribuidor ante la presencia del usuario y del Técnico del FIRCO-SAGARPA que incluya la medición de:

- a. Tensión a circuito abierto y corto circuito de cada cadena o panel, bajo condiciones de sistema apagado, y al mismo tiempo, medidas de radiación y temperatura del módulo para fines de normalización.
- b. Tensión y corriente a la entrada de cada inversor bajo condiciones de operación.
- c. Tensión y corriente a la salida de cada inversor; y al mismo tiempo, medidas de radiación y temperatura del módulo para fines de normalización.

Todos los distribuidores que participen en el Proyecto de Desarrollo Rural Sustentable en la componente de SFV-IR deben contar con la “certificación de empresa confiable” expedida

por la ANCE, y pertenecer al Padrón de Empresas verificadas del FIRCO. Se recomienda que el personal del distribuidor involucrado en el dimensionamiento e instalación de los SFV-IR deba contar con la capacitación necesaria para llevar a cabo sus actividades correctamente, por lo que deben presentar evidencia aprobatoria de cursos de capacitación con un mínimo de 40 horas requisito para pertenecer a dicho Padrón. Asimismo, cuando se cuente con el estándar de competencia laboral en la instalación de sistemas fotovoltaicos, se recomienda que el personal responsable de realizar las instalaciones fotovoltaicas deba contar con el Certificado de Competencia laboral emitido por el CONOCER Consejo Nacional de Normalización y Certificación De Competencias Laborales.

Todos los distribuidores que participen en el Proyecto de Desarrollo Rural Sustentable en la componente de SFV-IR deben conocer y aplicar estas Especificaciones Técnicas.

La NOM 001 es la norma más importante dentro del territorio nacional en cuanto a instalaciones eléctricas. Sin embargo, debe respetar y cumplir otras normas y reglas internacionales que regulan no solo su instalación y uso, sino también diferentes especificaciones en el área de fabricación; como son, las dimensiones del panel fotovoltaico, las correcciones de temperatura, radiación solar, humedad, características de medición, requerimientos para hacer pruebas a las celdas fotovoltaicas y los tipos de pruebas que se realizan en las zonas geográficas antes de instalar el panel fotovoltaico.

## 2.2 IEC

La IEC en conjunto con la organización internacional de la estandarización (ISO) generan en conjunto, las normas para el uso de la gran gama de aparatos eléctricos con sus diferentes funciones.

### 2.2.1 IEC 60904

La IEC ha definido y establecido en la norma IEC 60904 dos categorías para diferenciar el análisis de paneles fotovoltaicos; paneles cristalinos y paneles de película delgada. Estos protocolos son la, IEC 61215 y IEC 61646 respectivamente. Las pruebas de certificación pueden realizarse utilizando sistemas de simulación con computación programada; pero serán insuficientes para sacarse al mercado sin las pruebas a nivel físico. Cabe destacar que estos estándares son exclusivamente para propósitos terrestres; pues recordemos que el uso de tecnología fotoeléctrica tiene también uso espacial.

En su primer apartado IEC 60904-1 trata sobre los dispositivos fotovoltaicos, las características de medición de corriente y voltaje.

IEC 60904-2 trata sobre los requerimientos de referencia para usarse en la fabricación de paneles solares.

IEC 60904-3 trata sobre los principios de medición solar terrestre con datos de referencia del espectro solar.

IEC 60904-5 habla sobre como determinar la temperatura equivalente utilizando el método de circuito abierto.

IEC 60904-7 habla acerca de los errores de espectro desajuste, introducidos de forma computacional.

IEC 60904-10 también habla sobre medición solo que ahora es lineal.

Las siguientes tablas muestran cuales son los criterios, donde se puede encontrar los estándares y parámetros que se usan:

<b>IEC 60904-1 características de la medición de voltaje y corriente (V-I) fotovoltaica</b>		
<b>Título</b>	<b>Condiciones de examinacion</b>	<b>Solar Class</b>
<b>Prueba voltaje y corriente</b>	See IEC 60904-1; I-V measurement in simulated sunlight; requires Class BBB solar simulator in accordance with IEC 60904-9; el área de prueba debe ser igual o mayor que el área de la fotocelda.	Clase BBB o mejor

**Tabla 2 Pruebas De Medición De Voltaje Y Corriente**

### 2.2.3 IEC 61215

A continuación se muestran las pruebas de certificación de los módulos cristalinos:

<b>IEC 61215 panel fotovoltaico de silicón cristalino</b>		
<b>Título</b>	<b>Condiciones de examinación</b>	<b>Solar Class</b>
<b>precondicionamiento</b>	Antes de la prueba , los módulos deben estar expuestos a la luz del sol (real o simulada) con una radiación de 5 kWh/m <sup>2</sup>	Sin especificar; recomendacion Clase CCC o mejor
<b>Determinación de máxima potencia</b>	Tomando como referencia la norma IEC 60904-1; I-V se requiere una clase solar tipo BBB y que el área de prueba sea mayor o igual al de la fotocelda. la radiación debe estar entre 700 W/m <sup>2</sup> – 1100 W/m <sup>2</sup> ; el monitoreo de temperatura a +/-1 C; I-V y la exactitud de los equipos de medición a +/- 0.2%	Clase BBB o mejor
<b>Prueba en NOCT y STC</b>	Temperatura de la celda a 25C y temperatura de operación nominal (NOCT) radiación STC=1000 y NOCT=800W/m <sup>2</sup> con IEC 60904-3 como referencia de la distribución de radiación del espectro solar. monitoreo de temperatura +/-1 C; I-V exactitud del equipo de medición +/- 0.2%	Clase B o mejor
<b>Prueba en baja irradiancia</b>	Temperatura de la celda a 25C y temperatura de operación nominal (NOCT). Radiación: 200W/m <sup>2</sup> siendo IEC 60904-3 como referencia de la distribución de radiación del espectro solar. Monitoreo de temperatura +/-1 C; I-V exactitud del equipo de medición +/- 0.2%.	Clase B o mejor
<b>Permanencia de punto caliente</b>	Cinco horas de exposición a 1000W/m <sup>2</sup> de radiación en el peor caso de condición punto caliente. Fuente radiante 1:simulador de estado continuo 700W/m <sup>2</sup> Fuente radiante 2:simulador de estado continuo 1000W/m <sup>2</sup> +/-10%	Fuente de irradiancia 1: estado estable del simulador clase BAB o mejor
<b>Precondiciones de rayos UV</b>	15 kWh/m <sup>2</sup> total de radiación UV en longitud de onda de 280 nm a 385 nm con 5 kWh/m <sup>2</sup> UV de radiación en la longitud de onda de 280 nm a 320 nm.	Fuente de Luz UV con uniformidad dlight +/-15%; see 10.10.3 para requerimientos espectrales

**Tabla 3 Pruebas Al Panel Cristalino**

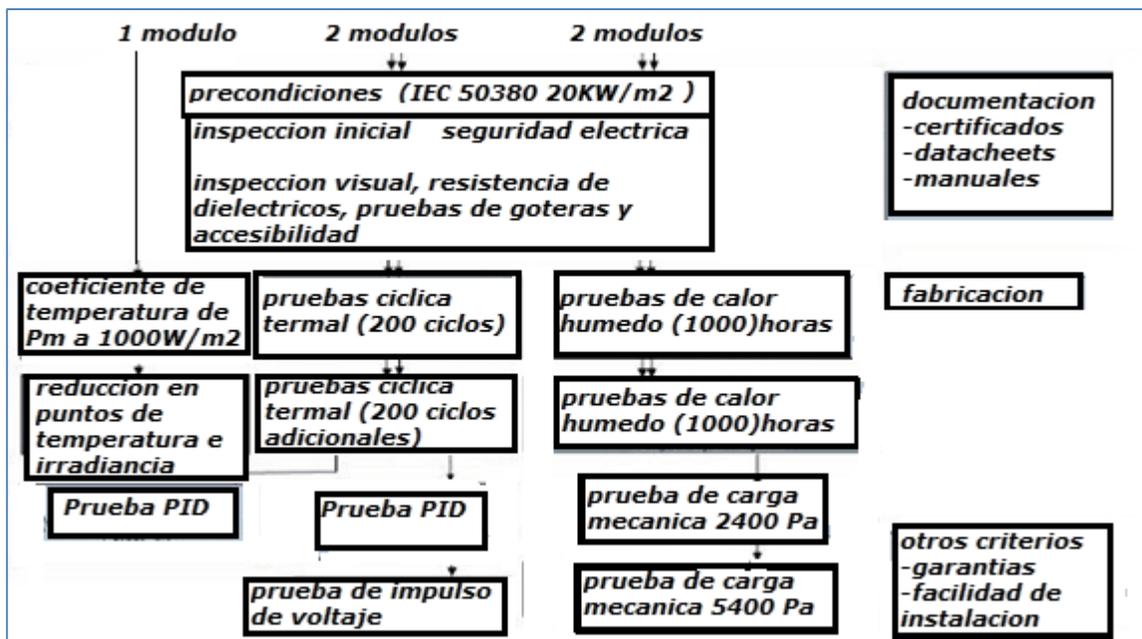
## 2.2.4 IEC 61646

A continuación los estándares de certificación de los paneles fotovoltaicos de película delgada se presentan en la siguiente tabla:

<b>IEC 61646 panel fotovoltaico de película delgada</b>		
<b>Título</b>	<b>Condiciones de examinación</b>	<b>Solar Class</b>
<b>Determinación de máxima potencia</b>	Tomando como referencia la norma IEC 60904-1; I-V se requiere una clase solar tipo BBA y que el área de prueba sea mayor o igual al de la fotocelda. la radiación debe estar entre 700 W/m <sup>2</sup> – 1100 W/m <sup>2</sup> ; la temperatura de la celda debe estar entre 25-50C.	Clase BBA o mejor
<b>Prueba en NOCT y STC</b>	La temperatura de la celda 25C y temperatura de operación nominal (NOCT). Radiación STC=1000 y NOCT=800W/m <sup>2</sup> con IEC 60904-3 como referencia de la distribución de radiación del espectro solar. Monitoreo de temperatura +/-1 C; I-V exactitud del equipo de medición +/- 0.2%.	Clase BBB o mejor
<b>Prueba en baja radiación</b>	Temperatura de la celda a 25C y temperatura de operación nominal (NOCT). Radiación: 200W/m <sup>2</sup> siendo IEC 60904-3 como referencia de la distribución de radiación del espectro solar. Monitoreo de temperatura +/-1 C; I-V exactitud del equipo de medición +/- 0.2%.	Clase BBB o mejor
<b>Prueba en baja radiación</b>	Una hora de exposición a 1000W/m <sup>2</sup> de radiación en el peor caso de condición punto caliente módulo de radiación 800 W/m <sup>2</sup> – 1100 W/m <sup>2</sup>	Simulador de estado Clase CCB o mejor
<b>Precondiciones de rayos UV</b>	15 kWh/m <sup>2</sup> total de radiación UV en longitud de onda del rango de 280 nm a 400 nm con margen de uniformidad +/-15% con 3-10% de energía de radiación en longitud de onda de 280nm a 320nm módulo de temperatura 60C +/-5C; con exactitud del equipo de +/-2C instrumentos de medición UV a 280nm-320nm y320nm-400nm de radiación con incertidumbre de of +/-15%	Fuente de Luz UV con uniformidad dlight de 280nm +/-15%; see 10.10.3 para requerimientos espectrales
<b>Exposición de luz</b>	Exposición de luz de 800 W/m <sup>2</sup> a 1000 W/m <sup>2</sup> bajo carga resistiva hasta P <sub>max</sub> sea estable con 2 %	

**Tabla 4 Pruebas Del Panel De Película Delgada**

Así mismo en esta norma se establece un diagrama de flujo con los pasos que se llevan a cabo antes de instalar la celda fotovoltaica de uno o dos módulos. Como se ve en la ilustración 8



**Ilustración 8 Diagrama De Flujo Para Instalar Un Panel Fotovoltaico**

Entre las normas que existen las que se refieren a la antigüedad de los paneles solares; cobran un impacto muy importante pues normalmente los equipos se desgastan por estar expuesta al medio ambiente las normas son las siguientes:

### 2.2.5 IEC 61215:2005

Esta prueba se usa en módulos fotovoltaicos cristalinos, y cubre los parámetros responsables del envejecimiento de los módulos fotovoltaicos. Esto incluye todas las fuerzas de la naturaleza:

- Rayos UV, incluida la luz del sol
- Diferencial ambiental de humedad y temperatura
- De carga mecánica como granizo, la succión del viento, la presión del viento y los parámetros de la nieve es decir carga distribuida que son los responsables del envejecimiento de los módulos fotovoltaicos Para la norma IEC 61215 de certificación, se aplican 2400 Pa de carga uniforme. Sin embargo, al instalar paneles solares en zonas con mucha nieve, un aumento de presión de carga a 5400 Pa.

## 2.2.6 IEC 61646 MÓDULOS DE PELÍCULA DELGADA

La certificación IEC 61646 es de módulos fotovoltaicos de capa o película fina y es en muchos aspectos idéntica a la norma internacional IEC 61215 para módulos cristalinos. Una prueba adicional certifica la degradación del comportamiento del silicio amorfo debido a la temperatura y la exposición a la radiación.

## 2.2.7 IEC 61730/EN 61730 CUALIFICACIÓN DE LA SEGURIDAD DE LOS MÓDULOS

La IEC/EN 61730 es la cualificación de la seguridad del módulo, que posteriormente fue publicada como la norma europea EN 61730. La norma IEC/EN 61730 consta de 2 partes: La primera parte abarca todos los requisitos para la construcción y las diferentes características de construcción obligatoria de los módulos. La segunda parte consta de los requisitos para las pruebas y define tres clases diferentes de aplicación del diseño de un módulo, especificando el tipo de uso, las pruebas de cualificación y los relacionados con las modificaciones resultantes de clase de seguridad eléctrica.

## 2.2.8 IEC 60364-4-41 PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS

Protección contra el choque eléctrico para instalaciones de baja tensión eléctrica, y que describe las medidas de seguridad personal para los sistemas eléctricos. Para los sistemas fotovoltaicos sugiere un aislamiento total y que requiere un aislamiento especial de los módulos fotovoltaicos de acuerdo a la Seguridad Clase II, sobre la base de los siguientes requisitos:

- a. Durabilidad
- b. Alta resistencia dieléctrica
- c. Estabilidad mecánica
- d. Aislamiento de espesor suficiente y las distancias

## 2.2.9 IEC 62108 CONCENTRADOR DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Un certificado especial, es necesario, porque la alta concentración de la radiación solar a través de lentes o espejos, son las mayores causas de cuidado en un equipo. La norma IEC 62108 especifica los criterios para la calificación del diseño y la homologación del tipo de concentrador de módulos fotovoltaicos y ensamblado adecuado para operaciones a largo

plazo, y en general, en instalaciones al aire libre. El primer certificado del mundo para esta tecnología IEC 62108 se publicó en junio de 2009 en California.

#### **2.2.10 IEC 61701 RESISTENCIA AL SALITRE EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Las instalaciones solares que están operando en un ambiente altamente corrosivo, como cerca del mar, deben llevar un certificado de los paneles, con la resistencia de los paneles fotovoltaicos contra los efectos corrosivos del salitre. La certificación de los paneles a la corrosión es una buena idea, en caso de que la instalación de módulos fotovoltaicos estén cerca de las costas o en las aplicaciones marítimas, tales como módulos flexibles para embarcaciones de recreo, pequeñas embarcaciones, barcos, boyas, faros y señalización marítima.

#### **2.2.11 BUILDING INTEGRATED SOLAR PANELS – BIPV**

En la integración arquitectónica, actualmente no existe un estándar de certificación de edificios que integran paneles solares, sin embargo, esto cambiará pronto. Por ejemplo, Suntech, espera una certificación IEC para mediados de este año. Suntech tiene la gama de productos MSK Solar Design Line, para BIPV.

#### **2.2.12 IEC 61683- CONDICIONES DE POTENCIA PARA MEDIR LA EFICIENCIA**

Creada en 1999, describe cuales son los pasos a seguir en la medición de la eficiencia de la carga donde la salida de voltaje sea de AC de frecuencia constante o un sistema estable de de voltaje DC.

#### **2.2.13 IEC 60364-7-712 REQUERIMIENTOS PARA LOCACIÓN DE INSTALACIÓN ESPECIAL FOTOVOLTAICA.**

Este apartado habla sobre cuales, son los estándares de radiación, latitud. y temperatura, que deben poseer como requisito mínimo una locación para poder incorporar un modulo fotovoltaico, ya sea en vivienda, zona industrial, rural o de generación.

#### **2.2.14 IEC 61853 RADIACIÓN Y TEMPERATURA CON RELACIÓN A LA MEDICIÓN Y EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA**

Con 3 apartados se incluye los requerimientos para la evaluación de potencia activa, sobre el rango de radiación y temperatura permitida.

En el segundo apartado se analiza el espectro de la respuesta, ángulo de incidencia y temperatura de operación con lo que se hace la estimación de energía generada con base a la radiación, y velocidad del viento.

En el último apartado, se realiza el cálculo en W/h bajo un día normal con especificaciones estándar.

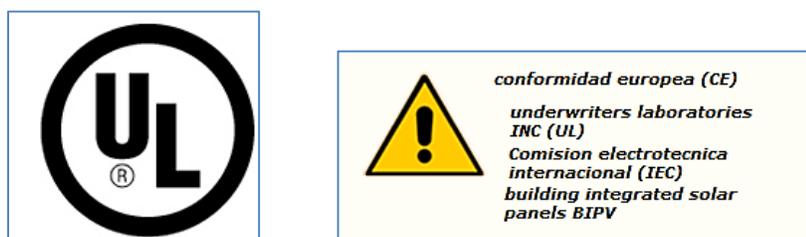
Cabe destacar que para realizar las pruebas de los primeros apartados se utilizan 23 temperaturas diferentes con sus variados niveles de radiación.

Como se puede ver la certificación de los módulos fotovoltaicos están sujetos a normas europeas; el sello del conformidad europea (CE) es el certificado de autenticación sobre seguridad, salud y medio ambiente.



**Ilustración 9 Logotipo De Certificación Europea**

También debe certificar Underwriters Laboratories INC con las siglas UL, es un organismo independiente que realiza las pruebas de certificación, y es difícil vender paneles solares sin el sello de estos laboratorios, tan solo en Estados Unidos , no se permite conectar los paneles solares a la red, tampoco las bonificaciones por parte del gobierno, y existen penalizaciones por la instalación, esto porque la norma UL 1703 cubre el código eléctrico nacional de Estados Unidos además de que certifica una eficiencia igual o superior al 90%.



**Ilustración 5 Logotipos De Certificación Internacional**

## 2.3 PRUEBAS AL MEDIO DONDE SE PONDRÁN EN SERVICIO EL PANEL FOTOVOLTAICO

En los párrafos anteriores nos enfocamos en las normas que regulaban el uso, la fabricación y la instalación de los paneles solares, sin embargo cuando realizamos la puesta en servicio se debe tener en cuenta el uso del terreno y por eso se debe citar algunas normas que regulan las pruebas que se realizan a la zona geográfica donde se planea incorporar estos sistemas y al igual que todo el gremio de normas impuestas a los paneles; estas pruebas se certifican mediante los acuerdos internacionales de la IEC.

Standard	Definition
IEC 60068-2-1 IEC 60068-2-1-am1 /am2	Prueba ambiental; part 2: test; test A: frio
IEC 60068-2-2 IEC 60068-2-2-am1 /am2	Procedimientos basicos de prueba ambiental part 2: Tests; Test B: calor seco
IEC 60068-2-3	Procedimientos basicos de prueba ambiental; Part 2: Tests; Test Ca: calor humedo
IEC 60068-2-6	Procedimientos basicos de prueba ambiental; Part 2: Tests; Test Fc: vibracion senoidal
IEC 60068-2-21	Procedimientos basicos de prueba ambiental; Part 2: Tests; Test U: Robustes del equipo de montaje
IEC 60068-2-27	Prueba ambiental; Part 2: Tests; Test guia de impacto
IEC 60068-2-30 IEC 60068-2-30-am1	Procedimientos basicos de prueba ambiental; Part 2:
IEC 60068-2-33 IEC 60068-2-33-am1	Procedimientos basicos de prueba ambiental; Part 2: Tests; guia en los cambios de temperatura
IEC 60068-2-75	Prueba ambiental; Part 2: Tests; Test Eh: Hammer tests

**Ilustración 10 Pruebas Al Medio Ambiente Donde Se Colocan Los Paneles Solares.**

# 2014

## MODELOS DE PANEL FOTOVOLTAICO



CHRISTIAN BELTRAN BEDOLLA

Microsoft

13/01/2014

## CAPÍTULO 3 PUESTA EN SERVICIO DE REDES ELÉCTRICAS CON SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Para realizar la puesta en servicio de un panel fotovoltaico en cualquier tipo de topología, se debe tener en cuenta que el panel necesita libre acceso a los rayos del sol durante la mayoría de los días del año, ya que así se asegura un mejor rendimiento del sistema. Aunado a esto, es indispensable realizar el cálculo de cantidad de paneles solares para el proyecto eléctrico, ya que la necesidad de energía requiere de un método que establezca la cantidad de electricidad que se debe utilizar. Se realiza deduciendo la energía consumida en el sistema; es decir, la cantidad de potencia de los aparatos multiplicada por el número de horas en el que trabaja.

Una vez que se encontró la potencia consumida por todo el sistema, se debe emplear la siguiente fórmula para elegirla capacidad que tendrá el panel.

:

$$Np = 1200 * Nc / Er \quad [1]^*$$

Dónde:

$Np$  capacidad del panel

$Nc$  cantidad de energía a cubrir

$Er$  energía disponible a tiempo real

El cálculo anterior está incompleto sin la obtención de las dimensiones de una batería. El cálculo de este componente se basa en la siguiente fórmula:

$$B = \frac{Dss * Ed}{Rn * De} \quad [2]^*$$

Donde:

$B$  total de Wh requeridos por la batería

$Dss$  días sin sol aproximado dependiendo de la época el año

$Ed$  energía por día consumida

$Rn$  rendimiento de la batería

$De$  grado de descarga de la batería

Para el cálculo se asume que la zona donde se instalarán los paneles puede quedarse hasta unos dos días continuos sin brillo solar, pero es un cálculo aproximado. Además las baterías tienen una eficiencia del 80%. Finalmente, no conviene que el grado de descarga de las baterías sea más allá del 50%, para no afectar su vida útil.

Así mismo es muy importante conocer la disponibilidad de energía solar en el lugar donde se instale el panel solar. Cabe mencionar que las tablas de radiación solar están controladas por la supervisión del gobierno de cada país. Por último la puesta en servicio está sujeta a los permisos, aprobación y consulta de las normas establecidas para su correcto funcionamiento, las cuales se explicaron en el capítulo anterior.

### 3.1 DOCUMENTOS TÉCNICOS A ENTREGAR, INSTRUCCIONES Y GARANTÍAS.

Cuando se adquiere un panel fotovoltaico para su incorporación en una red, el cliente tiene el derecho de exigir que su producto este aprobado bajo la legislación vigente en los estatutos de calidad y servicio; es así que el vendedor o distribuidor está obligado a presentar al usuario final la siguiente documentación para una puesta en servicio óptima:

- a. Dimensionamiento del sistema indicando los criterios para determinar la potencia pico a instalar así como el criterio de selección del inversor memoria de cálculo.
- b. Memoria de cálculo del diseño eléctrico para la selección de cables, desconectores, dispositivos de protección contra sobre corrientes, dispositivos de protección contra alto voltaje, conductores de puesta a tierra y tierra del sistema, protección contra fallas a tierra, y equipo de medición eléctrica.
- c. Diagrama bifilar del sistema propuesto que incluya todas las características eléctricas de los cables, conduits, cajas, sistemas de protección, etc.
- d. Relación completa de partes y componentes del sistema fotovoltaico.
- e. Manual de operación del sistema y de recomendaciones de uso, incluyendo protocolo de inspección y mantenimiento, información técnica relevante del equipo y relación de posibles causas de falla
- f. Diagrama eléctrico simplificado de la instalación.
- g. Diagrama de ubicación de equipos o diagrama arquitectónico.
- h. Memoria de cálculo de la cimentación y estructura soporte.
- i. Lista de verificación de partes y componentes en sitio.
- j. Resultados de la prueba de aceptación.
- k. Capacitación al usuario final, dando una explicación clara sobre el funcionamiento, operación y mantenimiento preventivo del sistema, indicando las partes y componentes del mismo, así como las posibles falla y corrección inmediata.
- l. Convenio de Garantías Usuario-Distribuidor por escrito del funcionamiento y ciclo de vida de todos los componentes del sistema, de acuerdo a la NOM 024-SCFI y a lo siguiente:
  - Panel fotovoltaico: 10 años con al menos 90% de la potencia máxima de salida y 20 años con al menos 80% de la potencia máxima de salida. En dichos períodos, la degradación máxima permisible será del 10% ó 20% en la potencia-pico, según sea el caso, bajo condiciones estándares de prueba.
  - Inversor, controlador y/o acondicionador de energía vida útil: 5 años.
  - Estructura para módulos fotovoltaicos vida útil: 20 años
  - Instalación eléctrica vida útil: 20 años

Además de la documentación, el distribuidor dará una garantía de su buen funcionamiento por un periodo de 18 meses como mínimo. Esta garantía cubrirá las fallas o defectos en la operación del sistema producto de una mala instalación, o vicios ocultos, o el uso de

materiales no adecuados para las condiciones climatológicas del sitio. Así también se garantizará que el sistema y suministros a instalar sean aquellos que constituyan las partes y componentes incluidos en la cotización que sirvieron de base para formular el dictamen técnico aprobatorio.

Cabe destacar que la garantía otorgada será cuando menos por 18 meses para las partes y componentes del sistema, exceptuando los módulos fotovoltaicos e inversores que tendrán una garantía provista por el fabricante y respaldada por el distribuidor. Y se dará cumplimiento de estas garantías en el sitio de instalación del sistema.

El tiempo de respuesta para hacer válida la garantía no será mayor a 15 días naturales, contados a partir del conocimiento de la falla. Están excluidas de éstas Garantías daños por: robo, vandalismo, terremotos, huracanes, inundaciones, incendios forestales y rayos.

### 3.1.1 PUESTA EN SERVICIO DE LOS EQUIPOS AUXILIARES

Para poder iniciar operaciones con inversores, se debe realizar bajo la conformidad de normas especiales, que son sujetas a organismos internacionales, de esta forma se logra la confiabilidad del buen funcionamiento del inversor en la puesta en servicio de un panel fotovoltaico, las normas más utilizadas son:

#### EN 50178:1997

Es una prueba avalada por CENELEC(Comité Europeo de Normalización Electrotécnica), en instalaciones de potencia, donde se definen los requerimientos mínimos de diseño para la protección contra fallas eléctricas, de puesta en servicio de paneles fotovoltaicos, cabe destacar que esta prueba es exclusiva para mecanismos de generación, no es aplicable para instalaciones doméstica, medicas, telecomunicaciones, transporte entre otras-

#### EN 61000-6-2

Esta prueba es avalada por CENELEC, y su aplicación es exclusiva para paneles fotovoltaicos de tipo residencial, comercial y de industria ligera como talleres, laboratorios y centros de servicio

#### EN 61000-6-4

Esta prueba es exclusiva para la puesta en servicio de industria pesada bajo voltajes formalizados Los seguidores también deben ser avalados bajo condiciones de servicio concretas, es por esto que se realizan las siguientes pruebas de desempeño en la puesta en servicio. Cabe aclarar que estas pruebas también son exclusivas de la implementación de un panel fotovoltaico a una red eléctrica.

#### EN 61010-1,

Esta prueba es normalizada bajo CELENEC y la AENOR, para tener una certeza de la seguridad contra fallas eléctricas en este instrumento de control.

Así también los conectores deben tener la certificación de ciertas pruebas para su funcionamiento en situaciones reales, las cuales son:

## EN 60998-1

Esta prueba avalada por CENELEC, dice que en la puesta en servicio no pueden superarse los 1000V en CA, superando la frecuencia normalizada y los 1500 V en CD, donde la instalación sea exclusiva para uso doméstico.

A continuación se muestra el logotipo de CENELEC

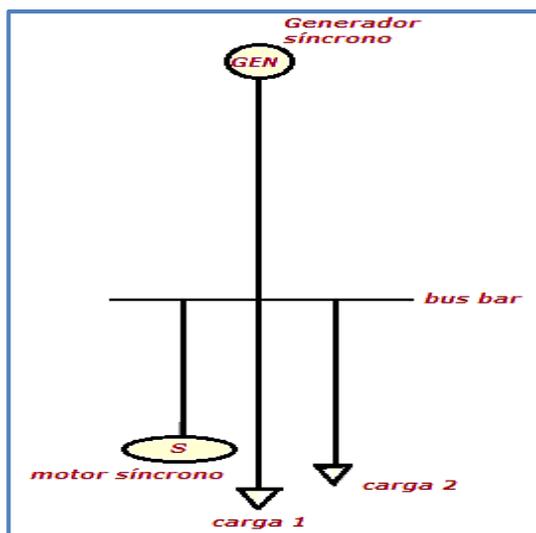


**Ilustración 1 Logotipo De CENELEC**

### 3.2 OPERACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INDEPENDIENTES

Los sistemas fotovoltaicos independientes tienen topología aislada, por tanto la consideración más importante en el diseño de este tipo de sistemas es que posea la capacidad adecuada para que la energía que consuman los aparatos sea la misma que la energía producida por el sistema fotovoltaico; pues sus aplicaciones fundamentales son domésticas, instalaciones, bombeo, iluminación, etc. Debido al costo y tiempo que lleva realizar la puesta en servicio de un panel fotovoltaico; es posible interpretar su comportamiento con base en simulaciones. Se establece entonces un circuito que nos ayude a entender el comportamiento de un sistema fotovoltaico aislado. Sin embargo primero se necesita realizar un análisis de estado dinámico con un sistema generador convencional, para que se hagan notar las diferencias y beneficios al intercambiar dicho sistema por un panel fotovoltaico.

En este caso se utiliza un generador síncrono; unido mediante un bus, a 3 cargas diferentes: un motor síncrono y dos cargas que representan el consumo de aparatos con los que se trabaja cotidianamente, como se observa en la ilustración 2



**Ilustración 2 Caso Base, Circuito Eléctrico De Generación Convencional, Unido A Tres Cargas Distintas**

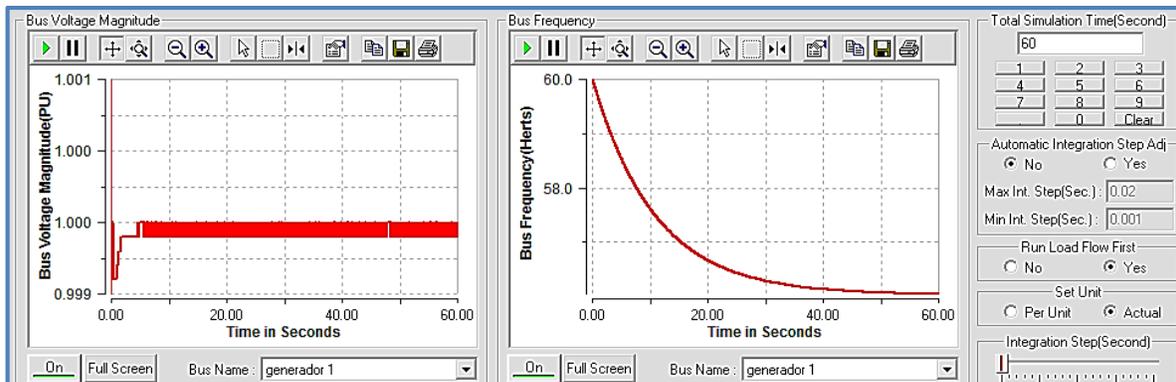
A este circuito se le inducirá una falla trifásica a tierra en el bus bar, a los 2s de haber iniciado el funcionamiento del sistema

Este sistema está diseñado para 23KV. A continuación se muestran los valores de cada componente en voltaje de los aparatos con los que se trabaja.

Elemento	Voltaje en el sistema
Generador	23 Kv
carga 1	2500 v
carga 2	2500 v
motor síncrono	15 KV

**Tabla 1 Componentes Del Circuito 1**

Estableciendo un tiempo considerable para realizar las mediciones que en este caso es un minuto, las gráficas arrojadas de este primer experimento fueron las siguientes:



**Ilustración 3 Graficas De Voltaje Y Frecuencia Del Caso Base**

Como se puede observar se obtiene un número muy alarmante de fluctuaciones, en el parámetro de voltaje, así mismo también es preocupante que la frecuencia disminuye hasta 56 Hz, es decir 4 ciclos por segundo menos. Existe una disminución en la eficiencia del generador. Entonces el sistema no funciona adecuadamente, de seguir así se provoca la inutilización de la instalación; por tanto se debe cambiar el sistema generador aumentando su potencia, ya que es difícil encontrar otros aparatos que demanden menos corriente.

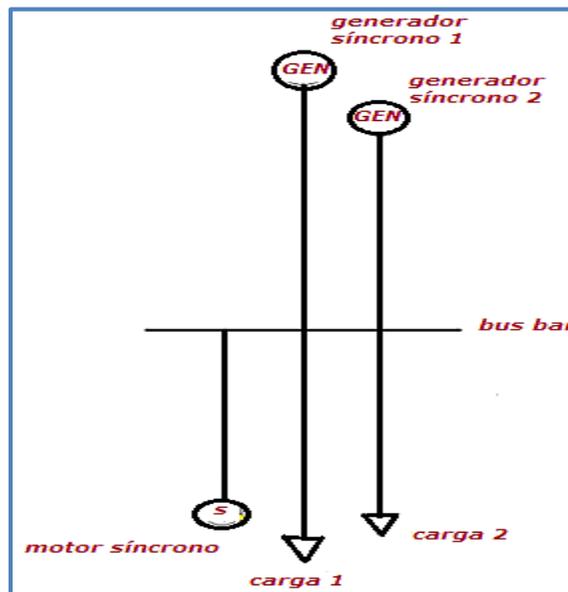
Fue necesario que se realizara la prueba anterior porque solo así se puede verificar que el sistema es estable para realizar la comparación con el sistema fotovoltaico; francamente no se esperaba que hubiera esas variaciones de voltaje y frecuencia tan grandes.

### 3.1.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO INDEPENDIENTE CON DOS GENERADORES

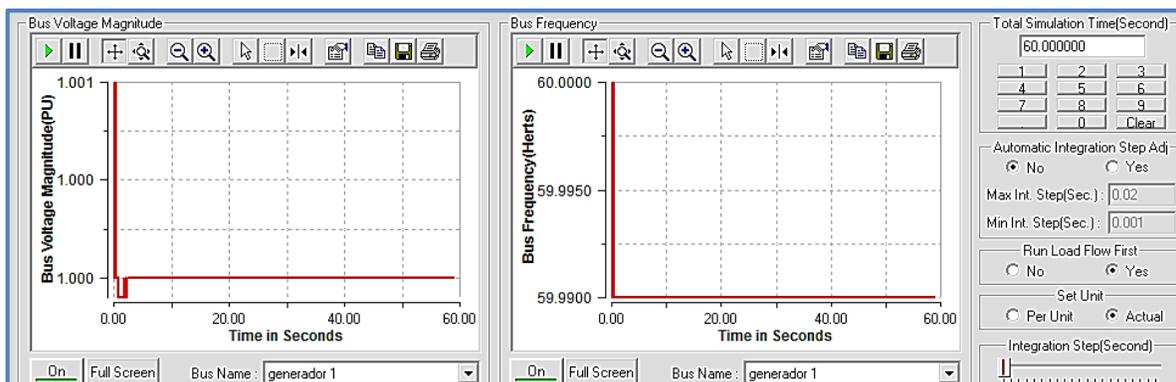
En la ilustración 4 se muestra el mismo sistema pero con un generador adicional de igual voltaje y capacidad, con lo que ahora será un sistema lo suficientemente robusto para realizar las mediciones. A continuación se analiza el comportamiento con este nuevo sistema, con las mismas características que la falla anterior.

Como se puede notar la ilustración 5, las gráficas son más amables y es posible tomar mejores mediciones

También se observa que la variación de voltaje en Pu's llega a estabilizarse aproximadamente a los 4s, y que aunado a lo anterior decae el voltaje, es decir que en primera instancia se pierde potencia cuando inician operaciones los generadores y se inicia la falla.

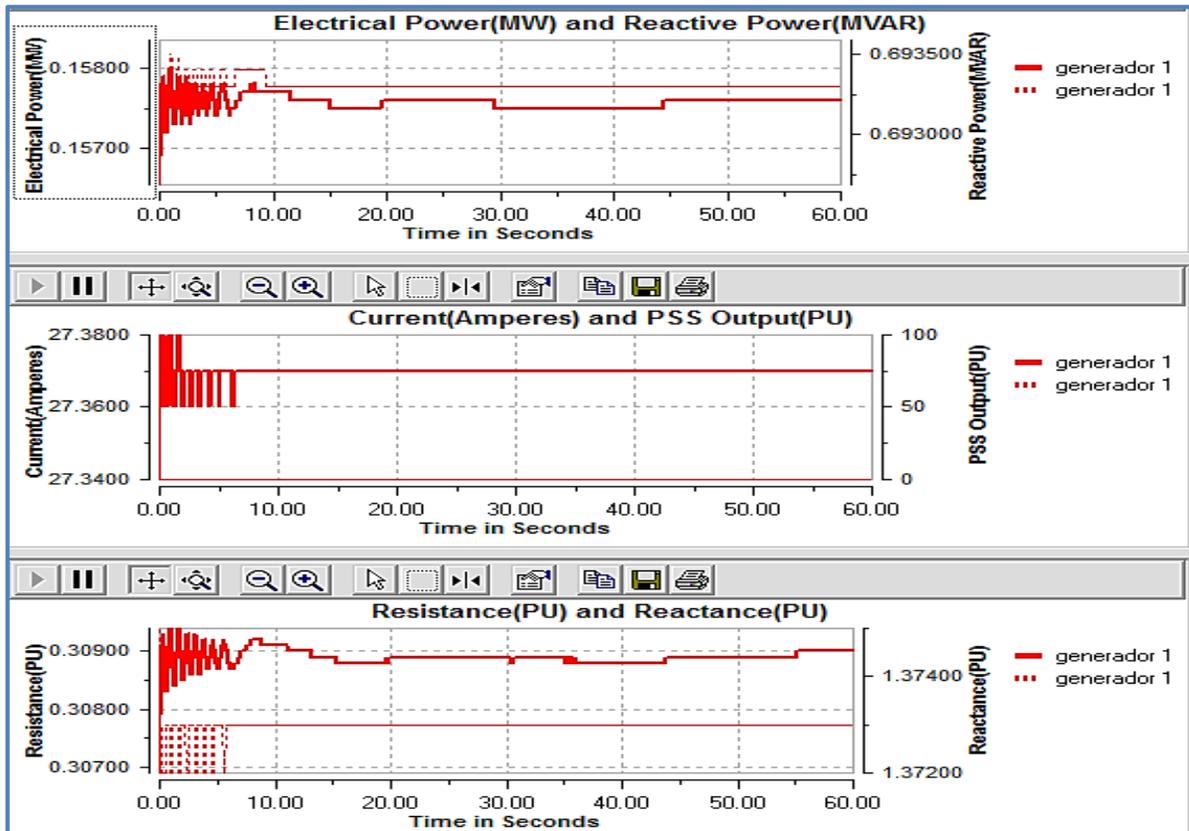


**Ilustración 4 Mismo Circuito Incorporando Otro Generador**



**Ilustración 5 Graficas De Voltaje Y Frecuencia De Circuitos Modificado**

Continuando con la ilustración 5, tras un pequeño ascenso en voltaje, la logra la estabilidad en el valor de la unidad, esto significa que al parecer las pérdidas no son significativas y que el sistema funciona correctamente. Si se analiza la gráfica de la frecuencia, es mayor la sincronía que existe entre los componentes de generación y carga, pues prácticamente no existe variación en los ciclos por segundo de operación del circuito.

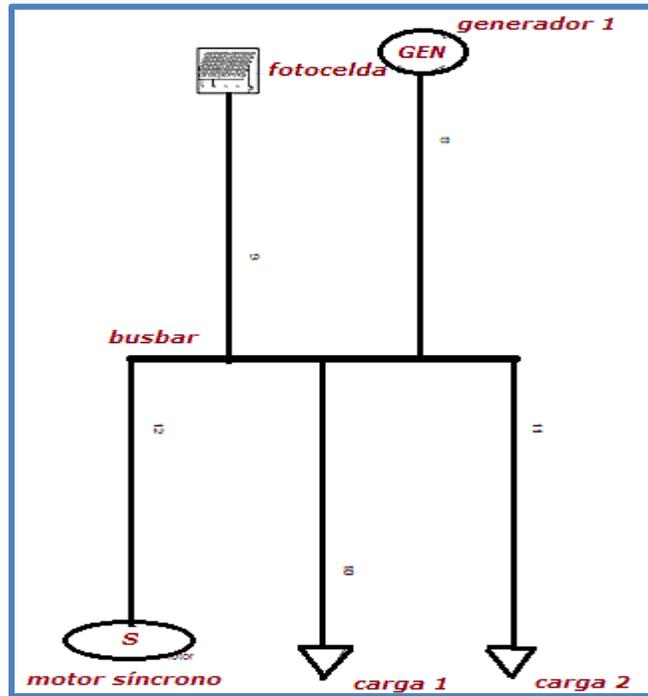


**Ilustración 6 Potencia, Corriente E Impedancia Del Circuito Modificado**

Ahora existen varios periodos de estabilización en la potencia, que se debe a que el sistema acopla cada componente de carga en conjunto, por lo que necesita aún más tiempo para llegar al punto de estabilidad. Sin embargo, ahora el sistema es óptimo para la utilización. Cabe destacar que este sistema sufre diversos cambios de impedancia, después de los 10 s; pero la corriente no se ve afectada; al parecer es indiferente, y se estabiliza aproximadamente a los 8 s.

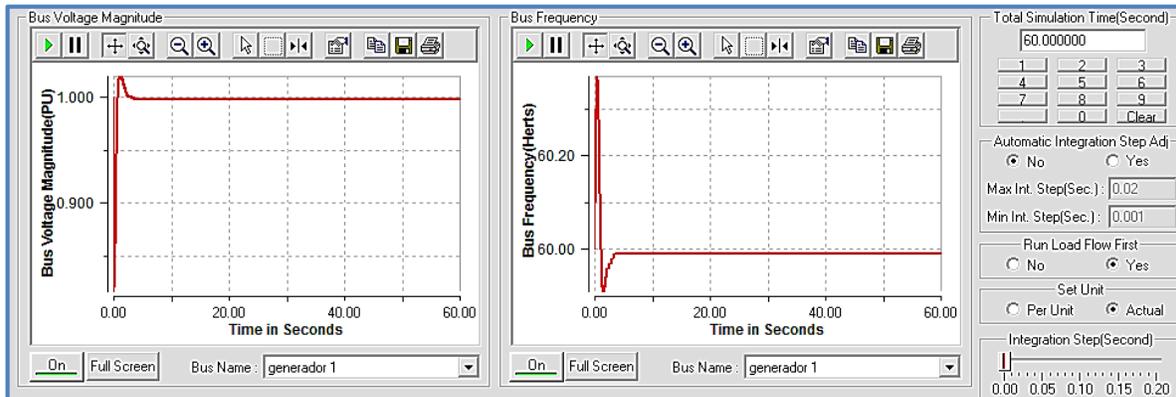
### 3.1.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO INDEPENDIENTE CON PANEL FOTOVOLTAICO

Intercambiando un generador de 23KV por un panel solar del mismo voltaje, se establece una correcta comparación entre los sistemas aislados y esto queda mostrado en la siguiente ilustración:

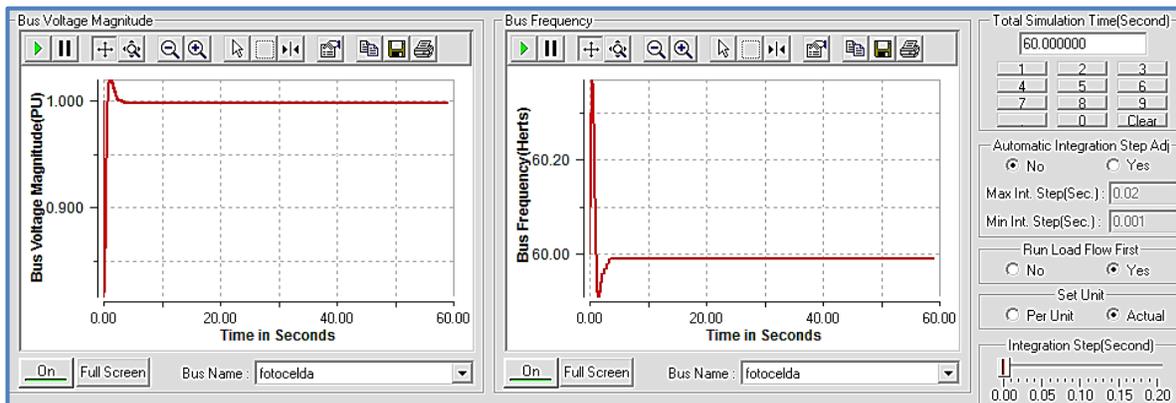


**Ilustración 7 Circuito Cambiando El Generador Por La Panel Fotovoltaico**

En las siguientes graficas se distingue el contraste de la frecuencia con el uso de paneles fotovoltaicos en relación con los generadores puestos en servicio.



**Ilustración 8 Graficas De Voltaje Y Frecuencia En Relación Al Generador**

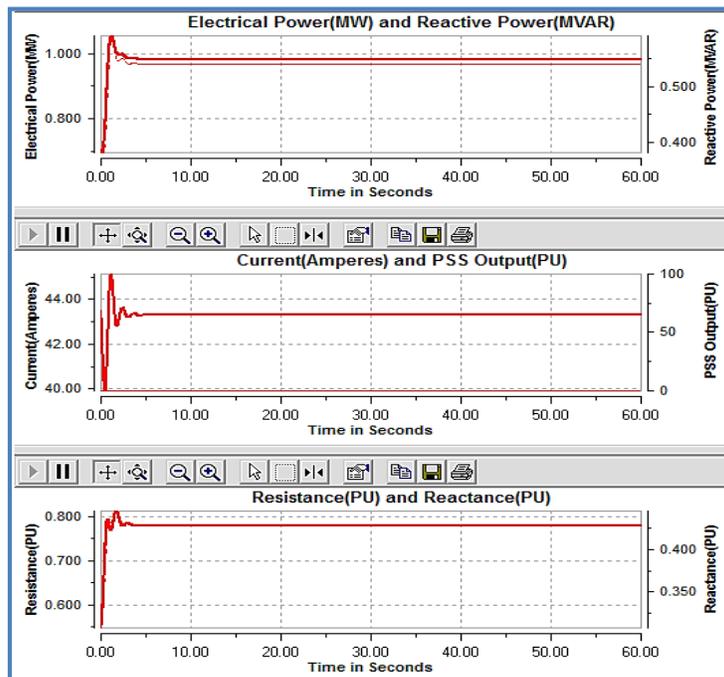


**Ilustración 9 Graficas De Voltaje Y Frecuencia En Relación Al Panel Fotovoltaico**

Observando la gráfica de voltaje el coeficiente de amortiguamiento tiene un valor mayor que cuando había dos motores, además el periodo para estabilizarse es aproximadamente a los 3s. Además cabe destacar que el generador y el panel fotovoltaico se comportan de la misma forma.

En relación con la gráfica de la frecuencia; si bien aumenta, no lo hace con una magnitud tan grande, lo hace en un periodo más corto que con los dos motores y además se estabiliza en el mismo valor de frecuencia con el que inicio, es decir, 60 Hz. Así que por ahora el sistema con el panel fotovoltaico es más robusto.

Analizando el comportamiento de la potencia, la corriente y resistencia se expondrá cómo está funcionando el panel, en la siguiente figura se pueden analizar dichos parámetros:



**Ilustración 10 potencia, corriente y voltaje del circuito con panel fotovoltaico**

Los valores de potencia reactiva y activa tienen un comportamiento muy parecido, sin embargo su magnitud es diferente; mientras los MW casi llegan al valor de la unidad, la potencia activa está en la barrera de 550000 VAR, esto significa que existe una sincronía entre ambos parámetros. Para fines de estabilidad esta relación supone un valor de potencia real suficiente para trabajar en óptimas condiciones.

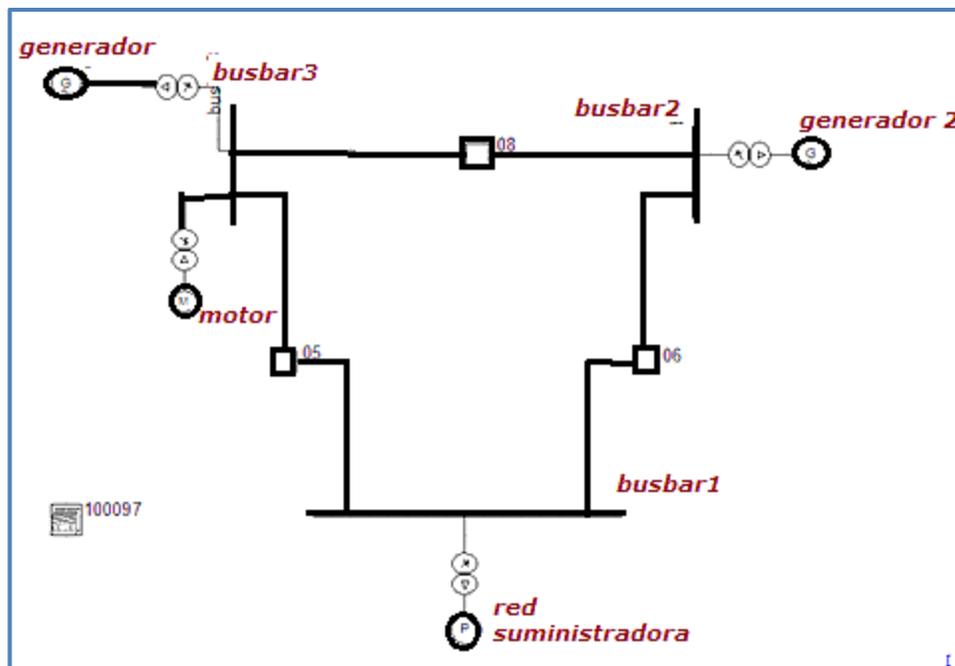
Observando la gráfica de corriente es posible ver que tiene un punto de estabilidad en aproximadamente 43A a los 5s de haber iniciado el proceso.

### 3.2 OPERACIÓN DE SISTEMAS GENERADORES EN RED

Para entender el concepto de modulo fotovoltaico incorporada a la red eléctrica se estudia el comportamiento de un circuito conectado a red con un cambio en el sistema generador de potencia.

Se realiza una corrida de estabilidad transitoria con un circuito elaborado para red eléctrica; que al igual que en los sistemas aislados en primera instancia, se hacen las mediciones con dos generadores para después intercambiar un generador por un panel solar, siendo que dicho circuito posee los mismo parámetros que el caso del sistema aislado, qué papel juega el panel fotovoltaico. En la siguiente ilustración es posible ver la topología de dicho circuito.

Se debe aclarar que para este análisis se provocó una falla trifásica, en la carga 5, a los 2s, de haber iniciado el proceso.



**Ilustración 11 Circuito Base Para Experimento**

Realizando una comparación entre los generadores. Ilustración 12 y 13. Es posible ver que sus valores son muy similares, en reactancias para el cálculo de fallas transitorias.

Label:  Select...

Machine Type: **Eq', Ed' Model**

Governor  
 Voltage Regulator  
 PSS

Machine Bus Name: **generador2**

Machine Base Power (MVA): 128

Inertia Constant (sec): 2.35  
 Synchronous RPM: 100  
 Moment of Inertia (lb-ft sq): 100

Damping factor on the machine (pu): 0

Direct-axis transient reactance (%): 23.2064

Quadrature-axis transient reactance (%): 30

Direct-axis synchronous reactance (%): 157.5

Quadrature-axis synchronous reactance (%): 151

Potier reactance on machine base (%): 0

D-axis transient open-circuit time constant (sec): 5.89

Q-axis transient open-circuit time constant (sec): 0.6

Saturation data S2: 0

Saturation data S1: 0

Saturation data E2: 1.2

Saturation data E1: 1

D-axis subtransient reactance (%): 0

D-axis subtransient open-circuit time constant (sec): 0

Q-axis subtransient open-circuit time constant (sec): 0

Q-axis subtransient reactance (%): 0

Generator Resistance (pu): 0.002

Note: All % Impedances on Machine Base Power (MVA).

Buttons: OK, Cancel, View..., Overview..., Governor..., AVR..., PSS..., Update

**Ilustración 12 Datos Generalizados Del Generador 2**

Label:  Select...

Machine Type: **Eq', Ed' Model**

Governor  
 Voltage Regulator  
 PSS

Machine Bus Name: **generador**

Machine Base Power (MVA): 192

Inertia Constant (sec): 3.333  
 Synchronous RPM: 100  
 Moment of Inertia (lb-ft sq): 100

Damping factor on the machine (pu): 0

Direct-axis transient reactance (%): 23.0016

Quadrature-axis transient reactance (%): 37.8

Direct-axis synchronous reactance (%): 172

Quadrature-axis synchronous reactance (%): 166

Potier reactance on machine base (%): 0

D-axis transient open-circuit time constant (sec): 6

Q-axis transient open-circuit time constant (sec): 0.535

Saturation data S2: 0

Saturation data S1: 0

Saturation data E2: 1.2

Saturation data E1: 1

D-axis subtransient reactance (%): 0

D-axis subtransient open-circuit time constant (sec): 0

Q-axis subtransient open-circuit time constant (sec): 0

Q-axis subtransient reactance (%): 0

Generator Resistance (pu): 0.002

Note: All % Impedances on Machine Base Power (MVA).

Buttons: OK, Cancel, View..., Overview..., Governor..., AVR..., PSS..., Update

**Ilustración 13 Datos Generalizados Del Generador 1**

Recordando que:

- a. Reactancia subtransitoria ( $X_{d''}$ ): limita la amplitud de la corriente de falla en el primer ciclo después de ocurrido el cortocircuito. Esta se define como el valor de reactancia de estator en el intervalo de tiempo transcurrido entre el instante en que se produce la falla y 0.1 s.
- b. Reactancia transitoria ( $X_{d'}$ ): limita la corriente de falla después de varios ciclos de producido el cortocircuito. Se define como la reactancia que presenta el generador en el intervalo de tiempo transcurrido entre 0.5 a 2 s.

El generador 1 posee un cuidado un poco más especial en cuestión de que sus valores de reactancias son más elevados debido que produce una cantidad de energía mayor.

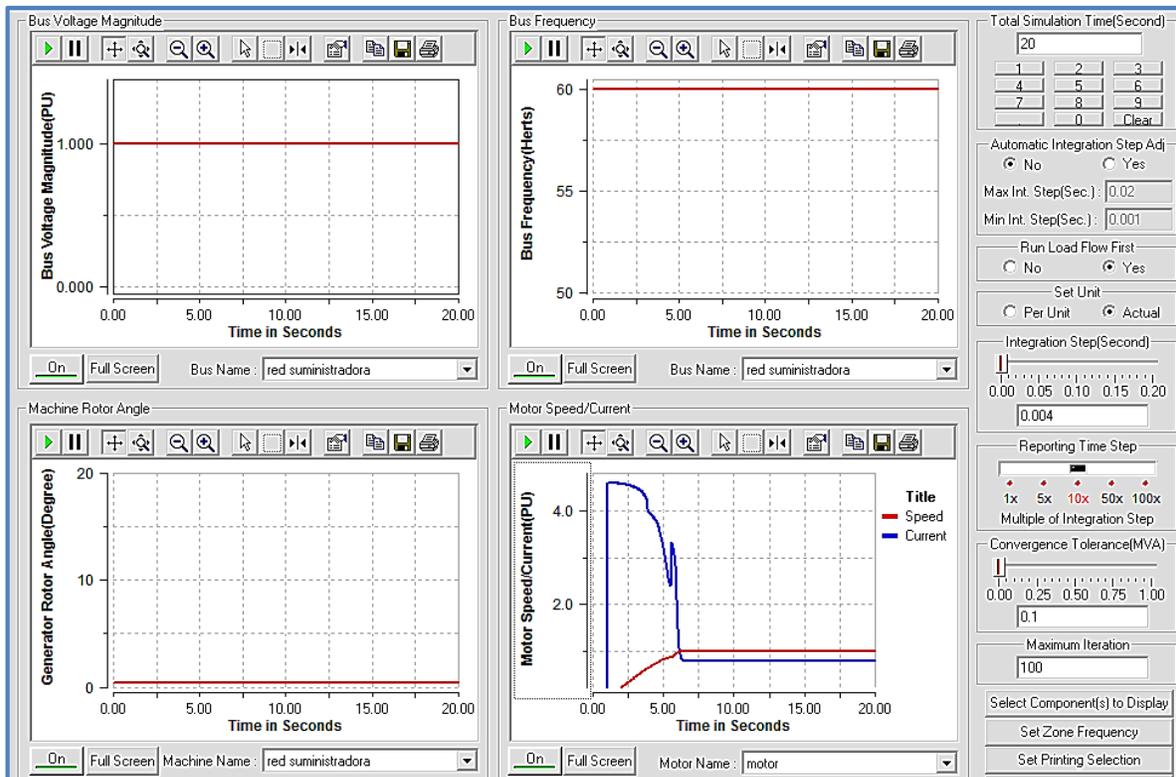
El tercer componente en cuestión es la red suministradora los valores de los parámetros de resistencia y reactancia disminuyen con respecto a los generadores, porque su función no es la de generar propiamente si no controlar el sistema de flujos y corrientes. Es la función realiza CFE en la red eléctrica nacional.

Cabe aclarar que los valores de potencia que tienen cada uno de los componentes del circuito se observan en la ilustración 14.

No.	Machine Type	Machine Bus Name	Machine Base Power(MVA)
1	Eq', Ed' Model	red suministradora	247.50000
2	Eq', Ed' Model	generador	192.00000
3	Eq', Ed' Model	generador2	128.00000

**Tabla 2 Potencia Total De Los Componentes**

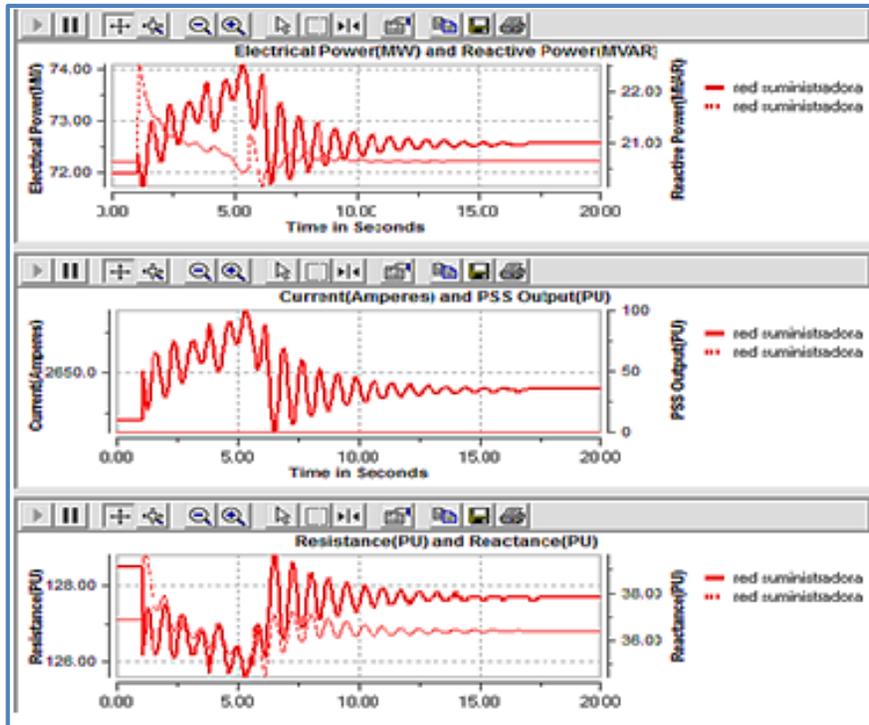
Al realizar la corrida para el análisis del estado transitorio se observa lo siguiente:



**Ilustración 14 Análisis Transitorio De Red Suministradora**

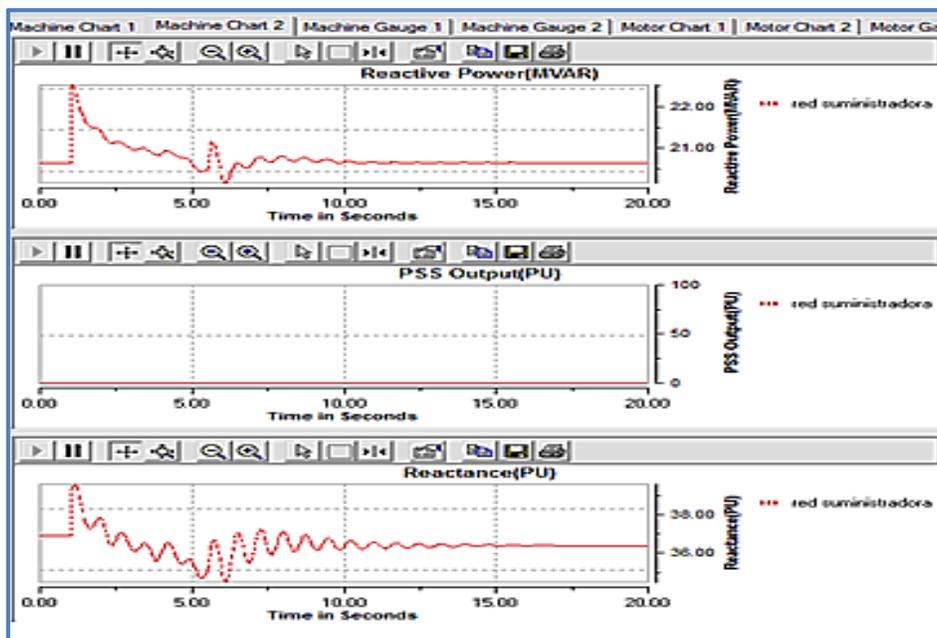
Donde la red suministradora siempre se mantiene en un margen de frecuencia y voltaje constante, y que el motor llega a un margen de estabilidad aproximadamente a los 7 s. Sin embargo, en las siguientes graficas se ilustra cómo cambian los flujos de potencia, corriente y la impedancia que presenta la red suministradora con el circuito propuesto, donde aproximadamente cada parámetro de medición tiene un tiempo de estabilidad aproximado a los 16 s.

En el caso de la parte real de la potencia y corriente poseen un grafica de tipo subamortiguada, que es muy similar entre sí. Aunado a lo anterior, entre los 5 y los 6 s alcanzan su valor más alto. En el caso de la resistencia se puede ver que aumenta a partir de los 5 s y se empieza a estabilizar, aunque no posee un valor muy grande, el aumento de las fluctuaciones llaman la atención por el cambio tan repentino. Este cambio puede deberse a una protección propia de la red ante el aumento de corriente.



**Ilustración 15 Grafica De Flujos E Impedancias De La Red Suministradora**

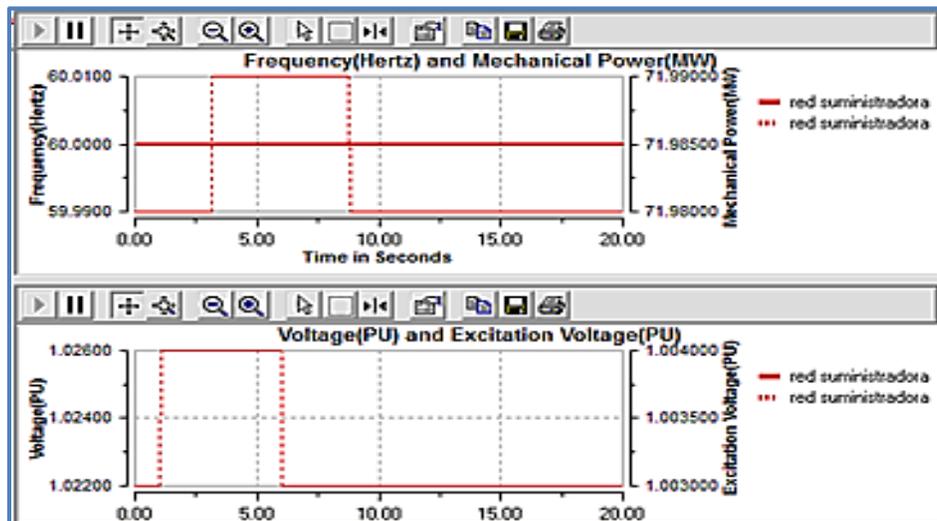
Ahora bien se analiza de manera meticulosa la parte imaginaria de dichos parámetros. En la gráfica siguiente es posible ver qué ocurre con la potencia reactiva y la parte reactiva de la impedancia, es muy interesante ver que aunque la reactancia se comporta en la gráfica de forma muy parecida a la resistencia no tiene un valor tan alto en términos numéricos y sus fluctuaciones son más pequeñas e incluso al parecer se estabiliza en un lapso de tiempo menor.



**Ilustración 16 Valores Pasivos Del Experimento**

Con respecto a la potencia reactiva, es posible ver que cuando se genera más potencia real, también llega un momento en el que se alcanza un punto más alto de potencia reactiva, pero cabe señalar que ambos valores de medición casi se mantienen con el mismo valor que iniciaron.

Aunado a lo anterior está el hecho de que no se afecta la frecuencia y el voltaje de excitación permanece prácticamente igual.



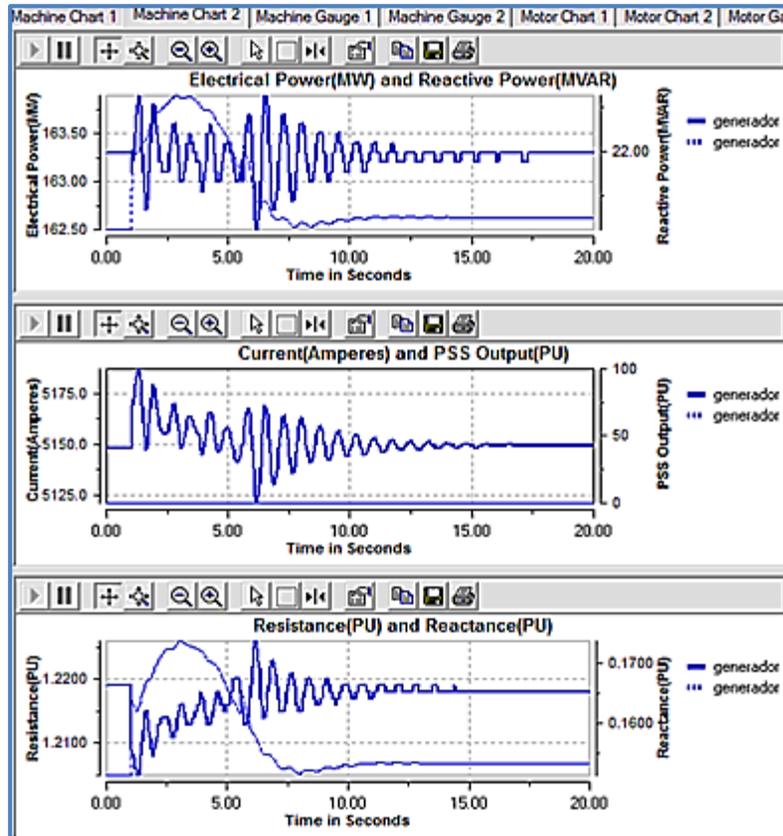
**Ilustración 17 Frecuencia Y Voltaje De La Red Suministradora**

A continuación se examina la ilustración 18 que describe cómo se comportan los parámetros de potencia y corriente de los generadores.

La potencia activa tiene un mayor número de fluctuaciones pasados los 5s, pero aunque se obtiene valores muy grandes este proceso no tiene un lapso de duración considerable, aproximadamente 3s; esto se debe probablemente a que los generadores hacen un esfuerzo muy grande acoplándose a todas las cargas a las que está proporcionando el servicio, esto sin considerar el trabajo de cableado del sistema.

Sin embargo se logra la estabilidad aproximadamente a los 17s, es decir que es un tiempo bastante considerable el que se necesita para poder soportar el sistema, y que sus funciones se realicen de forma correcta

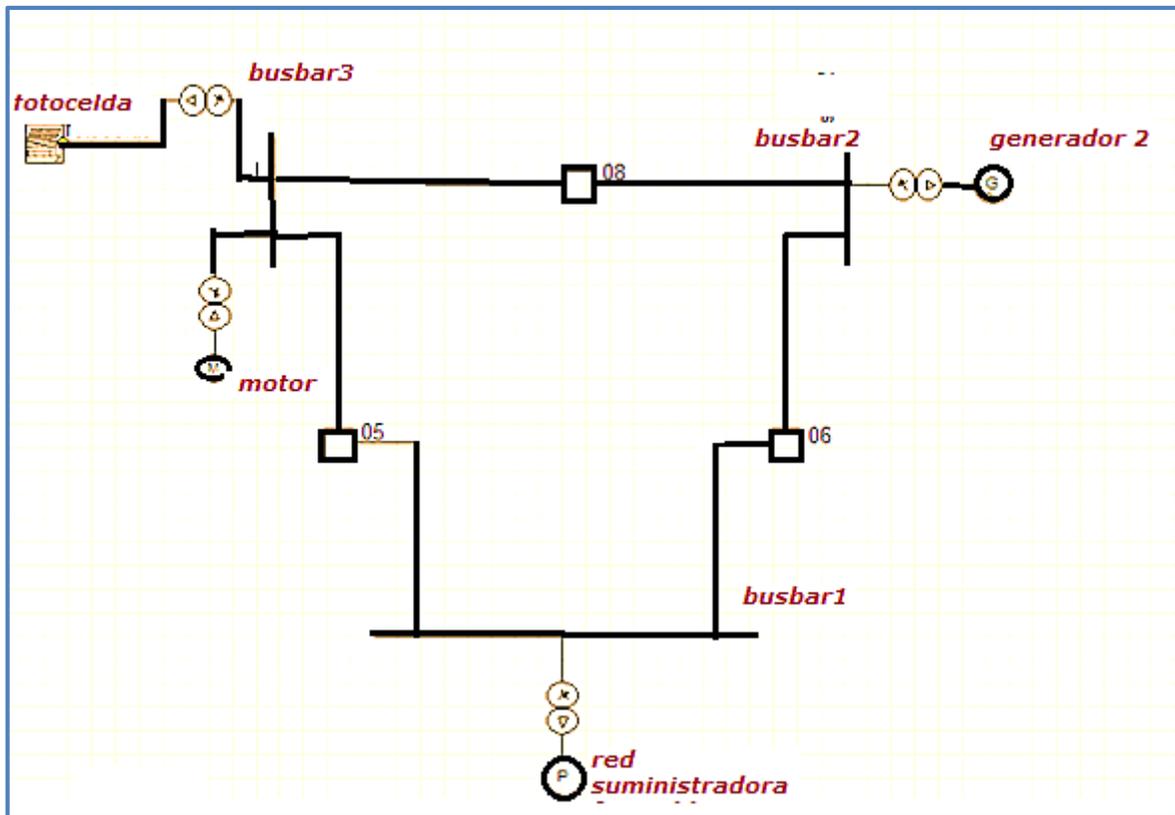
Se puede concluir ahora; que aunque el sistema, si acopla bien la relación de cargas y mecanismos generadores, pero lo realiza en un tiempo de 17s, que puede convertirse en un problema, si no se maneja con cuidado el conjunto de cargas que se están ocupando, además si se llega a añadir más equipos que demanden corriente, puede aumentar el tiempo de estabilidad, provocando un daño mayor.



**Ilustración 18 Parámetros Medibles De Los Generadores**

### 3.2.1 PRUEBA CON SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED

Se intercambiara un generador por un módulo fotovoltaico. Solo al incluir un módulo solar en el sistema de red se podrá establecer un criterio que permita conclusiones válidas.



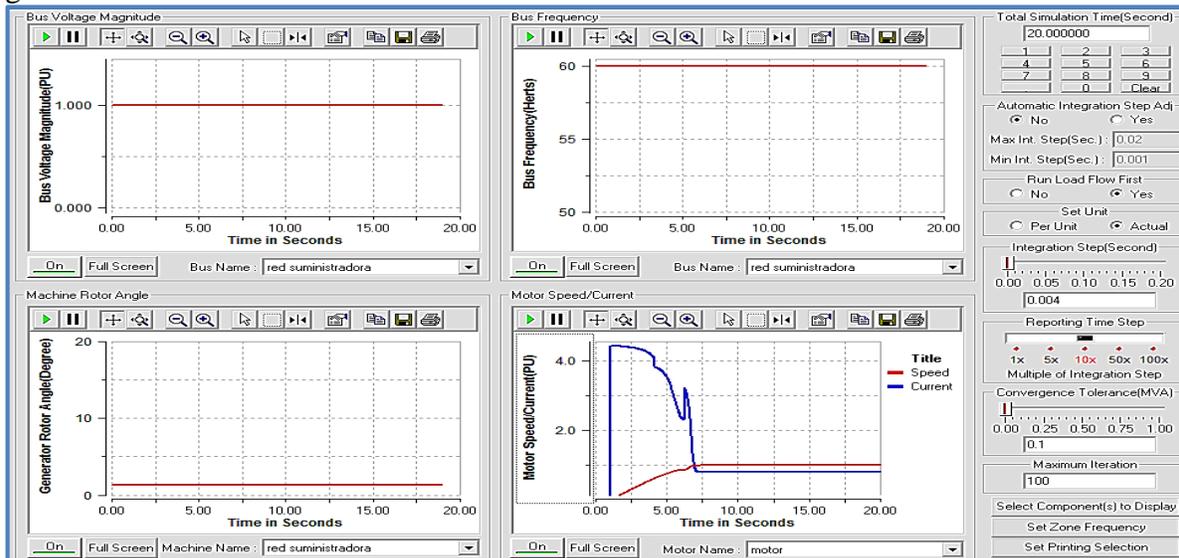
**Ilustración 19 Circuito De Incorporación A Panel Fotovoltaico**

A continuación se muestran los datos del panel solar puesto en servicio

Label:	PVMODELSUNPWR		Select...
Description:			
IB:	PV	VTLOW1:	0.2
SB:	10	VTLOW2:	2
WR:	1.18	FLOW:	0.9834
IIR:	1.07	FTLOW:	0.5
TDC:	5		0
Max:	1.18		0
Min:	0		0
KPI:	5		0
KI:	1		0
KP:	0.1		0
IMax:	1.1		0
IMin:	-1.1		0
KPQ:	1		0
KIQ:	1		0
VLOW2:	0.9		0
VLOW1:	0.1		0

**Ilustración 20 Parámetros Medibles Del Panel Solar**

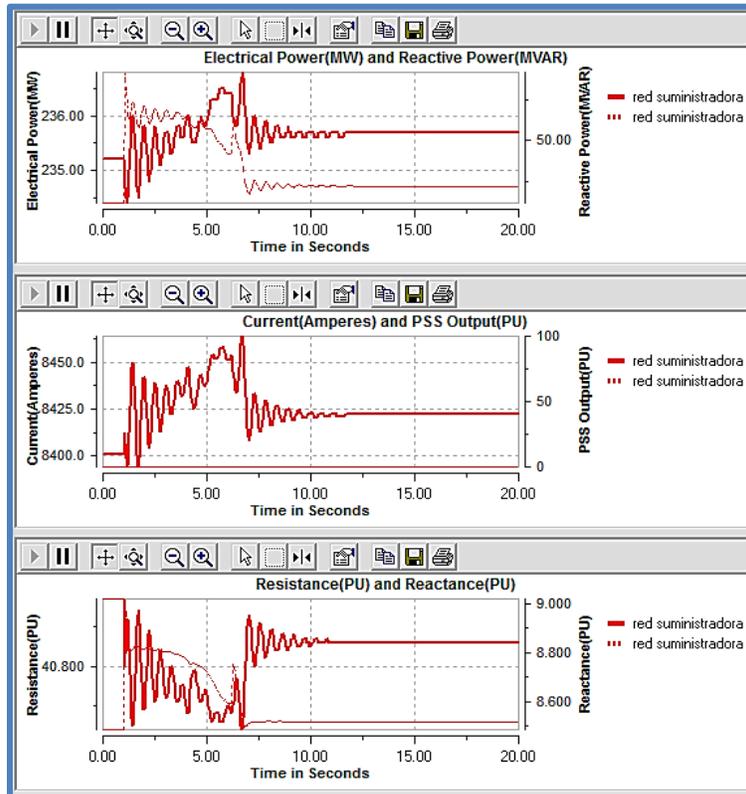
Al realizar la corrida de análisis de fenómeno transitorio se obtuvieron las siguientes graficas:



**Ilustración 21 Análisis De Fenómeno Transitorio Utilizando La Panel Fotovoltaico**

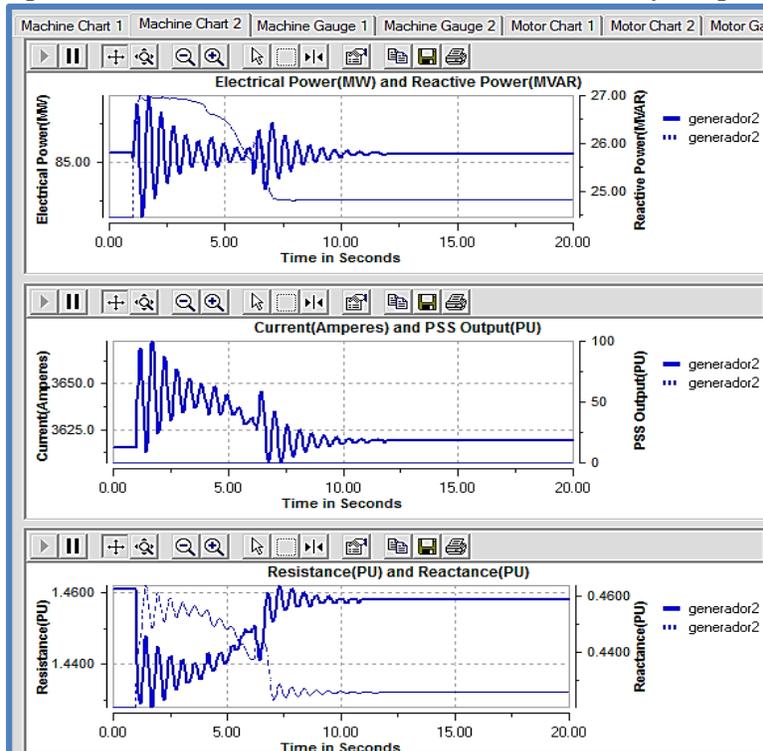
De esta manera la ilustración 22, muestra una gráfica muy parecida a la que se obtuvo con los dos generadores. Es así que se debe realizar un análisis a fondo de los flujos de potencia, que como se puede ver a pesar de que sigue siendo una gráfica de respuesta subamortiguada, el periodo en que se logra la estabilidad es menor que la lograda por los dos generadores reduciéndose aproximadamente en 4 s, y que sus fluctuaciones se realizan con una mayor frecuencia, además provoca que la potencia real total aumente a casi 3 veces la que se obtenía cuando solo estaban los generadores.

Además la corriente aumento casi 2 veces, y la impedancia disminuyo también casi 4 veces la original, por lo que si bien se logra estabilidad en un tiempo menor los flujos de medición disminuyen en promedio casi 4 veces su valor.



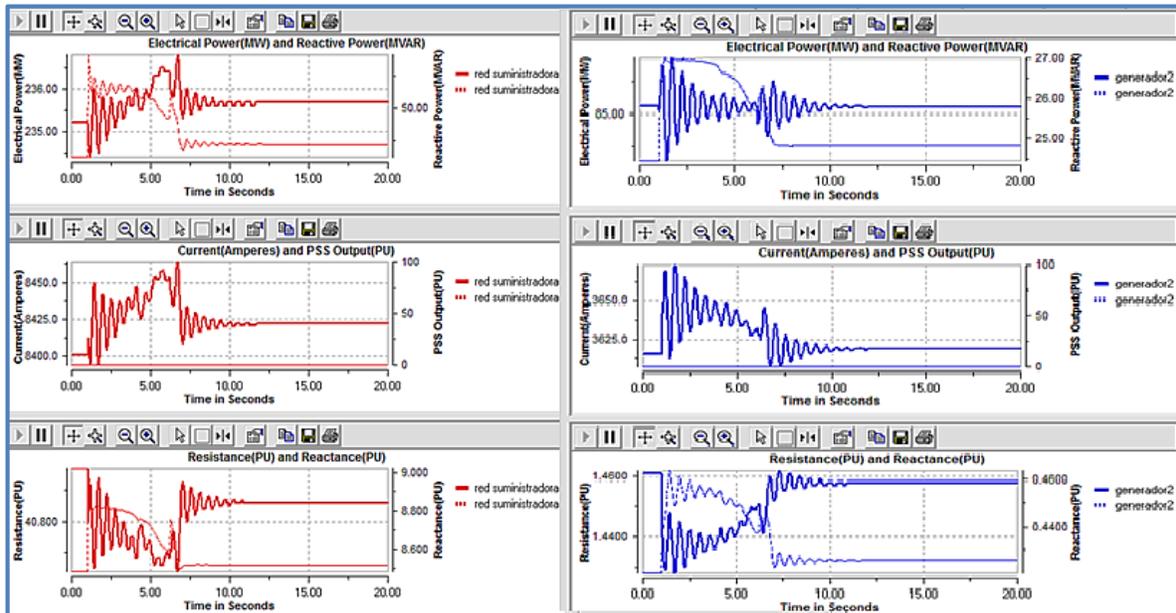
**Ilustración 22 Grafica De Parámetros De Flujo Con Celda Fotovoltaica**

En la siguiente ilustración se encuentran las gráficas de los flujos con base en el generador del circuito, para poder así dar una conclusión con todos los datos ya expuestos.



**Ilustración 23 Grafica De Flujos Con Generador**

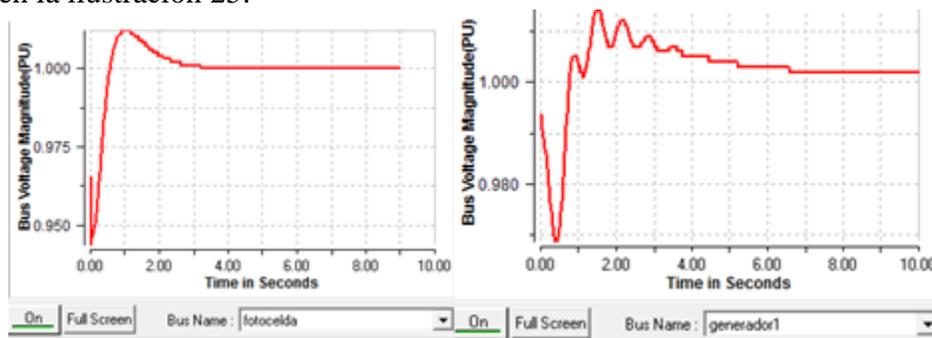
Si se contrasta las gráficas de flujos con generadores y con el panel solar se observa que el voltaje con la panel fotovoltaico, se reduce a la mitad y la corriente se reduce aproximadamente en un 70-80%, por lo que la gráfica de impedancia muestra realmente este fenómeno, y al igual que con la red suministradora el grado de estabilidad se logra pasados los 10 s.



**Ilustración 24** Contraste Panel Solar Con Generador

A lo largo del capítulo se analizaron los requerimientos que se necesitan para la instalación de un panel fotovoltaico, las simulaciones dan la pauta para estudiar su comportamiento en situaciones de funcionamiento real. Así mismo se mostró, que existen diferencias entre estos sistemas, y los generadores convencionales.

Esas diferencias expusieron que; un sistema generador convencional, es más eficiente en términos de potencia y corriente, ya que mantiene estos parámetros, en forma casi constante desde que se pone en operación el sistema. Por otro lado, un panel fotovoltaico, hace al sistema en servicio más robusto y libra una falla en menos tiempo. Por lo que el panel compensa su eficiencia, brindando una mayor seguridad al circuito en cuestión. Como se observa en la ilustración 25:



**Ilustración 25** voltaje en falla trifásica con panel fotovoltaico y generador convencional

# 2014

## MODELOS DE PANEL FOTOVOLTAICO



CHRISTIAN BELTRAN BEDOLLA

Microsoft

13/01/2014

## CAPÍTULO 4 PROBLEMAS TÉCNICOS DE LA UTILIZACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Al incorporar mecanismos generadores de energía, en cualquier red, se tienen distintos tipos de dificultades, que están relacionadas con el aspecto técnico y pueden verse reflejadas en la eficiencia. Existen diversos aspectos que permiten analizar estos problemas, y es posible clasificar estas contrariedades, de acuerdo al momento en que se hace el análisis, es decir, el estado estable y el estado dinámico.

### 4.1 PROBLEMAS EN ESTADO ESTABLE

Frecuentemente, se habla de un estado estático del sistema eléctrico de potencia cuando todas las cantidades físicas involucradas son consideradas permanentes. El análisis que proporciona las herramientas para estudiar esta consideración, es llamado análisis de flujos de potencia. Esta metodología consiste en la obtención de una condición de flujos que optimice la inyección de potencia al sistema.

El objetivo principal de un estudio de flujos de potencia es obtener los voltajes de bus que definen las potencias activa y reactiva, además del vector de tensión en cada bus del sistema bajo condiciones preestablecidas. De esta forma se intenta obtener una operación satisfactoria de los sistemas, considerando los efectos de interconexión, la incorporación de nuevas cargas, y el aumento de líneas de transmisión y transformadores.

Además con la ayuda de este estudio se puede determinar el tamaño más conveniente de los bancos de capacitores, tanto para el control de potencia reactiva como para transmisión de potencia; así también, es de gran ayuda en la localización desde el punto de vista eléctrico de las centrales generadoras, subestaciones y líneas de transmisión.

Uno de los criterios para establecer el concepto de estado estacionario, es que el sistema está operando en frecuencia nominal y constante, de modo que implica un balance global de potencia, donde la generación debe ser igual a la carga en el sistema más las pérdidas , matemáticamente se expresa como:

$$\sum_{i=1}^n P_g = \sum_{i=1}^n P_c + \sum_{m=1}^n P_L \quad [1]$$

Dónde:

$P_g$ =generación

$P_c$ =carga

$P_L$ =pérdidas

Se puede obtener una expresión matemática para el análisis de flujo de potencia en un caso ideal; se asume una red trifásica balanceada, de tal forma que se le presente por su

diagrama de secuencia positiva, con parámetros lineales y ramas en derivación. Sin embargo, en un sistema de potencia real, las soluciones explícitas analíticas no son claras por las fluctuaciones de la carga de los buses.

El panel fotovoltaico por esta razón, debe someterse a este tipo de análisis, para lograr un adecuado funcionamiento, proyectando así las pérdidas del sistema. Es de esta forma que se evalúa la calidad energética de un equipo eléctrico.

#### 4.2 PROBLEMAS EN ESTADO DINÁMICO

La estabilidad dinámica, es la propiedad de conservar el sincronismo de las maquinas conectadas al sistema, cuando ocurren cambios grandes y bruscos de las condiciones de operación. Los estudios de estabilidad dinámica tienen con objetivo primario analizar el comportamiento de los parámetros medibles de un sistema eléctrico de potencia, en el que existan perturbaciones externas, a lo largo de un periodo de tiempo establecido. Generalmente se considera que este estado dinámico transitorio se debe a una falla, que se libra desconectando el circuito o el circuito donde se ha producido la falla. Las características de los relevadores de protección automática y de los interruptores determinan la duración de la falla. Dichos tiempos pueden ser pequeños o grandes y representan la base del estudio de la estabilidad dinámica.

Los estudios dinámicos para periodos pequeños, comprenden un lapso de menos de 1s hasta un minuto, la programación digital es una herramienta muy útil para este tipo de estudio, ya que las secuencias de medición deben ser en extremo precisas para observar el comportamiento del sistema. Los estudios para periodos grandes comprenden lapsos de hasta 20 minutos, en este estudio, se desprecian los efectos del transitorio de los generadores, y se añaden otro tipo de parámetros como son corte de carga, maniobras de los operadores y el efecto de los transformadores con base a su configuración.

Las perturbaciones más comunes que existen para realizar este estudio son:

a. Fallas eléctricas

También llamadas cortocircuitos, se definen como una conexión de resistencia casi nula, entre dos o más puntos de un circuito en que normalmente se encuentran a tensiones diferentes. De esta manera las corrientes de cortocircuito se caracterizan por un incremento instantáneo y varias veces superior a la corriente nominal.

b. Desbalance en la potencia activa

Este cambio se produce por un aumento o reducción en la velocidad de los rotores de los generadores, modificando el desplazamiento angular, haciendo que la frecuencia sea la variable de interés.

c. Desbalance en la potencia reactiva

En el caso del desbalance en la potencia reactiva, se debe al requerimiento del sistema de este tipo de potencia, al no poder satisfacer la demanda, se producen variaciones de voltaje que colapsan el sistema.

d. Calentamiento

Cuando un sistema trabaja en sobrecarga, circulan corrientes que generan calor, y no pueden ser disipadas con la misma rapidez, aumentando la temperatura de equipos como transformadores, generadores y cables.

La estabilidad en estado dinámico da un mayor énfasis al estudio de fallas eléctricas porque las fallas o corto circuitos reducen el voltaje de las fases en cuestión y elimina toda la transferencia de potencia a partir del punto de falla.

En orden decreciente de severidad, se tienen los siguientes tipos de falla.

- a. Trifásica
- b. Bifásica a tierra
- c. Bifásica
- d. Monofásica

Existe el problema de decidir qué tipo de falla usar en los estudios de estabilidad transitoria, la falla trifásica es la más severa, pero también es la menos probable. Si las protecciones y los interruptores son rápidos la diferencia de la severidad de los distintos tipos de falla se reduce. Para garantizar la estabilidad en estado dinámico de los sistemas para todo tipo de falla, la mayor parte de las compañías eléctricas en Canadá, Europa y generalmente México, consideran en estos estudios de estabilidad, la falla monofásica que es la que tiene mayor probabilidad de ocurrir.

Existen diversos métodos para mejorar la estabilidad transitoria como son:

a. Disminuir la reactancia transitoria del generador

Esta maniobra aumenta el par de sincronización de un generador, este procedimiento puede obtenerse mediante una construcción especial de maquina síncrona, sin embargo se aumenta la magnitud de corriente de cortocircuito lo que agrava las consecuencias de la falla y requiere la utilización de interruptores de mayor capacidad.

b. Reducción de la impedancia de red de transmisión

Una de las formas es instalar bancos de capacitores instalados en serie con las líneas de transmisión para que las reactancias capacitivas se resten de las inductivas.

Generalmente con este tipo de compensaciones del orden del 30% se han obtenido buenos resultados, sin embargo una compensación del orden superior al 60% ha llegado a producir una ruptura de flecha de los generadores.

c. Disminución de reactancia de una línea de transmisión

En operación normal mientras menor sea el valor de las impedancias de la línea de transmisión menor será la diferencia angular entre las maquinas. Una forma económica de reducción es utilizar varios conductores en paralelo por fase, de menor diámetro permitiendo alcanzar una reducción de aproximadamente 20%.

Cabe destacar que la disminución de las reactancias de línea contribuye a aumentar el valor de la corriente de falla, lo que es un efecto indeseable. Sin embargo los efectos benéficos sobre la estabilidad que estas medidas proporcionan, han hecho que su utilización sea más generalizada.

Así mismo gran parte de las fallas que ocurren en las líneas de transmisión son fugitivas, o sea que desaparecen al desconectar la línea sin causar daños a la a instalación y la línea puede volverse a conectar en un tiempo corto, que sea suficiente para permitir la desionización del aire en el lugar de la falla, de manera que esta no reaparezco al aplicar de nuevo el voltaje en la línea. Esta posibilidad de realizar el recierre automático en las líneas de transmisión puede aprovecharse para mejorar la estabilidad dinámica del sistema.

La duración de la falla tiene una gran influencia en la estabilidad dinámica, ya que mientras mayor sea el tiempo en librar la falla mayor será la energía que acelera la máquina, mediante el desarrollo de protecciones más selectivas y rápidas en los que se reduce el tiempo en hasta dos ciclos. Sin embargo otra forma de mejorar la estabilidad y reducir el tiempo de falla es disminuir el par de aceleración de la máquina.

Puesto que el par de aceleración es la diferencia entre el par mecánico y el par eléctrico:

$$\overline{T}_a = \overline{T}_m - \overline{T}_e \quad [1]$$

La disminución rápida del par mecánico o un aumento rápido del par eléctrico ayudaran a mejorar la estabilidad transitoria y reducir el tiempo de la falla.

Es así que se exponen los diferentes problemas que existen y algunos métodos para dar solución al análisis en estado estacionario y en estado dinámico, siendo que ambos poseen la misma importancia en cualquier análisis de sistemas eléctricos de potencia, es de vital importancia seguir conociendo los diversos y modernos métodos que existen para estos estudios y comprender mejor, el comportamiento que posee cada sistema para llegar al estado estable.

2014

# MODELOS DE PANEL FOTOVOLTAICO

CHRISTIAN BELTRAN BEDOLLA

Microsoft

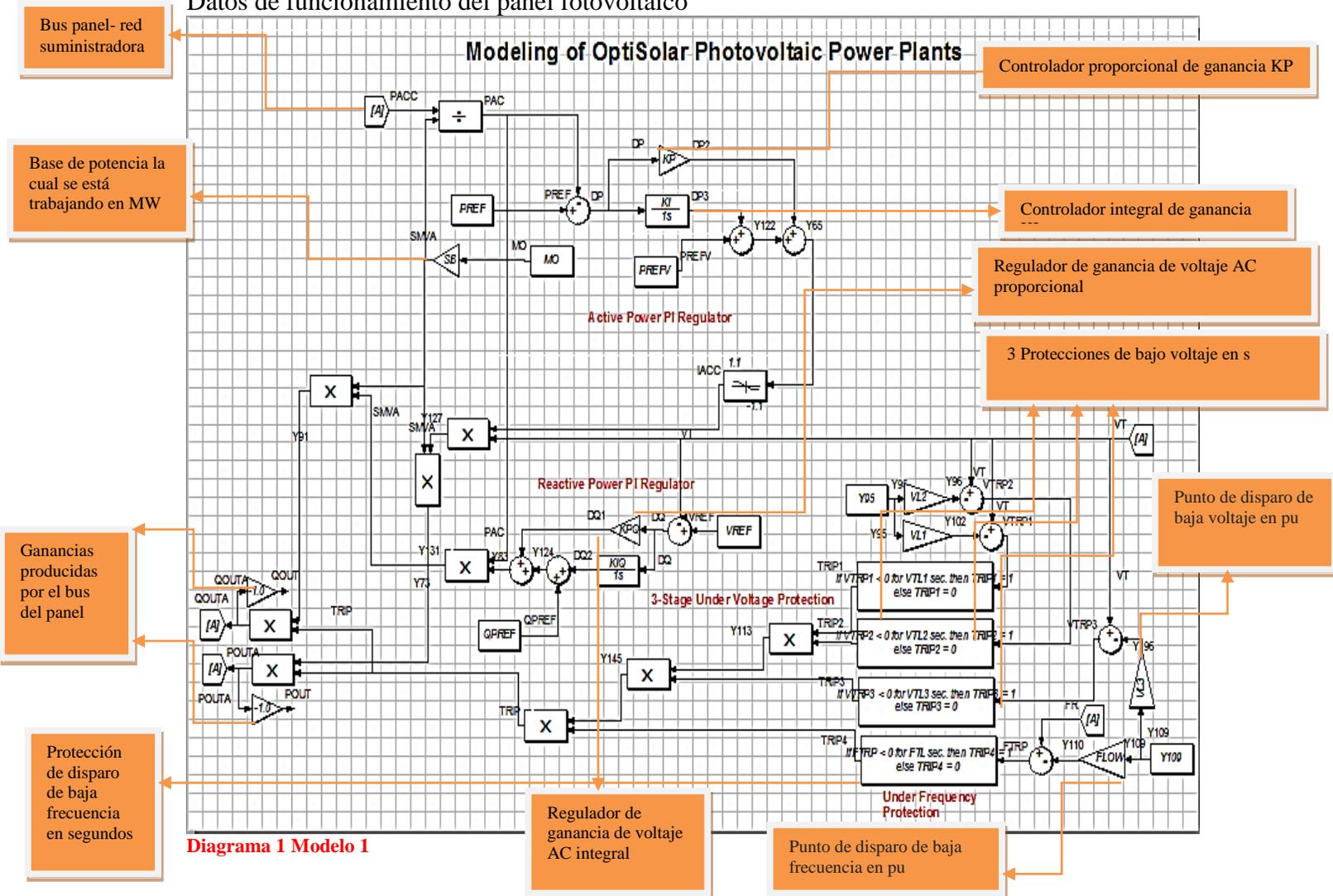
13/01/2014

## CAPÍTULO 5 CASOS DE ESTUDIO

Un caso de estudio es la parte práctica de un proceso, en el que se analizan circunstancias reales en un sistema en particular. El programa edsa paladin designbase 4.0. ® da la opción de utilizar tres tipos de paneles fotovoltaicos para estudiar cada topología de red; por tanto es necesario exponer como es el modelo de funcionamiento de cada panel. Una vez expuestos estos modelos, el estudio de cada topología será más preciso.

### PANEL TIPO 1

Datos de funcionamiento del panel fotovoltaico



A continuación se presentan los valores de los parámetros cuando se pone en funcionamiento el sistema

Parámetros	valores
SB	0
KI	2
KP	0.5
KPQ	1
KIQ	2
VL2	0.5
VL1	0.1
VTL1	0.3
VTL2	1
FLOW	0.95
FTL	1
VTL3	2
VL3	0.9

**Tabla 1 panel 1**

## PANEL TIPO 2

Siguiendo con este análisis se muestran los datos de funcionamientos del panel solar con respecto al diagrama de control que nos muestra el programa.

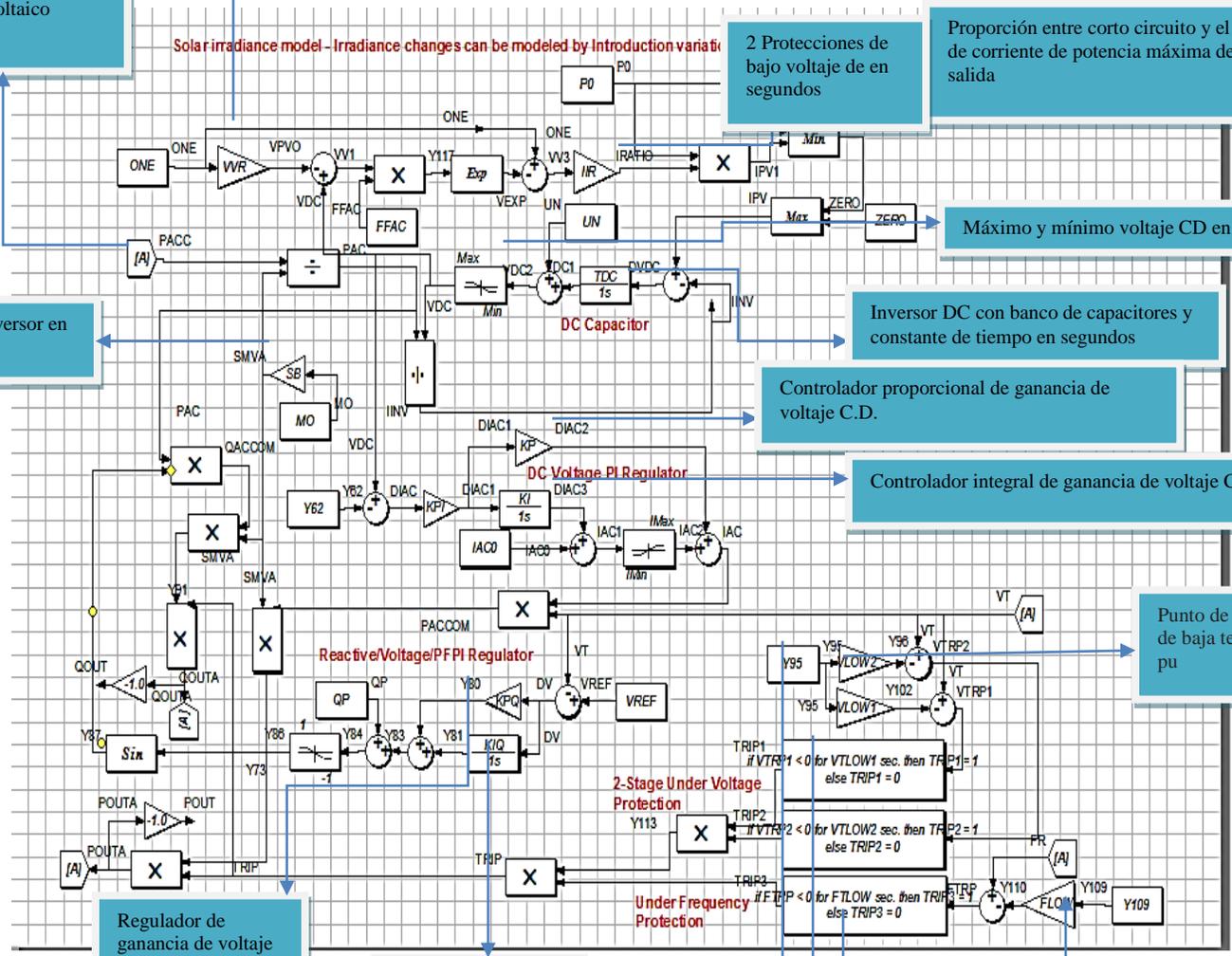
parámetros	valores
SB	10
WR	1.18
IIR	1.07
TDC	5
Max	1.18
Min	0
KPI	5
KI	1
KP	0.1
Imax	1.1
Imin	-1.1
KPQ	1
KIQ	1
VLOW2	0.9
VLOW1	0.1
VTLOW1	0.2
VTLOW2	2
FLOW	0.9834
FTLOW	0.5

**Tabla 2 panel 2**

Proporción entre circuito abierto y el pico de corriente de potencia máxima de salida

Bus red suministradora-panel fotovoltaico

Base del inversor en MW



2 Protecciones de bajo voltaje de en segundos

Proporción entre corto circuito y el pico de corriente de potencia máxima de salida

Máximo y mínimo voltaje CD en pu

Inversor DC con banco de capacitores y constante de tiempo en segundos

Controlador proporcional de ganancia de voltaje C.D.

Controlador integral de ganancia de voltaje CD.

Punto de disparo de baja tensión en pu

Regulador de ganancia de voltaje AC

Regulador de ganancia integral de voltaje AC

2 Protecciones de bajo voltaje de en segundos

Punto de disparo de baja frecuencia en pu

Protección de baja frecuencia en segundos

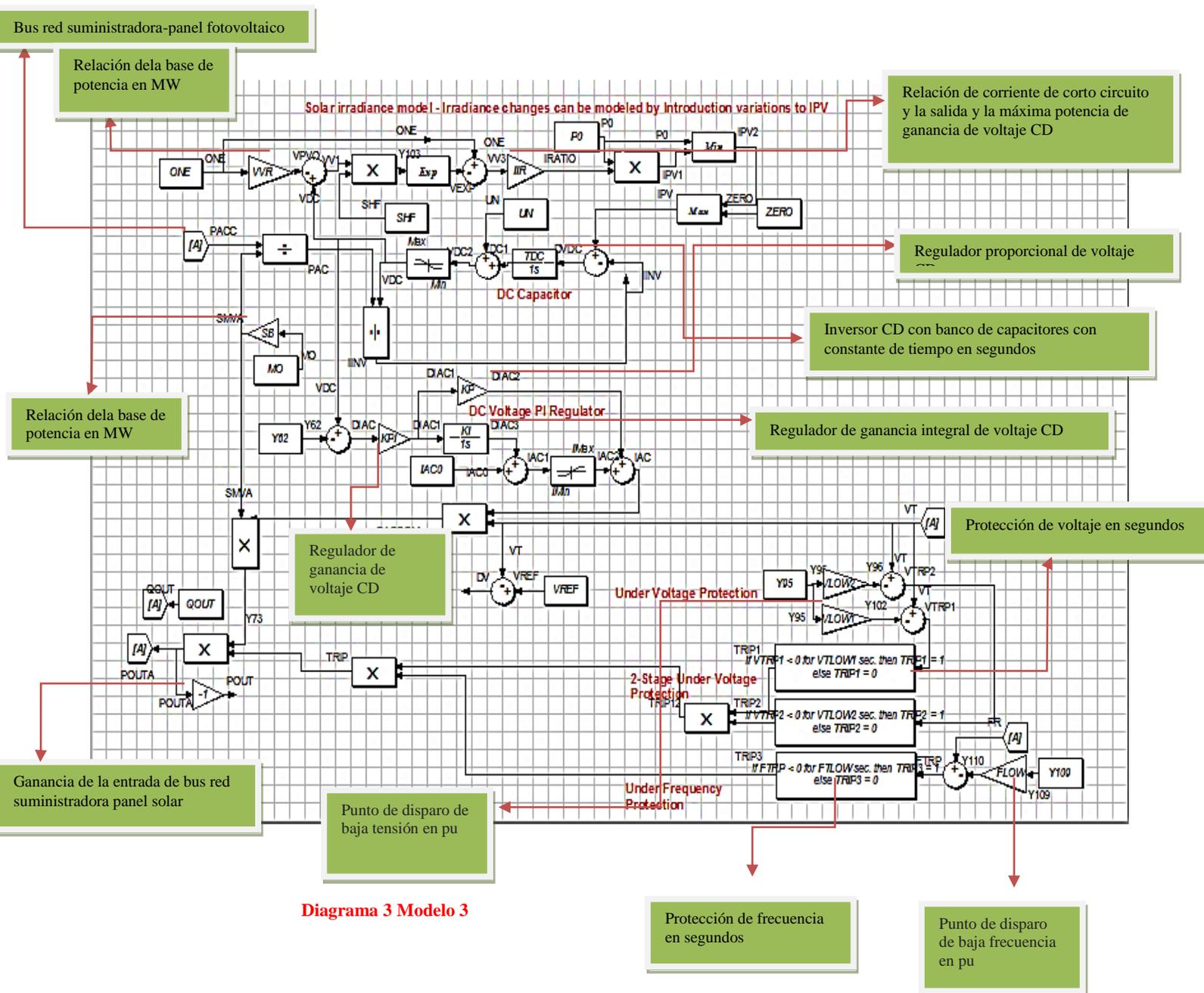
Diagrama 2 modelo 2

### PANEL TIPO 3

En la siguiente ilustración se muestra el comportamiento de los parámetros de control, que permitirán hacer un análisis detallado de lo que ocurre en el circuito.

<b>parámetros</b>	<b>Valores</b>
<b>SB</b>	10
<b>WR</b>	1.4
<b>IIR</b>	1.2
<b>TDC</b>	10
<b>Max</b>	1.4
<b>Min</b>	0
<b>KPI</b>	1
<b>KI</b>	20
<b>KP</b>	1.5
<b>Imax</b>	1.05
<b>Imin</b>	-1.05
<b>VLOW2</b>	0.88
<b>VLOW1</b>	0.57
<b>VTLOW1</b>	0.17
<b>VTLOW2</b>	2
<b>FLOW</b>	0.95
<b>FTLOW</b>	0.17

**Tabla 3 panel 3**



### 5.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INDEPENDIENTES

Describir el comportamiento de diferentes paneles solares bajo condiciones similares dentro de un circuito eléctrico de topología aislada.

La eficiencia del panel fotovoltaico es muy variable debido a los parámetros no lineales que conlleva su funcionamiento, sin embargo existen otros mecanismos que pueden auxiliar al panel para lograr su cometido. Entonces bajo condiciones iguales se evaluará la estabilidad

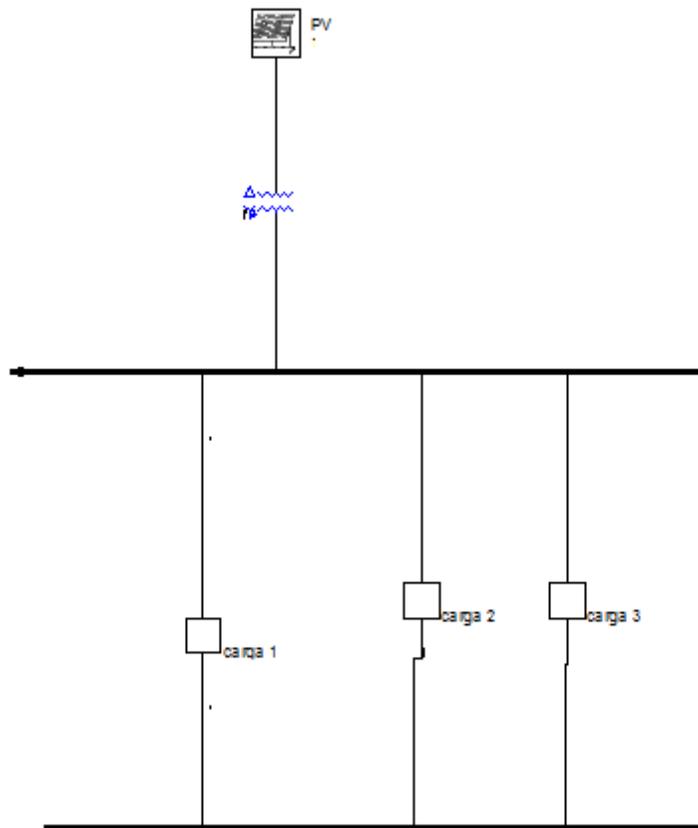
en estado transitorio de la potencia de generación, la corriente y el voltaje, de 3 paneles distintos.

La comparación entre los módulos fotovoltaicos, en estado transitorio muestra que parámetros son más sensibles a la operación del circuito, y que parámetros son los que se mantienen dentro de los rangos permitidos; es decir cuáles son las fortalezas y debilidades de cada equipo con el que estamos trabajando.

Los tres paneles a comparar son propuestos por el programa de simulación edsa paladin designbase 4.0. © Este estudio en estado transitorio revelara que tan robusto y eficiente se vuelve el sistema con cada componente; para tomar una decisión concisa al elegir el sistema generador.

Se establece un proyecto de generación solar en una vivienda. Se solicita un análisis minucioso de diversos tipos de paneles. Entonces se pide un reporte completo sobre los 3 módulos con los que se ha trabajado antes, y que se incluya en dicho reporte la conclusión definitiva del equipo con el que se va a trabajar.

Para analizar el estado transitorio de cada sistema, se inducirá una falla trifásica a los 2 s de haber iniciado operaciones. De esta manera se establecerá una semblanza del comportamiento de cada mecanismo de generación solar.



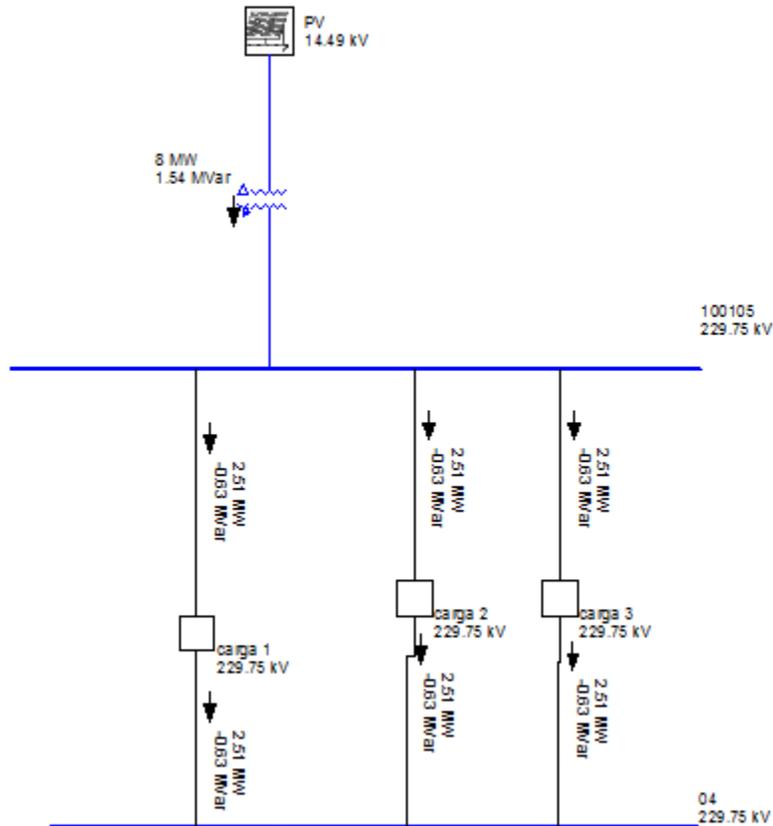
**Ilustración 1 Circuito De Topología Aislada**

<b>Elemento</b>	<b>potencia KVA</b>	<b>voltaje V</b>	<b>Impedancia</b>	<b>resistencia (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Reactancia (%)</b>	<b>Reactancia sub. (%)</b>	<b>frecuencia (Hz)</b>	<b>configuración</b>
<b>panel solar</b>	1000	4800	Variable	variable	Variable	variable	60	no aplica
<b>Cables</b>	no aplica	no aplica	0.033+0	0.033	0	0	60	no aplica
<b>transformador</b>	10000	13.800- 23000	0.8+5.69	0.8	5.69	0	60	estrella
<b>Carga 1</b>	No aplica	2500	0.9+1.68	0.9	1.68	No aplica	60	No aplica
<b>Carga 2</b>	No aplica	2500	0.9+1.68	0.9	1.68	No aplica	60	No aplica
<b>Carga 3</b>	No aplica	2500	0.9+1.68	0.9	1.68	No aplica	60	No aplica

**Tabla 4 Elementos Del Circuito**

### 5.1.2 ANÁLISIS EN ESTADO ESTABLE

El Análisis en estado estable marca la trayectoria de los flujos de potencia, cuando el sistema se encuentra sin ninguna perturbación, como se observa en la ilustración 2. Aunado a lo anterior, realizar una corrida de flujos en el circuito propuesto obtiene el balance de potencia respecto a las pérdidas producidas en los elementos involucrados:



**Ilustración 2 Diagrama Con Corrida De Flujos Y Su Trayectoria**

Potencia activa [MW]	Potencia reactiva [IMVAR]	pérdidas transformador [MW]	pérdidas en línea [MW]	Pérdidas totales [MW]
7.482	3.46	0.482	0	0.482

**Tabla 5 Balance De Pérdidas En El Circuito**

En donde se puede observar que el transformador es el elemento donde se suscitan las pérdidas, asimismo la potencia activa generada es el doble que la potencia reactiva, por lo que, la intensidad de potencia que circula por el circuito es muy grande para el trabajo útil demandado.

En la siguiente tabla se muestra el balance de voltaje entre los elementos involucrados en el que se observa que el panel solar es el elemento que proporciona mayor voltaje al circuito. Siendo así los buses trabajan en estado aparentemente ideal ya que están en un valor muy cercano a la unidad en Pu.

<b>voltaje P.U.</b>	<b>Buses</b>
<b>1</b>	1
<b>1.025</b>	2
<b>1.05</b>	PV
<b>1.025</b>	4
<b>0.9989</b>	5
<b>0.9989</b>	6
<b>0.9989</b>	CARGA 1
<b>0.9989</b>	CARGA 2
<b>0.9989</b>	CARGA 3

**Tabla 6 Voltaje En P.U. De Los Buses Del Circuito**

Una vez mostrado el comportamiento que presenta el circuito en estado estable es necesario realizar un análisis en estado dinámico con los tres tipos de paneles expuestos anteriormente.

### 5.1.3 ANÁLISIS EN ESTADO DINÁMICO

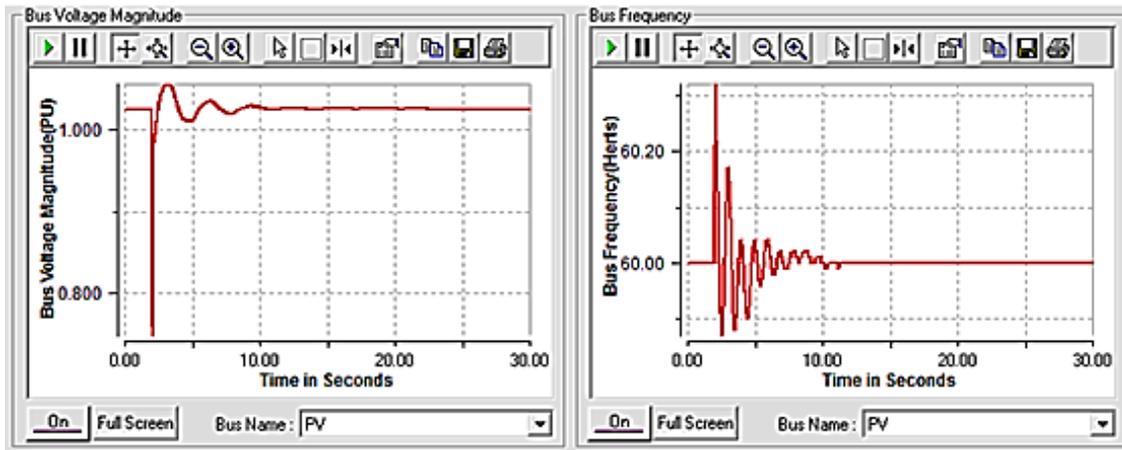
A continuación se realiza un análisis en estado dinámico, al inducir una falla trifásica en el bus 1 a los 2s de la puesta en servicio y esto se efectúa con los 3 tipos de paneles solares. Tal como se puede observar en la ilustración 2. De esta forma se evalúan los comportamientos por separado de cada panel, en una situación real de falla.

<b>evento</b>	<b>Falla</b>	<b>Bus</b>	<b>tiempo en que se lleva cabo [s]</b>	<b>duración [s]</b>	<b>Reactancia <math>\Omega</math></b>
<b>1</b>	trifásica	1	2	0.1	52.9

**Tabla 7 Inducción De Falla Al Bus 1**

#### 5.1.3.1 ANÁLISIS EN ESTADO DINÁMICO CON PANEL 1

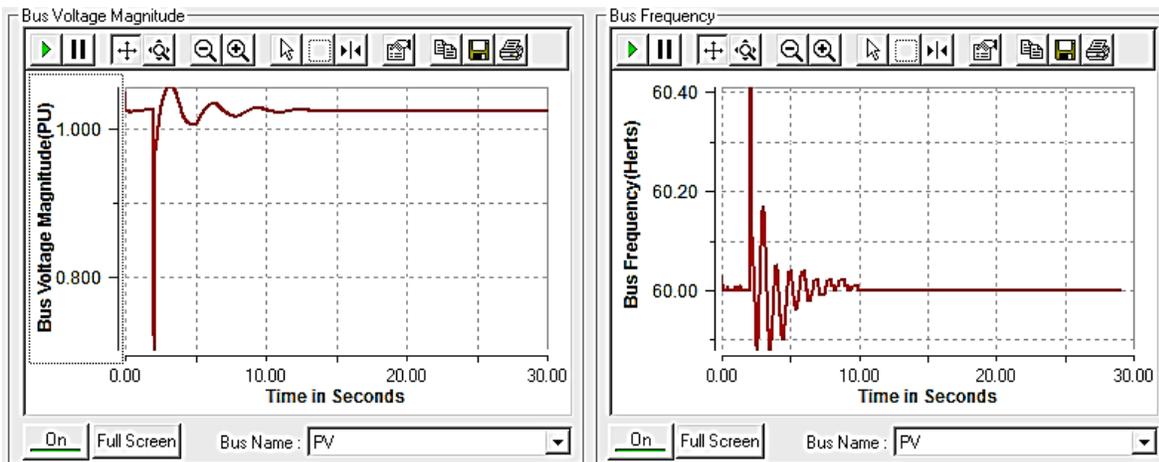
Se observa que en un tiempo de 12 s se logra la estabilidad, tanto de frecuencia como de voltaje y el valor de estabilidad es el mismo con el que se inició operaciones, es decir que en apariencia no existen pérdidas. Aunque al inicio del proceso existe una disminución del voltaje muy grande debido a la falla el sistema se recupera muy rápido de esta variación tan radical. Caso contrario a lo que ocurre en la frecuencia que la frecuencia aumenta al comienzo de la falla, y las oscilaciones son de menor magnitud conforme el tiempo va avanzando.



**Ilustración 3 Voltaje Y Corriente En Panel 1**

### 5.1.3.2 ANÁLISIS EN ESTADO DINÁMICO CON PANEL 2

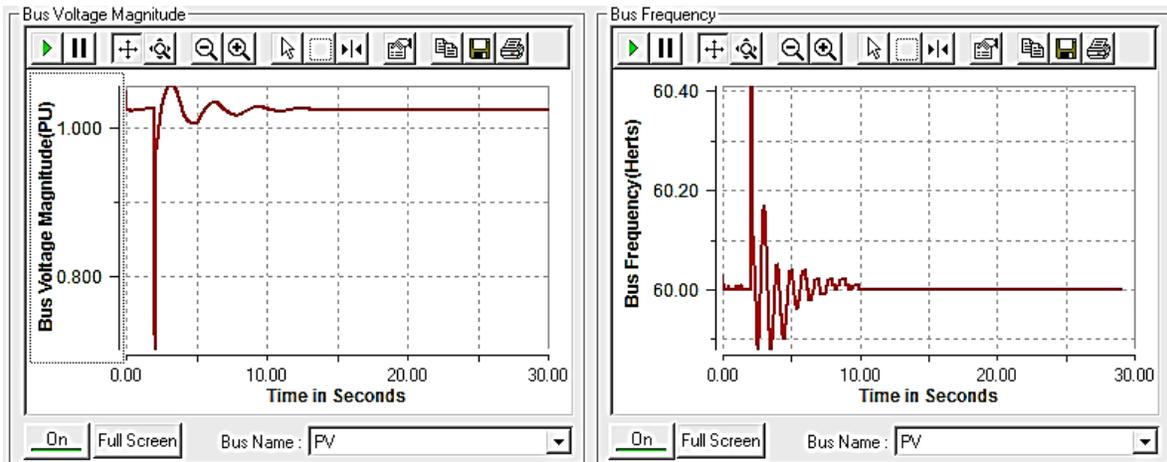
En este caso la frecuencia llega al punto de estabilidad a los 10 s de iniciar operaciones, el voltaje tarda aproximadamente 4 s más para estar en fase óptima de trabajo. Esto quiere decir que a diferencia del panel 1, se tiene una oscilación más en términos de voltaje. Es de vital importancia considerar el tiempo que tarda en librar la falla este panel ya que estas variaciones tan grandes pueden afectar al equipo electrónico que se conecte al sistema aislado.



**Ilustración 4 Voltaje Y Frecuencia En Panel 2**

### 5.1.3.3 ANÁLISIS EN ESTADO DINÁMICO CON PANEL 3

En este último caso no existe una diferencia palpable con los otros paneles, y pareciera que el panel 3 se comporta exactamente de la misma forma que el panel 2, es así que se debe hacer un análisis minucioso del comportamiento de estos paneles bajo otros tipos de falla en el que se puedan observar distinguir las ventajas y desventajas de cada equipo.



**Ilustración 5 Voltaje Y Frecuencia En Panel 3**

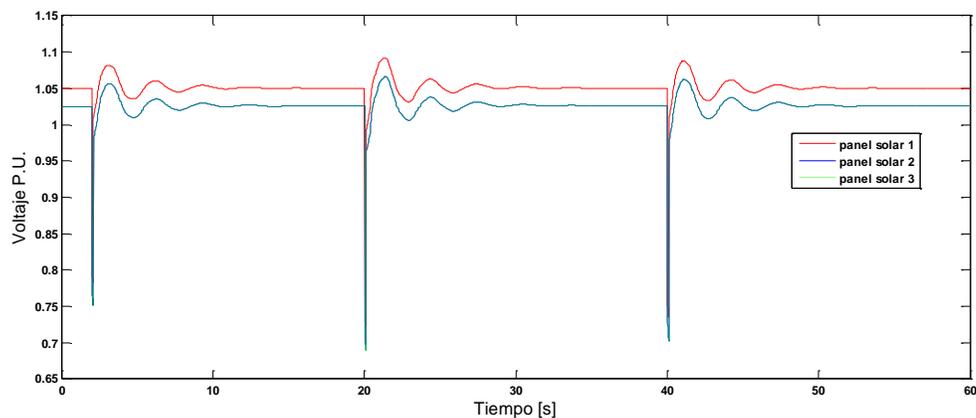
### 5.1.4 COMPARACIÓN DEL USO DE LOS PANELES BAJO DISTINTOS TIPOS DE FALLA

El análisis en estado dinámico con un número mayor de fallas da un mayor panorama acerca del comportamiento de cada panel, así mismo se expondrán las características necesarias para dar una conclusión concreta del fenómeno. Es por esto que se plantean las siguientes alteraciones en el circuito:

evento	Falla	Bus	tiempo en que se lleva cabo [s]	duración [s]
1	trifásica	Carga1	2	0.1
2	bifásica	carga 2	20	0.1
3	monofásica	carga 3	40	0.1

**Tabla 8 Fallas Inducidas En El Circuito**

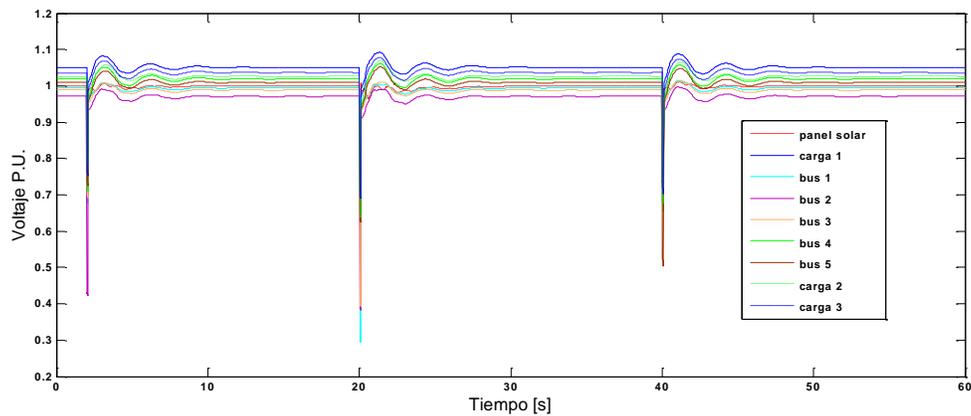
Es así que se obtiene la siguiente grafica de voltaje de los paneles en cuestión:



**Ilustración 66 Voltaje en P.U. De cada panel**

Donde se aprecia que el panel 1 presenta un voltaje mayor a lo largo de todo el proceso, sin embargo el rasgo más sobresaliente es el tiempo en el que libra las fallas, aproximadamente tarda 1 ciclo menos para librar la falla trifásica y dos ciclos menos para las fallas bifásica y monofásica. Este rasgo da una ventaja muy grande sobre los otros dos tipos de paneles ya que los otros dos paneles tardan casi 20 s en estabilizarse. Es por esto que se debe realizar otro análisis con el voltaje de los buses involucrados para entender el papel que juega cada panel. Ya que por ahora el panel 1 proporciona mayor estabilidad pero maneja mayor voltaje.

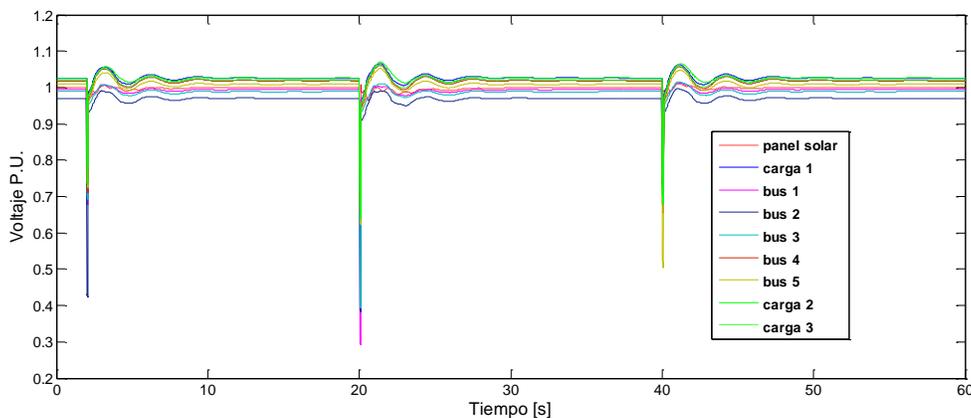
#### 5.1.4.1 VOLTAJES DE BUS CON PANEL 1



**Ilustración 77 Voltaje en P.U. De Cada Bus Con El Panel 1**

En la ilustración 8 se observa que la falla bifásica afecta con mayor énfasis al sistema, y es el panel solar el que tiene una disminución de voltaje mayor. Aunado a lo anterior el tipo de falla que menos afecta al circuito es la falla monofásica, aunque este tipo de perturbación es más frecuente, al parecer el sistema no resiente tanto el impacto de la falla. Es de esta forma que se sigue manejando un nivel mayor de voltaje y un tiempo aproximado de 10 s en la recuperación de la falla

#### 5.1.4.2 VOLTAJES DE BUS CON PANEL 2

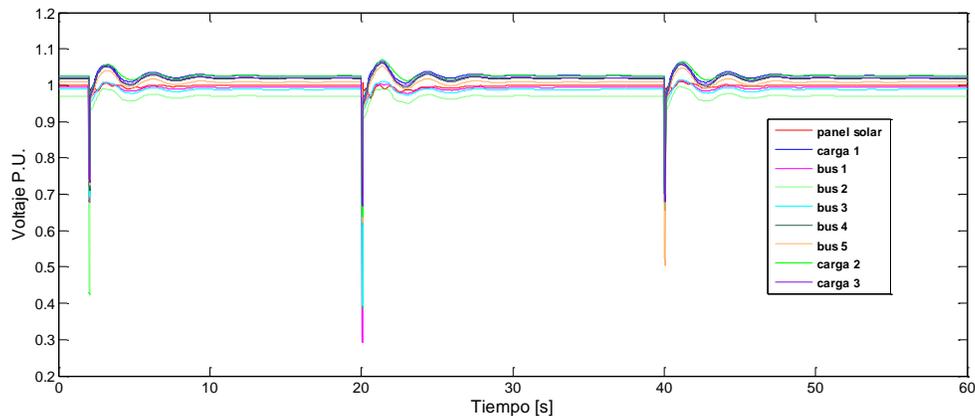


**Ilustración 8 Voltaje en P.U. De Cada Bus Con Panel 2**

El panel 2, muestra que el bus 1 es el elemento que más secuelas tiene ante la falla bifásica, teniendo una disminución mayor de voltaje. En este caso, también la falla bifásica es la más dañina para el sistema, y al parecer se logra la estabilidad superando los 10 s, en cualquier tipo de falla.

La relación de voltaje es menor que con el panel 1, y se mantiene un lapso para librar la falla aparentemente mayor.

### 5.1.4.3 VOLTAJES DE BUS CON PANEL 3

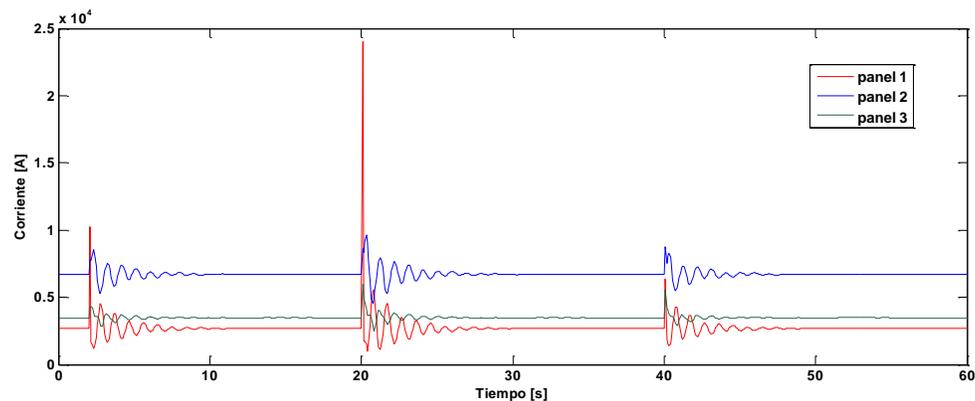


**Ilustración 9** Voltaje en P.U. De Cada Bus Con Panel 3

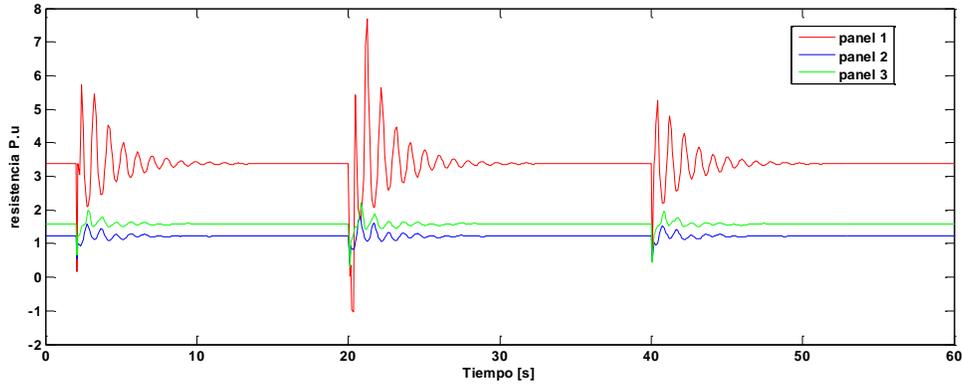
En el caso del panel 3, se maneja una grafica de apariencia muy similar al panel 2, en magnitud de voltaje y tiempo en que se libra la falla, aunado a que de nuevo la falla bifásica es la más dañina en cuestión de disminución de voltaje al circuito.

### 5.2 GRÁFICAS CON VALORES MEDIBLES DE CADA PANEL

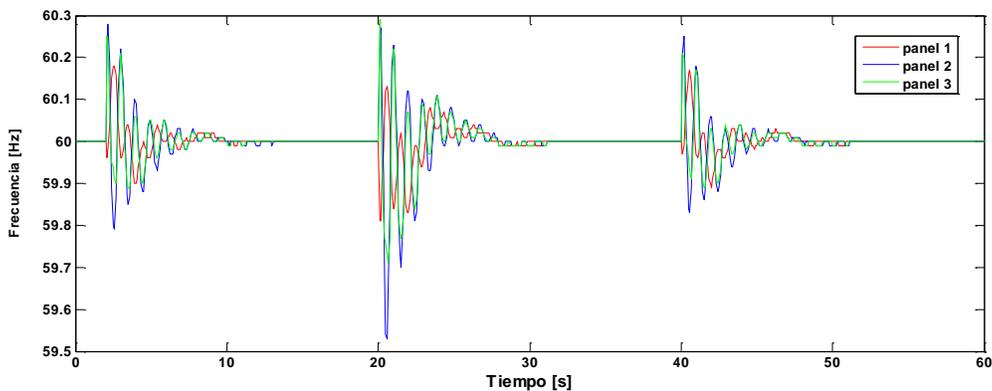
La forma más viable para encontrar otras diferencias entre los paneles es analizar meticulosamente los parámetros de corriente, frecuencia y resistencia, para entonces elegir al panel que estará en la puesta en servicio.



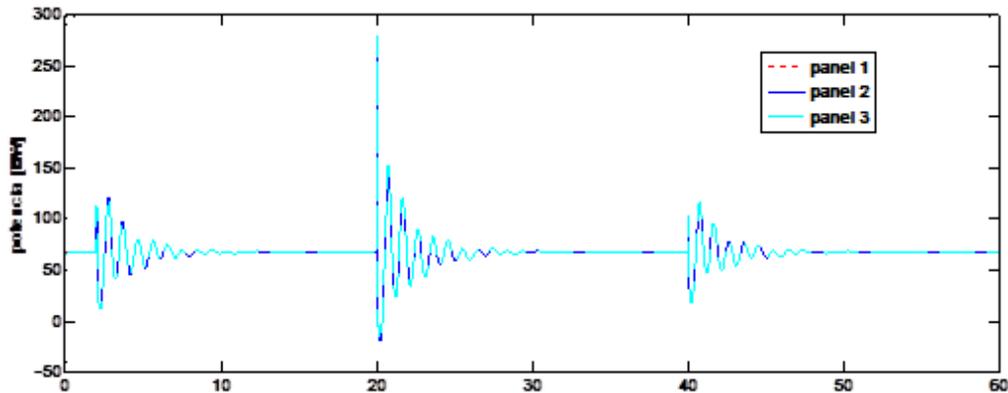
**Ilustración 10** Grafica De Corriente De Los Paneles



**Ilustración 11 Grafica De Resistencia De Los Paneles**



**Ilustración 12 Grafica De Frecuencia De Cada Panel**



**Ilustración 13 Grafica De Potencia En Cada Panel**

En la gráfica de corriente en la ilustración 10 se observa que el Panel 2 inicia con un valor mayor de corriente. Sin embargo cuando inicia la falla bifásica la corriente del panel 1 aumenta de forma alarmante, superando por mucho la corriente de los paneles en servicio. Si bien el panel 1 en cuestión de voltaje se estabiliza en menor tiempo que los otros equipos, maneja un corriente muy grande en todas las fallas, y tarda mayor tiempo en recuperarse, si no se maneja con cuidado puede provocar la destrucción de sistema por completo. Por otro lado, el panel 3 maneja menos oscilaciones en corriente y se recupera de

la falla en menor tiempo, por lo que el diseño del panel es más robusto para soportar variaciones de corriente. La grafica de resistencia de la ilustración 11 refleja el comportamiento anterior, ya que como se puede ver el panel 1 maneja mayores variaciones de resistencia, y aunque el panel 2 no maneja niveles tan altos ambos equipos se estabilizan casi al mismo tiempo.

Continuando con el análisis la gráfica de la frecuencia en ilustración 12 muestra que las variaciones en la falla trifásica y monofásica son muy similares en magnitud y tiempo, sin embargo, al iniciar la falla bifásica el panel 1 tiene una disminución de voltaje, es decir que es más sensible a esta perturbación, sin embargo posee menos oscilaciones. Es el panel 2, quien sufre mayores variaciones en cuestión de magnitud, ya que sus oscilaciones son más pronunciadas y unos de sus picos alcanza el valor mínimo de frecuencia de todos los paneles, casi 59.5 Hz.

El panel 3 alcanza el nivel mayor de frecuencia de 60.3 Hz, que también supone un riesgo muy grande para el equipo electrónico conectado en el sistema, y se debe manejar con las precauciones debidas este tipo de variaciones.

Por último la gráfica de la potencia en ilustración 13, muestra un comportamiento muy similar con los 3 paneles expuestos, quiere decir que no existe una diferencia palpable en la potencia generada; por lo que los parámetros de corriente, frecuencia y voltaje son los que dan una conclusión al estudio de caso.

Con base en los experimentos expuestos y los resultados en términos de eficiencia y niveles adecuados de uso eléctrico. Mi criterio de resultado con base en los propósitos del estudio de caso, y que presenta los paneles en orden de elección es el siguiente:

1. Panel 3
2. Panel 1
3. Panel 2

El panel 3 da una mayor seguridad, aunque el tiempo en que logra la estabilidad en términos de voltaje es mayor, no tiene un valor de corriente tan grande como los otros paneles. Es así que el panel 1 maneja corrientes muy grandes y el panel 2 demasiadas oscilaciones de frecuencia. Por lo que no ofrecen ventaja sobre el panel 3. Y se elige el panel 1 como segunda opción por alcanzar la estabilidad en menor tiempo.

## 5.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED

Describir el comportamiento de diferentes paneles solares bajo condiciones especiales dentro de un circuito eléctrico conectado a red.

La eficiencia del panel fotovoltaico es muy variable debido a los parámetros no lineales que conlleva su funcionamiento, sin embargo existen otros mecanismos que pueden auxiliar al panel para lograr su cometido. Entonces bajo condiciones iguales se evaluará la estabilidad en estado transitorio de la potencia de generación, la corriente y el voltaje, de 3 paneles distintos.



A continuación se muestra una tabla con los elementos del circuito:

<b>Elemento</b>	<b>potencia KVA</b>	<b>voltaje V</b>	<b>Impedancia</b>	<b>resistencia (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Reactancia (%)</b>	<b>Reactancia sub. (%)</b>	<b>frecuencia (Hz)</b>	<b>Configuración</b>
<b>generador 1</b>	192000	18000	30+0.15	30	15%	9%	60	solido a tierra
<b>generador 2</b>	128000	13800	30+0.15	30	15%	9%	60	solido a tierra
<b>panel solar</b>	1000	4800	Variable	variable	Variable	variable	60	no aplica
<b>Cables</b>	no aplica	no aplica	0.033+0	0.033	0	0	60	no aplica
<b>compañía suministradora</b>	no genera	16500					60	solido a tierra
<b>transformador 1</b>	200000	18000- 230000	0+0.0625	0	0.0625	0	60	Estrella
<b>transformador 2</b>	100000	13800- 230000	0+0.0586	0	0.0586	0	60	Estrella
<b>transformador 3</b>	100000	16500- 230000	0+0.057	0	0.057	0	60	Estrella
<b>transformador 4</b>	10000	13.800- 23000	0.8+5.69	0.8	5.69	0	60	Estrella

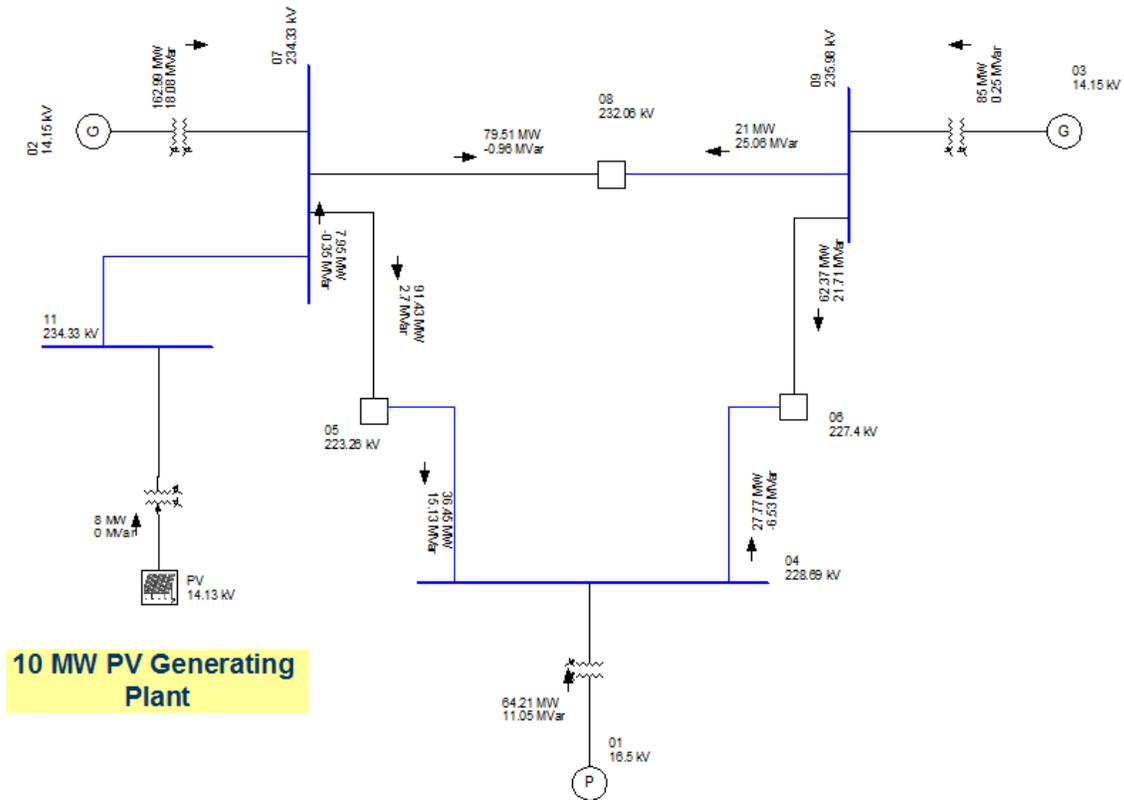
**Tabla 9 Elementos Del Circuito**

## 5.2.1 ANÁLISIS EN ESTADO ESTABLE

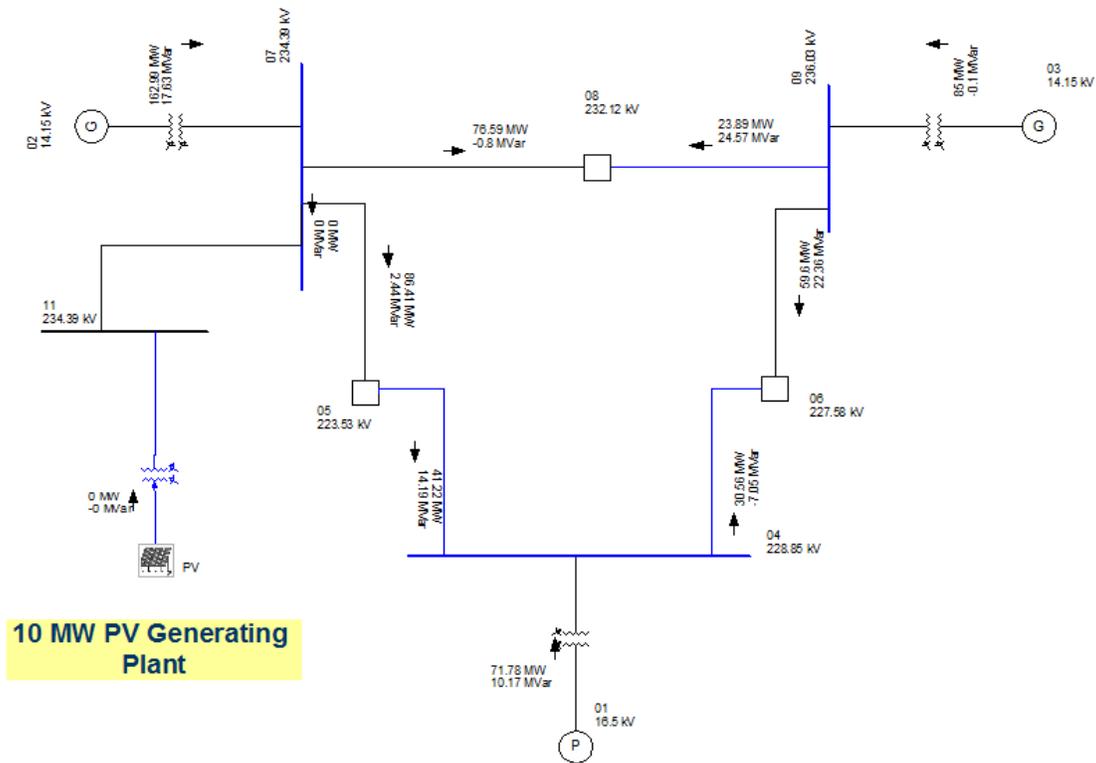
Para realizar un análisis en estado estable es necesario realizar una corrida de flujos, en el circuito propuesto. Debido al tipo de circuito se manejan dos casos de estado estable para dichos circuitos para todos los modelos de panel fotovoltaico:

- Con el panel fotovoltaico funcionando
- Sin el panel fotovoltaico funcionando

Solo una comparación de ambos casos, hará posible una conclusión real del comportamiento del sistema y de la importancia del panel fotovoltaico. La siguiente figura ejemplifica en forma de esquema como son las trayectorias en estado estable.

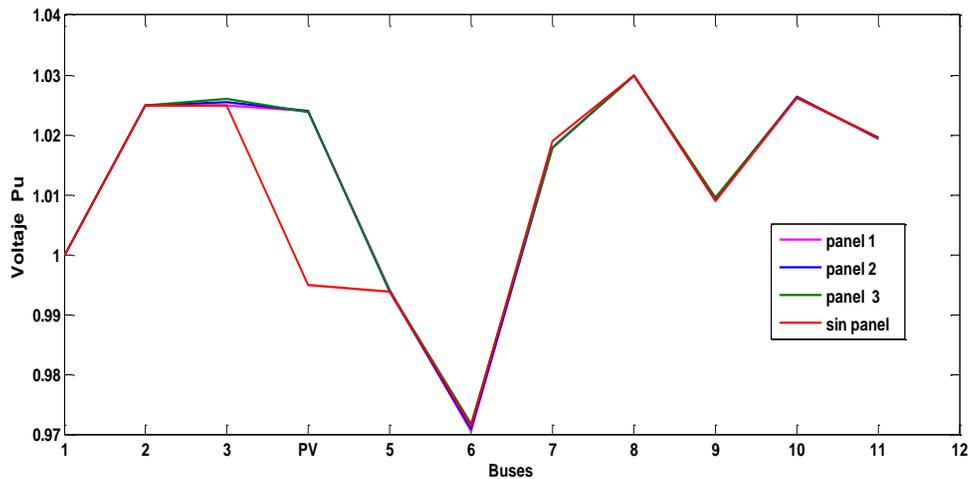


**Ilustración 15** Flujos Y Trayectorias Con Panel



**Ilustración 169 Diagrama Y Trayectoria De Flujos Sin Panel**

De los esquemas anteriores se obtiene la siguiente grafica en términos de voltaje, y será de gran utilidad para entender el peso que tiene cada tipo de panel fotovoltaico sobre el circuito:



**Ilustración 10 Voltaje en P.U. En los diferentes casos de la puesta en servicio**

Donde es posible observar que el cambio que tiene el trayecto del bus PV al bus 5, este cambio se debe a que el bus 5 tiene la carga más cercana al panel y por esa razón resiente más la pérdida del panel

Así mismo una tabla comparativa de la relación de pérdidas de los dos eventos, dará una herramienta más, para entender el comportamiento de los flujos en el circuito, la cual es mostrada a continuación:

Evento	Potencia activa [MW]	Potencia reactiva [IMVAR]	pérdidas transformador [MW]	pérdidas en línea [MW]	Pérdidas totales [MW]
Sin panel	309.78	27.69	0	4.787	4.786
con panel 1	320.365	30.034	0.11	5.164	5.213
Con panel 2	320.363	30	0.115	5.169	5.212
Con panel 3	320.365	30.01	0.117	5.167	5.217

**Tabla 10 Balance Potencia En Cada Caso De La Puesta En Servicio**

Donde se observa que, la relación entre pérdidas y potencia generada en el flujo de parámetros eléctricos es directamente proporcional; es decir que si bien se genera mayor potencia y mayor voltaje con el panel fotovoltaico, también se tienen mayores pérdidas con este mecanismo de generación.

Una vez que se analiza, el estado estable en el circuito, es necesario realizar una corrida de flujos en estado dinámico para dar una conclusión, del comportamiento con cada panel.

## 5.2.2 ANÁLISIS EN ESTADO DINÁMICO

A continuación se realiza un análisis en estado dinámico con los 3 tipos de paneles solares predeterminados anteriormente en el programa paladin, ya que en una comparación con diferentes mecanismos de generación es más viable en este tipo de estudio.

Es así que mostrados los datos de cada panel solar, se realiza un Test comparativo. Esto se realiza al inducir una falla trifásica en el bus 5 a los 2 s de iniciar operaciones. Tal como se puede observar en la ilustración 32. Por tanto se comparan los beneficios y las desventajas de cada panel solar cuando se ponen en servicio, esto se realiza provocando diversas fallas en el sistema Sin embargo las siguientes graficas muestran cómo se comporta en estado transitorio el sistema y será posible ver que tan fuerte es el sistema con este tipo de panel. La frecuencia de operación es 60 Hz.

evento	Falla	Bus	tiempo en que se lleva cabo [s]	duración [s]	Reactancia $\Omega$
1	trifásica	5	2	0.1	52.9

**Tabla 11 descripción de falla trifásica**

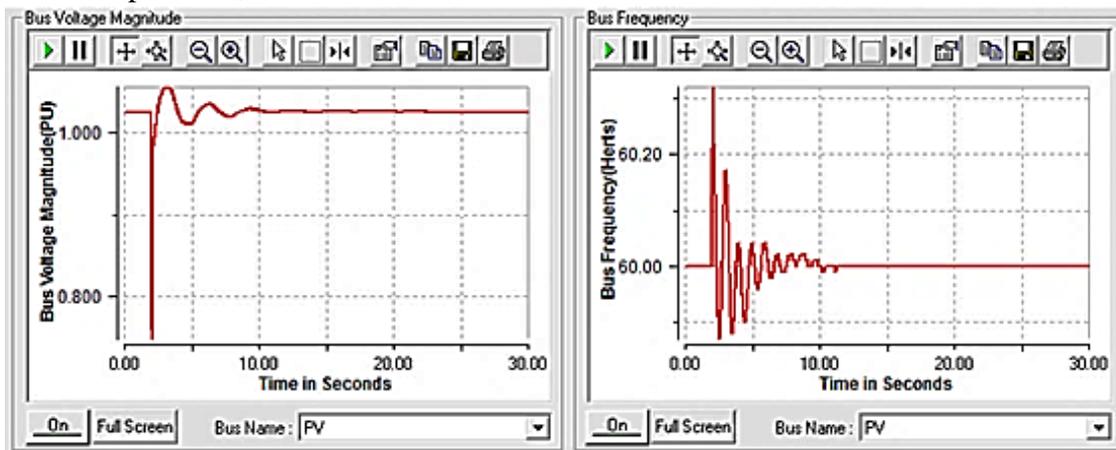
### 5.2.2.1 ANÁLISIS DINÁMICO CON PANEL 1

En la gráfica de voltaje de la ilustración 18 se observa que en un tiempo de 10 s se logra la estabilidad, sin embargo, según la gráfica, el valor de estabilidad es el mismo con el que iniciamos (aproximadamente 1.025 PU), es decir se tiene una sincronía casi perfecta ya que en apariencia no existen perdidas, esto es algo de gran peso para el circuito, ya que se

puede trabajar sin miedo a que existan variaciones del voltaje a pesar de ser un mecanismo de generación de MW.

Aunque claro casi al inicio del proceso existe una disminución del voltaje muy grande debido a la falla inducida, pero por suerte, se recupera muy rápido de esta variación tan radical, por lo que este sistema está bien diseñado para corregir estas anomalías.

A igual que la gráfica del voltaje, la frecuencia se mantiene en el mismo valor con el que iniciamos, cuando llega al punto de estabilidad; es decir 60 HZ. Esto tiene una trascendencia enorme en cualquier sistema, sobre todo si se trabaja con electrónica, ya que así estamos garantizando que los equipos pueden funcionar correctamente, sin miedo a fallas de operación, al conectarse a la red.

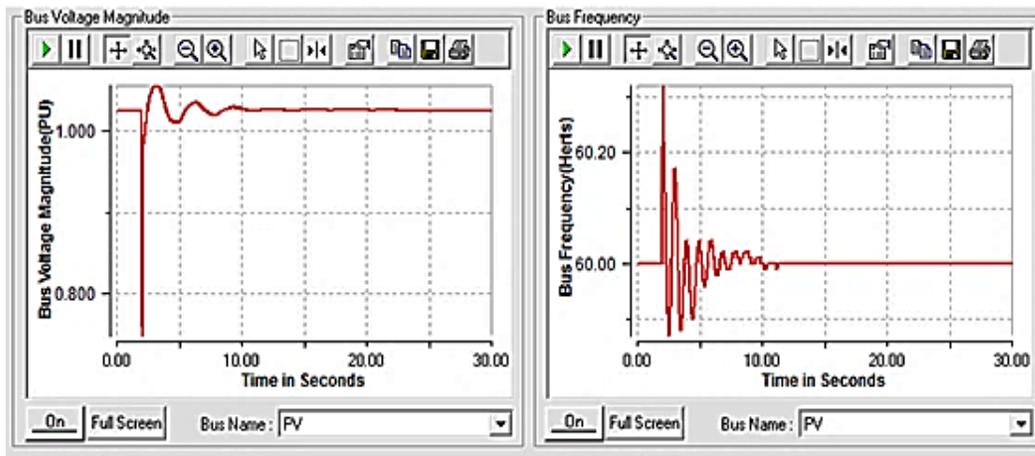


**Ilustración 11 Voltaje Y Corriente En Panel 1**

### 5.2.2.2 ANÁLISIS DINÁMICO CON PANEL 2

Como se observa la gráfica de voltaje de la ilustración 34, tiene un nivel casi igual con el que inicio, y es superando la unidad en Pu's, aunado a lo anterior tras unas pequeñas fluctuaciones y una disminución natural por la falla, que tiene un lapso de duración muy pequeño; a los 10 s se logra la estabilidad.

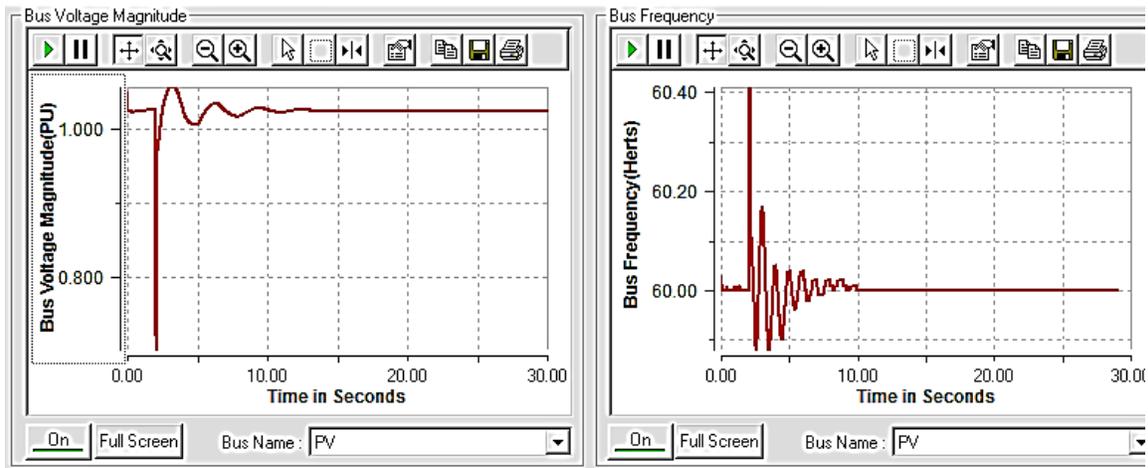
Esto ocurre al igual que la frecuencia de operación, pues al pasar los 10 s el sistema se encuentra sin fluctuaciones. Situación muy similar al valor que se obtuvo con el panel 1, esto quiere decir que al parecer no hay mucha diferencia entre estos dos paneles.



**Ilustración 19 Voltaje Y Corriente En Panel 2**

### 5.2.2.3 ANÁLISIS DINÁMICO CON PANEL 3

Haciendo un análisis de la gráfica del voltaje de la ilustración 35, se observa que la estabilidad se logra superando apenas los 10S. Que ha sido un valor constante en estos experimentos, además la frecuencia logra permanecer en los 60 Hz llegados exactamente a los 10S, con algunas oscilaciones iniciando el proceso. Aparentemente este valor se obtiene bruscamente, pero sin mayores consecuencias. Al no existir un rasgo diferenciable entre los paneles es necesario realizar estudios más detallados para llegar a una conclusión, satisfactoria del estudio de caso.



**Ilustración 12 Voltaje Y Corriente De Panel 3**

### 5.2.3 COMPARACIÓN DEL USO DE LOS PANELES BAJO DISTINTOS TIPOS DE FALLA

Una vez que se explica el funcionamiento de cada tipo de panel, en una falla transitoria, es posible hacer una comparación con los parámetros de voltaje y frecuencia que muestran las gráficas anteriores. Sin embargo un solo tipo de falla no puede proporcionar la información necesaria para establecer cuál es el tipo de panel más adecuado para la planta de generación solar, ya que como se describió anteriormente los resultados de las gráficas son muy similares.

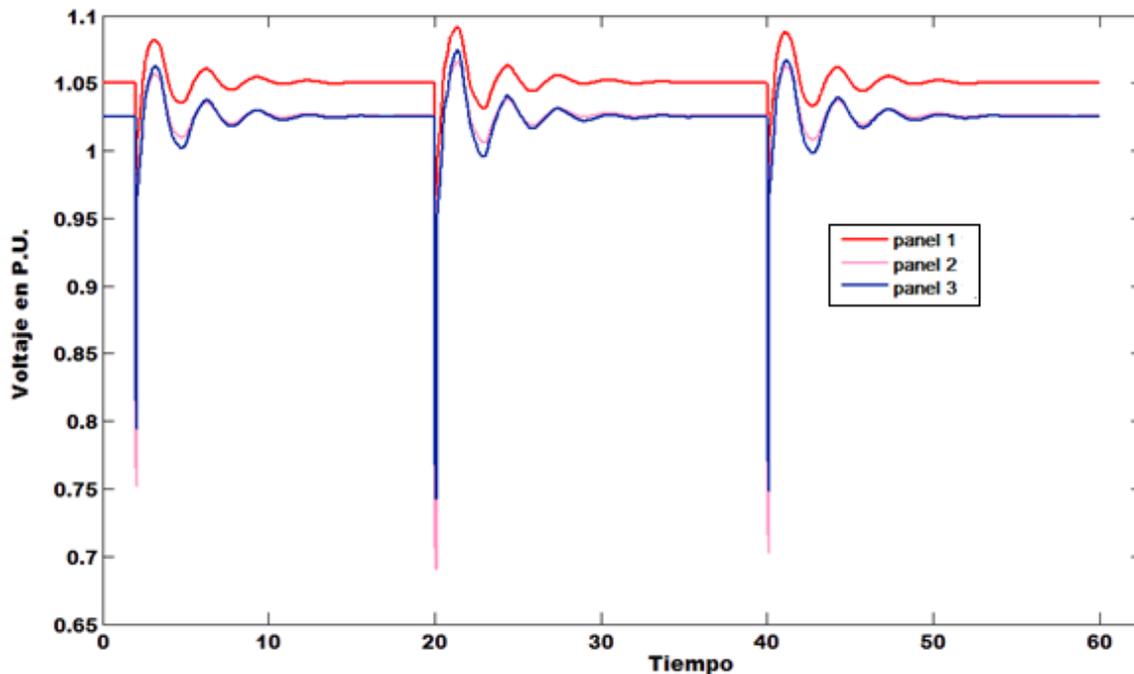
Es por esto que para realizar una comparación fidedigna, se debe establecer diversos tipos de falla y entonces analizar cómo se comportan los 3 paneles, en cuestión de eficiencia, corriente, robustez, y potencia.

Se inducirán diversos tipos de fallas en los paneles solares y de esa forma el proceder de cada sistema nos dará una conclusión convincente de este análisis.

Evento	Falla	Bus	tiempo en que se lleva cabo [s]	duración [s]
1	trifásica	5	2	0.1
2	bifásica	4	20	0.1
3	monofásica	8	40	0.1

**Tabla 12 Fallas Inducidas En El Circuito**

Como se observa en la ilustración anterior se dio un tiempo considerable entre fallas para que el sistema no colapsara con un solo impacto; se eligieron los buses anteriores, ya que de acuerdo con la lejanía de los mecanismos de generación, los sistemas de carga se vuelven más susceptibles a recibir un daño mayor por lo que esta forma es la mejor opción para observar la forma en que el circuito se restablece.



**Ilustración 131 Voltaje De Cada Panel En P.U.**

La ilustración anterior muestra el comportamiento de cada tipo de panel en relación a las fallas provocadas.

Como se puede observar el panel solar tipo 1, inicia operaciones con un valor mayor de voltaje superior a los otros tipos de panel solar; superando la unidad, esto quiere decir que

posee una diferencia de potencial mayor en sus terminales, provocando un sobrevoltaje que aunque no es un valor alarmante, debe manejarse con cuidado, ya que un voltaje alto conlleva por ley una corriente significativa.

Los otros dos tipos de paneles también superan la unidad en P.U., sin embargo aunque es un sobrevoltaje; no requiere una precaución de la misma índole como como el panel 1. Es de vital importancia observar que el panel solar tipo 2 presenta una caída de voltaje superior que los demás, provocando que el circuito resienta esta variación y las cargas puedan ser más susceptibles al daño.

Ahora bien el panel solar 3, muestra con respecto al panel tipo 2, el mismo números de oscilaciones, pero de magnitud superior, por lo que es factible decir que este panel es menos robusto que el tipo 2, por lo que cuesta más esfuerzo llevarlo al estado estable.

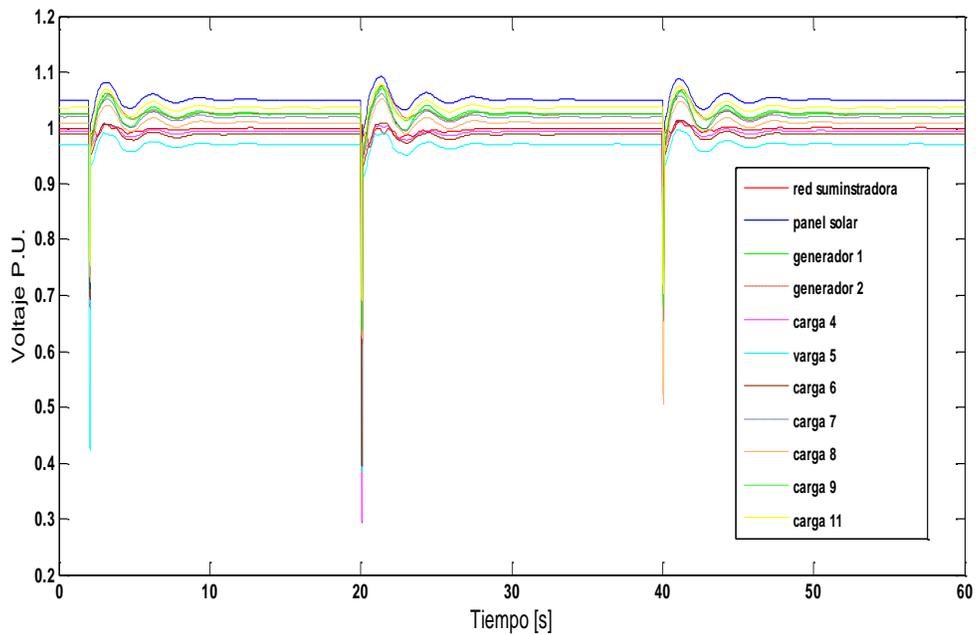
Así mismo se debe analizar cuál fue el tipo de falla que generó más daño en los paneles. La falla bifásica en el bus 4, cerca de la red suministradora provocó caídas y elevaciones de voltaje de mayor cuidado con respecto a las demás fallas. Es decir que el circuito es más susceptible a recibir daño cerca de la red de suministro, que es el papel que desempeña CFE. Cabe destacar que en promedio el panel 2 y 3, necesita aproximadamente 15 s para recuperarse y volver a ser estable.

El panel solar tipo 1 necesita aproximadamente 4 oscilaciones en cualquier falla, para llegar al nivel de estabilidad, los demás paneles necesitan por lo menos una oscilación más, esto adquiere mucha importancia por el tiempo en el que se realiza este proceso, esto significa aproximadamente 5 s menos en la falla bifásica y 3 s menos en los demás errores inducidos para llegar al estado estable.

Para poder llegar a una conclusión fidedigna se debe tomar en cuenta los demás buses de carga con respecto al voltaje y así ver qué elementos presentan una diferencia de potencial mayor.

### 5.2.3.1 VOLTAJES DE BUS CON PANEL 1

La grafica siguiente muestra el comportamiento del voltaje con respecto a cada bus de carga, de panel solar tipo 1. Como se puede observar, el elemento que presenta un mayor voltaje sigue siendo el panel solar y la carga 5 es el elemento que muestra el voltaje menor, que paradójicamente es donde iniciamos las fallas inducidas. Es por esta razón que el sistema se recupera más fácil de la falla trifásica, porque el bus 5 no posee un voltaje de valor muy grande como para provocar un daño mayor.

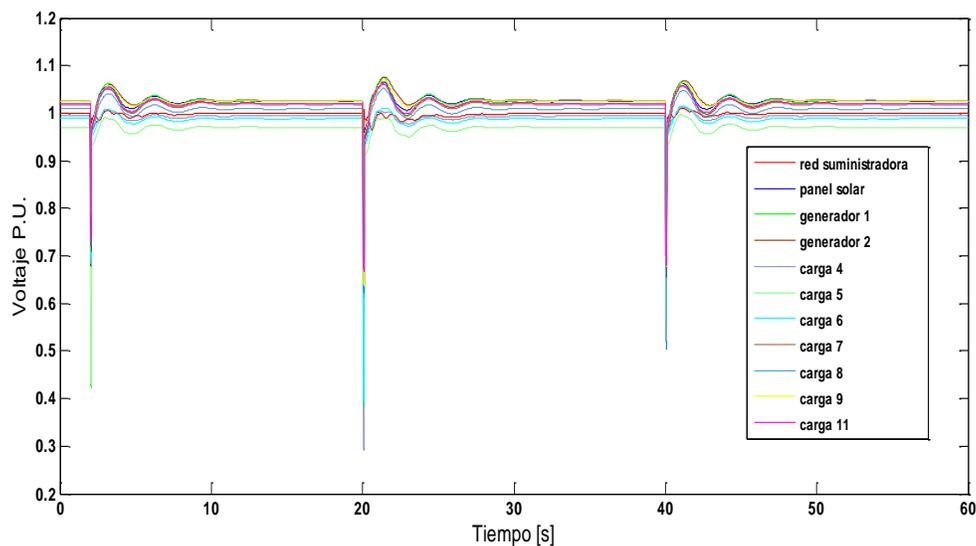


**Ilustración 142 Voltaje en P.U. De Cada Bus Con Panel 1**

### 5.2.3.2 VOLTAJES DE BUS CON PANEL 2

A continuación se mostrara las gráficas de voltaje en los buses de carga del panel solar tipo 2, en donde se aprecia el cambio con el panel tipo 1.

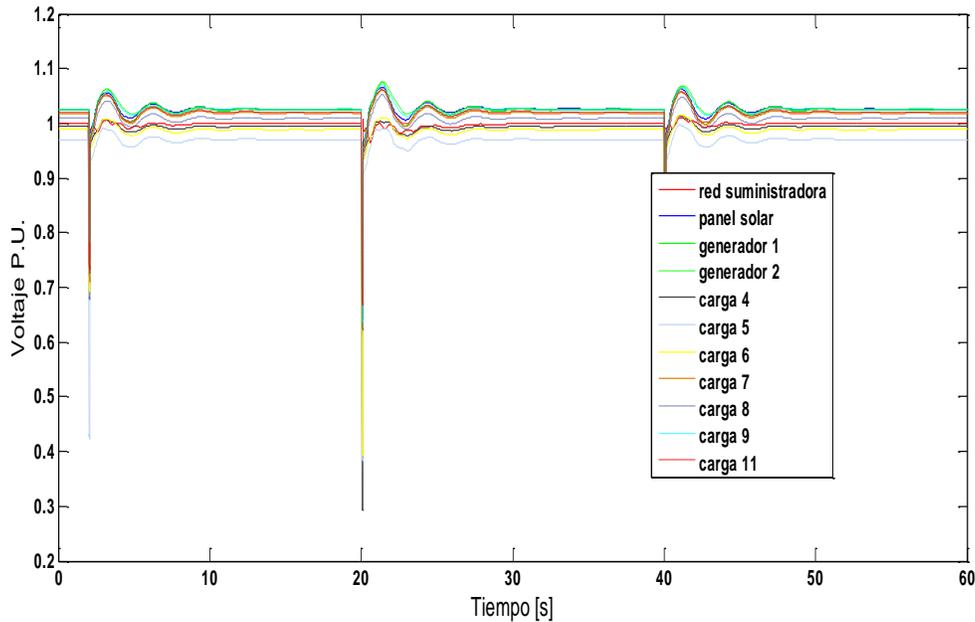
Se puede observar que en este caso, los generadores casi tienen el mismo voltaje que el panel solar, quiere decir esto que no hay una diferencia entre la tensión de operación de los mecanismos de generación; y aunque difieren entre sí por la potencia suministrada a la red por tanto, existe una armonía entre estos sistemas, ya que realizan este proceso sin cambios bruscos, en este parámetro de medición.



**Ilustración 15 Voltaje en P.U. De Cada Bus Con Panel 2**

### 5.2.3.2 VOLTAJES DE BUS CON PANEL 3

Por último se observa el panel solar tipo 3, en el que es muy fácil detectar la semejanza en muchos aspectos con el panel tipo 2, sin embargo se debe ser analizar a conciencia todas las gráficas para inferir que no es del todo similar.



**Ilustración 24 Voltaje en P.U.. De Cada Bus Con Panel 3**

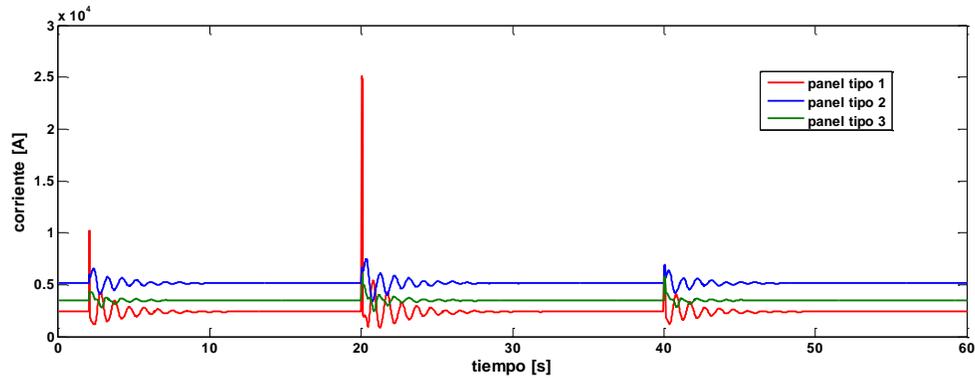
Por un rango muy tenue, el generador 2 en las dos últimas ilustraciones, es el sistema que posee el valor mayor de voltaje y es más sencillo de detectar en la falla bifásica, es muy interesante observar que las oscilaciones con ambos paneles, en este generador en particular suponen un mayor daño al momento de inducir esta falla, y se debe casi en su totalidad a que en ambos casos el panel inicia casi al mismo nivel que los generadores, pero posee un refuerzo en la generación; en decir, que el generador 2 tiene un proceso más abrupto en las fallas porque no tiene otro sistema que lo auxilie; en cambio, como el generador 1 y el panel solar se unen en un bus para soportar el circuito en el proceso de producción de energía y asimilan mejor el proceso.

Ahora bien otro rasgo a analizar es el comportamiento de la corriente, la frecuencia y la resistencia, de cada panel. Esto, mostrara los datos precisos para que de forma definitiva se elija, el mejor panel para el propósito.

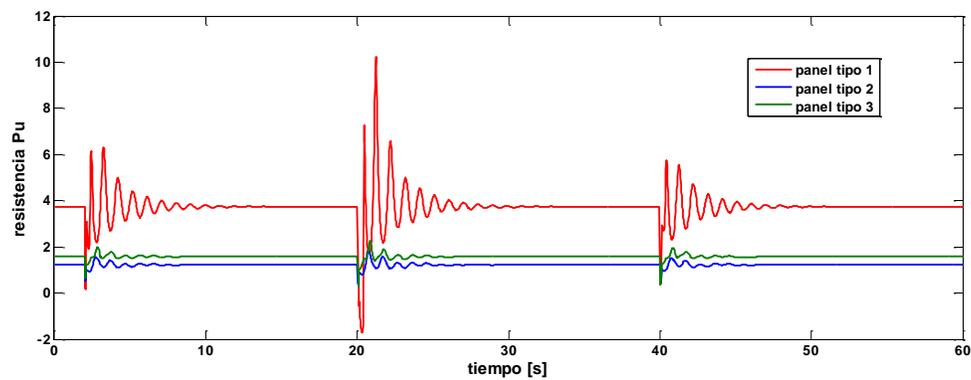
En esta última fase de la comparación, se debe tener un especial cuidado en la interpretación de los fenómenos porque aunque los valores parezcan en primera instancia altos, no necesariamente suponen un riesgo de cuidado para el sistema, por lo que se debe hacer una evaluación a conciencia de los datos que arrojan estos experimentos.

### 5.3 GRÁFICAS CON VALORES MEDIBLES DE CADA PANEL

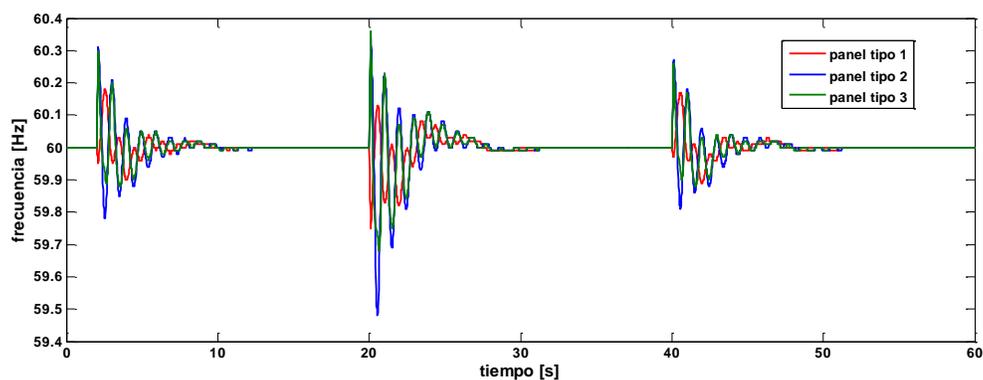
Las siguientes figuras muestran el proceder de cada panel con respecto a los parámetros anteriores; de esta manera será posible establecer una conclusión precisa del comportamiento de estos paneles, en cada etapa de las fallas.



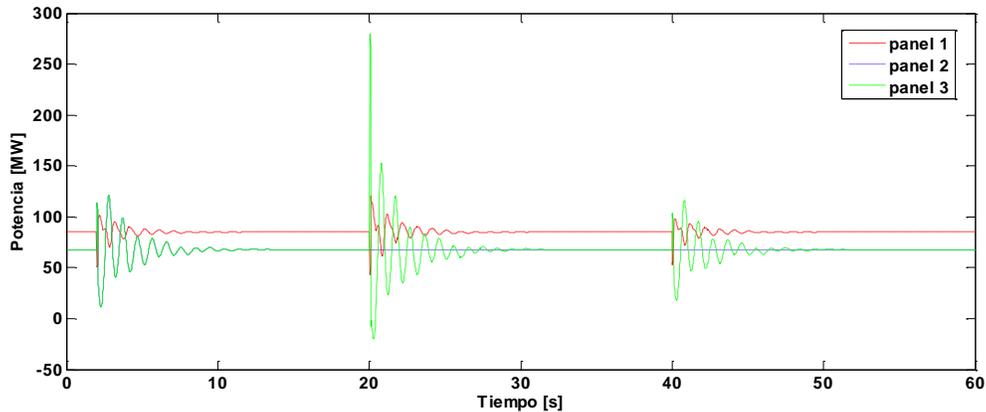
**Ilustración 25 Grafica De Corriente De Cada Panel**



**Ilustración 26 Grafica De Resistencia De Cada Panel**



**Ilustración 27 Grafica De Frecuencia De Cada Panel**



**Ilustración 28 Grafica De Potencia De Cada Panel**

Analizando primero el esquema de la corriente en la ilustración 25 se puede ver que el panel solar 1, aparentemente en la falla bifásica posee una corriente muy grande, superando los 10000 A, siendo el panel que presenta la corriente mayor y también en el cual la falla trifásica afecta más en términos de corriente. Sin embargo el panel que se mantiene en un rango superior de corriente durante todo el proceso es el panel 2, y también tarda aproximadamente 3 s más en estabilizarse. Por último el panel 3 se mantiene aparentemente sin fluctuaciones tan pronunciadas como los otros paneles. Gracias a este análisis podemos tener en cuenta que aparentemente el panel 3 sufre menos variación que los demás.

Los niveles de resistencia coinciden con los de corriente como se observa en la ilustración 26 entonces gracias a esto se comprueba que el panel 1 es el que sufre mayor variación respecto a la corriente. El esquema de la frecuencia en la ilustración 27 muestra que la falla bifásica tiene mayor relevancia para el circuito y que el panel 2 recibe una alteración superior que los demás paneles, y además la falla trifásica y monofásica afectan aparentemente en la misma proporción a la planta de generación.

Así mismo parece ser que la falla bifásica y monofásica dejan de tener repercusiones después de aproximadamente 10 s la falla trifásica, después de 8, es decir que durante 2 s al sistema le es más difícil librarse de una falla de dos y una fases.

Por último la gráfica de la potencia en la ilustración 28, muestra que el panel que posee una menor variación de potencia es el panel 1, manejando desde el inicio de la puesta en servicio una potencia mayor, la potencia en el panel 3 y panel 2 fluctúa más en la falla bifásica. Por lo que, aunque presentan un comportamiento similar, el panel 1 es menos sensible a estas alteraciones.

Con base en los experimentos expuestos y sin tomar en cuenta el aspecto económico ya que en este análisis está acotado a parámetros de eficiencia y niveles adecuados de uso eléctrico. Mi criterio de resultado es el siguiente en orden de elección:

1. Panel 1
2. Panel 3
3. Panel 2

En otras palabras, el panel 1 es más eficiente, y aunque tiene variaciones de corriente muy grandes, pueden corregirse, con un control minucioso de la seguridad del sistema, posee la gran ventaja de recuperarse de las fallas en un tiempo menor a los otros paneles. El panel 2 posee caídas de voltaje muy pronunciadas, el panel 3 no ofrece una ventaja sobre el panel 1 a excepción de la variación de corriente.

Por lo que el panel 1 es la mejor opción en términos de uso, sin embargo; tomando en cuenta otros parámetros como lo son el monetario, el control de protecciones eléctricas y la disponibilidad de encontrar el primer tipo panel. Las otras dos opciones pueden dar resultados muy positivos, teniendo un sistema de inspección rígido de su comportamiento.

## 5.2.5 CONCLUSIONES A LOS ESTUDIOS DE CASO

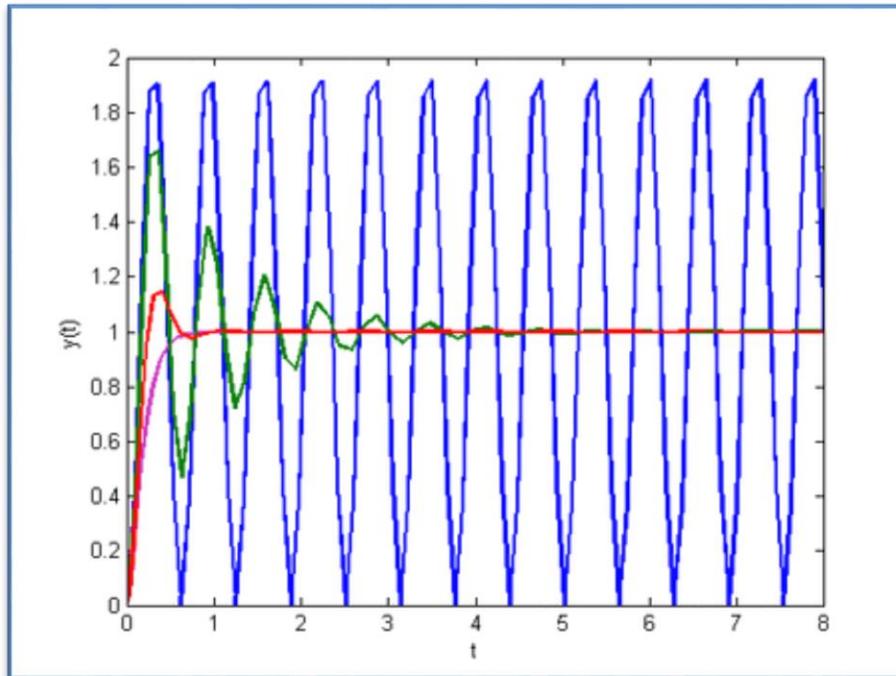
A lo largo del capítulo, se analizan las diferencias que existen entre los modelos de paneles propuestos por el programa de simulación. Dicho análisis se realiza con los parámetros físicos medibles involucrados en cada gráfica que arrojó el circuito. Se obtienen así mismo, resultados suficientemente completos para realizar una elección de panel en cada caso de estudio. Aunado a lo anterior se realiza un análisis metódico de.

Sin embargo, se debe destacar que matemáticamente todas las gráficas de esta sección tienen un comportamiento de respuesta transitoria de segundo orden, por lo que proceden según la siguiente fórmula:

$$\frac{KW_n^2}{s^2 + 2\varepsilon W_n s + W_n^2} \quad (1)$$

Dónde:  $W_n$  frecuencia natural de oscilación,  $\varepsilon$  coeficiente de amortiguamiento y  $K$  la ganancia de estado estacionario.

Por lo que podemos inferir que el valor del coeficiente de amortiguamiento es pequeño; si se observa la ilustración 32, se puede tener un mayor panorama del coeficiente de amortiguamiento.



**Ilustración 29** Graficas De Respuesta Sub Amortiguada Dependiendo Del Valor Del Coeficiente De Amortiguamiento Curva De Color Azul  $\varepsilon = 0$ , Curva De Color Verde  $\varepsilon = 0.1$ , Curva De Color Rojo  $\varepsilon = 0.5$ , Curva De Color Rosa  $\varepsilon = 1$

Y este coeficiente de valor pequeño es intrínseco de las propiedades de los elementos del circuito en cuestión.

Es de esta forma que el análisis de cada panel bajo las topologías de la puesta en servicio debe estar complementado realizando un cuadro comparativo de los paneles, mostrando sus ventajas y desventajas, como se observa en la tabla 12:

CELIDAS	PANEL SOLAR 1	PANEL SOLAR 2	PANEL SOLAR 3
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se maneja en valores superiores a la unidad en P.U. en relación a los otros paneles.</li> <li>-Se recupera de una falla en un menor tiempo con respecto a los otros paneles.</li> <li>-El voltaje que maneja es superior al de los generadores por lo que su rendimiento es mejor.</li> <li>-Presenta la misma frecuencia al inicio y al final del proceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Las oscilaciones de voltaje que presenta son de menor magnitud al momento de llegar al estado estable.</li> <li>-Presenta la misma frecuencia al inicio y al final del proceso.</li> <li>-Los generadores trabajaran al nivel de la celda en términos de voltaje, independientemente del rendimiento de la misma.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Es más robusto que el panel 2 en relación a la variación de corriente.</li> <li>-presenta la misma frecuencia al inicio y termino del proceso.</li> <li>-Los generadores trabajaran al nivel de la celda en términos de voltaje sin importar el rendimiento de la misma.</li> <li>-en topología aislada libra en menor tiempo una falla.</li> </ul>

	-Las fluctuaciones de frecuencia son mucho menores que los demás paneles.	-Las oscilaciones de corriente son de menor magnitud.	
<b>Desventajas</b>	-Presenta variaciones grandes de corriente -En topología aislada, tarda más tiempo en librar una falla.	-Las variaciones de corriente se presentan con un lapso de tiempo mayor. -El rendimiento del panel es menor que el panel 1. -Tiene las caídas de voltaje más pronunciadas.	-El rendimiento del panel es menor que el panel 1 -Tarda junto con el panel 2, más tiempo en recuperarse de las fallas.

**Tabla 13 Ventajas Y Desventajas De Los Paneles Examinados**

## CONCLUSIONES

A lo largo de los capítulos se describe el comportamiento de un panel fotovoltaico cuando está en servicio. Tal comportamiento depende del proceso de fabricación, la normativa aplicable en la instalación y su utilización. El análisis expuesto, es una herramienta muy útil para poder establecer los mecanismos de solución a los casos de estudio, ya que las corridas en estado dinámico, dieron un panorama explícito de lo que ocurre con un sistema eléctrico en un periodo de tiempo determinado, y así, reproduce cual es el costo en términos de voltaje frecuencia, potencia y corriente, antes de llegar al punto de estabilidad de cada tipo de panel.

Dicho estudio dio las herramientas para inferir lo siguiente: Un sistema generador convencional, soporta el nivel de carga establecido, en un lapso de tiempo considerable, y si no se maneja con cuidado puede traer consigo alguna falla tanto en la instalación como en los equipos, sin embargo mantiene el nivel de los valores medibles de potencia y corriente en forma casi constante desde que se pone en operación el sistema.

Ahora bien, si se intercambia un generador por un panel fotovoltaico, se llega al punto de estabilidad en un lapso más corto de tiempo, soportando el mismo conjunto de cargas. A pesar de que esto es algo muy valioso para cualquier instalación de un sistema; los valores medibles de potencia y voltaje se reducen, lo que conlleva una disyuntiva en el criterio y política de los sistemas de generación. Se debe estudiar que es más conveniente, si generar una cantidad mayor de energía o proveer al sistema con un grado más elevado de protección. De tal forma, que se incorpore un sistema eléctrico de potencia que además de generar una cantidad suficiente de energía, asegure su confiabilidad y su cómodo manejo para una correcta ejecución. Ese será el punto de partida para lograr un beneficio en conjunto para la sociedad y el medio ambiente.

La energía solar puede proveer los elementos suficientes para dar un servicio de calidad, sin embargo, necesita aún más estudios en redes para asegurar un funcionamiento eficiente en sus componentes. Esto se verifica en el capítulo 5, ya que al realizar la conexión a red se necesita de dos generadores de tipo convencional, para poder sostener la demanda de energía. Sin embargo es una opción bastante generosa en sistemas aislados, y medios donde no se requiera alimentar una carga muy grande.

Aunado a lo anterior, se debe aclarar que se puede hacer un análisis mucho más meticuloso del comportamiento dinámico del panel, ya que aunque los parámetros mostrados en el capítulo 1 generalizan de la forma más fidedigna a un panel fotovoltaico, existen más variaciones que están sujetos a constantes de los materiales y el medio ambiente donde se fabrican paneles fotovoltaicos.

Es más que conocido, el hecho de que los generadores convencionales son más eficientes que los paneles. Realizar una comparación entre paneles fotovoltaicos y generadores no hubiera mostrado algo nuevo en proyectos de tesis, por esta razón se busca realizar una comparación entre modelos de paneles solares. Ya que así, se utiliza una metodología de trabajo ingenieril; pues se establece un criterio de solución y una postura ante situaciones

usuales en la industria. Desde un punto de vista personal, las partes sustanciales de un proyecto de generación, son la eficiencia, confiabilidad y costo, estas palabras son traducidas en problema, solución y producto en la industria. Difícilmente un producto defectuoso llega al mercado, y tiene éxito entre los consumidores, entonces el proceso de evaluar los modelos de panel, supuso un reto, el cual fue establecer filtros que muestran rasgos distintivos en cada modelo y topología usada, así mismo elegir el equipo más adecuado según el criterio de un servidor, fue muy interesante.

Fueron corridas de simulación, y sin embargo mostraron el comportamiento y función de cada sistema bajo condiciones abruptas de trabajo. Así mismo se estableció de antemano que los paneles fotovoltaicos en cuestión, operaban bajo los estándares de calidad que se dicta en la normativa internacional. Por lo que se hizo énfasis en parámetros de flujo eléctrico.

Es así que el panel fotovoltaico es un sobresaliente mecanismo de generación, que ofrece la función específica de producir energía sustentable para consumo humano, tiene la ventaja de ser un sistema que mejora la calidad de los equipos de servicio eléctrico, reduciendo el tiempo de recuperación en fallas eléctricas.

De tal manera que el panel, necesita de mejores tecnologías que le permitan asimilar una mayor cantidad de energía solar y un mejor proceso de fabricación; para ganar una mayor confianza en los consumidores y explotar sus beneficios al máximo. Falta mucho por hacer; sin embargo, todo comienza por el hecho de intentar cambiar el concepto típico de generación de energía, para encontrar el justo medio entre generación, calidad y eficiencia que se busca en los mecanismos.

## APÉNDICE A. MEDIDAS USUALES EN PANELES FOTOVOLTAICOS

Estas dependen en gran medida de cada fabricante pero se puede suponer un aproximado dependiendo de sus valores de medición y la potencia que se busca obtener. La empresa SOLARTEC, propone las siguientes dimensiones respecto a la potencia:

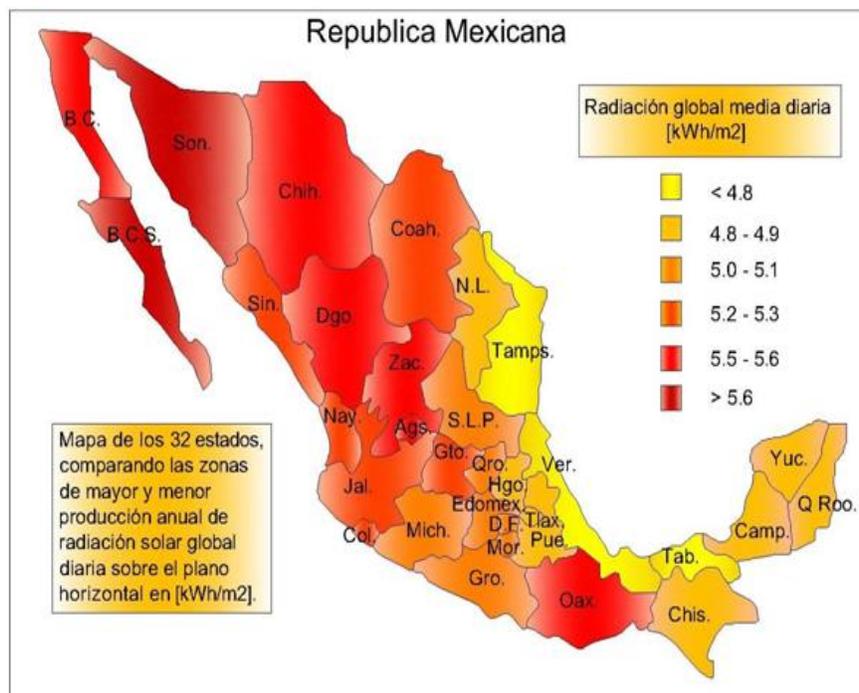
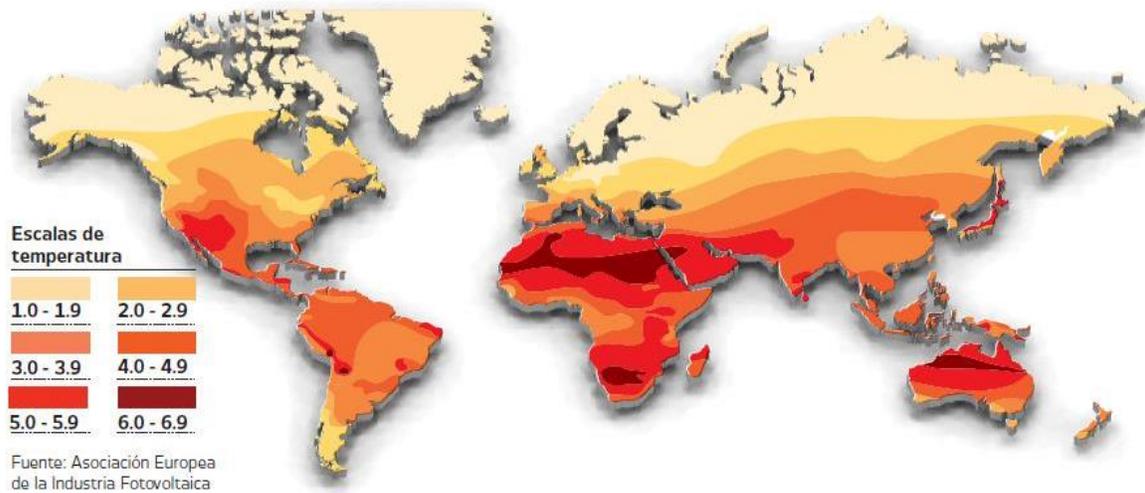
Para baja potencia:

Modelo	Pp (W)	Imp (A)	Vmp (V)	Isc (A)	Voc (V)	Dimensiones (mm)	Peso (Kg)
KS3A	3	0.21	16.0	0.24	20.0	234x176x22	0.8
KS5	5	0.29	16.9	0.31	21.5	205X352X22	1.2
KS5A	5	0.30	16.1	0.34	20.2	205X352X22	1.2
KS7	7	0.42	16.9	0.44	21.5	304x352x22	1.7
KS7A	7	0.44	16.1	0.50	20.2	304x352x22	1.7
KS10	10	0.60	16.9	0.62	21.5	304x352x22	1.8
KS10A	10	0.64	16.1	0.68	20.4	340x352x22	1.9
KS12	12	0.71	16.9	0.73	21.5	340x352x22	1.9
KS12A	12	0.75	16.1	0.85	20.4	408x352x22	2.1
KS16	16	0.95	16.9	0.98	21.5	408x352x22	2.1
KS16A	16	1.00	16.1	1.12	20.5	520x352x22	2.3
KS20	20	1.20	16.9	1.24	21.5	520x352x22	2.3
KS20A	20	1.26	16.1	1.37	20.6	635x352x22	3.1
KS25	25	1.48	16.9	1.55	21.5	635x352x22	3.1

Para alta potencia:

Modelo	Pp (W)	Imp (A)	Vmp (V)	Isc (A)	Voc (V)	Dimensiones (mm)	Peso (Kg)
KS32A	32	2.20	14.6	2.36	18.4	875x343x36	4.5
KS35	35	2.33	15.0	2.50	18.8	875x343x36	4.5
KS36A	36	2.20	16.3	2.36	20.6	990x343x36	5.2
KS40	40	2.34	16.9	2.48	21.5	990x343x36	5.2
KS45	45	3.00	15.0	3.10	19.2	1080x343x36	5.5
KS46A	46	3.18	14.6	3.56	18.4	1280x343x36	6.6
KS50	50	3.00	16.7	3.10	21.5	1280x343x36	6.8
KS52A	52	3.21	16.3	3.56	20.6	1432x343x36	7.1
KS60	60	3.55	16.9	3.73	21.5	1432x343x36	7.1
KS80	80	4.73	16.9	4.97	21.5	971x651x36	8.7

## APÉNDICE B. MAPA DE RADIACIÓN SOLAR



## APENDICE C CLASE SOLAR

El IEC 60904-9 y ASTM E927 Edition2-10 son normas con una especificación común para los simuladores solares utilizados para las pruebas de paneles fotovoltaicos. La luz de un simulador solar se controla en tres dimensiones:

contenido espectral

uniformidad espacial

estabilidad temporal

Cada dimensión se clasifica en una de tres clases: A, B, o C. Las especificaciones requeridas para cada clase se definen en la Tabla a continuación. Un simulador solar es Una unión en las tres dimensiones y se refiere como Clase A, a un simulador solar, o a veces un AAA en referencia a cada una de las dimensiones en el orden que se indica más arriba.

Clasificación espectral	Contenido espectral de radiación	Uniformidad espacial de radiación	Estabilidad temporal de radiación
A	0.75–1.25	2%	2%
B	0.6–1.4	5%	5%
C	0.4–2.0	10%	10%

## BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

*E. LORENZO, (1994) Solar Electricity, Engineering of Photovoltaic Systems. Institute of Solar Energy, Polytechnic University of Madrid, Madrid España.*

*D.G. NEWMAN, (1988) Engineering Economic Analysis. Engineering Press, San José, California.*

*F. KREITH AND J.F. KREIDER, (1988) . Principles of Solar Engineering, Hemisphere Publishing Corporation, New York.*

*D. ROOT, (1986).Understanding Life Cycle Costing, Florida Solar Energy Center Cape Canaveral, USA.*

*W.H. BLOSS, F. PFISTERER Y H.P. HERTLEIN, (1993) Photovoltaics : Solar Electricity, World Solar Summit, Conf. 003/7, UNESCO Paris.*

*A. RICAUD, Thin Film Photovoltaic Technology: From the Laboratory to Mass Production, (1992) . Advanced Technology Assessment System, United Nations, New York.*

*R. MERTENS, (1992) Photovoltaics: Present Reality and Future Prospects. Advanced Technology Assessment System, United Nations, New York.*

## OTRAS REFERENCIAS

*México. FIRCO (2013) Fideicomiso de riesgo compartido. Firco\_v6.*

*IEC 60068-1, Environmental testing*

*IEC 60068-2-21, Robustness of terminations and integral mounting devices*

*IEC 60068-2-78, Damp heat, steady state*

*IEC 60410, Sampling plans and procedures for inspection by attributes*

*IEC 60721, Classification of environmental conditions – Part 2: Environmental conditions appearing in nature – Temperature and humidity*

*IEC 60891, Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices Amendment*

*IEC 60904 Photovoltaic devices*

*IEC 60904-1, Measurements of photovoltaic current-voltage characteristics*

*IEC 60904-2, Requirements for reference solar cells*

*IEC 60904-3, Measurement principles for terrestrial photovoltaic solar devices with reference spectral irradiance data*

*IEC 60904-6 Requirements for reference solar modules*

*IEC 60904-7, Computation of spectral mismatch error introduced in the testing of a photovoltaic device*

*IEC 60904-9, Solar simulator performance requirements*

*IEC 60904-10, Methods of linearity measurements*

*IEC 61215*

*CEN –CENELEC. EUROPEANSTANDARIZATION.<http://www.cencenelec.eu/standards>*

*Copyright © 2014 CEN CENELEC. All rights reserved. 2014-04-0*

*Criteria of Test and Evaluation 60904*

*Basic Understanding of IEC Standard Testing For Photovoltaic Panels. E-mail: [info@tuvam.com](mailto:info@tuvam.com)*

*[www.TUVamerica.com](http://www.TUVamerica.com)*

*TESTING AND MEASURING EQUIPMENT/ALLOWED SUBCONTRACTING*

*Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules.Design qualification and type approval*

*IEC 61646 1st Edition (1998)*

*Universidad Tecnológica Nacionalfacultad Regional Rosario Regimen Transitorio En Circuitos Lineales. Versión 1.1 (marzo 2010)*

*MEXICO NOM 001(2012). ARTICULO 690*

*Henning Dyes Hidalgo. Módulos Fotovoltaicos para la Generación de Energía Eléctrica. 2009. Universidad de Costa RicaFacultad de IngenieríaEscuela de Ingeniería Eléctrica*

*Efraín Paucar Castillo Ingeniero Electricista CIP N° 53294*

*Análisis de Pérdidas Técnicas en Sistemas Eléctricos de Distribución utilizando Flujo de Potencia en entorno GIS. .Supervisor de Tiempo Real / Unidad de Control de Operaciones – Electrocentro S.A.*

*Viqueira, Jacinto (Autor). MEXICO, MEXICO: [s.n.], 1985.Redes eléctricas TOMO III*

#### *REFERENCIAS DE INTERNET*

*SOLAR MARKET AND ANALYSIS. <http://www.solarbuzz.com>. © 2014 NPD Solarbuzz. All rights reserved*

*International Standards and Conformity Assessment for all electrical, electronic and related technologies.<http://www.iec.ch>. Copyright © IEC 2014. All rights reserved.*

*Energy.gov. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. <http://energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>.*

*PERIODISMO DE LAS ENERGIA RENOVABLES. <http://www.energias-renovables.com>  
ENERGIAS RENOVABLES. <http://www.suntechnics.com>. 03 de April de 2014*

*RADIACIÓN SOLAR EN MEXICO. [http://www.el universal.online.com](http://www.eluniversal.online.com). 7 de abril 2014*

*IRRADIANCIA SOLAR EN MEXICO. POWER ELECTRICAL SALE CORPORATION, S.A.  
DEC.V. <http://www.pesco.com.mx/pesco/eficiencia/index.php/servicios/sistemas-fotovoltaicos/irradiancia-solar>. 7 de abril 2014*

