

**Ingeniería Eléctrica**

**Informe Técnico de Residencia Profesional**

**“Impacto de la Generación Solar en la Estabilidad de los  
Sistemas de Potencia”**

**Presenta: Héctor Darío Velázquez Cruz**

**Número de control: 14270542**

**Asesor Interno: M.C. Osvaldo Brindis Velázquez**

**Asesor Externo: Dr. Arturo Román Messina**

**Periodo de Realización: agosto - diciembre 2018**

**Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, a viernes 20 de diciembre de 2018.**

# Índice

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introducción                                                           | 3  |
| 1.1 Antecedentes                                                          | 3  |
| 1.2 Estados del arte                                                      | 3  |
| 1.3 Justificación                                                         | 5  |
| 1.4 Objetivos                                                             | 5  |
| 1.4.1. Objetivo general                                                   | 5  |
| 1.4.2 Objetivos específicos                                               | 5  |
| 1.5. Metodología                                                          | 6  |
| 2. Fundamento teórico                                                     | 7  |
| 2.1 Generador síncrono                                                    | 7  |
| 2.2 Energía fotovoltaica                                                  | 8  |
| 2.3 Generadores eléctricos fotovoltaicos                                  | 9  |
| 2.3.1 Funcionamiento del sistema fotovoltaico                             | 9  |
| 2.3.2 ¿Cómo se produce la energía eléctrica fotovoltaica?                 | 9  |
| 2.3.3 Aplicaciones                                                        | 10 |
| 2.3.4 Mantenimiento de un sistema fotovoltaico                            | 10 |
| 2.4 Inversores fotovoltaicos                                              | 11 |
| 2.4.1 ¿Cómo funcionan los inversores fotovoltaicos?                       | 11 |
| 2.4.2 Funciones principales del inversor fotovoltaico                     | 11 |
| 2.4.3 Tipos de inversores fotovoltaicos                                   | 12 |
| 2.4.3.1 Inversores String o de cadena                                     | 12 |
| 2.4.3.2 Micro inversores                                                  | 13 |
| 2.4.3.3 Optimizadores de potencia                                         | 13 |
| 2.5 Baterías para energía solar fotovoltaica                              | 14 |
| 2.5.1 Funcionamiento de las baterías solares fotovoltaicas                | 15 |
| 2.5.2 Clasificación de baterías de almacenamiento de energía fotovoltaica | 15 |
| 2.5.2.1 Baterías de ciclo bajo                                            | 16 |
| 2.5.2.2 Baterías de ciclo profundo                                        | 16 |
| 2.5.2.3 Baterías de ácido-plomo para aplicaciones solares                 | 17 |
| 2.5.2.4 Baterías líquidas-electrolito líquido                             | 17 |
| 2.5.2.5 Baterías AGM - Absorption Glass Mat                               | 17 |
| 2.6 Estabilidad de voltaje, ángulo de fase y frecuencia                   | 17 |
| 2.6.1 Estabilidad de voltaje                                              | 17 |
| 2.6.2 Relación entre potencia y ángulo                                    | 19 |
| 2.6.3 Estabilidad de frecuencia                                           | 21 |
| 3. Desarrollo                                                             | 22 |
| 3.1 Diseño de red de transmisión en MATLAB pstv3                          | 22 |
| 3.2 Diseño de la red en PSAT y TSAT                                       | 25 |
| 3.3 Diseño de la red en PSCAD                                             | 25 |
| 4. Resultados y conclusiones                                              | 26 |
| 4.1 Implementación de datos y obtención de datos en MATLAB pstv3          | 26 |
| 4.1.1 Voltajes de excitación                                              | 26 |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.2 Par mecánico -----                                                              | 28 |
| 4.1.3 Magnitudes de voltaje y ángulos de voltaje de los buses -----                   | 28 |
| 4.1.4 Potencia generada de los buses -----                                            | 29 |
| 4.2 Resultados de la red de transmisión con PSAT y TSAT -----                         | 30 |
| 4.3 Resultados de la red de transmisión con PSCAD -----                               | 32 |
| 4.3.1 Voltajes de los generadores -----                                               | 32 |
| 4.3.2 Corrientes de los generadores -----                                             | 35 |
| 4.3.3 Potencia real de los generadores -----                                          | 39 |
| 4.3.4 Potencia reactiva de los generadores -----                                      | 43 |
| 4.4 Impacto de la generación solar fotovoltaica en la red de transmisión ---          | 48 |
| 4.4.1 Impacto del generador solar fotovoltaico en la<br>magnitud de voltaje-----      | 48 |
| 4.4.2 Impacto del generador solar fotovoltaico en el<br>ángulo de voltaje -----       | 51 |
| 4.4.3 Impacto de la generación solar fotovoltaica en<br>las corrientes de campo ----- | 54 |
| 4.4.4 Impacto de la generación solar fotovoltaica en<br>la potencia activa -----      | 55 |
| 4.4.5 Impacto de la generación solar fotovoltaica en<br>la potencia reactiva -----    | 58 |
| 4.5 Conclusiones -----                                                                | 59 |
| 5. Referencias Bibliográficas -----                                                   | 60 |
| 6. Anexos -----                                                                       | 63 |

# 1. Introducción.

## 1.1 Antecedentes.

El uso de la energía eléctrica en nuestra vida diaria es sumamente importante, su uso es elemental para las industrias, para tener productividad en determinados ramos de la misma, y, por ende, mejora la calidad de vida del ser humano; asimismo, esta es importante ya que su uso es empleado en nuestros hogares, debido a que nos brinda el uso de determinados equipos eléctricos y electrónicos para así tener una vida más confortante y segura.

México, siendo un país con diversas fuentes de generación, como la generación eólica, hidráulica, nuclear, mareomotriz, fotovoltaica, etc. En el presente documento, nos centraremos particularmente en analizar el impacto que tiene la generación solar en los sistemas eléctricos de potencia. Así como su estudio con diversas herramientas digitales como MATLAB Simulink, MATLAB pstv3 y PSCAD.

La mayoría de los consumidores buscan mitigar gastos a través del uso de diversas fuentes de energía renovable, inclinándose particularmente en la generación eólica y fotovoltaica, hablando específicamente de esta última, actualmente se busca implementar inversores o convertidores, y bancos de almacenamiento de energía, para así aprovechar su máximo potencial y tratar de dañar la red lo menos posible, ya que en ella se generan armónicos y reactivos que dañan particularmente la misma.

## 1.2 Estados del arte.

Pedro González Castrillo, Enrique Romero Cadaval, Eva González Romera, Fermín Barrero González, Miguel A. Guerrero Martínez, Power Electrical and Electronic Systems (PE&ES), School of Industrial Engineering (University of Extremadura) registran diversos parámetros y magnitudes eléctricas como potencia activa y reactiva, factor de potencia, tasa de distorsión armónica de tensión y armónicos individuales de tensión y corriente. [1]

Parimita Mohanty, The Energy Research Institute (TERI), India Habitat Center, Lodhi Road, New Delhi, 110003, los inversores solares son clasificados con base al número de estados energéticos, único estado, estado doble, o estado múltiple del inversor, la presencia de un transformador (lado de alta o lado de alta), la posición de los capacitores desacoplados se utiliza para desacoplar la fuente principal, el inversor. [2]

Bhanu Prakash G, A Raghu Rama Chandra, Asst. Prof. Pragati P Gupta, Dept. of Electrical, Engineering, VJTI, Matunga, Mumbai-400019, este tipo de circuitos puede ser operado en dos diferentes estados, aislado y circuito conectado. Para la operación de un circuito cerrado el corta circuito se mantiene activo, mientras que, para el estado aislado, se mantendrá inactivo.

Controlando el cambio de dispositivos tenemos los estados operacionales del sistema para la demanda de carga particular. Tras aplicar las ecuaciones de balance de potencia, y potencia generada, tenemos que esta es igual a la demanda del sistema, sin embargo, los dispositivos de cambio de control son aplicados para la condición de balance de potencia. [3]

L. H. KOH, WANG Peng, K. J. TSENG, GAO ZhiYong, Energy Research Institute @, NTU, Nanyang Technological, University (NTU), Singapore, la radiación solar es conocida por brindar energía intermitente y difusa que varía y generalmente depende del lugar dónde se aplique. La generación solar es sumamente diferente a las fuentes convencionales de energía.

Las fuentes de energía fotovoltaicas son fuentes renovables con nivel de generación en mega watts ya que están integrados dentro de los sistemas eléctricos de potencia actuales, esto trae consigo particularmente, evaluar el impacto de la generación de recursos renovables en la confiabilidad de los sistemas eléctricos de potencia.

Los parámetros típicamente utilizados para buscar la característica de una batería de almacenamiento con base a una evaluación de confiabilidad son: capacidad de almacenamiento, rango de carga y descarga, eficiencia de carga y descarga, y límite de carga y descarga.

En estado de carga, la energía fotovoltaica disponible para cargar no debe ser igual a la producida, ya que algo de la energía fotovoltaica debe ser utilizada para suministrar el sistema de carga. Únicamente el exceso de energía fotovoltaica está disponible para cargar el sistema de almacenamiento de energía. El exceso de esta energía, está limitado por el rango de eficiencia de la carga y descarga del sistema de almacenamiento. [4]

Rimantas Pranas Deksnys and Aldas Stankevicius, Lituania anualmente genera anualmente 61 mega watts con base a generación solar, lo cual representa un total del 1.3% del total de la energía que suministra esta ciudad. Lituania basa aproximadamente el 10.5% de toda su generación en energías renovables, hablando ciertamente en números, Lituania recibe 1.000 kWh por metro cuadrado al año, y el 80% de esta generación se recibe en el periodo de abril-septiembre, esto se debe a la ubicación geográfica que tiene esta ciudad. [5]

Adiela Arenas, Consultora Pablo Mediavilla, Consultor Fabio García, Especialista, Dirección de Estudios y Proyectos Pablo Garcés, Especialista, Dirección de Estudios y Proyectos, Quito, Ecuador, los generadores solares están integrados en niveles de voltaje más bajos que las grandes plantas de potencia. Típicamente el control de voltaje está estrictamente basado en un concepto, donde los transformadores con cambiadores, regulan el voltaje del nivel inmediatamente inferior, esto significa que el balance potencia reactiva es únicamente posible en la dirección de más alto a bajo.

El impacto de la estabilidad angular es indirecto ya que los generadores solares no tienen un problema de estabilidad transitoria en sí mismos, sus impactos, ya sean de secuencia positiva o negativa, se ven reflejados en los tiempos de despeje críticos de una determinada falla. Estos fallos, son tolerables, siempre y cuando los momentos críticos de despeje de fallas se mantenga por encima de tiempos de despeje de fallas reales, por ejemplo, 150 ms. [6]

Velázquez Cruz, Héctor Darío, Residente en ingeniería eléctrica en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, los generadores fotovoltaicos tienen determinado impacto en los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), de

tal manera, se ven afectados diferentes rubros de las redes de transmisión, como lo son estabilidad angular, de voltaje y frecuencia, entre otros rubros. Todo esto se analizará por medio de diferentes herramientas electrónicas como: Simulink y pstv3 de MATLAB, PSCAD, PSAT y TSAT.

### **1.3 Justificación.**

La generación solar es una de las fuentes de energía renovable que está teniendo más impacto en las redes de transmisión del país, ya que con el pasar del tiempo más y más gente busca maneras de ahorrar y dañar menos el medio ambiente, este tipo de generación renovable ofrece de manera objetiva muchos beneficios cuando a estos dos rubros se hace hincapié.

Con este proyecto se busca analizar el impacto que la generación solar fotovoltaico tiene en los sistemas eléctricos de potencia, debido a que estos pueden modificar la estabilidad del voltaje, el ángulo de fase y los transitorios al ser conectados a un sistema de mayor escala, y de la misma manera en la que se analizan, se buscará cómo reducir estos fenómenos generados al acoplar una generación con otra en la red general.

Asimismo, el control de la potencia activa y reactiva se examinará con base a programas comerciales, y así conocer de forma detallada la sincronía y la estabilidad de la red de transmisión. Esto implica realizar análisis de magnitud de voltaje, ángulo de voltaje y flujos de corriente de campo.

### **1.4 Objetivos.**

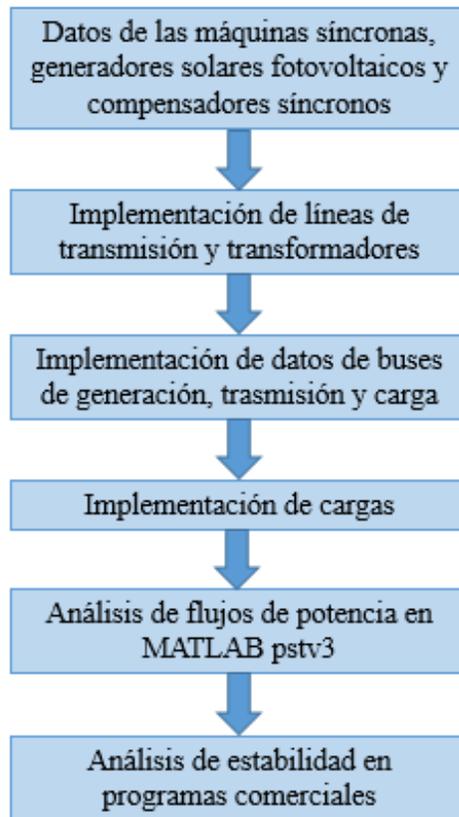
#### **1.4.1 Objetivo General.**

Evaluar el impacto de generación solar en la red de alta tensión en la estabilidad electromecánica de los sistemas eléctricos de potencia. Analizar y cuantificar el efecto de niveles elevados de penetración fotovoltaica en la inercia del sistema y la potencia sincronizante y su impacto en la estabilidad angular y de voltaje en la estabilidad del sistema.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos.**

1. Llevar a cabo una revisión de las características básicas de operación de generación fotovoltaica, así como su interconexión con el sistema de potencia
2. Modelar la red de transmisión eléctrica con generadores convencionales y con generadores solares fotovoltaicos.
3. Revisar los modelos existentes de segunda generación incorporados en simuladores comerciales, principalmente PSCAD, PSAT, TSAT y MATLAB pstv3.
4. Desarrollar y evaluar modelos simplificados para estudios preliminares del impacto de la generación fotovoltaica en la estabilidad del sistema utilizados.
5. Presentar estudios de flujos de potencia, estabilidad de voltaje, corriente y potencia de la red de transmisión.
6. Realizar análisis comparativos de flujos de potencia con base a los programas PSCAD Y TSAT.

## 1.5 Metodología.



*Fig. 1.1 Diagrama a bloques del desarrollo del proyecto.*

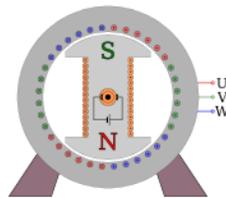
Este proceso para el análisis de la red de transmisión, comienza directamente con la colocación de los elementos para transmisión, tales como máquinas síncronas o de generación, líneas de transmisión, cargas, etc. De esta manera, podemos realizar simulaciones de la red en programas comerciales, y así, analizar los resultados de flujos de potencia en programas comerciales como PSCAD, MATLAB pstv3, PSAT y TSAT.

## 2. Fundamento Teórico.

### 2.1 Generador síncrono.

Los generadores eléctricos se pueden clasificar de distintas maneras de acuerdo a sus características, una de las clasificaciones más generales es de acuerdo a las frecuencias con las que opera el rotor del mecanismo y la frecuencia con la que se obtiene la corriente del generador es la misma.

Un generador síncrono se define como una máquina rotatoria que es capaz de convertir una energía mecánica en energía eléctrica. Ésta se encuentra compuesta de dos partes: un rotor y un estator. El rotor es la parte móvil del generador, mientras que el estator es la parte fija.



*Fig. 2.1 Generador síncrono.*

En este tipo de generadores el rotor gira de acuerdo a la energía mecánica que se suministra. Esta energía procede de un lo que se llama *impulsor primario* que es el mecanismo que gira por la fuerza mecánica.

Las máquinas síncronas se pueden clasificar en dos tipos de acuerdo al tipo de arreglo rotor – estator que se emplee.

- Armadura giratoria. El inducido se encuentra en el rotor, y el campo magnético en el estator.
- Campo giratorio. El inducido se encuentra en el estator, y el campo magnético en el rotor.

Características de los generadores síncronos.

- Su salida es usualmente corriente alterna, en algunos casos se emplean rectificadores para obtener una salida de directa.
- Las estaciones emplean dos o más generadores en paralelo para suplir las demandas variantes de energía.
- Para generadores de alta frecuencia se emplean turbinas de vapor alimentadas por combustibles fósiles o fuentes de energía nuclear.
- Para generadores de baja frecuencia se emplean turbinas hidráulicas. [7]

## 2.2 Energía fotovoltaica.

El fundamento de la energía solar fotovoltaica es el efecto fotoeléctrico o fotovoltaico, que consiste en la conversión de la luz en electricidad. Este proceso se consigue con algunos materiales que tienen la propiedad de absorber fotones y emitir electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.

En 1.839, el físico francés Edmundo Becquerel fue el primero en constatar el efecto fotoeléctrico. Más tarde, Willoughby Smith en 1.873 y Lenard en 1.900 verifican su existencia bajo diferentes condiciones. En 1.921 Albert Einstein gana el Premio Nobel de Física gracias a un trabajo en el que se describe la naturaleza de la luz y el efecto fotoeléctrico y en el cual está basada la tecnología fotovoltaica. En 1.920 el físico norteamericano Millikan corroborará totalmente la teoría de Einstein. Sin embargo, fue en 1.954 cuando se construye el primer módulo fotovoltaico en los Laboratorios Bell y es tratado como un experimento científico ya que su coste era demasiado elevado para su utilización a gran escala.

Desde entonces, una sucesión de nuevos procesos industriales, junto con la expansión del mercado de consumo, han permitido una drástica reducción de los costes de producción de módulos. Las células fotovoltaicas están hechas con silicio, material semiconductor muy utilizado también en electrónica.

Para las células fotovoltaicas, una rejilla semiconductor recibe un tratamiento químico especial para formar un campo eléctrico, positivo en un lado y negativo en el otro. Cuando la luz solar incide en la célula, los electrones son desplazados del material semiconductor.

Si ponemos conductores eléctricos tanto del lado positivo como del negativo de la rejilla, formando un circuito eléctrico, los electrones pueden ser capturados en forma de electricidad.

Esta electricidad puede ser utilizada para suministrar energía a una carga, por ejemplo, para encender una bombilla. La conjunción de varias células conectadas eléctricamente entre si y montadas en una estructura de apoyo o marco, se llama módulo fotovoltaico.

Varios módulos pueden ser conectados unos con otros para formar un campo solar. Los módulos producen electricidad en corriente continua, pudiendo ser conectados en serie o en paralelo para conseguir el voltaje que se requiera.

Isofotón, empresa pionera en la fabricación de módulos fotovoltaicos, se dedica al desarrollo de tecnología fotovoltaica desde 1.981 y es en la actualidad el primer fabricante español y europeo y ocupa el séptimo lugar a nivel mundial.

La electricidad producida por los módulos se utiliza de diferentes formas según sea su aplicación. Los principales usos de la E.S.F. son la electrificación de lugares aislados de la red eléctrica (viviendas, sistemas de control remoto, telecomunicaciones, rótulos luminosos, farolas, embarcaciones, alarmas, etc.), el bombeo solar directo y la conexión a red.

Existen fundamentalmente dos tipos de aplicaciones de la energía solar fotovoltaica: instalaciones aisladas de la red eléctrica y centrales de generación conectadas a la red. [8]

## 2.3 Generadores eléctricos fotovoltaicos.

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de dispositivos cuya función es transformar la energía solar directamente en energía eléctrica, acondicionando esta última a los requerimientos de una aplicación determinada. Consta principalmente de los siguientes elementos:

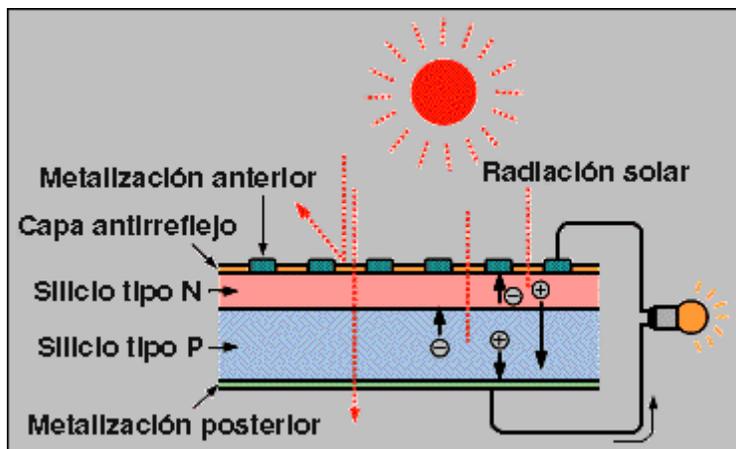
1. Arreglos de módulos de celdas solares.
2. Estructura y cimientos del arreglo.
3. Reguladores de voltaje y otros controles, típicamente un controlador de carga de batería, un inversor de corriente CD/CA o un rectificador CA/CD.
4. Baterías de almacenamiento eléctrico y recinto para ellas.
5. Instrumentos.
6. Cables e interruptores.
7. Red eléctrica circundante.
8. Cercado de seguridad, sin incluir las cargas eléctricas.

### 2.3.1 Funcionamiento del sistema fotovoltaico.

En un sistema típico, el proceso de funcionamiento es el siguiente: la luz solar incide sobre la superficie del arreglo fotovoltaico, donde es transformada en energía eléctrica de corriente directa por las celdas solares; esta energía es recogida y conducida hasta un controlador de carga, el cual tiene la función de enviar toda o parte de esta energía hasta el banco de baterías, en donde es almacenada, cuidando que no se excedan los límites de sobrecarga y sobre descarga; en algunos diseños, parte de esta energía es enviada directamente a las cargas.

La energía almacenada es utilizada para abastecer las cargas durante la noche o en días de baja insolación, o cuando el arreglo fotovoltaico es incapaz de satisfacer la demanda por sí solo. Si las cargas a alimentar son de corriente directa, esto puede hacerse directamente desde el arreglo fotovoltaico o desde la batería; si, en cambio, las cargas son de corriente alterna, la energía proveniente del arreglo y de las baterías, limitada por el controlador, es enviada a un inversor de corriente, el cual la convierte a corriente alterna.

### 2.3.2 ¿Cómo se produce la energía eléctrica fotovoltaica?



*Fig. 2.2 Proceso de generación de energía eléctrica fotovoltaica.*

La producción está basada en el fenómeno físico denominado "efecto fotovoltaico", que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de unos dispositivos semiconductores denominados células fotovoltaicas. Estas células están elaboradas a base de silicio puro (uno de los elementos más abundantes, componente principal de la arena) con adición de impurezas de ciertos elementos químicos (boro y fósforo), y son capaces de generar cada una corriente de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0,46 a 0,48 Voltios, utilizando como fuente la radiación luminosa. Las células se montan en serie sobre paneles o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado. Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión (rebota) y otra parte por transmisión (atraviesa la célula). El resto es capaz de hacer saltar electrones de una capa a la otra creando una corriente proporcional a la radiación incidente. La capa antirreflejo aumenta la eficacia de la célula.

### **2.3.3 Aplicaciones.**

Prácticamente cualquier aplicación que necesite electricidad para funcionar se puede alimentar con un sistema fotovoltaico adecuadamente dimensionado. La única limitación es el coste del equipo y, en algunas ocasiones, el tamaño del campo de paneles. No obstante, en lugares remotos alejados de la red de distribución eléctrica, lo más rentable suele ser instalar energía solar fotovoltaica antes que realizar el enganche a la red.

Entre las principales aplicaciones se incluyen: electrificación de viviendas, sistemas de bombeo y riego, iluminación de carreteras, repetidores de radio y televisión, depuradoras de aguas residuales, etc.

### **2.3.4 Mantenimiento de un sistema fotovoltaico.**

El mantenimiento de un sistema fotovoltaico será específico dependiendo directamente de cada uno de los componentes que se someterán a mantenimiento, por ejemplo:

- Paneles: requieren un mantenimiento nulo o muy escaso, debido a su propia configuración: no tienen partes móviles y las células y sus conexiones internas están encapsuladas en varias capas de material protector. Es conveniente hacer una inspección general 1 o 2 veces al año: asegurarse de que las conexiones entre paneles y al regulador están bien ajustadas y libres de corrosión. En la mayoría de los casos, la acción de la lluvia elimina la necesidad de limpieza de los paneles; en caso de ser necesario, simplemente utilizar agua y algún detergente no abrasivo.
- Regulador: la simplicidad del equipo de regulación reduce sustancialmente el mantenimiento y hace que las averías sean muy escasas. Las operaciones que se pueden realizar son las siguientes: observación visual del estado y funcionamiento del regulador; comprobación del conexionado y cableado del equipo; observación de los valores instantáneos del voltímetro y amperímetro: dan un índice del comportamiento de la instalación.
- Acumulador: es el elemento de la instalación que requiere una mayor atención; de su uso correcto y buen mantenimiento dependerá en gran medida su duración. [9]

## 2.4 Inversores fotovoltaicos.



*Fig. 2.3 Inversores fotovoltaicos.*

Las placas solares no son el único componente que debemos tener en cuenta cuando planificamos una instalación de energía solar. Los inversores fotovoltaicos desempeñan un papel igual de importante, ya que convierten la electricidad que generan los paneles solares para que puedan usarla los electrodomésticos, la iluminación y otros aparatos electrónicos que tenemos en casa.

### 2.4.1 ¿Cómo funcionan los inversores fotovoltaicos?

Cuando nuestras placas fotovoltaicas reciben la luz del sol, los electrones comienzan a moverse dentro de las células solares, lo que produce electricidad de corriente continua. Los circuitos dentro de las células fotovoltaicas recogen esa energía para que la usemos en nuestra casa.

Es aquí donde entra en juego el inversor solar. La mayoría de las viviendas usan electricidad de corriente alterna, no de corriente continua, por lo que la energía producida por las placas solares no es útil por sí misma.

Cuando los paneles solares recogen la luz solar y la convierten en energía, esta se envía al inversor, que recibe la electricidad de corriente continua y la convierte en corriente alterna.

Es entonces cuando la electricidad solar puede alimentar los electrodomésticos y los aparatos electrónicos o, si estamos produciendo más electricidad de la que necesitamos, almacenarla en baterías o podríamos verterla a la red eléctrica.

### 2.4.2 Funciones principales del inversor fotovoltaico.

1. Conversión de energía: El inversor solar fotovoltaico convierte corriente continua en corriente alterna, que es la utilizada por todos los aparatos eléctricos. Básicamente actúa como una pasarela entre corriente continua y corriente alterna.
2. Optimización de energía: Maximiza la generación de energía de las placas solares. Para ello, se aíslan los paneles individualmente con el fin de aumentar la producción de energía, y, por lo tanto, mejorar el rendimiento general de la instalación.
3. Seguimiento y protección: Un inversor solar realiza un seguimiento de los rendimientos energéticos del sistema fotovoltaico, de la actividad eléctrica y de las señales cuando surge problema. Esta información se puede ver en el propio

dispositivo o desde otra ubicación si se implementa la tecnología de comunicación adecuada y los servicios en línea.

4. Operación constante: Una instalación fotovoltaica está diseñada para proporcionar energía a la intemperie y en todas las condiciones climáticas. El inversor fotovoltaico ofrece una operación constante disipando el calor de una manera consistente.

### **2.4.3 Tipos de inversores fotovoltaicos.**

Todos los inversores fotovoltaicos tienen la misma tarea común: convertir la energía solar de corriente continua en energía de corriente alterna útil para nuestro hogar. Sin embargo, hay tres tecnologías diferentes de inversor que podemos elegir para nuestro sistema de placas solares, y cada uno de ellos funciona de manera sensiblemente diferente.

#### **2.4.3.1 Inversores String o de cadena.**

La mayoría de los sistemas de energía solar de pequeña escala utilizan un inversor de cadena, también conocido como inversor "centralizado". En una instalación de autoconsumo solar con un inversor de cadena, cada panel se conecta en serie. Cuando producen energía, se envía toda a un solo inversor, que normalmente se encuentra en un lateral de la casa, en el garaje o en el sótano. El inversor convierte toda la energía verde que generan tus paneles solares en electricidad que puedes usar en tu casa o empresa

- ✓ Pros: Los inversores de cadena son la opción de menor coste y son una tecnología más que contrastada. También son los de fácil mantenimiento, ya que se encuentran en lugares fácilmente accesibles.
- ✓ Contras: Si nuestro sistema utiliza un inversor string, sólo producirá tanta electricidad útil como el panel solar que menos produzca. La generación de electricidad en una instalación con un inversor string puede sufrir el efecto "cuello de botella", o verse reducida drásticamente, si sólo uno o dos de los paneles están con sombra o no están funcionando correctamente.
- ✓ Ideal para: Viviendas con cubiertas "sin obstáculos" que reciben radiación consistentemente durante todo el día, y para propietarios que buscan sistemas fotovoltaicos al menor coste.



*Fig. 2.4 Inversor fotovoltaico string o de cadena.*

### 2.4.3.2 Micro inversores.

Si un inversor string puede considerarse como un inversor "centralizado", los micro inversores son inversores "distribuidos". En las instalaciones fotovoltaicas con micro inversores cada placa solar tiene un pequeño inversor solar instalado. En lugar de enviar energía desde todos los paneles hasta un único inversor, los sistemas de micro inversores convierten la energía solar de corriente continua en energía de corriente alterna en la propia cubierta.

- ✓ Pros: Los micro inversores son más eficientes que los inversores string. Las instalaciones de placas solares que disfrutan de esta tecnología, siguen produciendo energía, incluso si uno o dos de los paneles del sistema tienen un rendimiento inferior. Los micro inversores también permiten supervisar el rendimiento de placas solares específicas, lo que facilita la identificación de problemas de producción si se diese el caso.
- ✓ Contras: Los micro inversores cuestan más que un inversor de cadena, y pueden ser más difíciles de mantener o reparar en caso de un problema, ya que se encuentran en la cubierta.
- ✓ Ideal para: Instalación con paneles solares con diferentes orientaciones, propietarios que quieren maximizar la producción de energía solar en un pequeño espacio, y viviendas que tienen cubiertas "complicadas" con frontones, chimeneas u otros objetos que pueden causar sombras.



*Fig. 2.5 Micro inversor.*

### 2.4.3.3 Optimizadores de potencia.

Los optimizadores de potencia pueden considerarse como un término medio entre los inversores de cadena y los micro inversores. Al igual que los micro inversores, los optimizadores de potencia se encuentran en el tejado junto a - o integrado con - las placas solares individuales. Sin embargo, los sistemas con optimizadores de potencia siguen enviando energía a un inversor centralizado.

Los optimizadores de energía no convierten la electricidad de corriente continua en corriente alterna en el sitio del panel solar. Más bien, "condicionan" la electricidad en corriente

continúa fijando el voltaje de la electricidad, en el momento que es enviada al inversor fotovoltaico. Una instalación de paneles solares con optimizadores de potencia es más eficiente que una que sólo usa un inversor de cadena.

- ✓ Pros: Al igual que los micro inversores, los optimizadores de potencia pueden mejorar la eficiencia de la instalación, y son menos costosos que los micro inversores. También ofrecen la ventaja de supervisar el rendimiento de cada panel solar individualmente, y reducir el efecto de las sombras en el rendimiento de la instalación.
  - ✓ Contras: Una instalación con optimizadores de potencia costará más que una instalación con un inversor de cadena.
  - ✓ Ideal para: Propietarios que están dispuestos a pagar más para aumentar la eficiencia de su sistema de paneles solares, pero que no quieren adquirir en micro inversores.
- [10]



*Fig. 2.6 Optimizador de potencia fotovoltaico.*

## **2.5 Baterías para energía solar fotovoltaica.**

Las baterías solares son un componente importantísimo en cualquier instalación aislada de energía fotovoltaica, ya que éstas son las que se encargarán de almacenar la energía para que pueda ser utilizada durante la noche o durante periodos prolongados de mal tiempo en los que no tengamos suficiente radiación solar.

Además, las baterías solares también son las encargadas de suministrar una intensidad de corriente superior a la que recibe el panel solar en sí para mejorar el rendimiento.



*Fig. 2.7 Batería de almacenamiento de energía solar fotovoltaica.*

### 2.5.1 Funcionamiento de las baterías solares fotovoltaicas.

Consiste en una o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada en electricidad. Cada celda consta de un electrodo positivo y un electrodo negativo y electrolitos que permiten que los iones se muevan entre los electrodos, facilitando que la corriente fluya fuera de la batería para llevar a cabo su función.

Durante el día el panel solar fotovoltaico recibe la radiación solar y la convierte en electricidad que a su vez es suministrada a la instalación. El excedente de energía de este consumo es almacenado en la batería o baterías que formen parte de la propia instalación y que se utilizará durante la noche o durante los días de poca generación de energía solar.

La capacidad de una batería solar para acumular energía depende directamente de la velocidad de descarga de la misma: a mayor tiempo de descarga, mayor es la cantidad de energía que la batería solar es capaz de generar.

La capacidad de una batería se suele dimensionar según criterios como tipo de uso, consumo diario, días de autonomía o potencia máxima de la instalación. [11]

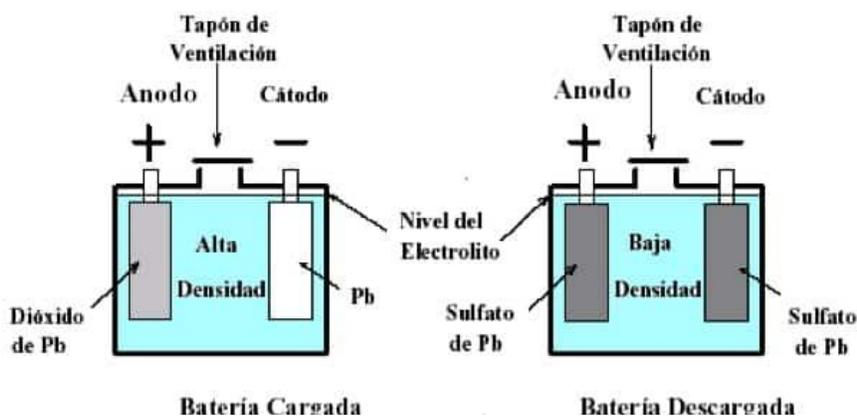


Fig. 2.8 Batería de almacenamiento de energía fotovoltaica cargada/descargada.

### 2.5.2 Clasificación de baterías de almacenamiento de energía fotovoltaica.

Hay dos tipos de batería según su ciclo:

- Baterías de ciclo bajo.
- Baterías de ciclo profundo.

Hay tres tipos de batería según su tecnología fabricación, así como de los electrolitos utilizados.

Las baterías más utilizadas en instalaciones solares son las ácido-plomo, por la relación de precio por energía disponible. Su eficiencia está entre un 85-95%, mientras que las Ni-Cad en un 65%.

Seguramente las mejores baterías serían las de litio (móvil) pero no son viables económicamente:

- Baterías de ácido-plomo para aplicaciones solares.
- Baterías líquidas - electrolito líquido.
- Baterías AGM - Absorption Glass Mat.

### 2.5.2.1 Baterías de ciclo bajo.

Las baterías de ciclo bajo están diseñadas para suplir una cantidad de corriente por un corto período de tiempo y soportar pequeñas sobrecargas sin perder electrolitos, como en el caso de las de automóviles.

Sin embargo, estas baterías no soportan descargas profundas. Si son descargadas repetidamente por debajo del 20%, se acorta su vida útil considerablemente. Por lo tanto, estas baterías no son una buena elección para sistemas solares fotovoltaicos.



*Fig. 2.9 Batería de almacenamiento de energía fotovoltaica de ciclo bajo.*

### 2.5.2.2 Baterías de ciclo profundo.

Están diseñadas para ser descargadas repetidamente hasta un 80% de su capacidad. Esta característica las convierte en la mejor opción para sistemas de energía solar.



*Fig. 2.10 Batería de almacenamiento de energía fotovoltaica de ciclo profundo.*

### **2.5.2.3 Baterías de ácido-plomo para aplicaciones solares.**

Todas las baterías de ácido-plomo fallan prematuramente cuando no son recargadas completamente después de cada ciclo. Si una batería de ácido-plomo se deja descargada (durante días) en algún momento, esto provocará una pérdida permanente de su capacidad.

### **2.5.2.4 Baterías líquidas-electrolito líquido.**

Son las más usadas. Hay dos tipos de baterías líquidas: de forma abierta, con tapas que permiten el cambio del agua. De forma sellada, que son cerradas, pero con válvulas que permiten las salidas de los posibles gases durante cargas excesivas.

- Ventajas de las baterías líquidas:
  - ✓ Las más antiguas
  - ✓ Su producción permite precios económicos.
  - ✓ Son menos problemáticas a las sobrecargas.
  
- Desventajas:
  - ✓ Existe el peligro de perder líquido (agresivo).
  - ✓ Suelen tener una vida útil corta, entre 400 ciclos de carga y descarga.
  - ✓ Temperaturas muy bajas pueden destruirlas rápidamente.

### **2.5.2.5 Baterías AGM - Absortion Glass Mat.**

Son las baterías más modernas y el ácido está fijado en fibras de vidrio que lo absorbe.

Casi todas las baterías AGM son de válvula regulada, VRLA (valve regulated lead acid).

Tienen todas las ventajas de las del hiello, además de los siguientes:

- Ventajas:
  - ✓ Buena vida útil.
  - ✓ Más resistencia a climas fríos.
  - ✓ Su auto descarga es mínima.
  - ✓ Baja resistencia interna que permite corrientes altas.
  - ✓ De ciclo profundo.
  
- Desventajas:
  - ✓ Precio más elevado. [12]

## **2.6 Estabilidad de voltaje, ángulo de fase y frecuencia.**

### **2.6.1 Estabilidad de voltaje.**

Es la propiedad que posee un sistema de potencia para mantener los voltajes en estado estacionario en todos los buses después de haber sido sometido a una perturbación. Esto se manifiesta como una inestabilidad se manifiesta como un aumento/disminución progresivo del voltaje en uno o varios buses.

Hay determinados eventos que pueden conducir inestabilidad de voltaje en el sistema, como:

- Pérdida de carga en un área o región.
- Disparo de líneas de transmisión u otros elementos que conduzcan a salidas en cascada.
- Pérdida de sincronismo de algunos generadores como resultado de la salida de estos elementos o una condición de operación que viole los límites de la corriente de campo.

También hay motivos principales para generar inestabilidad de voltaje (usualmente cargas), como:

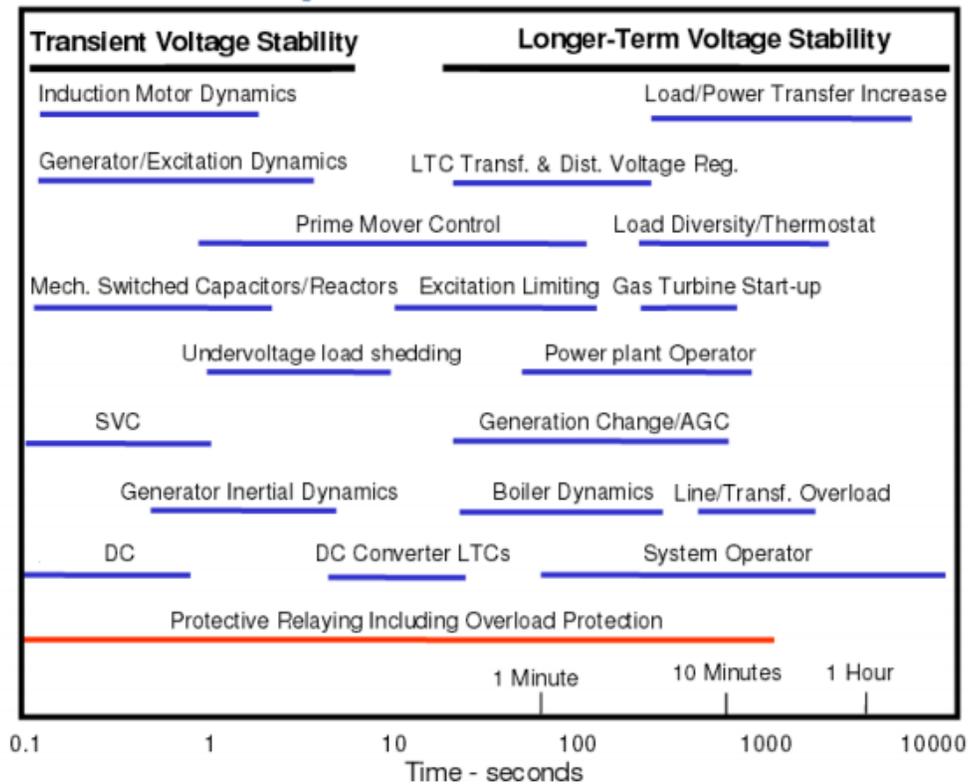
- La potencia consumida por las cargas es restablecida por:
  1. Reguladores de voltaje en los sistemas de distribución.
  2. Transformadores con de tap.
  3. Cargas controladas por termostato.
- La inestabilidad de tensión se produce cuando la dinámica de la carga intenta restaurar el consumo de energía más allá de la capacidad de la red de transmisión y la generación conectada.

En este fenómeno se involucran pequeñas y grandes perturbaciones en escalas de tiempo grandes y/o pequeñas:

- Corto plazo: Se involucran cargas rápidas, como:
  1. Motores de inducción.
  2. Cargas electrónicamente controladas.
  3. Convertidores estáticos.
- Largo plazo: Se involucran los equipos de respuesta lenta, como:
  1. Transformadores con cambio de tap.
  2. Cargas controladas por termostato.
  3. Cargas controladas por termostato.
  4. Limitadores de corriente en generadores.

La inestabilidad es debida a la pérdida de equilibrio de largo periodo. En muchos casos, el análisis estático puede ser utilizado.

En la siguiente gráfica se muestran los diferentes acontecimientos que se ven inmersos en el fenómeno. [13]

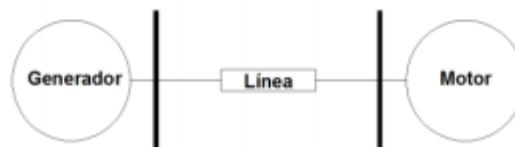


*Fig. 2.11 Escalas de tiempo del fenómeno.*

### 2.6.2 Relación entre potencia y ángulo.

La relación entre la potencia y ángulo es altamente no lineal. Esta es una de las características más importantes para la realización de estudios dinámicos de estabilidad.

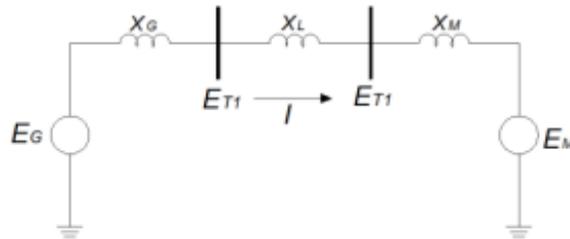
La *Fig. 2.11* presenta un sistema formado por dos máquinas interconectadas por medio de una línea de transmisión, este es un sistema básico que nos servirán para estudiar la relación potencia ángulo.



*Fig. 2.12 Diagrama unifilar de un sistema de potencia simple.*

La potencia suministrada por el generador y que alimenta al motor está en función de la separación angular  $\delta$  entre los rotores de ambas máquinas.

En la **Fig. 2.12** se muestra el circuito equivalente del sistema de la **Fig.2.10**.



**Fig. 2.13** Diagrama unifilar de un sistema de potencia simple.

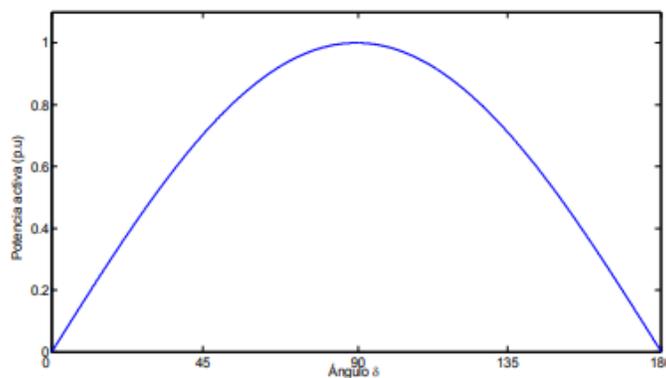
La potencia por fase transferida desde el generador al motor (P) viene dada por la siguiente expresión:

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta$$

Dónde:

$$X_T = X_G + X_L + X_M$$

En el **Fig. 2.13** se muestra la relación potencia-ángulo que viene de la ecuación de P.



**Fig. 2.14** Relación potencia y ángulo.

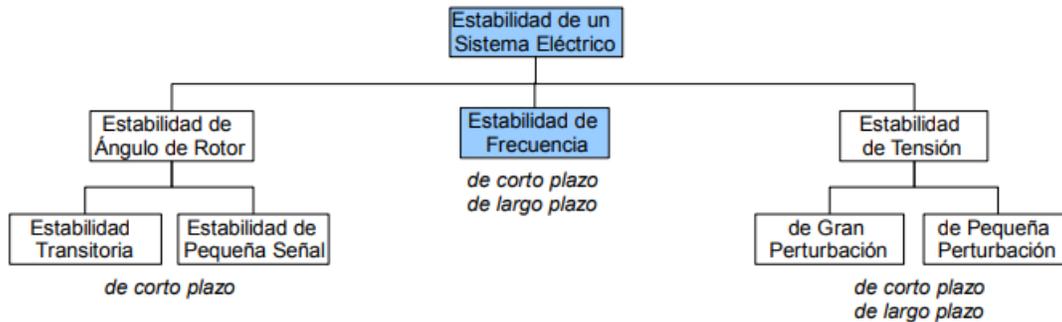
La relación entre la potencia y el ángulo es altamente no lineal y depende del seno del ángulo del rotor  $\delta$ .

Cuando el ángulo  $\delta$  es cero no existe transferencia de potencia. La potencia máxima transferida se produce cuando  $\delta$  es igual a  $90^\circ$  en este punto la magnitud de la máxima potencia es directamente proporcional a los voltajes internos de las máquinas e inversamente proporcional a la reactancia equivalente (reactancia de la línea y de las máquinas) entre los

voltajes (ecuación de P). Esta curva determina los límites máximos de potencia a la que la maquina puede llegar manteniendo un punto de operación aceptable. [14]

### 2.6.3 Estabilidad de frecuencia.

La estabilidad en frecuencia es la habilidad de un sistema eléctrico de potencia, de restablecer la frecuencia luego de una perturbación severa de desbalance entre generación y carga.



*Fig. 2.15 Clasificación CIGRÉ de estabilidad.*

La estabilidad en frecuencia depende de la habilidad de mantener o restablecer el balance entre generación y carga, con mínima pérdida de carga. La pérdida de carga es un hecho indeseado, pero en muchos casos necesario e inevitable a la hora de preservar el resto del sistema eléctrico.

Este tipo de situaciones puede llevar a la separación del sistema en islas (subsistemas independientes) que deben lograr cada una un estado de equilibrio estable con mínima pérdida de carga, equilibrio que queda evidenciado por el comportamiento de la frecuencia promedio de cada isla.

Generalmente, los problemas de estabilidad en frecuencia están asociados a inadecuada respuesta de los equipos, coordinación insuficiente de los controles y protecciones o insuficiente reserva de generación.

Los problemas de estabilidad en frecuencia pueden involucrar tiempos de segundos o fracciones de segundos (fenómenos de corto plazo) como el disparo por subfrecuencia y los controles de los generadores y protecciones.

O pueden involucrar tiempos del orden de decenas de segundo y hasta varios minutos (fenómenos de largo plazo) como los relacionados a las plantas motrices de los generadores (turbinas, calderas, etc.) y los reguladores de tensión.

La inestabilidad en frecuencia de corto plazo, puede llevar a apagones en cuestión de segundos en el sistema, en una o varias islas. [15]

Perturbaciones tan severas que producen grandes variaciones de frecuencia, de tensión y de los flujos de potencia, activando la actuación de sistemas de protección y de control y la acción de procesos lentos, que normalmente no son modelados en los estudios de estabilidad transitoria.

La estabilidad de frecuencia se relaciona con la habilidad para mantener una frecuencia de estado estacionario aceptable luego de una perturbación severa que produzca un desbalance importante entre carga y generación. [16]

### 3. Desarrollo.

#### 3.1 Diseño de red de transmisión en MATLAB pstv3.

Para el diseño de la red de transmisión se emplearon determinados datos, como el número de buses, potencia real, reactiva y aparente, así como algunos elementos de cargas distribuidos en diferentes puntos de la red, y principalmente, se habla de elementos de generación y de buses los cuales se clasifican de la siguiente manera: de carga, slack y de generación.

Condiciones de la red de transmisión. la red está implementada por cinco generadores, de los cuales uno de ellos es un bus slack, el cual podríamos decir que está conectado a un bus infinito o slack ya que se dirige a una red mucho más grande a la que se analizará posteriormente, asimismo, este bus absorbe las cargas de toda la red con mayor facilidad, también se tienen 4 buses de generación, que en comparación con el generador conectado al bus infinito o slack son sumamente pequeños. Entonces, tomando como referencia esto, se tiene que hay 4 buses de generación (porque tienen conectado generadores), hay un bus slack, el cual tiene conectado un generador mucho más grande que los otros cuatro buses, podríamos decir que es un bus infinito, y se tienen cinco buses más que son de carga, los cuales están diseñados para hacer la transferencia de un bus a otro y suministrar. Estos datos fueron tomados de las siguientes tablas implementadas en MATLAB pstv3:

|    |    |      |      |       |     |     |     |      |
|----|----|------|------|-------|-----|-----|-----|------|
| 1  | 2  | 0.08 | 0.6  | 0.025 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 1  | 2  | 0.08 | 0.6  | 0.025 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 2  | 4  | 0.08 | 0.4  | 0.100 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 2  | 4  | 0.08 | 0.4  | 0.100 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 4  | 7  | 0.08 | 0.4  | 0.100 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 4  | 7  | 0.08 | 0.4  | 0.100 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 4  | 10 | 0.08 | 0.4  | 0.100 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 4  | 10 | 0.08 | 0.4  | 0.100 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 4  | 10 | 0.08 | 0.4  | 0.100 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 4  | 10 | 0.08 | 0.4  | 0.100 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 5  | 7  | 0.08 | 0.4  | 0.100 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 5  | 7  | 0.08 | 0.4  | 0.100 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 2  | 3  | 0.02 | 0.12 | 0.00  | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 5  | 6  | 0.01 | 0.06 | 0.00  | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 10 | 11 | 0.02 | 0.12 | 0.00  | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |
| 10 | 12 | 0.02 | 0.12 | 0.00  | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0; |

*Tabla 3.1 Datos de las líneas de transmisión y cargas de las mismas.*

Donde las columnas respectivas de la tabla significan:

Columna 1. Bus del que proviene.

Columna 2. Bus al que se dirige.

Columna 3. Resistencia de la línea de transmisión.

Columna 4. Reactancia de la línea de transmisión.

Columna 5. Susceptancia capacitiva de la línea de transmisión.

Columna 6. Tap ratio de la línea de transmisión.

|    |        |          |        |         |        |        |      |      |     |
|----|--------|----------|--------|---------|--------|--------|------|------|-----|
| 1  | 1.0500 | 0.000000 | 0.5233 | -0.0206 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.00 | 1;  |
| 2  | 1.0388 | -8.26050 | 0.0000 | 0.00000 | 1.0000 | 0.2500 | 0.00 | 0.00 | 3;  |
| 3  | 1.0500 | -1.99280 | 1.0000 | 0.16240 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.00 | 2;  |
| 4  | 1.0500 | -13.7438 | 0.0000 | 0.26800 | 1.0000 | 0.2500 | 0.00 | 0.00 | 2;  |
| 5  | 1.0683 | 1.477600 | 0.0000 | 0.00000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.00 | 3;  |
| 6  | 1.0500 | 4.334300 | 0.9000 | -0.0808 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.00 | 2;  |
| 7  | 1.0504 | -7.69940 | 0.0000 | 0.00000 | 0.3000 | 0.1500 | 0.00 | 0.00 | 3;  |
| 10 | 1.0360 | -13.7967 | 0.0000 | 0.00000 | 2.0000 | 0.5000 | 0.00 | 0.00 | 3;  |
| 11 | 1.0500 | -7.53770 | 1.0000 | 0.18650 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.00 | 2;  |
| 12 | 1.0500 | -7.53770 | 1.0000 | 0.18650 | 0.0000 | 0.0000 | 0.00 | 0.00 | 2]; |

**Tabla 3.2** Datos de los buses de la red de transmisión.

Donde las columnas respectivas de la tabla significan:

Columna 1. Número de bus.

Columna 2. Magnitud de voltaje (en por unidad).

Columna 3. Ángulo de voltaje (en grados).

Columna 4. Potencia real generada (en por unidad).

Columna 5. Potencia reactiva generada (en por unidad).

Columna 6. Potencia real de la carga (en por unidad).

Columna 7. Potencia reactiva de la carga (en por unidad).

Columna 10. Tipo de bus.

Dónde:

1 = Bus slack.

2 = Bus de generación.

3 = Bus de carga.

Asimismo, los datos de las máquinas funcionales en la red de transmisión son los siguientes.

|   |    |     |       |       |       |       |       |         |         |
|---|----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|
| 1 | 1  | 300 | 0.000 | 0.00  | 1.000 | 0.150 | 0.120 | 3.000   | 0.02... |
|   |    |     |       |       | 1.000 | 0.300 | 0.120 | 0.500   | 0.02... |
|   |    |     |       |       | 500.0 | 0.000 | 0.000 | 1.000;  |         |
| 2 | 3  | 115 | 0.000 | 0.004 | 1.920 | 0.362 | 0.120 | 5.690   | 0.02... |
|   |    |     |       |       | 1.900 | 1.000 | 0.120 | 1.500   | 0.02... |
|   |    |     |       |       | 2.700 | 0.000 | 0.000 | 3.000;  |         |
| 3 | 11 | 115 | 0.000 | 0.002 | 1.720 | 0.263 | 0.120 | 4.120   | 0.02... |
|   |    |     |       |       | 1.640 | 0.467 | 0.120 | 1.475   | 0.02... |
|   |    |     |       |       | 1.600 | 0.000 | 0.000 | 11.00;  |         |
| 4 | 12 | 115 | 0.000 | 0.002 | 1.670 | 0.364 | 0.120 | 7.800   | 0.02... |
|   |    |     |       |       | 1.610 | 0.536 | 0.120 | 1.388   | 0.02... |
|   |    |     |       |       | 6.100 | 0.000 | 0.000 | 12.00;  |         |
| 5 | 6  | 175 | 0.000 | 0.002 | 1.216 | 0.336 | 0.120 | 10.00   | 0.02... |
|   |    |     |       |       | 0.756 | 0.336 | 0.120 | 2.000   | 0.02... |
|   |    |     |       |       | 7.400 | 0.000 | 0.000 | 6.000;  |         |
| 6 | 4  | 150 | 0.000 | 0.002 | 1.000 | 0.350 | 0.120 | 5.000   | 0.02... |
|   |    |     |       |       | 0.750 | 0.350 | 0.120 | 2.000   | 0.02... |
|   |    |     |       |       | 2.000 | 0.000 | 0.000 | 4.000]; |         |

**Tabla 3.3** Datos de las máquinas de generación.

Tomando en cuenta la lectura de los datos de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, y que cada máquina trabaja con 19 datos específicos, podemos interpretar los datos de cada máquina de la siguiente manera:

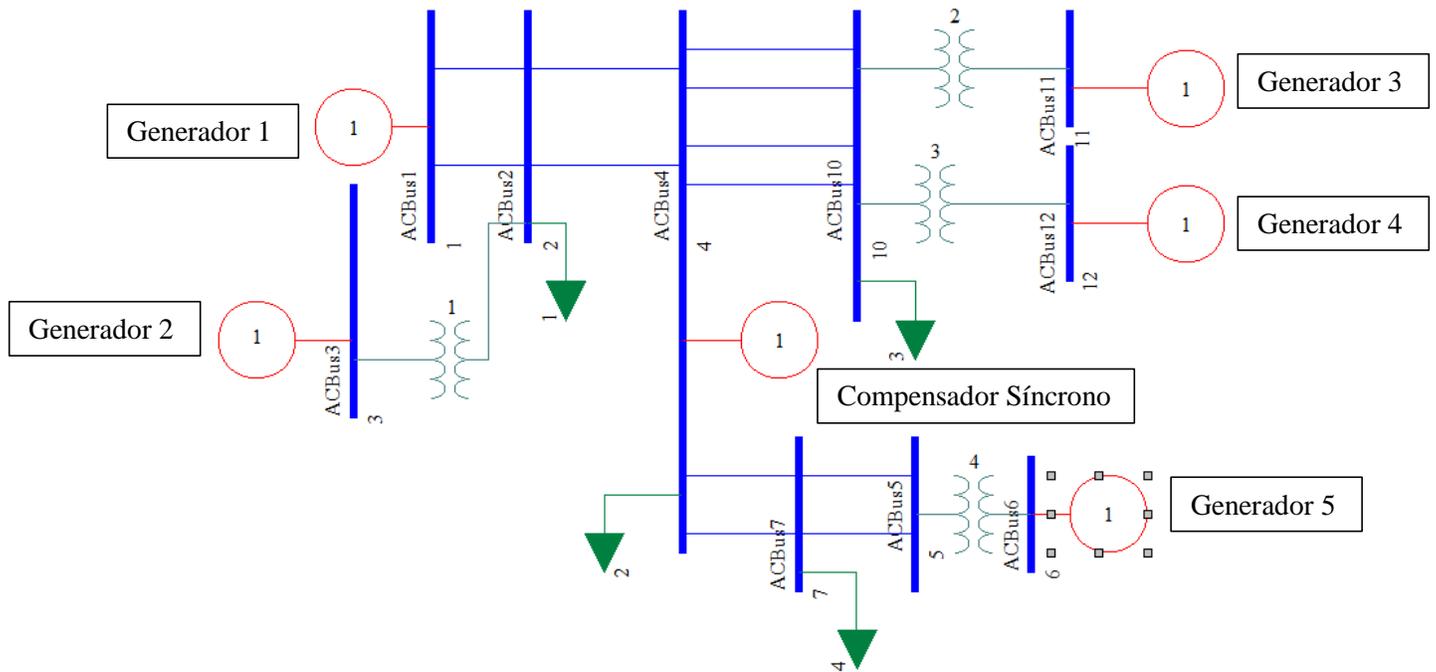
1. Número de máquina.
2. Número de bus al que está conectada la máquina.
3. MVAs base de la máquina.
4. Fugas de reactancia  $x_l$  (en por unidad).
5. Resistencia  $r_a$  (en por unidad).
6. Reactancia síncrona del eje directo  $x_d$  (en por unidad).
7. Reactancia transitoria del eje directo  $x_d'$  (en por unidad).
8. Reactancia subtransitoria del eje directo  $x_d''$  (en por unidad).
9. Constante de tiempo de apertura del circuito del eje directo  $T_{d0}'$  (segundos).
10. Constante de tiempo de apertura del circuito subtransitorio del eje directo  $T_{d0}''$  (segundos).
11. Reactancia síncrona del eje en cuadratura  $x_q$  (en por unidad).
12. Reactancia transitoria del eje en cuadratura  $x_q'$  (en por unidad).
13. Reactancia subtransitoria del eje en cuadratura  $x_q''$  (en por unidad).
14. Constante de tiempo de apertura del circuito del eje en cuadratura  $T_{q0}'$  (segundos).
15. Constante de tiempo de apertura del circuito subtransitorio del eje en cuadratura  $T_{q0}''$  (segundos).

16. Constante de inercia H (segundos).
17. Coeficiente de amortiguamiento  $d_0$  (en por unidad).
18. Coeficiente de amortiguamiento  $d_1$  (en por unidad).
19. Número de bus al que se conecta.

Cabe hacer mención que algunos datos se modificaron a conveniencia del programa comercial PSCAD debido a los parámetros tan limitados que este utiliza.

### 3.2 Diseño de la red en PSAT y TSAT.

Con base a todos los datos proporcionados se diseñó una red, y así los datos fueron llevados a un programa comercial, PSAT y TSAT, para su respectivo análisis detallado. Cabe hacer mención que en el bus de carga 4 se tiene un compensador síncrono, el cual es capaz de hacer una función similar a la de un capacitor en circuitos electrónicos.



*Fig. 3.1 Diagrama generado para simulación en PSAT.*

### 3.3 Diseño de la red en PSCAD.

De la misma manera estos datos fueron implementados con pequeñas variaciones, así como la implementación de dos transformadores en el programa comercial PSCAD, para su análisis en paralelo con PSAT, y obtener resultados desde otro punto de vista.

Para llevar a cabo el objetivo principal de este proyecto, el generador con conexión al bus 1, tuvo un cambio, ya que se sustituyó por un generador fotovoltaico, para ver el impacto que la generación fotovoltaica tiene en la red de transmisión. Los datos por cuestiones de confidencialidad del Dr. Arturo Román Messina no se pueden dar a conocer.

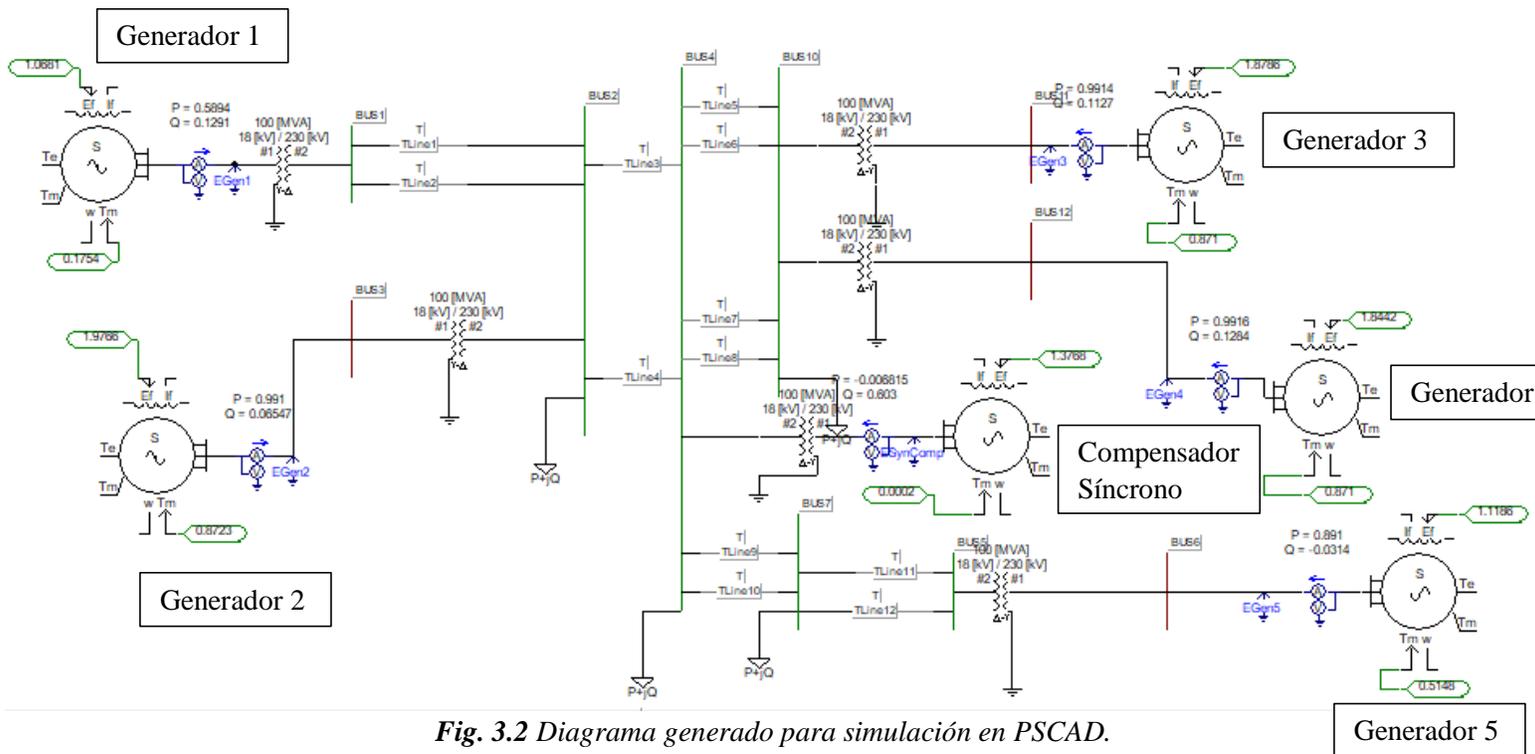


Fig. 3.2 Diagrama generado para simulación en PSCAD.

## 4. Resultados y Conclusiones.

### 4.1 Implementación de datos y obtención de datos en MATLAB psv3.

Al implementar los datos de la *Tabla 3.1*, *Tabla 3.2* y *Tabla 3.3* pudimos obtener los siguientes datos de par mecánico (torque), voltajes de excitación, magnitudes de voltaje y ángulos de voltaje de los buses, estos datos como se mencionó en el desarrollo fueron modificados a conveniencia del programa PSCAD y así obtener un criterio a los valores cercanos. Aclarando un detalle, en la *Tabla 3.2* se pueden observar los datos de los buses, pero, al obtener los valores ciertos en MATLAB psv3, estos nuevos datos se tienen que implementar nuevamente en PSCAD a los valores de los buses. (Cabe hacer mención para futuras referencias que los generadores están ubicados en las siguientes posiciones: el generador 1 está ubicado en la esquina superior izquierda, el generador 2 en la esquina inferior izquierda, el generador 3 en la esquina superior derecha, el generador 5 en la esquina inferior derecha, y finalmente el generador 4 ubicado entre los últimos dos ya mencionados).

Los datos obtenidos fueron los siguientes:

#### 4.1.1 Voltajes de excitación.

Los voltajes de excitación de cada una de las máquinas síncronas son indispensables, ya que sin ellos las máquinas no consiguen la estabilidad necesaria en el tiempo que es requerido, y por tanto el sistema ni siquiera estaría en condiciones correctas.

| <b>Vex (por unidad)</b> |
|-------------------------|
| 1.06806428896380 p.u.   |
| 1.97655074570582 p.u.   |
| 1.87855215899086 p.u.   |
| 1.84417423687640 p.u.   |
| 1.11855119846087 p.u.   |
| 1.37681691354436 p.u.   |

*Tabla 4.1 Voltajes de excitación de las máquinas de generación.*

Por uso de decimales decidí truncar el resultado, quedando así con cuatro decimales. Cabe recalcar que los voltajes de excitación están en orden (de la máquina 1 a la máquina 5), siendo el último valor expresado el valor del voltaje de excitación del compensador síncrono.

#### 4.1.2 Par mecánico.

De la misma manera, el par mecánico es necesario en cada una de las máquinas para que éstas funcionen en su estado óptimo, por lo que fue necesario su cálculo a través de MATLAB pstv3, y se obtuvieron los siguientes datos:

| <b>Tm (por unidad)</b>    |
|---------------------------|
| 0.175370864344273 p.u.    |
| 0.872324518825720 p.u.    |
| 0.870957351155571 p.u.    |
| 0.870957351155571 p.u.    |
| 0.514773883832025 p.u.    |
| 0.000213618388014589 p.u. |

*Tabla 4.2 Par mecánico de las máquinas de generación.*

Por uso de decimales, de igual forma, el resultado decidí truncarlo, para hacer uso únicamente de cuatro decimales en la implementación de los datos en PSCAD, el orden de los datos es el mismo que en Vex (de la máquina 1 a la máquina 5), siendo el último valor expresado el valor del par mecánico del compensador síncrono.

#### 4.1.3 Magnitudes de voltaje y ángulos de voltaje de los buses.

Como ya mencioné con anterioridad, los datos que se implementaron para el programa de MATLAB pstv3, no son los mismos que los que se tienen que implementar en PSCAD, por lo que esos datos varían al obtener los resultados en la simulación de flujos.

| <b>Número de bus</b> | <b>Magnitud de voltaje (p.u.)</b> | <b>Ángulo de voltaje (grados)</b> |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1                    | 1.05000000000000 p.u.             | 0°                                |
| 2                    | 1.02845394559155 p.u.             | -8.31200565552677°                |
| 3                    | 1.05000000000000 p.u.             | -2.01324526017664°                |
| 4                    | 1.05000000000000 p.u.             | -13.9934112615278°                |
| 5                    | 1.04953790807318 p.u.             | 1.73493539069063°                 |
| 6                    | 1.05000000000000 p.u.             | 4.60549671921580°                 |
| 7                    | 1.04007026483315 p.u.             | -7.79075519189871°                |
| 10                   | 1.02314407345302 p.u.             | -13.9045713227977°                |

|    |                       |                    |
|----|-----------------------|--------------------|
| 11 | 1.05000000000000 p.u. | -7.62224588909553° |
| 12 | 1.05000000000000 p.u. | -7.62224588909553° |

*Tabla 4.3 Magnitud y ángulo de voltaje de los buses.*

De manera similar a las tablas anteriores los datos de magnitud de voltaje y ángulo de voltaje se vieron truncados hasta 4 decimales por uso adecuado en PSCAD.

#### 4.1.4 Potencia generada de los buses.

De igual manera, se tienen que implementar las potencias generadas en cada uno de los generadores con base a los buses que estos están conectados, por lo que al obtener estos datos de la solución de los buses tenemos:

| Número de generador  | Potencia real generada (MW) | Potencia reactiva generada (MVA) |
|----------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 1                    | 0.5261                      | 0.01551                          |
| 2                    | 1.0000                      | -0.1188                          |
| 3                    | 1.0000                      | 0.1220                           |
| 4                    | 1.0000                      | 0.1220                           |
| 5                    | 0.9000                      | -0.1188                          |
| Compensador Síncrono | 1.1635e-13                  | 0.5147                           |

*Tabla 4.4 Potencia de generada por los generadores con relación de los buses.*

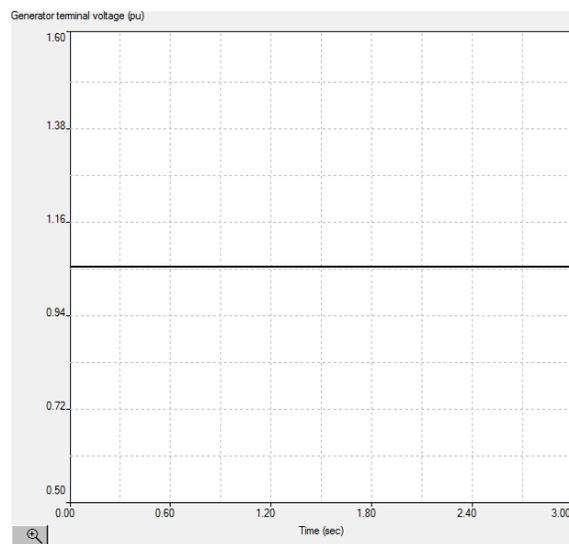
Los datos que nos brinda la tabla de solución de los buses está en una base diferente a la que trabaja PSCAD, por lo que se tendrá que hacer el cálculo multiplicando por cien.

| Número de generador  | Potencia real generada (MW) | Potencia reactiva generada (MVA) |
|----------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 1                    | 52.6100 MW                  | 1.55100 MVA                      |
| 2                    | 100.0000 MW                 | -11.8800 MVA                     |
| 3                    | 100.0000 MW                 | 12.2000 MVA                      |
| 4                    | 100.0000 MW                 | 12.2000 MVA                      |
| 5                    | 90.0000 MW                  | -11.8800 MVA                     |
| Compensador Síncrono | 1.1635e-10 MW               | 51.4700 MVA                      |

*Tabla 4.5 Potencia de generada por los generadores con relación de los buses (no base cien).*

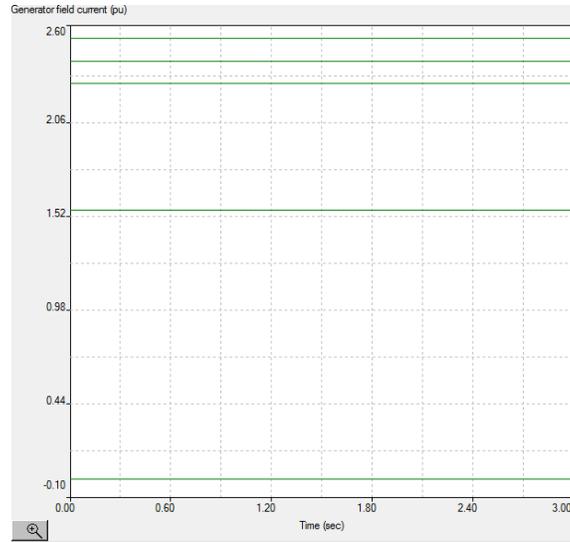
## 4.2 Resultados de la red de transmisión con PSAT y TSAT.

Al analizar los resultados obtenidos en PSAT y TSAT, con base a los datos que se ingresaron al mismo, pude obtener los siguientes resultados respecto a voltajes en terminales, potencia activa, potencia reactiva y corrientes de campo.



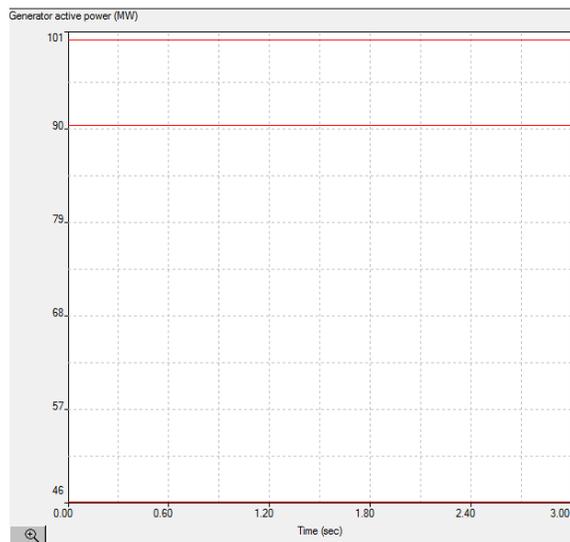
**Fig. 4.1** Gráfico generado a través de PSAT, voltajes en terminales.

Como podemos observar en el gráfico de la **Fig. 4.1** podemos ver que los voltajes en cada una de las diferentes terminales no se ven perjudicados por ningún efecto secundario, y se mantienen estables en cada uno de sus diferentes puntos de generación, por lo que podemos decir que la red está en estado óptimo.

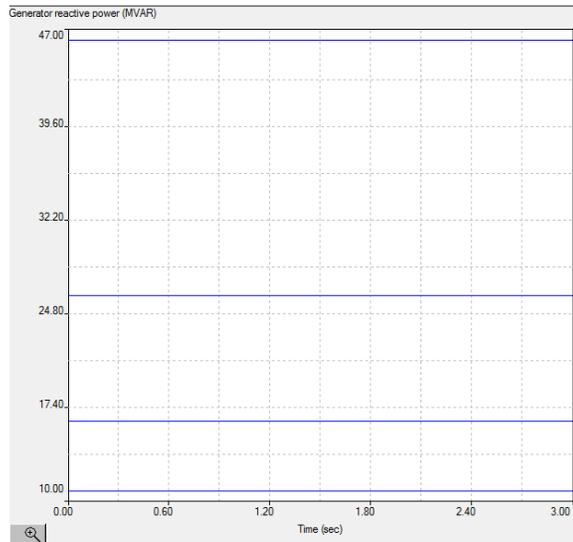


**Fig. 4.2** Gráfico generado a través de PSAT, corrientes de campo de los generadores.

Las corrientes, de la misma manera que los voltajes no se ven bajo ningún efecto que pueda perjudicar que estos estén estables, como podemos observar las corrientes de campo de los generadores, son estables.



**Fig. 4.3** Gráfico generado a través de PSAT, potencia activa en los generadores.



**Fig. 4.4** Gráfico generado a través de PSAT, potencia reactiva en los generadores.

De la misma manera en la que se analizan los voltajes y las corrientes de campo en cada una de las terminales, podemos analizar las potencias generadas en cada uno de los diferentes puntos de generación, en este caso, podemos observar que de la misma manera en la que se comportan los voltajes de terminales y las corrientes de campo, las potencias activas y reactivas se ven de manera estable, debido a que la red está en estado óptimo y que esta misma es producto de los dos valores analizados anteriormente en la **Fig. 4.2** y **Fig. 4.3**.

### **4.3 Resultados de la red de transmisión con PSCAD.**

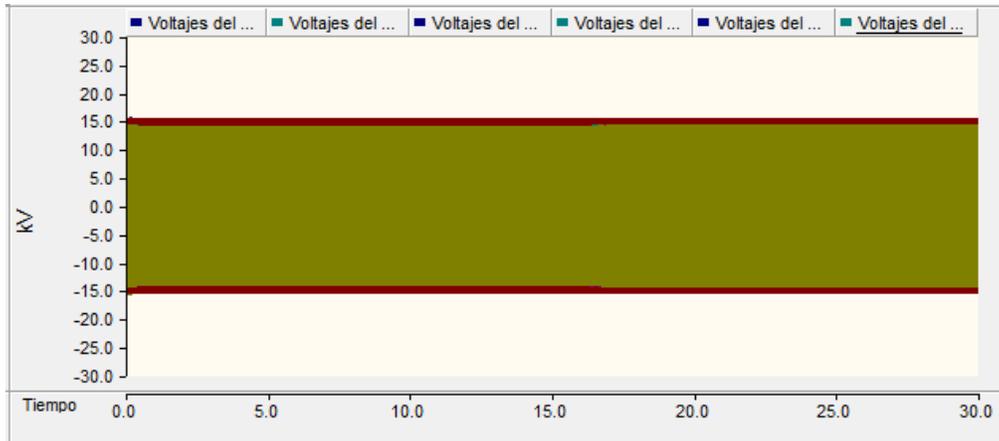
Como mencioné con anterioridad, utilicé dos diferentes programas comerciales para el análisis de los diversos valores que se pueden obtener, de la misma manera, se analicé los voltajes, potencias activas, potencias reactivas, corrientes y los ángulos de fase de cada uno de los generadores, pero, de manera trifásica más detallada.

#### **4.3.1 Voltajes de los generadores.**

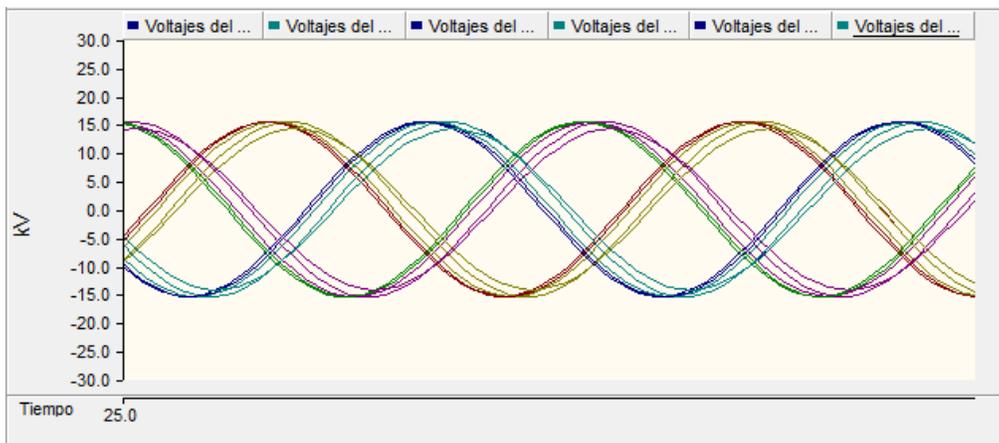
Los voltajes de los generadores se mantienen estables en los 15 kV – -15 kV, todos los voltajes de la red de transmisión analizada son estables, por lo que podemos decir que la red está en estado óptimo. Incluso, dentro de los gráficos de simulación, podemos observar el comportamiento del compensador síncrono.

Todos los voltajes utilizados para la simulación fueron implementados arbitrariamente, ya que era uno de los pocos datos que se desconocía. Pero, posteriormente pude confirmar que ese voltaje sí era el ideal para el funcionamiento óptimo de todas y cada una de los generadores síncronos y del compensador síncrono implementado.

A continuación, podemos observar el comportamiento de todos los generadores de la red en el tiempo de simulación máximo en la **Fig. 4.5** (0 - 30 segundos), y posteriormente se mostrarán los gráficos más a detalle en periodos de tiempo menores en la **Fig. 4.6** (25.00 – 25.03 segundos).

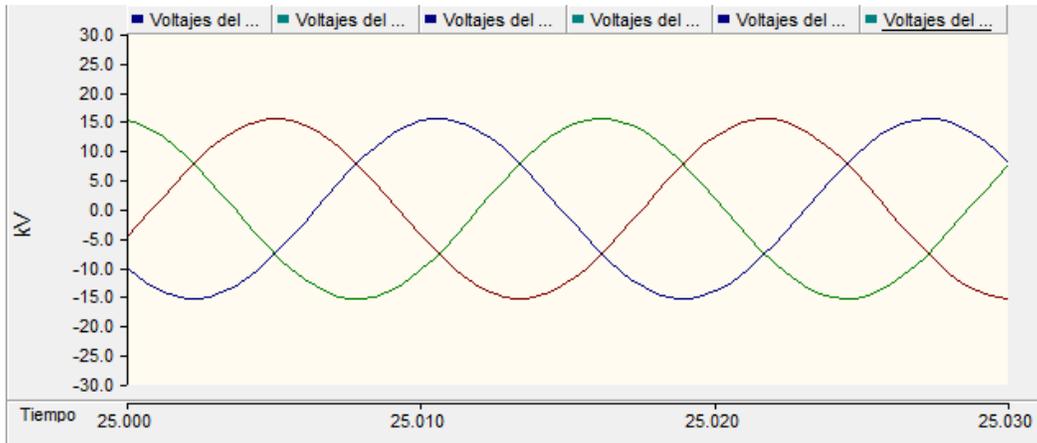


**Fig. 4.5** Voltajes de los generadores y compensador síncrono (Vista general).

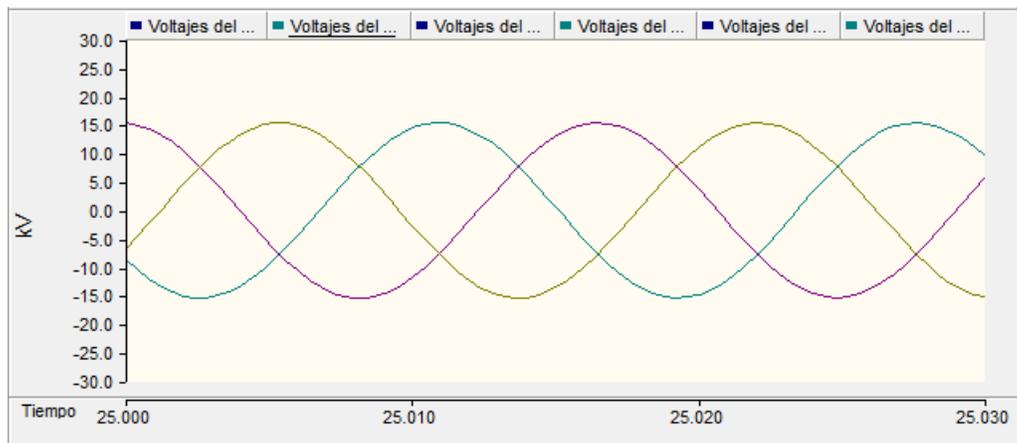


**Fig. 4.6** Voltajes de los generadores y compensador síncrono (Vista detallada).

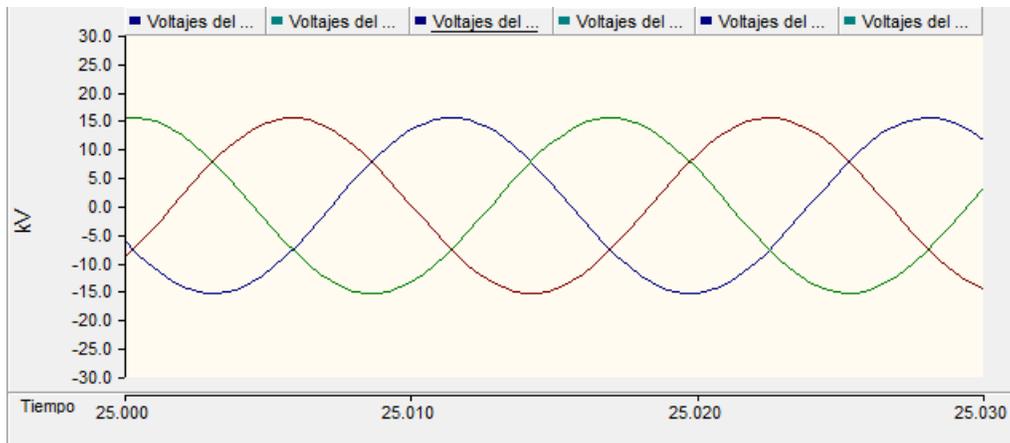
Asimismo, los voltajes de cada uno de los generadores pueden ser analizados individualmente como se muestran a continuación.



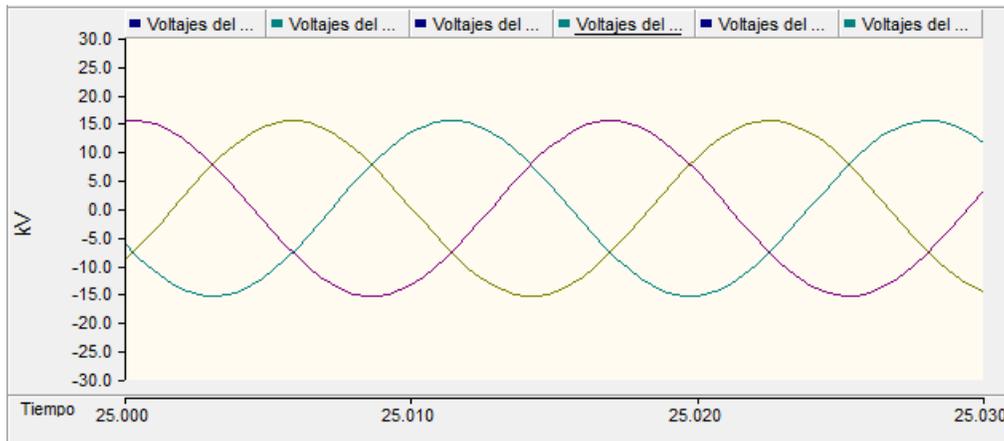
**Fig. 4.7** Voltaje del generador 1 (Vista detallada).



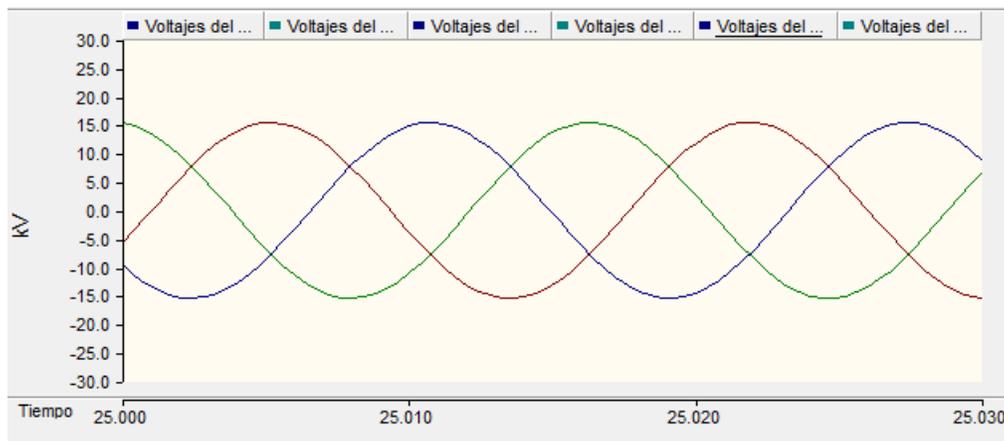
**Fig. 4.7** Voltaje del generador 2 (Vista detallada).



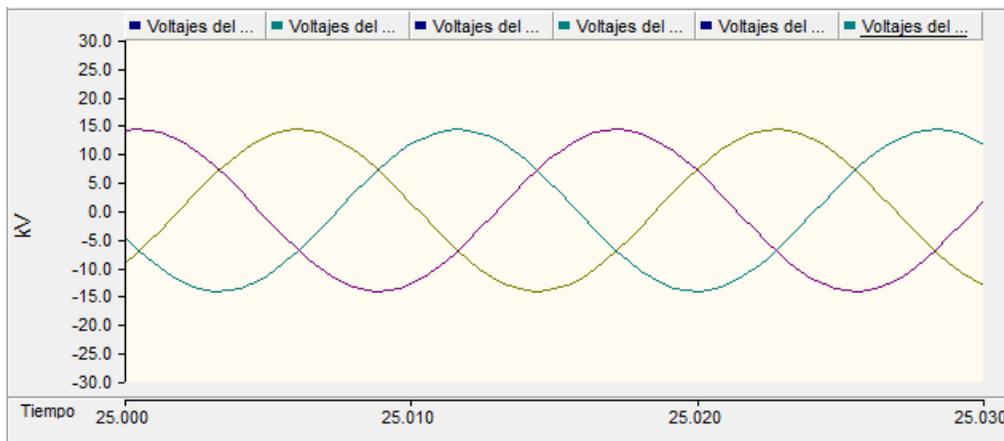
**Fig. 4.8** Voltaje del generador 3 (Vista detallada).



**Fig. 4.9** Voltaje del generador 4 (Vista detallada).



**Fig. 4.10** Voltaje del generador 5 (Vista detallada).



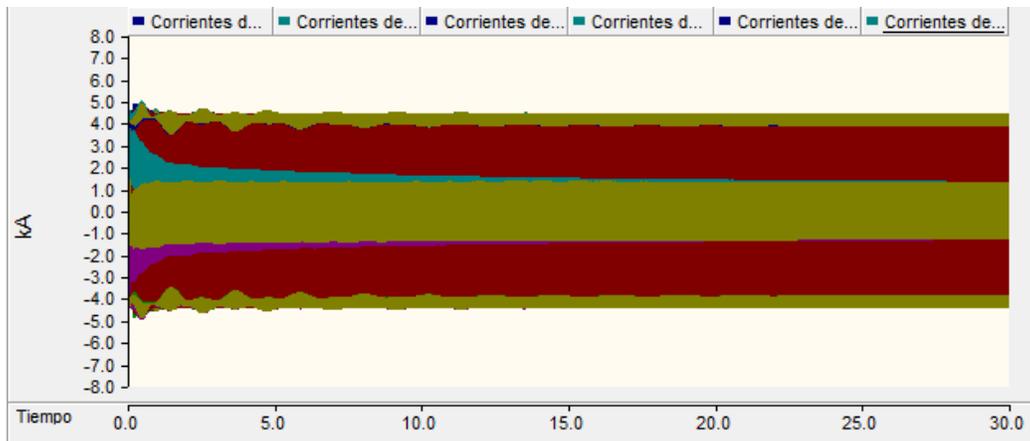
**Fig. 4.11** Voltaje del compensador síncrono (Vista detallada).

En particular, ninguno de los generadores genera más 15.44 kV, por lo que no es necesario analizar más a fondo esta característica particular de los equipos de generación.

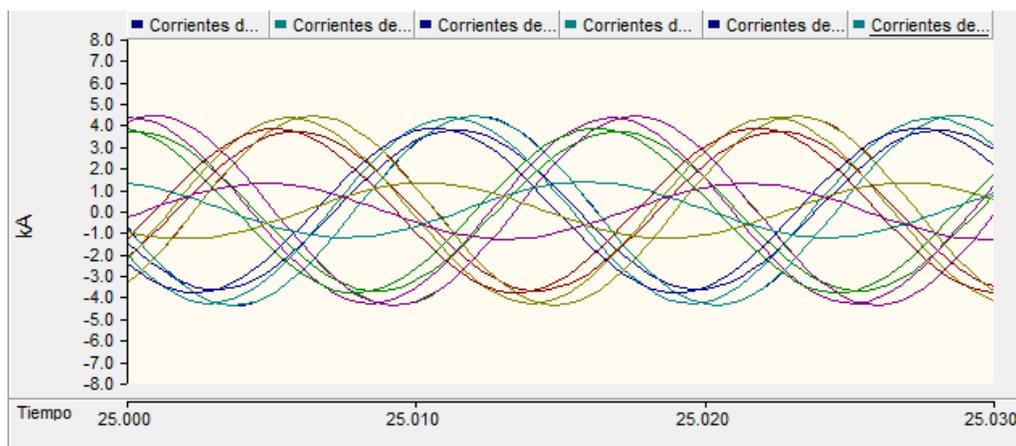
### 4.3.2 Corrientes de los generadores.

Como ya mencioné con anterioridad, de la misma manera realicé un análisis detallado de las corrientes de los generadores, y de la misma manera, la red se muestra con estabilidad y estado de operación de óptimo.

De la misma manera, estos datos los analicé de manera general y otra particular más detallada con lapsos de 0 – 30 segundos, y 25.00 – 25.03 segundos respectivamente. Se podrán observar que las corrientes pico máximo y mínimo son dependientes directamente del generador que se desee analizar, pero, oscilan entre los 4.5 kA - -4.5 kA.

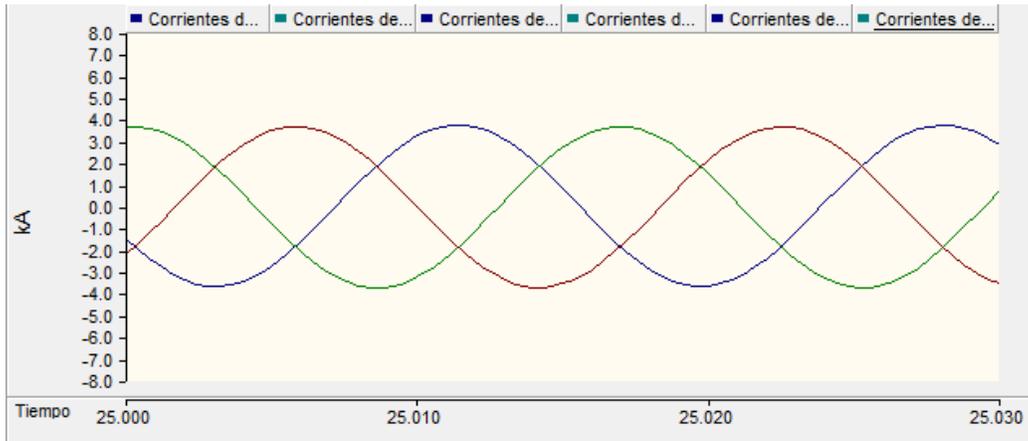


*Fig. 4.12 Corrientes de los generadores y compensador síncrono (Vista general).*



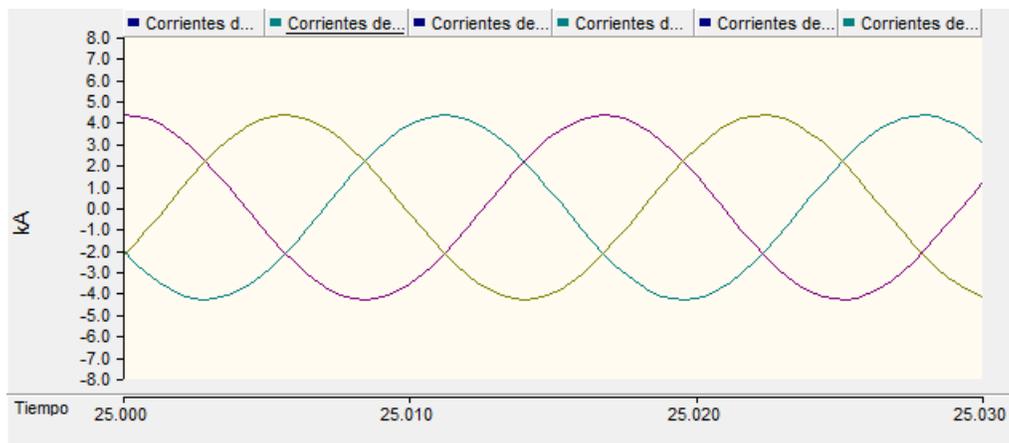
*Fig. 4.12 Corrientes de los generadores y compensador síncrono (Vista detallada).*

De la misma manera que con los voltajes analizados anteriormente, analicé las corrientes de cada uno de los generadores y compensador síncrono individualmente.



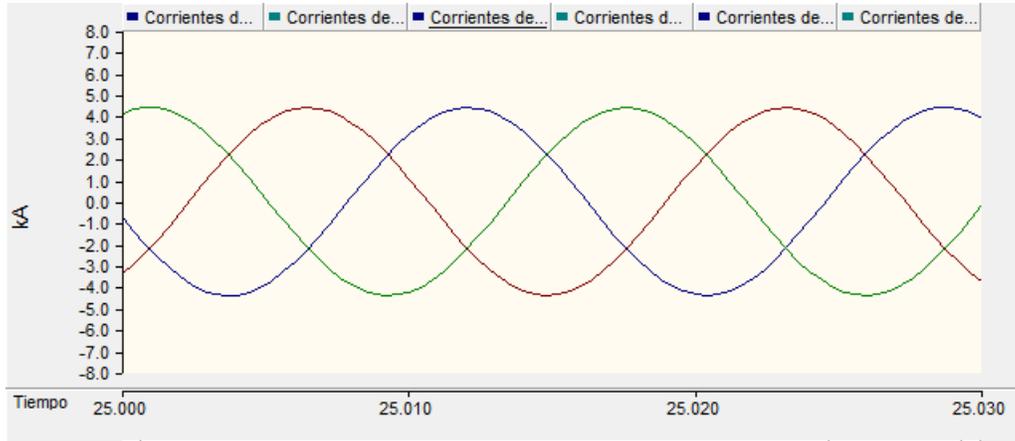
**Fig. 4.13** Corriente del generador 1 (Vista detallada).

Gracias a la ayuda del programa, podemos observar que la corriente pico del generador en cuestión, es de 3.67 kA.



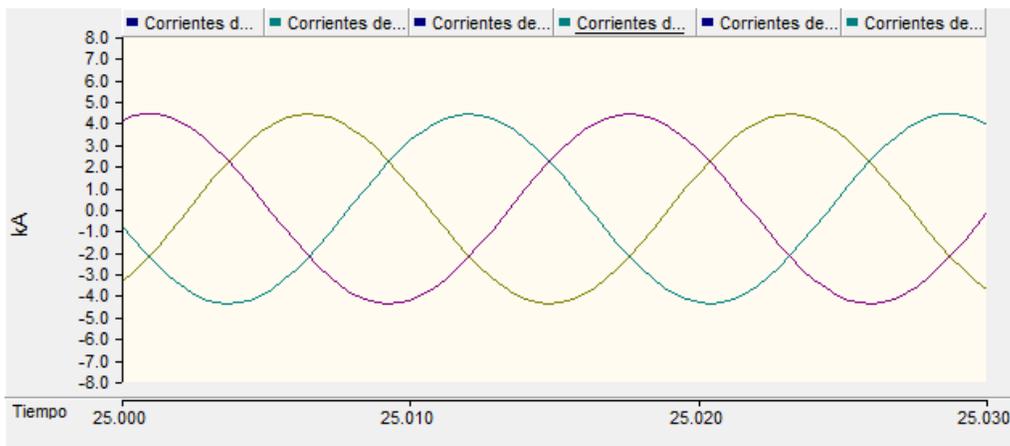
**Fig. 4.14** Corriente del generador 2 (Vista detallada).

A diferencia del generador anteriormente analizado, este tiene una corriente de 4.30 kA en valor pico.



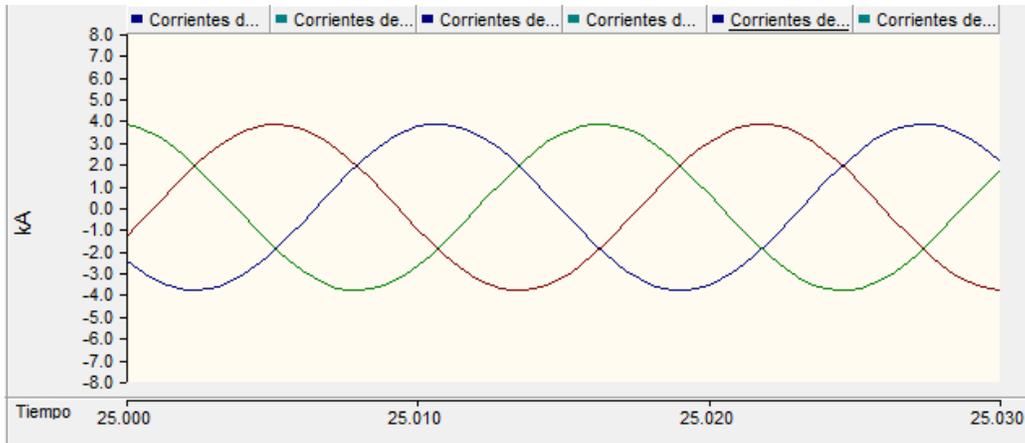
**Fig. 4.15** Corriente del generador 3 (Vista detallada).

Este generador tiene una corriente de 4.40 kA, y trabaja de manera similar al generador que se analiza en la siguiente figura.



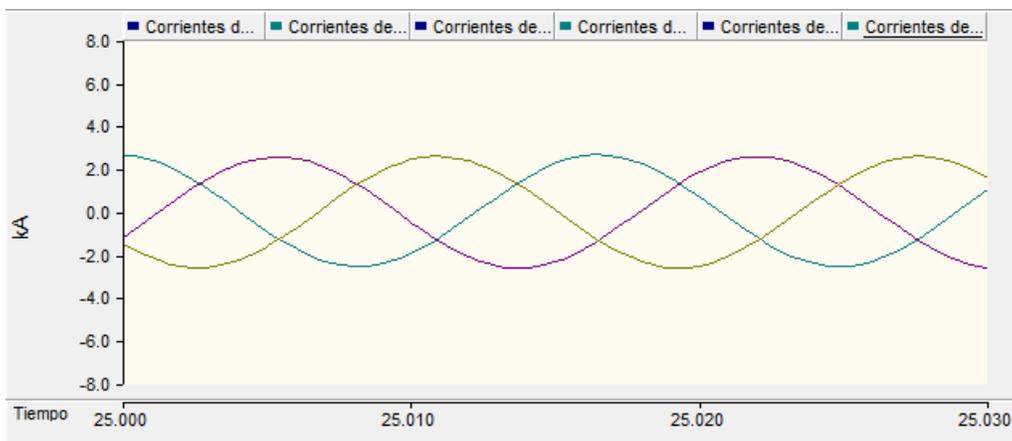
**Fig. 4.16** Corriente del generador 4 (Vista detallada).

Como ya mencioné con anterioridad, este generador trabaja de manera similar al generador 3, por lo que de igual forma, genera 4.40 kA.



**Fig. 4.17** Corriente del generador 5 (Vista detallada).

Este generador trabaja con 3.82 kA, por lo que es uno de los generadores más pequeños que tiene la red de transmisión conectado.



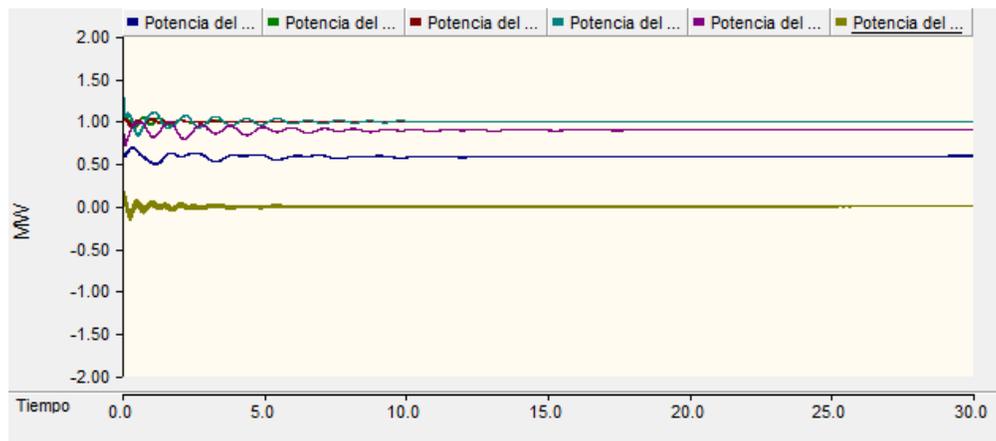
**Fig. 4.18** Corriente del compensador síncrono (Vista detallada).

La corriente que genera el compensador síncrono, es la menor de todos los generadores que están conectados a la red de transmisión, ya que este equipo únicamente está conectado para suministrar reactivos a la red como compensación, genera 1.28 kA.

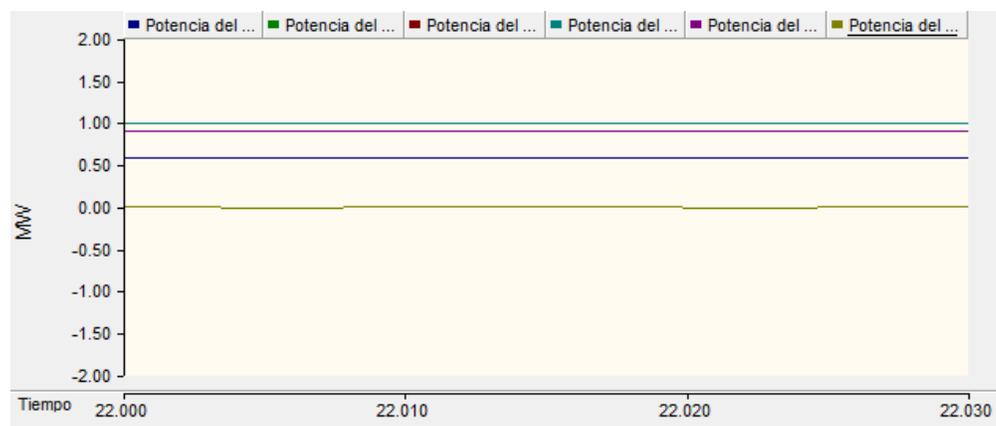
#### 4.3.3 Potencia real de los generadores.

Como es bien sabido, la potencia es una relación directa de voltaje y corriente, por lo que es necesario dejar en claro este análisis.

Para no causar discrepancias, el análisis general que se llevó a cabo, fue en el lapso de 0 – 30 segundos, mientras que, el análisis detallado se llevó a cabo en 25.00 – 25.03 segundos.

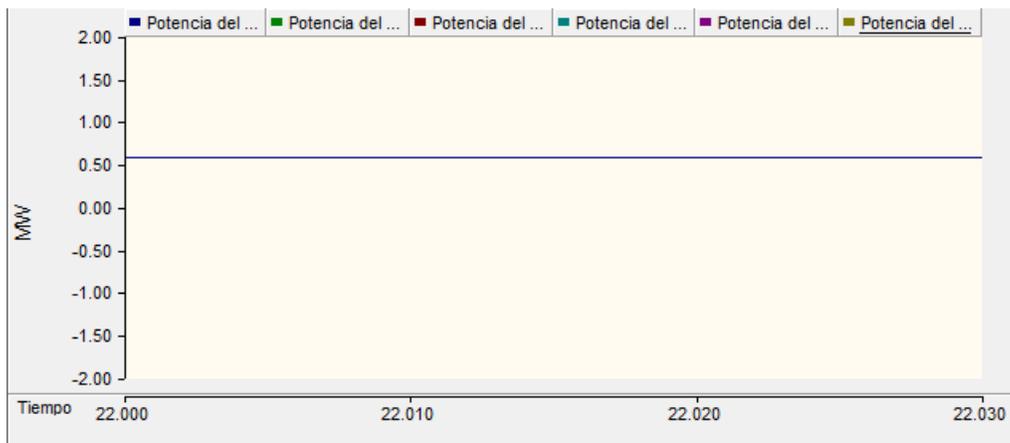


*Fig. 4.19 Potencia real de los generadores y compensador síncrono (Vista general).*



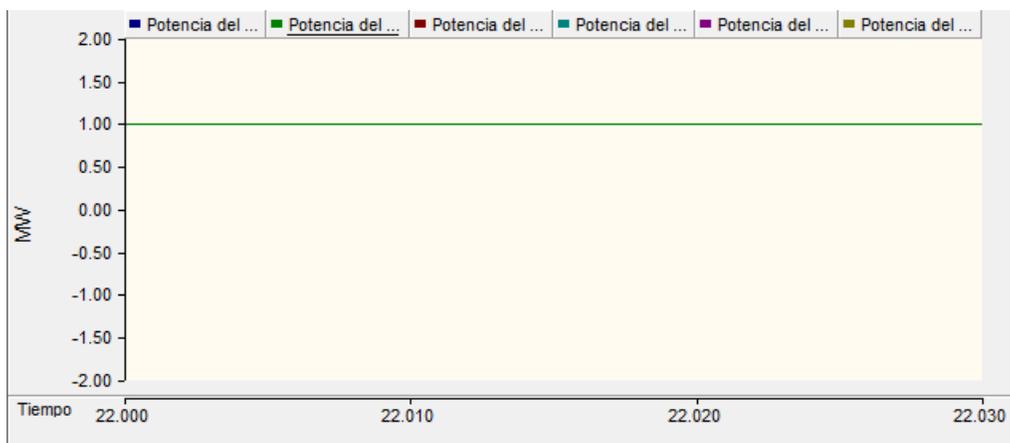
*Fig. 4.20 Potencia real de los generadores y compensador síncrono (Vista detallada).*

Al igual que se han analizado de manera meticulosa cada uno de los voltajes y corrientes, analicé las potencias reales de cada uno de los generadores y el compensador síncrono.



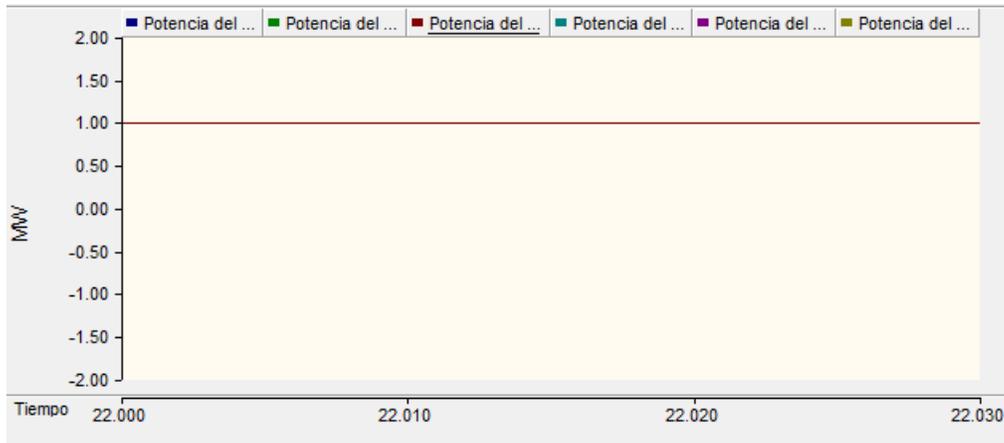
*Fig. 4.21 Potencia real del generador 1 (Vista detallada).*

Como podemos observar la potencia real del generador 1 está en los 0.58 MWs, este es el generador con menor generación real en todo el sistema (sin tomar en cuenta el compensador síncrono).



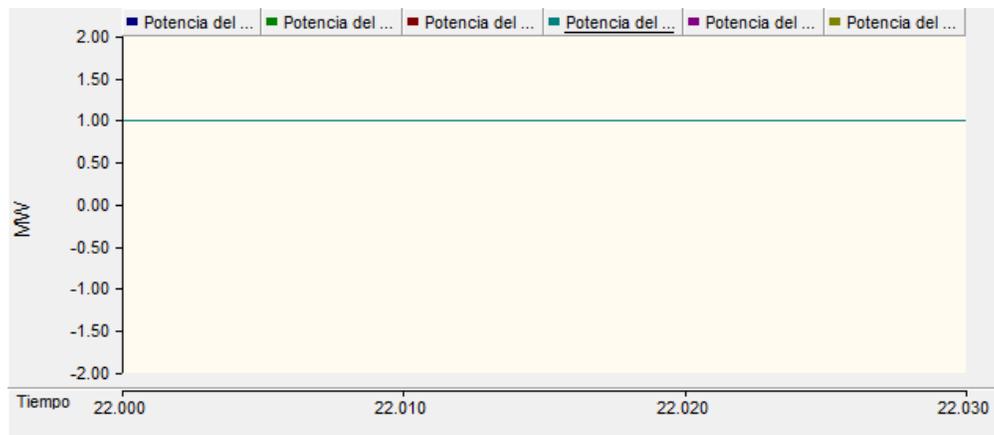
*Fig. 4.22 Potencia real del generador 2 (Vista detallada).*

Se puede observar que el generador 2 tiene una potencia real de 1.00 MWs, éste, al igual que los generadores 3 y 4 son los que más generación real tienen.



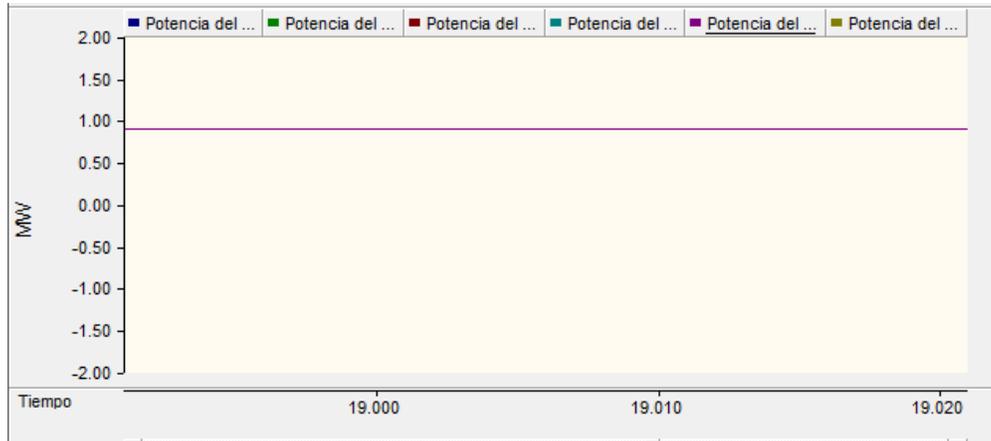
**Fig. 4.23** Potencia real del generador 3 (Vista detallada).

La potencia real generada por el generador 3 es de 1.00 MWs como ya se mencionó con anterioridad.



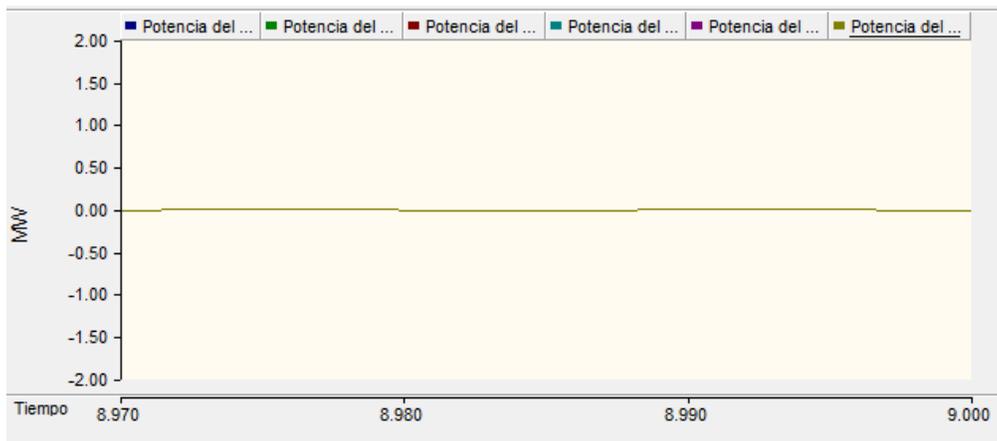
**Fig. 4.24** Potencia real del generador 4 (Vista detallada).

La potencia real generada por el generador 4 al igual que el generador 3, es de 1.00 MWs.



**Fig. 4.25** Potencia real del generador 5 (Vista detallada).

La potencia de este quinto generador es de 0.89 MWs, después del generador 1, es el más pequeño.

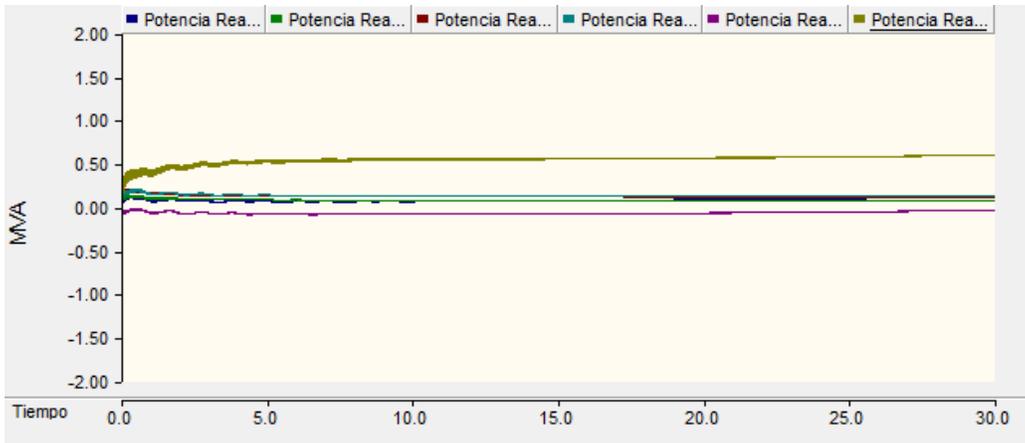


**Fig. 4.26** Potencia real del compensador síncrono (Vista detallada).

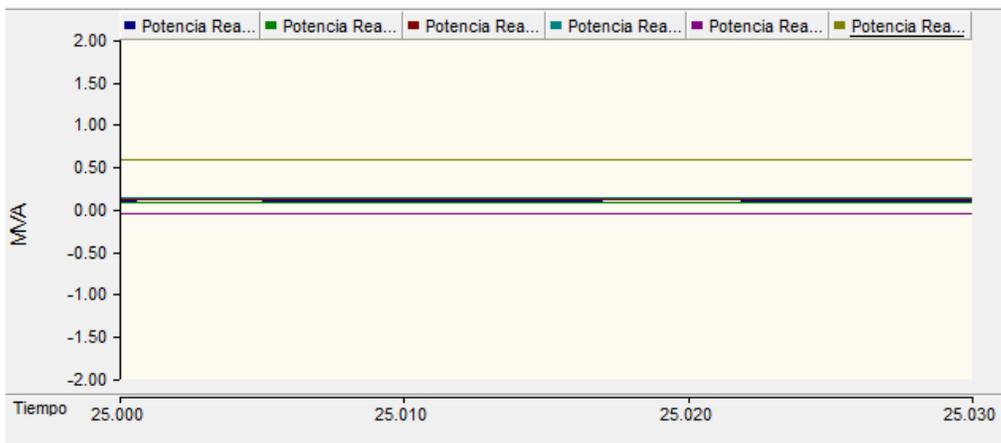
La potencia del compensador síncrono tiene que oscilar en 0.00 MWs, ya que este elemento está diseñado especialmente para suministrar cargas reactivas al sistema.

#### 4.3.4 Potencia reactiva de los generadores.

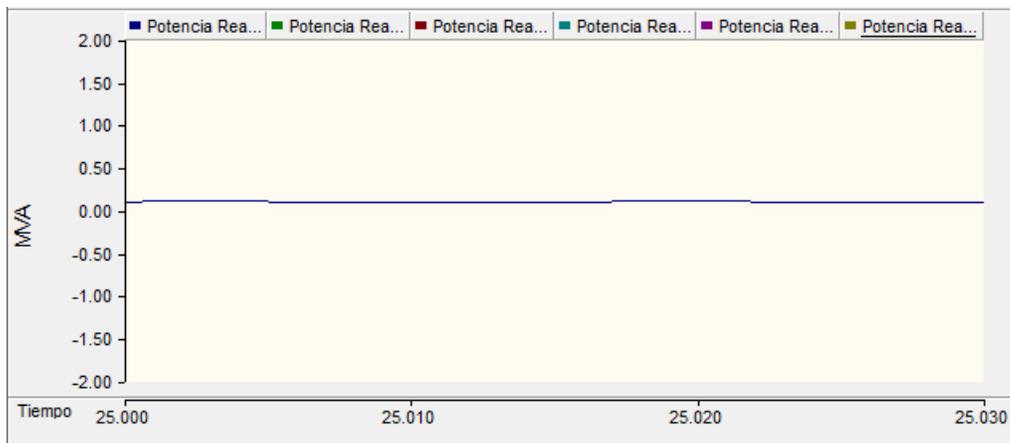
De la misma forma, ya que se analizó el voltaje y la corriente de los generadores, tenemos con ello resultados de potencia reactiva, por ello, para no causar discrepancias, el análisis general que se llevó a cabo, fue en el lapso de 0 – 30 segundos, mientras que, el análisis detallado se llevó a cabo en 25.00 – 25.03 segundos.



**Fig. 4.27** Potencia reactiva de los generadores y compensador síncrono (Vista general).



**Fig. 4.28** Potencia reactiva de los generadores y compensador síncrono (Vista detallada).



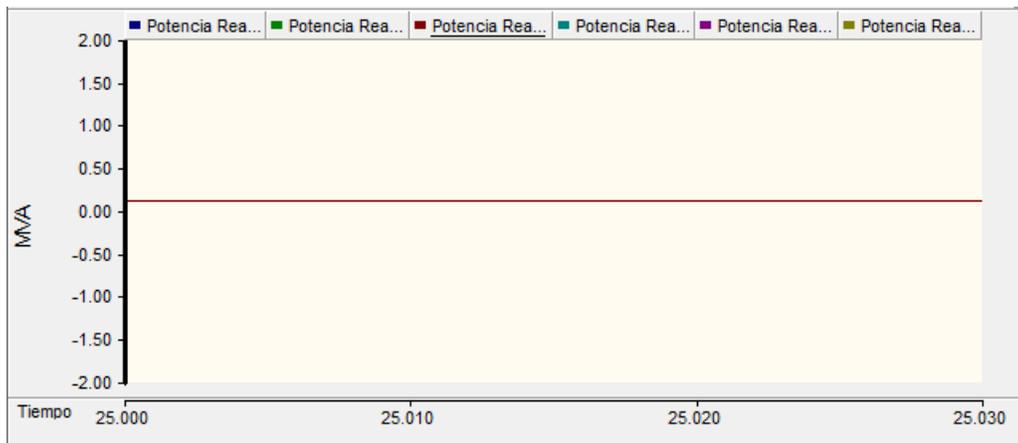
**Fig. 4.29** Potencia reactiva del generador 1 (Vista detallada).

La potencia reactiva del generador 1 oscila entre los 0.10 MVAs.



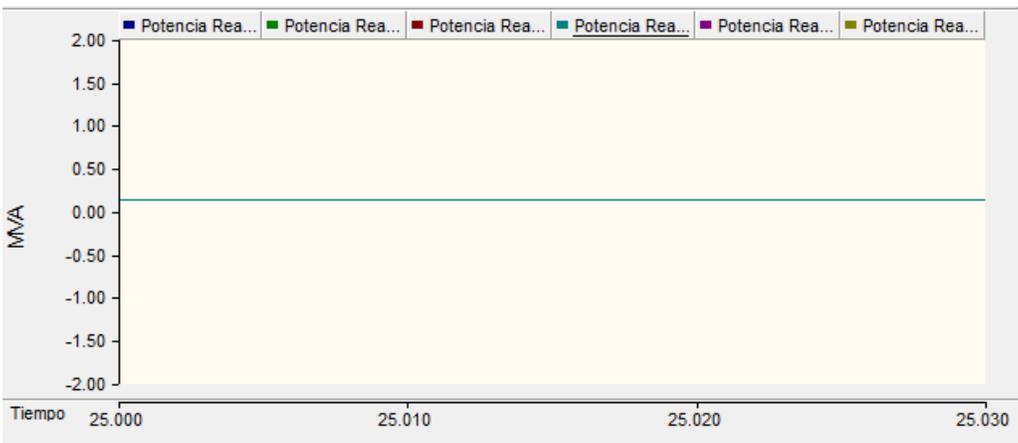
**Fig. 4.30** *Potencia reactiva del generador 2 (Vista detallada).*

La potencia reactiva del generador 2 oscila entre los 0.07 MVAs.



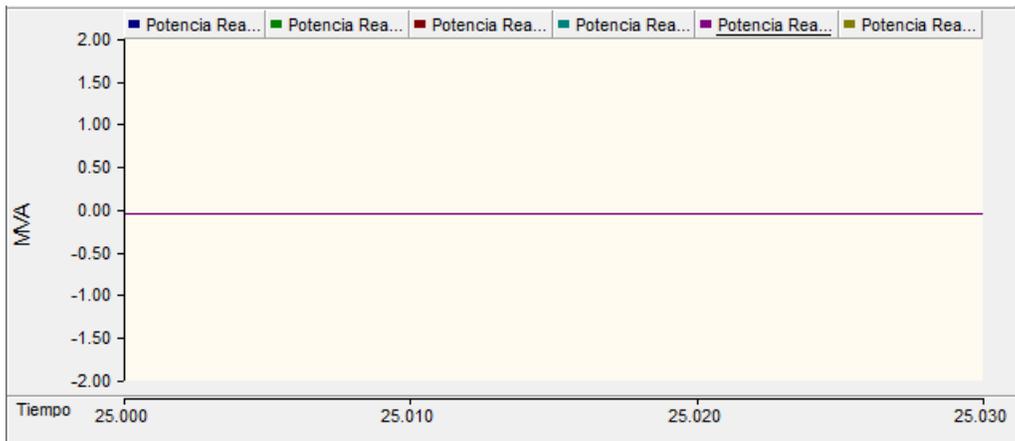
**Fig. 4.31** *Potencia reactiva del generador 3 (Vista detallada).*

La potencia reactiva del generador 3 oscila entre los 0.11 MVAs.



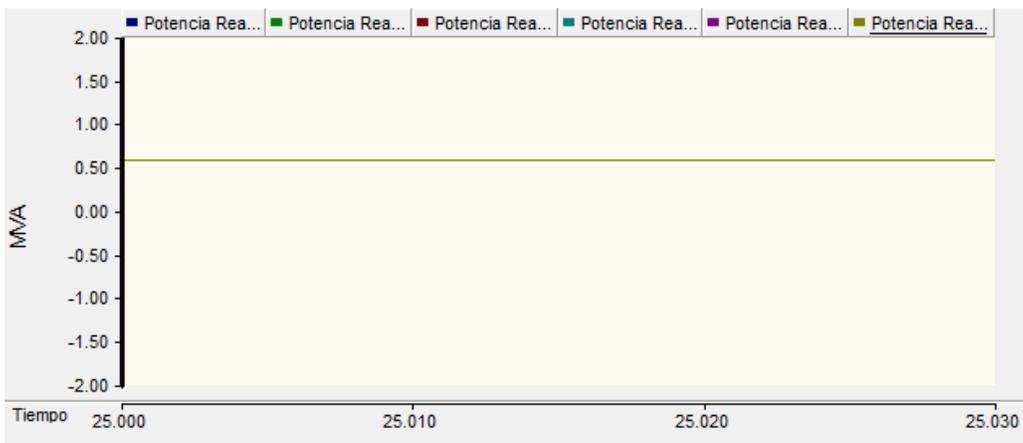
**Fig. 4.32** *Potencia reactiva del generador 4 (Vista detallada).*

A diferencia del generador 3, el generador 4 tiene una potencia reactiva de 0.12 MVAs.



**Fig. 4.33** Potencia reactiva del generador 5 (Vista detallada).

Este generador, es particularmente especial, ya que no genera reactivos, sino que los absorbe, tiene una potencia reactiva de -0.05 MVAs.



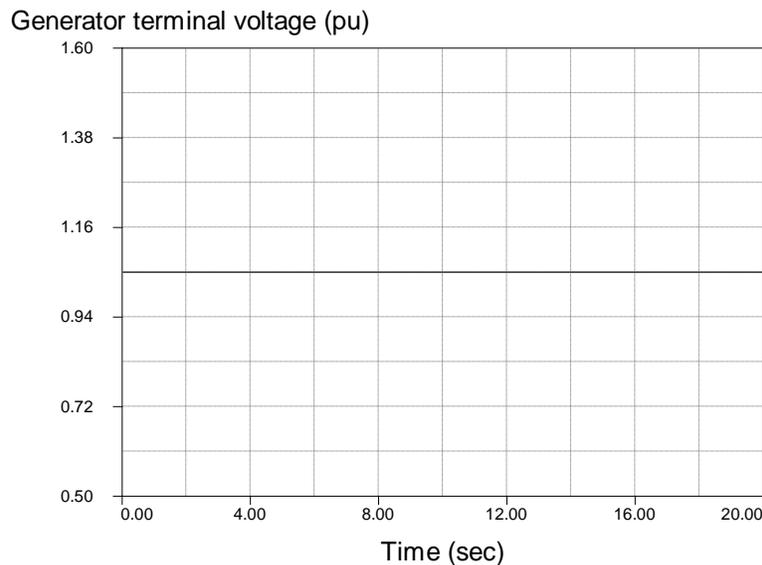
**Fig. 4.34** Potencia reactiva del compensador síncrono (Vista detallada).

Como ya se había mencionado con anterioridad, el compensador síncrono tiene como fin generar reactivos al sistema, para compensar el resto de generadores, por lo que su generación es de 0.58 MVAs.

#### 4.4 Impacto de la generación solar fotovoltaica en la red de transmisión.

Anteriormente se realizó un análisis de la red de transmisión sin tener alguna fuente de energía renovable conectada en PSCAD, PSAT y TSAT. En esta ocasión, llevé a cabo un análisis de la misma red en PSAT y TSAT, con sustitución del generador 1, por un generador fotovoltaico, por lo que los resultados obtenidos en cada uno de los ámbitos de interés fueron los siguientes:

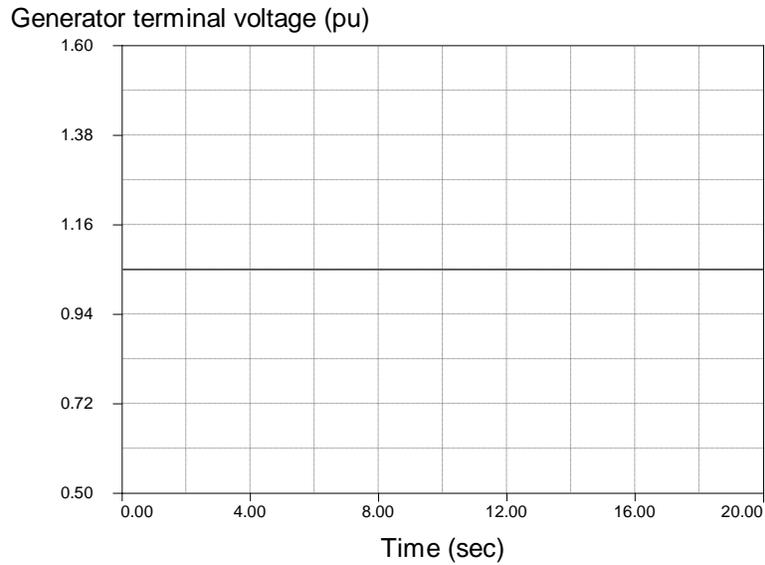
##### 4.4.1 Impacto del generador solar fotovoltaico en la magnitud de voltaje.



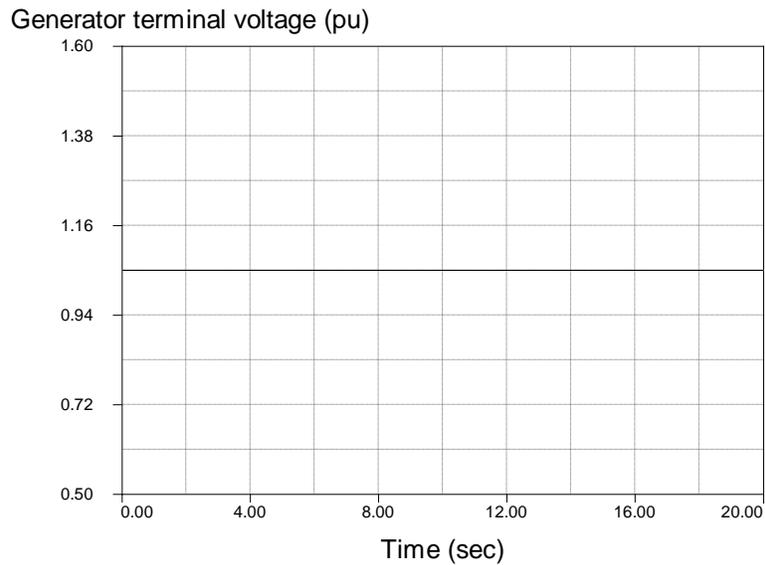
*Fig. 4.35 Magnitud de voltaje del generador solar fotovoltaico.*

Como podemos ver la magnitud de voltaje entregada por el generador solar fotovoltaico es de 1.06 p.u.

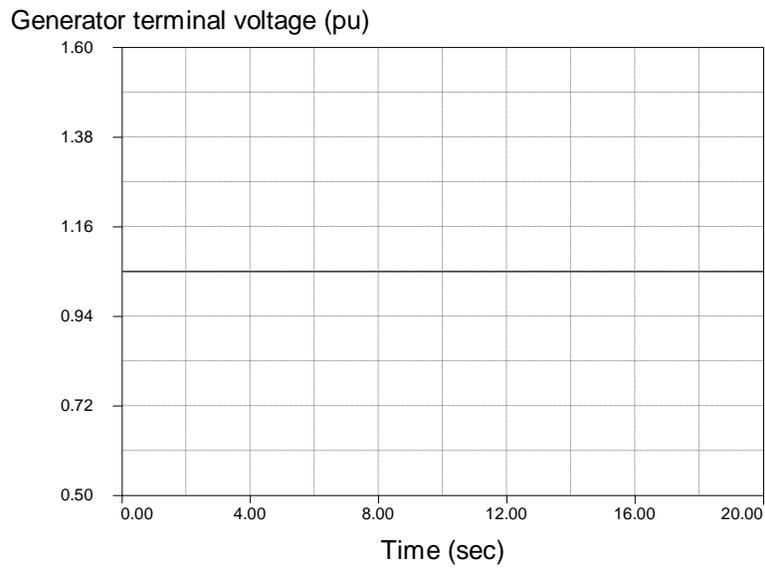
Tras los análisis anteriores realizados en PSCAD, podemos saber que los voltajes de cada uno de los generadores no variarán, ya que cada uno de ellos trabaja a una determinada base, por lo que la magnitud de voltaje no se ve afectada.



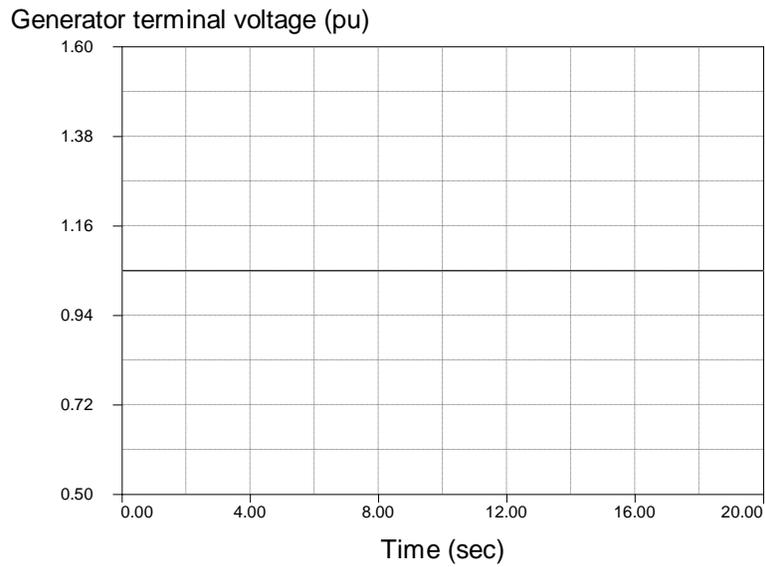
*Fig. 4.36 Magnitud de voltaje del generador 2.*



*Fig. 4.37 Magnitud de voltaje del generador 3.*



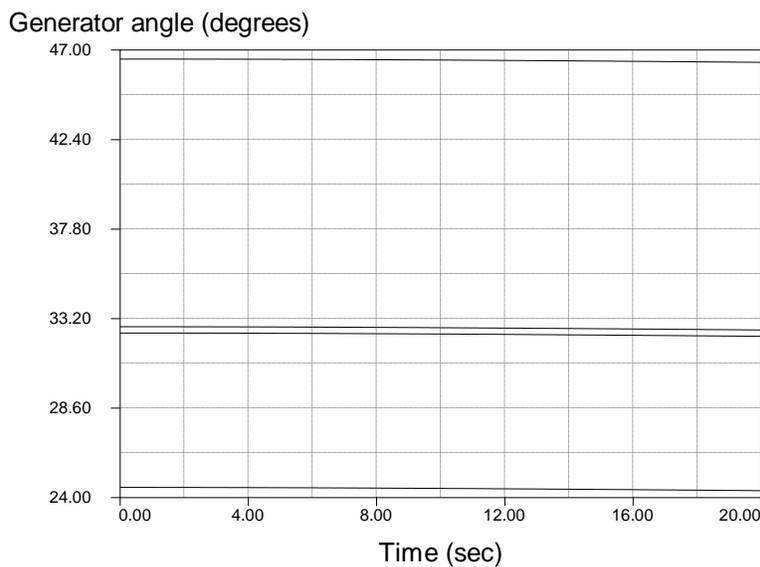
*Fig. 4.38 Magnitud de voltaje del generador 4.*



*Fig. 4.39 Magnitud de voltaje del generador 5.*

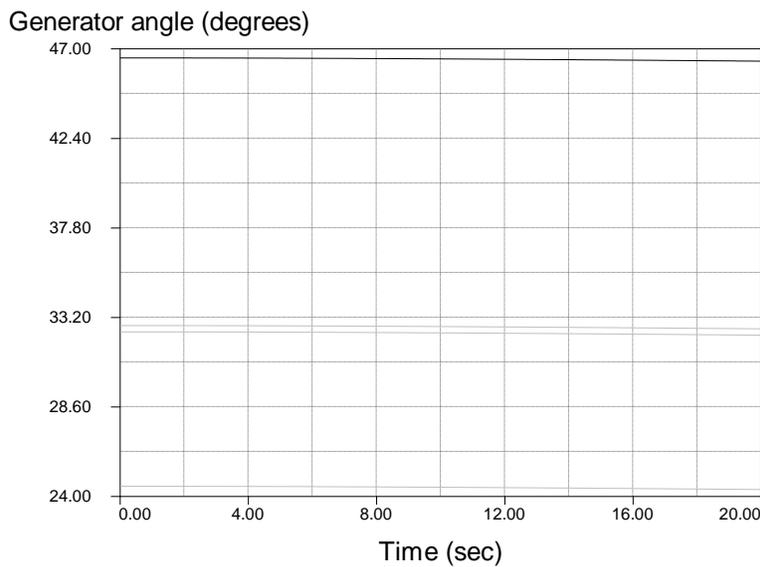
#### 4.4.2 Impacto del generador solar fotovoltaico en el ángulo de voltaje.

El ángulo de voltaje de los generadores es importante, ya que estos determinan si el sistema es estable o no, por lo que es necesario dejar claro este punto, a continuación, podremos observar como el generador solar fotovoltaico afecta a cada uno de los generadores de la red de transmisión.

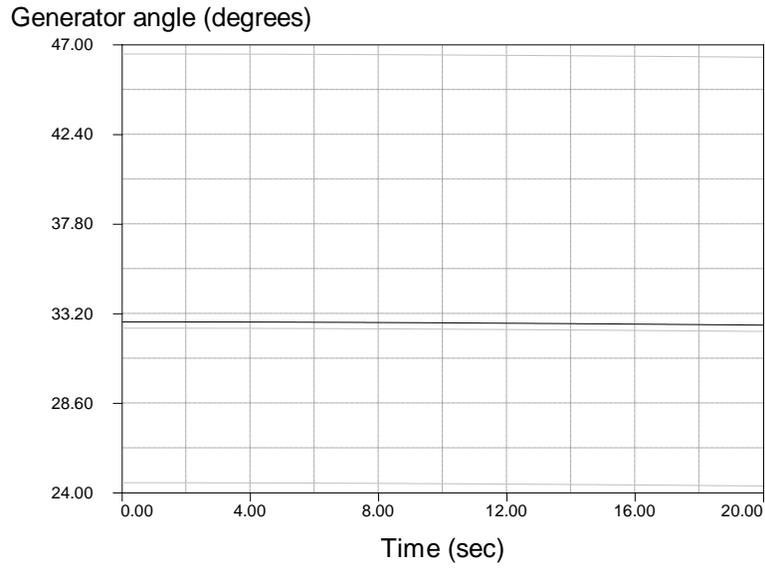


*Fig. 4.40* Ángulo de voltaje de los generadores de la red de transmisión.

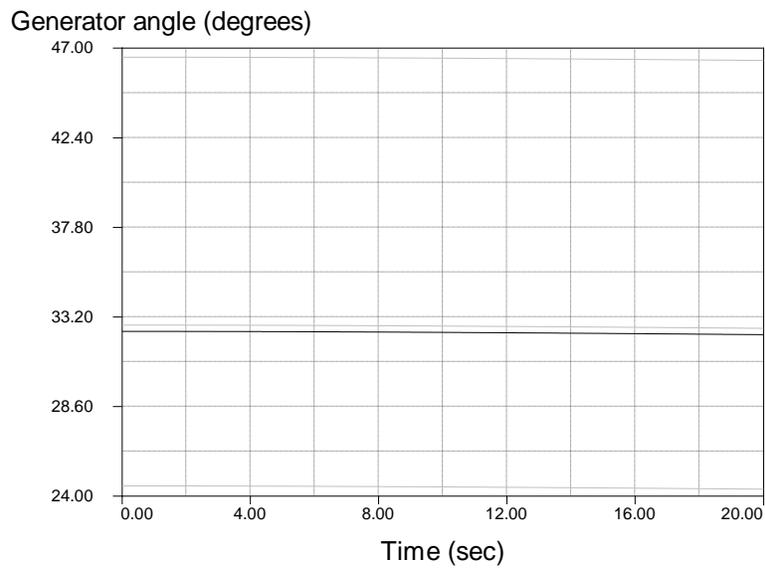
A continuación, analizaré los ángulos de voltaje de los generadores individualmente.



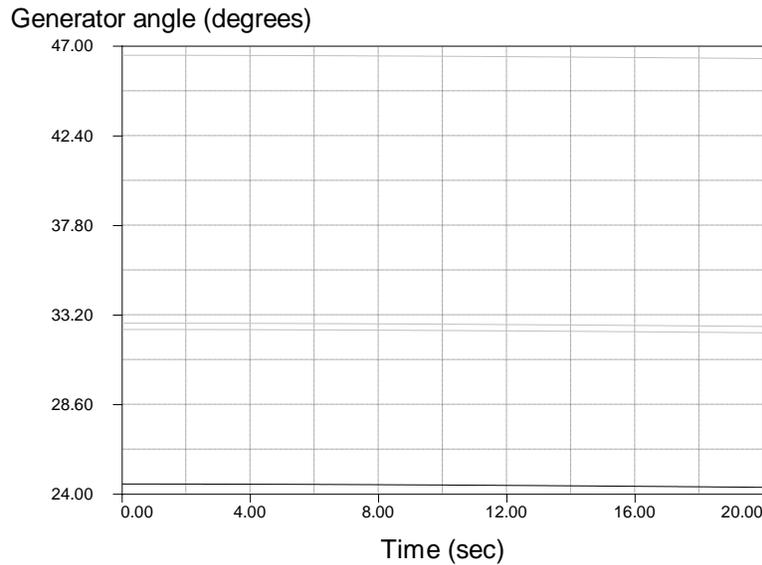
*Fig. 4.41* Ángulo de voltaje del generador 2.



*Fig. 4.42* Ángulo de voltaje del generador 3.



*Fig. 4.43* Ángulo de voltaje del generador 4.



**Fig. 4.44** Ángulo de voltaje del generador 5.

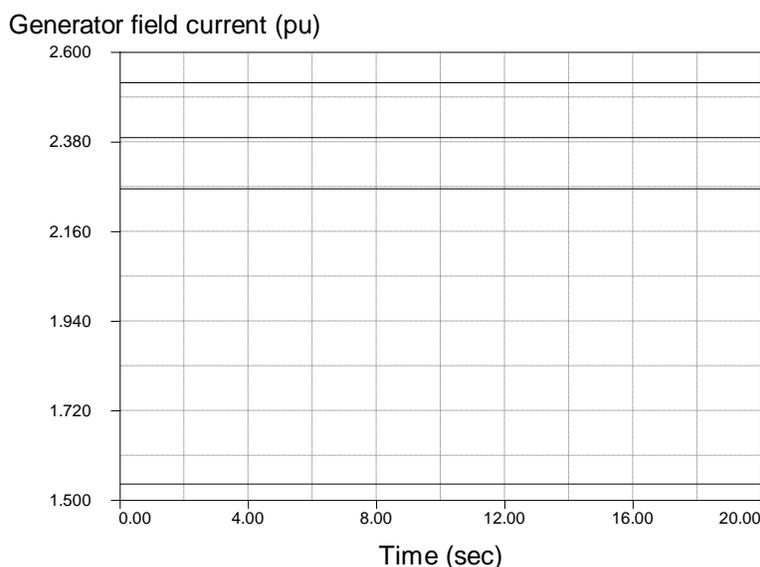
Como se puede observar en los gráficos anteriormente plasmados, los ángulos de voltaje no varían respecto al tiempo, por lo que se deduce que el sistema no tendrá fallas por asincronismo.

Cabe recalcar que, el generador solar fotovoltaico no se ve implementado en los gráficos debido a que, por ser una fuente dependiente de la radiación emitida por el sol, la cual depende directamente de las condiciones climáticas del lugar donde se implemente, la generación que este sistema acoplado a la red puede presentar variaciones, por ello, el programa comercial PSAT y TSAT no lo plasma.

Esto quiere decir que el ángulo de voltaje puede presentar variaciones, y por tanto realizar modificaciones en la red, de tal manera que puede llevar al asincronismo.

#### 4.4.3 Impacto de la generación solar fotovoltaica en las corrientes de campo.

Para hacer los análisis posteriores, necesitamos tener conocimiento de los flujos de corriente que los generadores nos brindan, por lo que a continuación se muestran.



*Fig. 4.45 Corrientes de campo de los generadores de la red de transmisión.*

De igual manera, las corrientes de campo de los generadores oscilan entre los 2.550 p.u. y los 1.550 p.u. y que no presenta perturbaciones por el sistema de generación solar fotovoltaico.

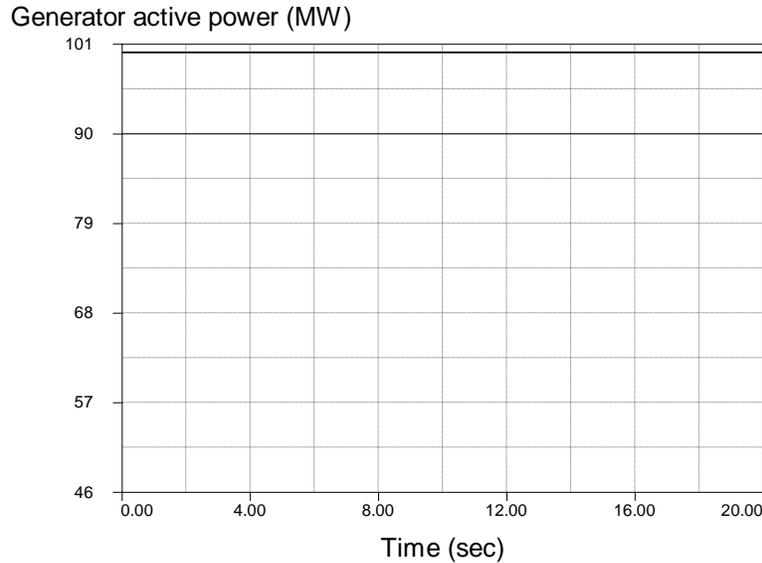
Asimismo, es importante recalcar que la corriente del generador solar fotovoltaico no se ve en el gráfico debido a que la corriente (al igual que el ángulo de voltaje) puede variar dependiendo de las condiciones climáticas.

También, cabe hacer mención, que las posiciones de las corrientes correspondientes a cada uno de los generadores son las siguientes:

1. Generador 4 (aproximadamente 2.550 p.u.)
2. Generador 3 (aproximadamente 2.390 p.u.)
3. Generador 2 (aproximadamente 2.270 p.u.)
4. Generador 5 (aproximadamente 1.550 p.u.)

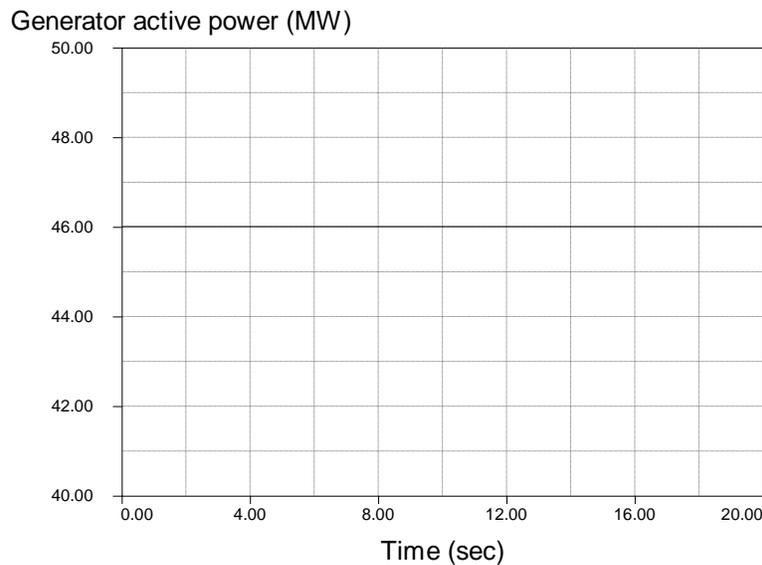
#### 4.4.4 Impacto de la generación solar fotovoltaica en la potencia activa.

De la misma forma en la que se realizó el análisis de la potencia activa en PSCAD, se realizó nuevamente en PSAT y TSAT, ya que la potencia es producto resultante de la relación directa de voltajes y corrientes de los generadores.



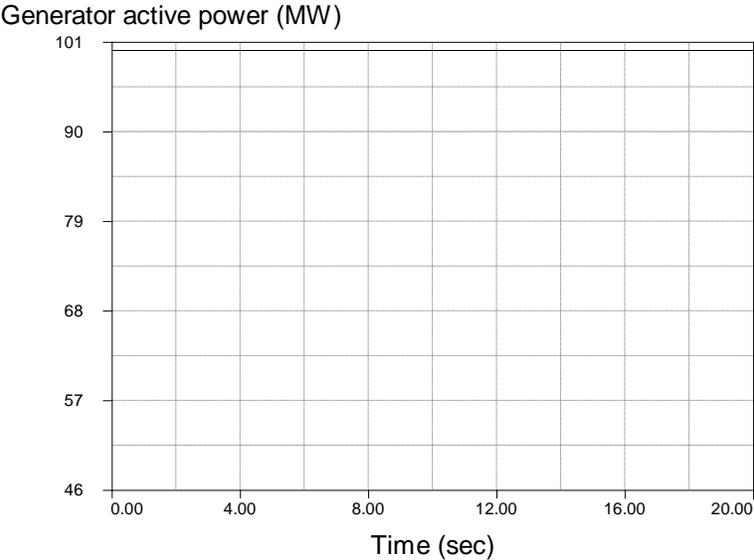
*Fig. 4.46* Potencia activa de los generadores de la red de transmisión.

En el gráfico no se puede observar con total claridad la potencia de todos los generadores, debido a que tres de los generadores están brindando casi la misma cantidad de potencia activa, por lo que será necesario analizarlos de manera particular, de igual forma, uno de los resultados plasmados, está por exactamente colocado en el límite inferior del gráfico, por lo que no se observa fácilmente.

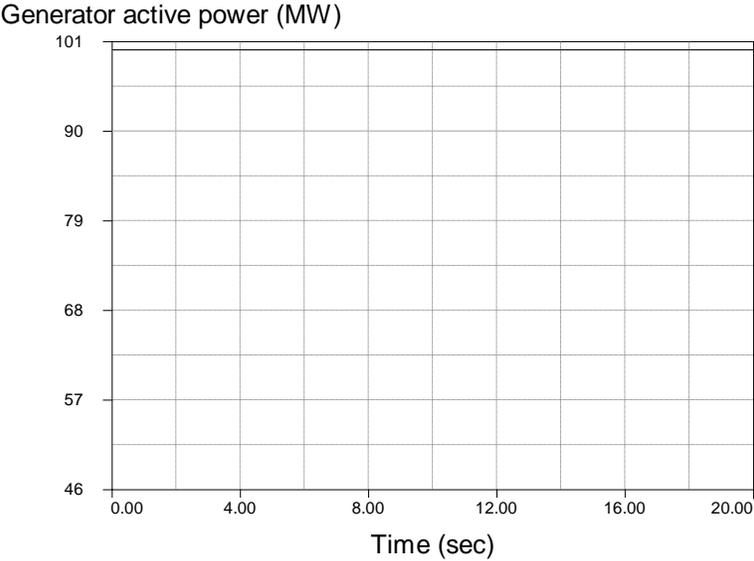


*Fig. 4.47* Potencia activa del generador solar fotovoltaico.

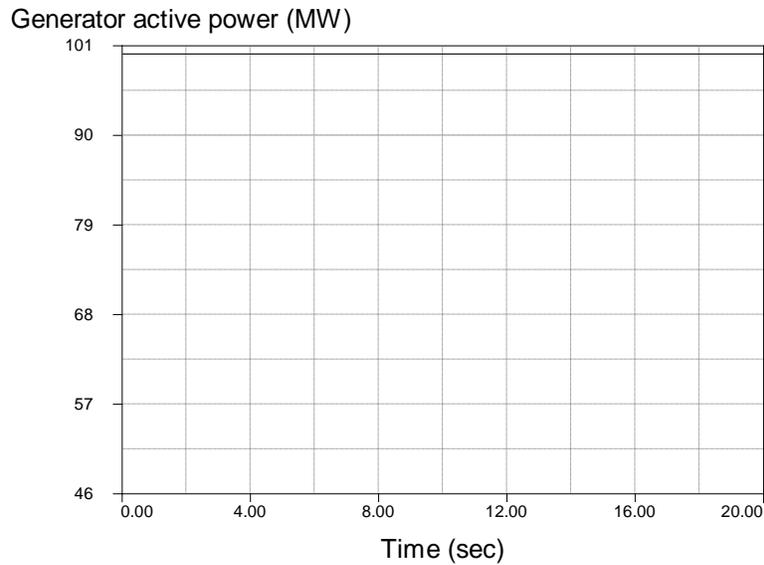
Como se puede observar en el gráfico de la *Fig. 4.47* la potencia activa que proporciona el generador solar fotovoltaico es de 46.00 MW aproximadamente, siendo éste el generador con menor generación real en el sistema. Sin embargo, esto es totalmente comprensible, ya que por ser un generador solar fotovoltaico no puede generar una cantidad sumamente grande como los otros generadores convencionales (térmicos, hidráulicos, etc.), y de igual manera la generación de éste puede someterse a variaciones, las cuales dependen directamente de las condiciones climáticas de donde se implemente el mismo.



*Fig. 4.48* Potencia activa del generador 2.

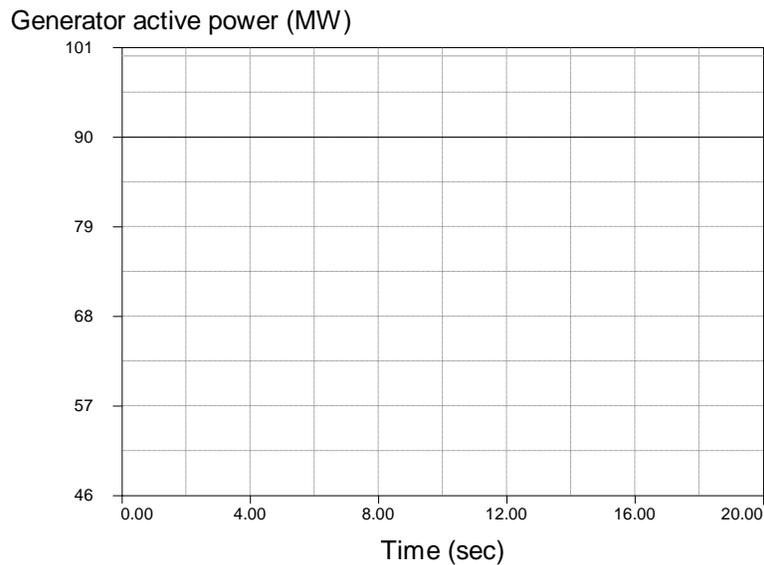


*Fig. 4.49* Potencia activa del generador 3.



*Fig. 4.50 Potencia activa del generador 4.*

Como podemos observar en el gráfico, los generadores 2, 3 y 4, generan la misma cantidad de potencia activa, generan 100 MW aproximadamente cada uno, ninguno de ellos presenta perturbaciones en su generación.

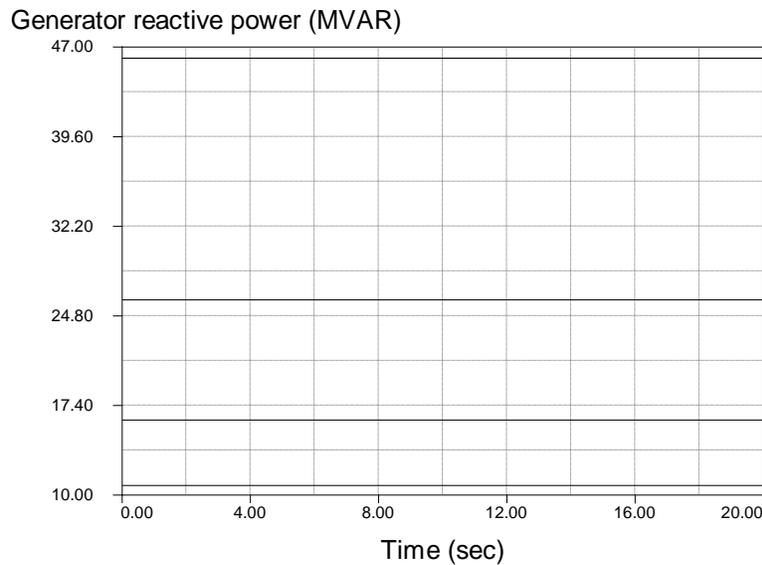


*Fig. 4.50 Potencia activa del generador 5.*

Este es el generador más pequeño sin tomar en cuenta el generador solar fotovoltaico, lógicamente, este generador genera una cantidad menor de potencia activa debido a que es el generador con menor flujo de corriente de campo, por lo que haciendo directamente la relación de voltaje-corriente, podemos conocer que el resultado de la potencia activa es completamente coincidente.

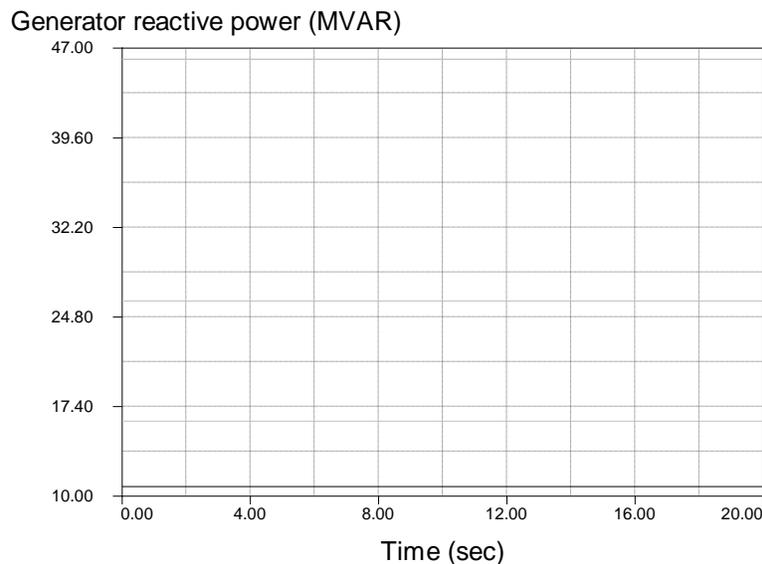
#### 4.4.5 Impacto de la generación solar fotovoltaica en la potencia reactiva.

Al igual que la potencia activa, la potencia reactiva es resultante directa del voltaje y los flujos de corriente de campo, por lo que también se muestran los resultados obtenidos.



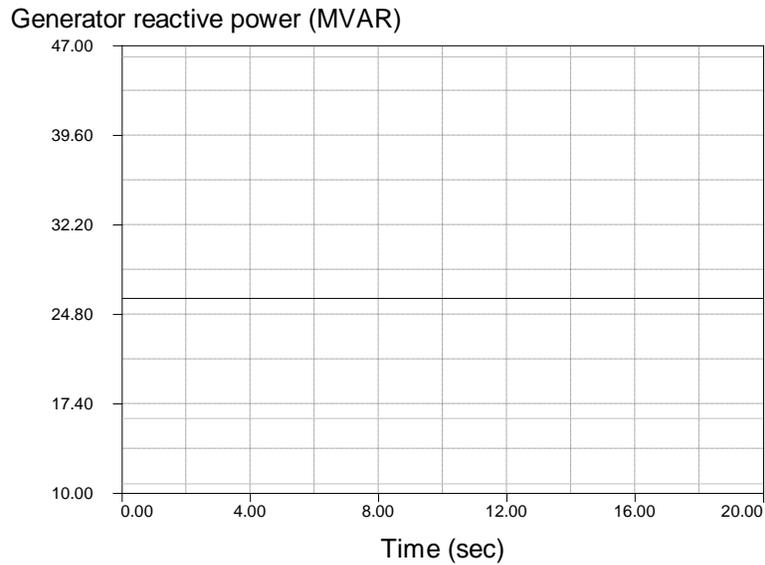
*Fig. 4.51* Potencia reactiva de los generadores de la red de transmisión.

Como se puede observar en el gráfico, la potencia reactiva de los generadores está muy por debajo de la generación de potencia activa, mas no indica que la potencia reactiva sea poca, ya que estamos hablando de que los generadores están brindando entre 46.00 MVAR – 11.00 MVAR.

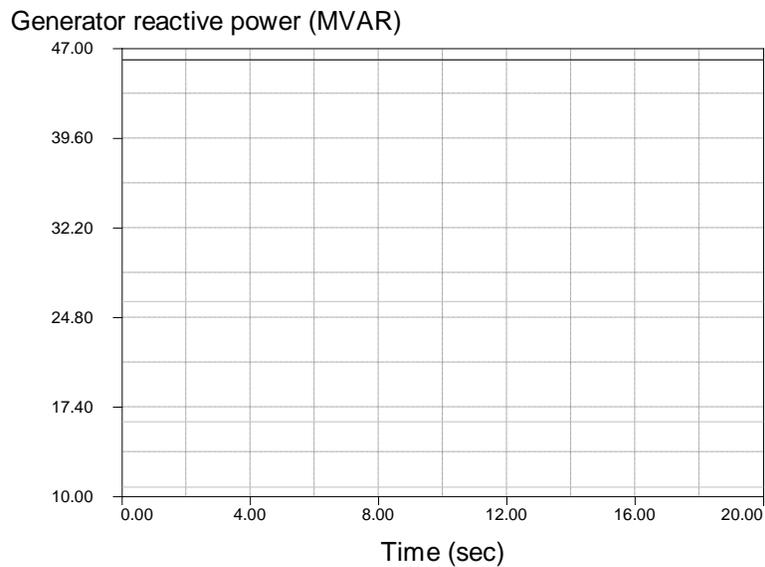


*Fig. 4.52* Potencia reactiva del generador solar fotovoltaico.

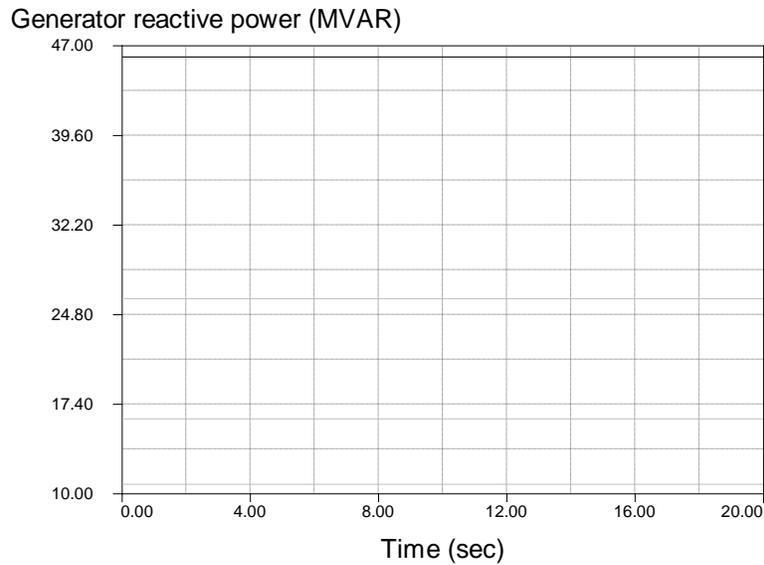
Como se observa en el gráfico, la potencia reactiva que proporciona el generador solar fotovoltaico es sumamente baja, ya que como se ha ido mencionando a lo largo de los resultados, depende directamente de las condiciones climáticas del lugar donde éste se implemente; la potencia reactiva generada por el elemento es de 11.00 MVAR aproximadamente, siendo así el generador con menor generación de reactivos.



*Fig. 4.53 Potencia reactiva del generador 2.*

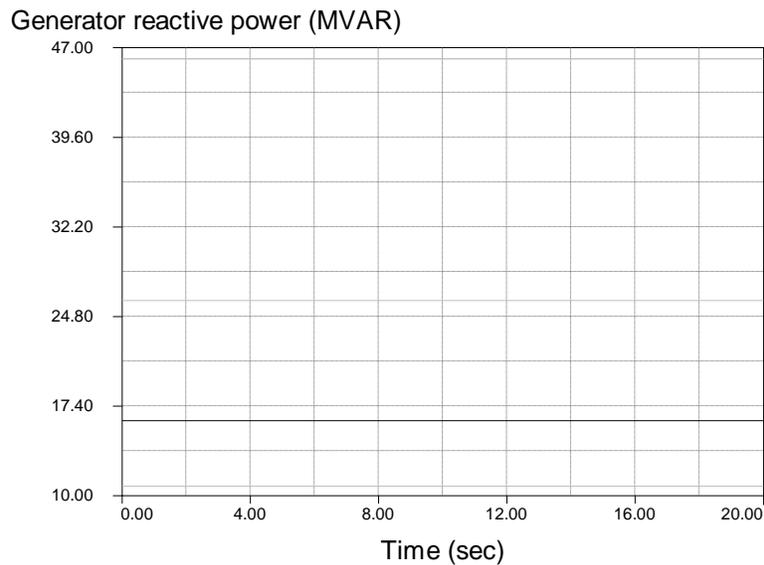


*Fig. 4.54 Potencia reactiva del generador 3.*



*Fig. 4.55 Potencia reactiva del generador 4.*

Como se puede observar en las tres figuras anteriores, los generadores 3 y 4, proporcionan a la red la misma cantidad de potencia reactiva, o sea, 46.00 MVAR aproximadamente, mientras que, el generador 2, brinda 25.00 MVAR aproximadamente.



*Fig. 4.56 Potencia reactiva del generador 5.*

El generador 5, es el generador que brinda menor potencia reactiva al sistema (sin tomar en cuenta el generador solar fotovoltaico), éste proporciona apenas 17.00 MVAR aproximadamente.

#### **4.5 Conclusiones.**

Con base a los resultados mostrados, podemos observar, la red eléctrica tendrá un comportamiento ideal siempre que las condiciones de todos y cada uno de los elementos que están conectados a la misma estén en sincronía, ya que esto, puede afectar directamente a los elementos de generación, tales como las máquinas síncronas o los buses directamente.

En comparativa de la información obtenida con un PSCAD, PSAT y TSAT, podemos decir que la red se comporta de manera similar en ambos casos, las únicas variaciones que pueden presentar se deben al uso de la base de datos, debido a que en PSCAD se tuvo que modificar la misma a conveniencia del programa. Sin embargo, ese cambio de base de datos no afecta deliberadamente los resultados obtenidos.

La estabilidad de la red dependerá directamente de las magnitudes y ángulos de voltaje, así como de los flujos de la corriente de campo. Cuando una red es inestable, ésta presentará problemas de sincronismo, por lo que, la red desfazará los ángulos de voltaje de los generadores para intentar compensar el fallo, por lo que este fallo afectará a toda la red haciendo que los equipos no trabajen como deberían hacerlo normalmente, por tanto, las máquinas pueden averiarse y, provocar un fallo mayor.

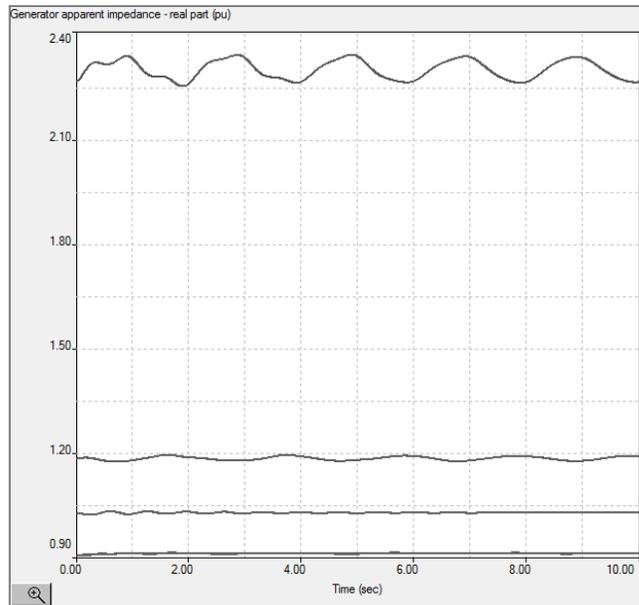
La generación solar fotovoltaica puede afectar a la red por los detalles mencionados anteriormente, la red puede presentar variaciones que dependen directamente de las condiciones climáticas de todos y cada uno de los lugares donde se implementen paneles solares fotovoltaicos conectados a la red. Sin embargo, la red no debería presentar perturbaciones si los elementos conectados no tienen ninguna afectación secundaria.

## 5. Referencias Bibliográficas.

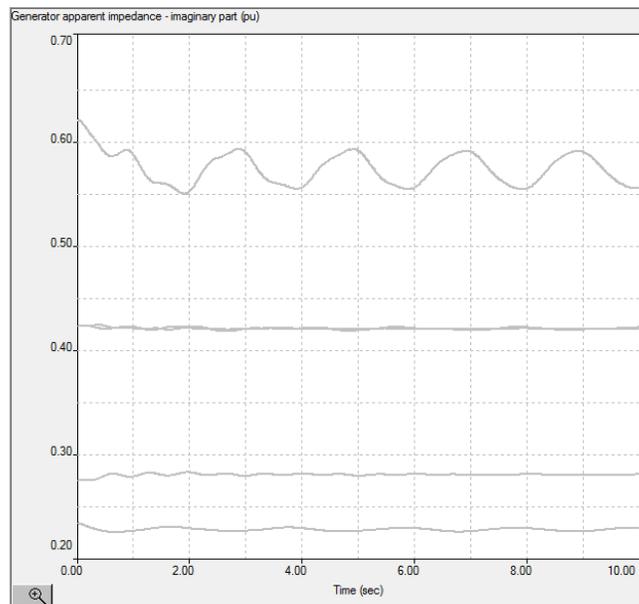
- [1] E. R. C. E. G. R. Pedro González Castrillo, «Influencia de una Instalación Fotovoltaica,» Extremadura, 2011.
- [2] P. Mohanty, «Parimita Mohanty,» New Delhi, 2014.
- [3] A. R. R. C. Bhanu Prakash G, «Study of operational modes of a grid connected solar,» Mumbai, 2016.
- [4] W. P. K. J. T. G. L. H. KOH, «Reliability Evaluation of Electric Power Systems with,» Singapore, 2014.
- [5] R. P. D. a. A. Stankevicius, «Modelling and Analysis of Wind and Solar,» Kaunas, 2014.
- [6] P. M. F. G. P. G. Adiel Aranas, «Estabilidad en los Sistemas Eléctricos de Potencia con Generación Renovable,» Quito, 2013.
- [7] P. eléctricas, «Luz Plantas,» 19 04 2013. [En línea]. Available: <https://www.luzplantas.com/que-es-un-generador-sincrono/>. [Último acceso: 17 10 2018].
- [8] A. SOLAR, «AMT-SOLAR,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.amt-solar.com/index.php/es/sobre-amt-solar>.
- [9] J. Arias, «Arisa,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.arisa.com.mx/plantas.html>. [Último acceso: 17 10 2018].
- [1] S. Solar, «Soty Solar,» 07 06 2017. [En línea]. Available: [https://sotysolar.es/blog/que-son-los-0 inversores-fotovoltaicos](https://sotysolar.es/blog/que-son-los-0-inversores-fotovoltaicos).
- [1] S. Rocket, «Solar Rocket,» 31 05 2018. [En línea]. Available: <http://www.dsrocket.com/baterias-almacenar-energia-solar/>.
- [1] E. Solar, «Energía Solar,» 08 06 2017. [En línea]. Available: <https://solar-energia.net/definiciones/baterias.html>.
- [1] D. R. O. J. Betancourt, «CUCEI,» Agosto 2014. [En línea]. Available: [http://www.cucei.udg.mx/maestrias/electrica/sites/default/files/estabilidad\\_de\\_voltaje\\_en\\_sistemas\\_de\\_potencia\\_-\\_uso\\_de\\_tecnicas\\_basadas\\_en\\_flujos\\_de\\_carga.pdf](http://www.cucei.udg.mx/maestrias/electrica/sites/default/files/estabilidad_de_voltaje_en_sistemas_de_potencia_-_uso_de_tecnicas_basadas_en_flujos_de_carga.pdf).
- [1] G. C. y A. D., «Análisis de Estabilidad Angular del Sistema Eléctrico Ecuatoriano,» Quito, 2014. 4]
- [1] U. D. L. REPÚBLICA, «Sistemas de protección, estabilidad en frecuencia,» Uruguay, 2016. 5]

- [1] S. Andrade, «Academia,» 2006. [En línea]. Available:  
6] [http://www.academia.edu/14960362/6.\\_ESTABILIDAD\\_DE\\_FRECUENCIA\\_Qu%C3%A9\\_es\\_la\\_estabilidad\\_de\\_frecuencia](http://www.academia.edu/14960362/6._ESTABILIDAD_DE_FRECUENCIA_Qu%C3%A9_es_la_estabilidad_de_frecuencia).

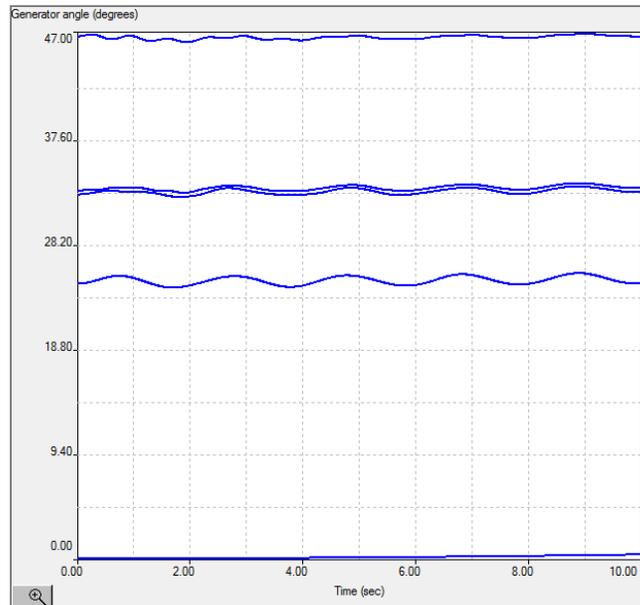




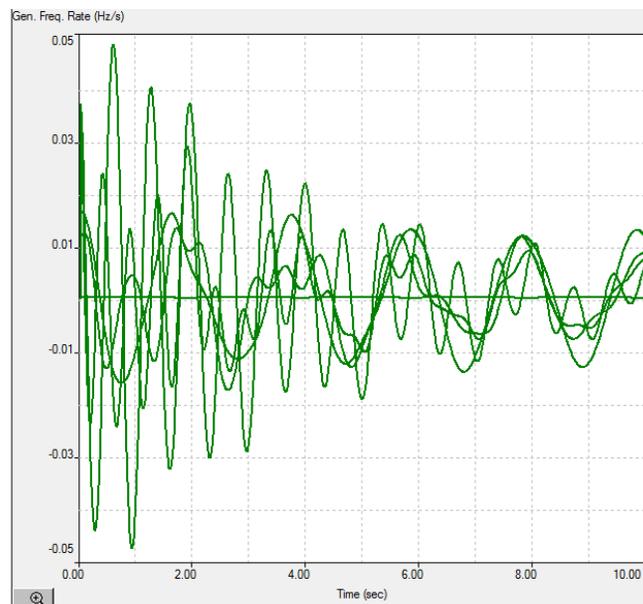
**Fig. 6.3** Gráfico de la impedancia aparente de los generadores (parte real) obtenida en TSAT.



**Fig. 6.4** Gráfico de la impedancia aparente de los generadores (parte imaginaria) obtenida en TSAT.



**Fig. 6.5** Gráfico de los ángulos de voltaje de los generadores obtenida en TSAT.

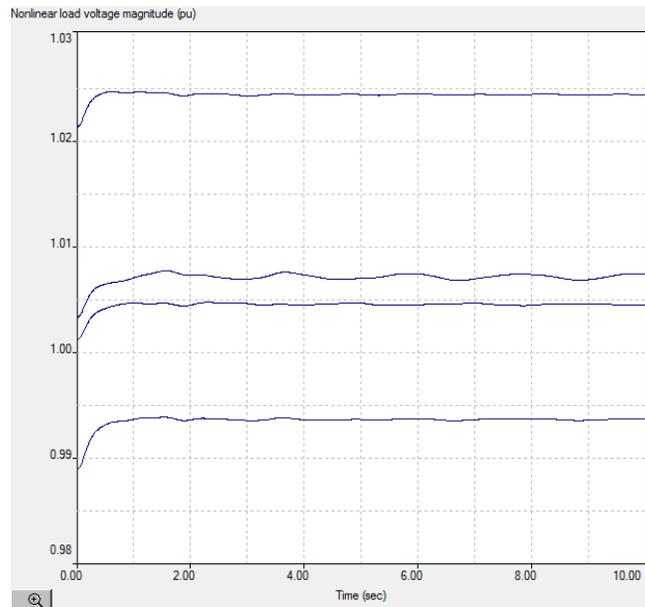


**Fig. 6.6** Gráfico de frecuencia de los generadores obtenida en TSAT.

Los voltajes de la red de transmisión analizada con el fallo de pérdida de carga en el bus número 10. Cada uno de los voltajes de los generadores presentan inestabilidad gracias a este fallo implementado, sin embargo, cabe hacer mención que el bus 1, el cual tiene conectado el generador principal, por lo que su estabilidad no se ve afectada debido a que está conectado a una red de transmisión aún mayor a la del análisis respectivo.

Asimismo, podemos observar que cada detalle en específico de la red se ve modificado por este fallo generado en el bus número 10, podemos observar variaciones en las diferentes

potencias que proporcionan los generadores, así como de las impedancias, los ángulos de fase, y la frecuencia de los mismos.



**Fig. 6.6** Gráfico de la magnitud de voltaje de las cargas no lineales obtenida en TSAT.

Como podemos observar debido al fallo que se generó en el bus número 10, los resultados especifican que el bus 10 tiene un voltaje de 1.02 unidades, proseguido del bus número 7, que tiene un voltaje de 1.01 unidades, seguido del bus número 2 que tiene un voltaje de 1.00 unidades, y finaliza con el voltaje obtenido en el bus número 4, el cual tiene un 0.99 unidades.