



**BUAP**

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**Análisis de estabilidad transitoria para  
unidad de Generación de 40 MVA conectada  
a la red de 23 kV en Subestación Victoria.**

Que para obtener el grado de

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

Presenta:

**ADRIAN CARMELINO ESCOBEDO ROCA**

Director de tesis:

M.C. Ismaél Albino Padilla

Co-director de tesis:

D.R. Alejandro Bautista Hernández

Puebla, Pue.

Septiembre, 2019



**BUAP**

Oficio No. 2120/2019

**C. Adrián Carmelino Escobedo Roca**

Pasante de la Maestría en Ingeniería  
con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia  
Facultad de Ingeniería, BUAP.  
Presente


Por medio del presente, el suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema titulado: **Análisis de estabilidad transitoria para unidad de generación de 40 MVA conectada a la red de 23 KV en subestación Victoria**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia. Asignándose como Director al M.C. Ismael Albino Padilla y Co-director al Dr. Alejandro Bautista Hernández.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

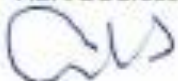
H. Puebla de Zaragoza, mayo 16 de 2019.

  
**M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández**  
Director

C.c.p. M.C. Ismael Albino Padilla y Dr. Alejandro Bautista Hernández, Director y Co-director del Tema de Tesis

C.c.p. Archivo

ABH/GCC/sco\*



MI. Fernando Daniel Lazcano Hernández.  
Director de la Facultad de Ingeniería  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
Presente

Asunto: Autorización de impresión de tesis.

Los suscritos:

MC. Ismael Albino Padilla Director y M.C. Edgar Lorenzo Belmonte González Codirector del tema de tesis:

**" Análisis de Estabilidad Transitoria para Unidades de Generación de 40 MVA Conectadas a Red de 23 KV en la Subestación Victoria "**

Presentada por el Ing. Adrian Carmelino Escobedo Roca, pasante de la Maestría en Ingeniería opción terminal Sistemas Eléctricos de Potencia, nos permitimos informar a usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no se tiene inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

Atentamente

MC. Ismael Albino Padilla

Director tesis

MC Edgar Lorenzo Belmonte González.

Codirector de tesis

H. Puebla de Zaragoza a 15 de Agosto de 2019

CCP Interesado

CCP Archivo

## Agradecimientos

**A Dios:** Por la protección en todo momento y por permitir vivir todos estos años en compañía de mis seres queridos.

**A mi esposa Miriam:** Por creer en mí y por todo el apoyo en toda esta trayectoria de vida y progresos y por estar conmigo en todo momentos buenos y malos.

**A mi familia:**

**A mis Amigos:** Por su compañía a lo largo de toda esta fase de estudios, y compartir bueno momentos.

**A mis asesores:**



## Resumen

Actualmente se encuentran unidades de Generación distribuida de 32 MW conectados a la red de 23 kV del sistema de distribución del valle de México a través de las barras de 23 kV de las subestaciones de la red de Transmisión, los cuales tienen como compromiso mejorar la operatividad y suministro de energía eléctrica al sistema eléctrico de distribución, esto derivado a la creciente demanda en el sistema eléctrico en nuestro país.

Estas unidades de generación están expuestas a fallas internas y externas que originan la desconexión de estas unidades de generación o quedan en una operación en modo isla, lo que trae como consecuencia la indisponibilidad del suministro eléctrico de generación y pérdidas económicas para la Comisión Federal de Electricidad.

Para el modelado del sistema eléctrico, se utilizaron herramientas de trabajo Aspen On Liner y PSSE® 32, tomando en consideración valores reales del sistema, obteniendo con esto un análisis de estabilidad transitoria con las condiciones de contingencias en la red de distribución y los buses de 23 kV de Trasmisión, con los escenarios de alta y baja carga.

En el presente trabajo se realizo una propuesta de modelo de generador GENROU, con la finalidad de analizar el comportamiento del generador ante estas contingencias y hacer un comparativo con los modelos actuales de generadores clásicos con los que se realizan las simulaciones de estabilidad con la red PSSE manejada por la Dirección de operación de Transmisión.

Para su análisis se llevó a cabo las siguientes consideraciones:

- 1.- Modelo en red Aspen On Liner, para el análisis de tiempos de liberación de fallas de los esquemas de protección.
- 2.- Modelado de red PSSE; Trasmisión, Distribución y Generación Distribuida.
- 3.- Simulación de diferentes escenarios para su análisis y comparación; alta carga, baja carga, sin control y con un control propuesto, bajo condiciones de falla.

Las simulaciones realizadas demostraron que existe un mejor en el comportamiento de los generadores ante las fallas que ocurren en la red de distribución, considerando los diferentes escenarios de alta y baja carga, estas mejoras se pueden implementar para su seguimiento futuro con los modelos de gobernador y estabilizador de sistemas de potencia.



## Abstract

There are currently 32 MW distributed generation units connected to the 23 kV network of the distribution system of the Valley of Mexico through the 23 kV buses of the Transmission network substations, which are committed to improving operability and supply of electrical energy to the electrical distribution system, this derived from the growing demand in the electrical system in our country.

These generation units are exposed to internal and external failures that cause the disconnection of these generation units or an operation in island mode, which results in the unavailability of the generation electricity supply and economic losses for the Federal Electricity Commission.

For the modeling of the electrical system, Aspen On Liner and PSSE® 32 work tools were used, taking into account real values of the system, thus obtaining a transient stability analysis with the contingency conditions in the distribution network and the busses of 23 kV Transmission, with high and low load scenarios.

In the present work, a proposal of a GENROU generator model was made, with the purpose of analyzing the behavior of the generator in the face of these contingencies and making a comparison with the current models of classic generators with which the stability simulations with the PSSE network are carried out managed by the Transmission operation Directorate.

The following considerations were carried out for its analysis:

- 1.- Aspen On Liner network model, for the analysis of fault release times of protection schemes.
- 2.- PSSE network models; Transmission, Distribution and Distributed Generation.
- 3.- Simulation of different scenarios for analysis and comparison; high load, low load, without control and with a proposed control, under fault conditions.

The simulations performed showed that there is a better performance of the generators in the face of failures that occur in the distribution network, considering the different scenarios of high and low load, these improvements can be implemented for future monitoring with governor models and power system stabilizer.



## Índice general

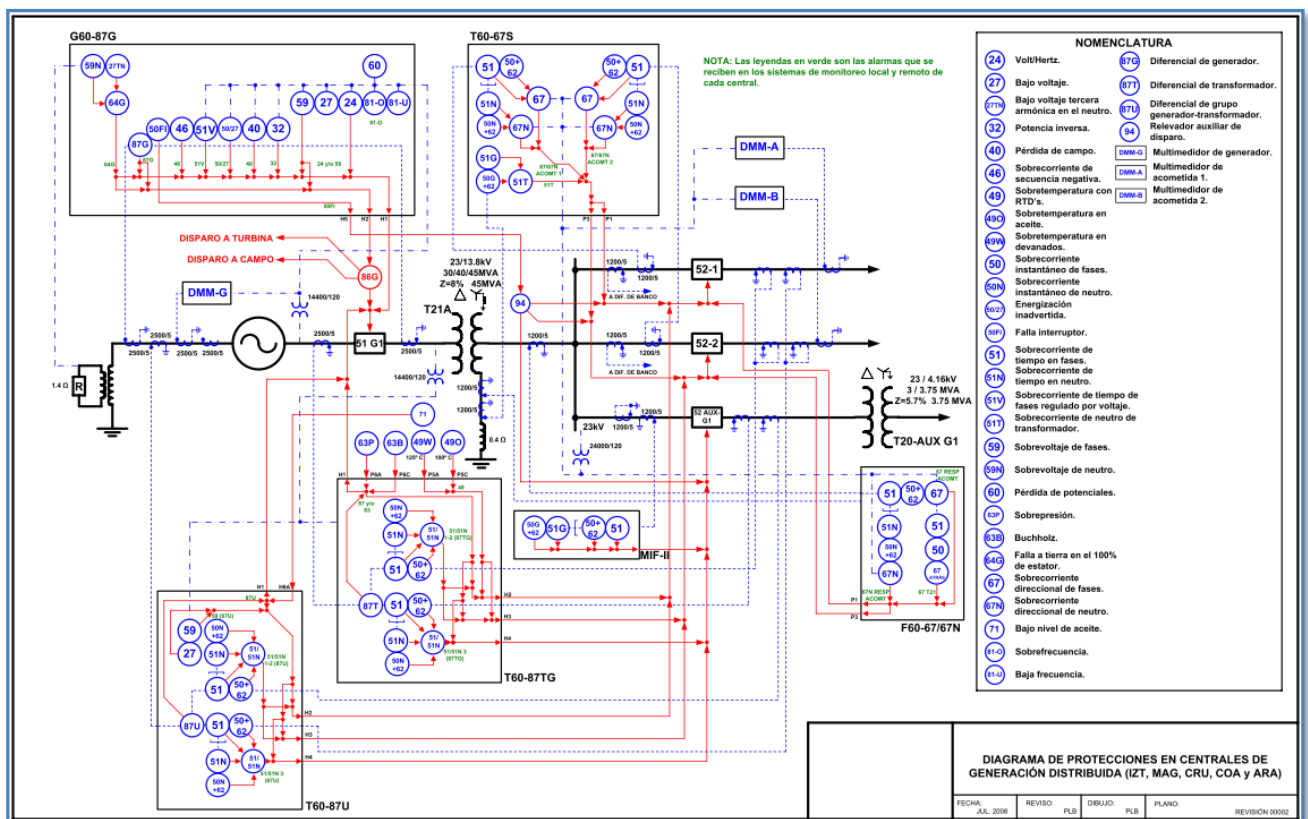
Resumen .....	4
Abstract.....	5
<b>Introducción. ....</b>	<b>12</b>
<b>I.2. Justificación del problema. ....</b>	<b>13</b>
<b>I.3. Objetivos del estudio .....</b>	<b>14</b>
<b>I.3.1. Objetivo General .....</b>	<b>14</b>
<b>I.3.2. Objetivos particulares.....</b>	<b>14</b>
<b>I.4. Hipótesis.....</b>	<b>15</b>
<b>I.5. Alcance del proyecto.....</b>	<b>15</b>
<b>I.5. Aportaciones .....</b>	<b>15</b>
<b>I.6. Sistema Eléctrico en México.....</b>	<b>16</b>
<b>I.7. Sistema Eléctrico en el Valle de México. ....</b>	<b>17</b>
<b>I.7. Sistema de Generación Distribuida en México.....</b>	<b>19</b>
<b>I.8. Sistema de Generación Distribuida en el Valle de México.....</b>	<b>23</b>
<b>I.8. Estadística de fallas en la red de generación distribuida en el valle de México. ....</b>	<b>25</b>
<b>Capitulo II.....</b>	<b>26</b>
<b>II.1. Estabilidad del sistema eléctrico de potencia.....</b>	<b>26</b>
<b>II.1.1. ESTABILIDAD TRANSITORIA.....</b>	<b>28</b>
<b>II.1.2. ESTABILIDAD ANGULAR.....</b>	<b>28</b>
<b>II.1.3. ESTABILIDAD VOLTAJE.....</b>	<b>29</b>
<b>II.2. MODELO GENERADOR. ....</b>	<b>29</b>
<b>II.2. MODELO DE CARGAS.....</b>	<b>29</b>
<b>II.3. CONTROL AUTOMATICO DE VOLTAJE. ....</b>	<b>29</b>
<b>CAPITULO III.....</b>	<b>30</b>
<b>III.1. GENERACIÓN DISTRIBUIDA.....</b>	<b>30</b>
<b>III.1.1GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL VALLE DE MEXICO.....</b>	<b>30</b>
<b>III.2. RED ELECTRICA DEL SISTEMA DE POTENCIA.....</b>	<b>31</b>
<b>III.2.1. TRANSFORMADOR DE POTENCIA. ....</b>	<b>31</b>
<b>III.2.2. REDES DE DISTRIBUCIÓN.....</b>	<b>31</b>
.....	<b>31</b>
<b>III.3. Protecciones eléctricas en el sistema de generación.....</b>	<b>32</b>



**“Análisis de estabilidad transitoria para unidad de Generación de 40 MVA conectada a la red de 23 kV en Subestación Victoria.”**

Actualmente el sistema eléctrico interconectado trae mayores retos para la operación de los equipos en condiciones normales de operación y ante contingencias, las unidades de generación conectadas directamente a los centros de carga tienen un desarrollo tecnológico en los esquemas y ajustes de protección que deben cumplir con las especificaciones vigentes de la CFE, con la finalidad de tener una mayor flexibilidad, seguridad y confiabilidad en el sistema al que se interconectan.....32

Los esquemas de protección han evolucionado en su tecnología, siendo los primeros los relevadores electromecánicos, evolucionando posteriormente a los relevadores de estado sólido o estáticos, finalmente en la actualidad los relevadores son de tecnología digital, con la que se puede llevar a cabo la programación de diferentes lógicas de operación con mayor facilidad y practicidad.....32



.....32

**Figura xxx. Esquemático de Protecciones Eléctricas de las Unidades de Generación Distribuida en el Valle de México.** .....32

En la Figura xxx, se observa los esquemas de protección de la unidad generadora, esta obedece en gran parte al arreglo con interruptor de maquina en baja tensión del procedimiento CFE G0100-07, sin embargo, estas unidades cuentan con protecciones de sobre-corriente direccional para la protección de acometidas.....33



Las unidades de generación distribuida se encuentran integradas por seis grupos de protecciones eléctricas locales y de respaldo; Protecciones de Generador (G60-87G), Protecciones del Transformador Elevador (T60-87TG), Protecciones de Unidad de generación (T60-87U), Protección de Transformador de servicios propios (T20-AUX G1), protección de respaldo de acometida 1 (T60-67S) y protección de respaldo de acometida 2 (F60-67/67N). ....33

Además de las protecciones propias de la unidad de generación, se tiene un arreglo de sumatorias de corrientes del módulo de transferencias de acometidas en la unidad generadora y la sumatoria de corrientes de los alimentadores de 23 kV’s de los transformadores de potencia de la S.E. Victoria, estas corrientes son conectadas al relevador de protección 87T de los transformadores de potencia en la S.E. Victoria. ....34

Esta protección se logra con las tres aportaciones de corriente conectadas a la protección, aportación lado alta, aportación lado baja y aportación de la unidad generadora, o en su caso con la conexión en paralelo de las corrientes de aportación de la unidad generadora con las corrientes de aportación de los alimentadores de 23 kV de la S.E. Victoria. ....34

La finalidad del alcance de esta protección es la de proteger de forma instantánea los cables de potencia que interconectan la unidad generadora con las barras de 23 kV de la S.E. Victoria, por lo que de existir una falla en esta zona se accionan los disparos los interruptores del transformador de potencia en S.E. Victoria y el interruptor de acometida de la unidad generadora con el que se encuentra suministrando la generación, quedando la unidad generadora en modo isla y con los servicios propios de la unidad generadora. ....34

Las protecciones eléctricas de respaldo de la unidad de generación deben estar coordinadas con los tiempos de operación de las protecciones de respaldo del transformador de potencia y de las protecciones primarias de los circuitos de distribución, esto con la finalidad de no sobrealcanzar a estas protecciones y tener operaciones en falso de la unidad generadora. ....34

**III.4. MODELADO DE CONTROL AUTOMATICO DE VOLTAJE .....34**

**CAPITULO IV..... 35**

**IV.1. Características y configuración de la red. .... 35**

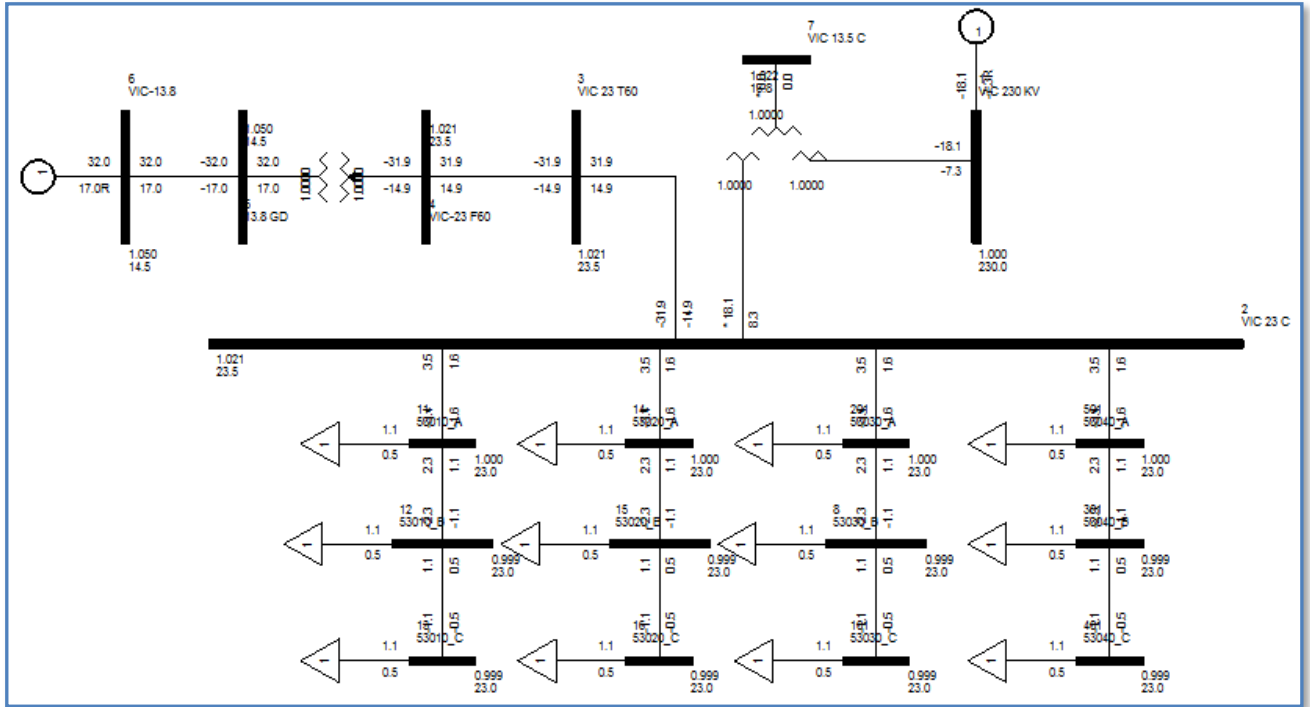
**IV.21. Estudio de flujos de potencia..... 38**

Para el análisis del comportamiento del generador con las simulaciones presentadas en este estudio, se tiene como principal punto de inicio, el análisis de flujos de potencia con la finalidad de obtener los voltajes en cada nodo del sistema bajo estudio, para lo que se obtuvieron flujos de potencia con los escenarios de alta y baja carga con cuatro circuitos de 23 kV (15MW’s y 72MW’s respectivamente). .... 38

Para las simulaciones de alta y baja carga, se consideró un voltaje de +5%, siendo este de 1.05 p.u., con la finalidad de tener al generador en su máximo nivel de voltaje permitido..... 38



**“Análisis de estabilidad transitoria para unidad de Generación de 40 MVA conectada a la red de 23 kV en Subestación Victoria.”**

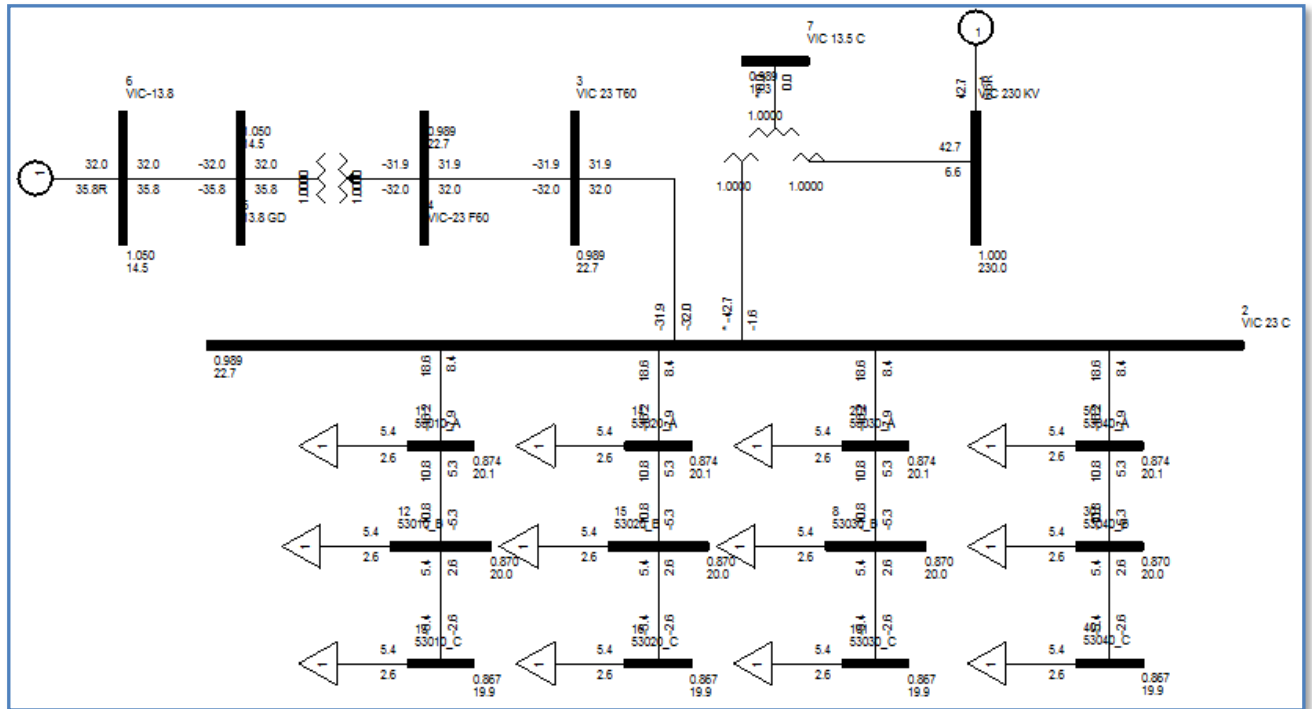


..... 39  
**Figura xxx. Flujos de potencia con 15 MW** ..... 39

La figura xxx, se tiene los flujos de potencia con baja carga de 15 MW con cuatro circuitos de 23 kV, se observa la generación de 32 MW con un voltaje en el bus de 1.05 p.u. en el bus del generador, esto con la finalidad de llevar al generador a su máximo voltaje permitido del 5%, en el transformador de 230/23 kV's se tiene una potencia de -18 MW que es consumida por el sistema de la red de 230 KV, a través del transformador de potencia. .... 39



**“Análisis de estabilidad transitoria para unidad de Generación de 40 MVA conectada a la red de 23 kV en Subestación Victoria.”**



.....	40
<b>Figura xxx. Flujos de potencia con 72 MW</b> .....	40
La figura xxx, se tiene los flujos de potencia con alta carga de 72 MW con cuatro circuitos de 23 kV, se observa la generación de 32 MW con un voltaje en el bus de 1.05 p.u. en el bus del generador, en el transformador de 230/23 kV's se tiene una potencia de 42.7 MW que es aportada por el sistema de la red de 230 KV a través del transformador de potencia. ....	40
<b>IV.21. Parámetros del estado dinámico</b> .....	40
<b>IV.2. ANALISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA SIN CONTROL</b> .....	41
Para el análisis de la estabilidad transitoria sin contar con los controles de regulador de voltaje, se tomó como propuesta para este estudio el modelo del generador GENROE, y se lleva a cabo el comparativo de	41
<b>IV.2.1. ANALISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA BAJA CARGA</b> .....	41
<b>IV.2.2. ANALISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA ALTA CARGA</b> .....	41
<b>IV.3. ANALISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA CON AVR</b> .....	42
<b>IV.3.1. ANALISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA BAJA CARGA</b> .....	42
<b>IV.3.2. ANALISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA ALTA CARGA</b> .....	42
<b>CAPITULO VI</b> .....	43
<b>VI.1. CONCLUSIONES</b> .....	43
<b>REFERENCIAS</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>ANEXOS</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>Bibliografía</b> .....	53



## Figuras

*Figura1. Marco temporal de los fenómenos dinámicos del sistema eléctrico básico. 28*





## Introducción.

La evolución del sistema eléctrico fue en los años de 1870, para la iluminación y alumbrado público, fue hasta los años de 1882 que Tomas Edison formo el primer sistema eléctrico de corriente directa en la ciudad de nueva york en la estación Pearl Street, para el año de 1893 al sur de california entra en operación la primer línea trifásica de corriente alterna de 12 km a un nivel de tensión de 2300 V, con el continuo desarrollo de las tecnologías y la necesidad de transmitir mayor energía a grandes distancia se tuvo la necesidad de incrementar los niveles de voltaje. [1]

En la actualidad es necesario incrementar la generación y la confiabilidad del sistema eléctrico nacional, derivado al incremento de la demanda eléctrica y los clientes importantes conectados en la red de 23 Kv en el Valle de México, ante esto se requiere responder con el compromiso de realizar una operación confiable cerca a los límites eléctricos y físicos del equipo instalado.

Las redes de potencia que integra el SEN en particular la red distribución de 23kV de la Zona Valle de México es la encargada de mantener el suministro de Energía Eléctrica del Centro del País, por lo que su confiabilidad es de suma importancia para los usuarios que integran el Mercado Eléctrico de esta zona.

Para lograr el suministro de la demanda en el Valle de México, se llevó a cabo un proyecto integral de generación distribuida, estas centrales generadoras son conectadas directamente a los buses de 23 kV en las subestaciones de potencia con lo que contribuye al suministro eléctrico de manera directa a los centros de carga.

Desde la fecha de instalación de estas unidades distribuidas de generación se han presentado disturbios en la red de 23 kV del Valle de México provocando la salida no programadas de estas centrales generadoras teniendo hasta el momento reconfiguración de los Flujos de Potencia en la red de 23 kV y pérdidas económicas por indisponibilidad de la generación.

El interés del desarrollo del modelo propuesto se centraliza en la mejora de la red PSSE de la red nacional de la Dirección de Transmisión.



Es de importancia para el desarrollo del presente trabajo el

Hay una variedad de ventajas en el uso de la generación distribuida, esto derivado a la cercanía del punto de conexión a los centros de carga, entre las que destacan las siguientes

1.- Reducción de caída de tensión por condición de distancias eléctricas.

2.- menor costo de porteo

3.- mayor confiabilidad en el suministro eléctrico

4.- Reducción de perdidas eléctricas técnicas y no técnicas

5.- Ahorro de energía durante la hora de demanda máxima.

## **I.2. Justificación del problema.**

La Zona Valle de México se encuentra conformada por grandes clientes industriales y comerciales conectados a la red de distribución de 23 kv's, esto conlleva a tener la disponibilidad del sistema eléctrico con eficiencia, calidad y confiabilidad en el suministro energético.

El crecimiento de la demanda en esta zona tiene como resultado el incrementar la generación de tal forma que sea lo más cercano a la carga con la finalidad de obtener mejores resultados en el suministro energético.

La conexión de estas generadoras a la red de distribución hace compleja la operación de las mismas, esto derivado a la exposición que tienen con las fallas comunes en los circuitos de distribución, ocasionando salidas de operación de estas e indisponibilidad de la generación.

Por lo anterior se requiere de un análisis del comportamiento que tienen los disturbios en la red distribución con los disparos de estas generadoras, realizando una propuesta de modelo de generador, esto con la finalidad de obtener resultados que den pauta a la reducción de salidas no programadas de estos equipos.



## **I.3. Objetivos del estudio**

### **I.3.1. Objetivo General**

El interés de elaborar el presente trabajo tiene como objetivo el análisis de la estabilidad transitoria de los generadores distribuidos de 32 MW conectados a la red de Distribución del Valle México, considerando las fallas más comunes en la red de distribución a las que están expuestos estos generadores, esto realizando un modelo de generador propuesto y realizando los comparativos con el modelo actual cargado en la base de datos de la Subdirección de Transmisión de la comisión Federal de Electricidad, con el apoyo del software Aspen On Liner y PSSE 32 para el desarrollo de las simulaciones.

### **I.3.2. Objetivos particulares**

En consecuencia, a lo largo de este documento se explicará la arquitectura básica de interconexión de las unidades generadoras y la red de distribución, se diseñará una red interconectada capaz de reproducir los tiempos de falla a las que está expuesta estos generadores.

- Comprensión de la problemática de la interconexión de estas unidades de generación con la red de distribución.
- Desarrollo de la red Generación, Transmisión y red de distribución con el software PSSE 32 con parámetros de la S.E. Victoria para la simulación del sistema interconectado.
- Contribuir en el estudio y análisis del comportamiento de los generadores distribuidos conectados a la red de distribución del Valle de México.
- Contribuir a la mejora de la Base de Datos de la Red PSSE de la Subdirección de Transmisión de la Comisión Federal de Electricidad.



#### **I.4. Hipótesis**

Se parte de la idea que el modelo de generador clásico (GENCLS) representan maquinas síncronas con más simplicidad que el de un modelo GENROE, por lo que en las simulaciones del sistema representado en el presente trabajo demostrara las mejoras que se pueden tener en el uso del modelo propuesto, y que su uso puede ser de gran ayuda en la base de datos de la red eléctrica PSSE utilizada en la CFE, en específico en los generadores distribuidos conectados en 23 kV en el Valle de México, para su futuro análisis de fallas en las redes de Distribución.

#### **I.5. Alcance del proyecto**

El alcance del presente pretende describir las funciones y conceptos básicos de las Unidades de generadoras y la red eléctrica que se interconecta con estas mismas, realizar las simulaciones necesarias para reproducir las condiciones reales del sistema y las fallas a las que están expuestas con la finalidad de obtener resultados que favorezca a utilizar el nuevo modelo GENROU para la red PSSE utilizado en la Subdirección de Transmisión de la Comisión Federal de Electricidad.

#### **I.5. Aportaciones**



## I.6. Sistema Eléctrico en México.

La primera planta de generación en México fue instalada en la Ciudad de León, Guanajuato, con una capacidad de 1.8 kW en la fábrica de hilados y tejidos “La americana”, el crecimiento de las textilerías fueron los principales usuarios de la energía eléctrica. Para los años de 1884 a 1890, el suministro eléctrico tenía el objetivo de abastecer el alumbrado público en diferentes ciudades de México. [2]

La primer hidroeléctrica instalada en México fue en Batopilas, Chihuahua en los años de 1889 con 22 kW de capacidad eléctrica. La hidroeléctrica Necaxa fue puesta en servicio en los años de 1905 fue considerada como las más grande en Latinoamérica, con la línea de transmisión de 272 Km, en un voltaje de 60 kV y con la que se conectaba la plata hidroeléctrica con la Ciudad de México. [2]

Para la década de los años 1960, se lleva a cabo la expansión y desarrollo de los sistemas de Generación y Transmisión, obteniendo así una interconexión entre sistemas aislados, desarrollándose un sistema eléctrico interconectado a nivel nacional, unificando la frecuencia a 60 Hz para todos los equipos y dispositivos del sistema eléctrico. [2]

En las décadas de 1970, 1980 y 1990, se obtiene un crecimiento en el desarrollo de tecnologías de Generación entre las que destacan: Geotérmica, Carboeléctricas, eólico, y la primera y única central nucleoelectrica Laguna Verde construida en 1990 en Veracruz. [2]

A partir del año 2000 la tecnología de las energías renovables se convirtieron en un objetivo para el desarrollo sustentable en el sistema eléctrico, la primera planta fotovoltaica fue Santa Rosalía (Tres Vírgenes) en Baja California en operación desde el 2012, con 1 MW de generación eléctrica. [2]

Actualmente con la Reforma Energética, pretende la modernización del sector energético, se subastan proyectos de generación destacando promover la competencia en el sector eléctrico y busca el crecimiento de las nuevas fuentes limpias y renovables.



## 1.7. Sistema Eléctrico en el Valle de México.

El sistema eléctrico nacional se encontraba operado por dos empresas nacionales, Luz y Fuerza del Centro operaba en el centro del país y el resto del sistema se encontraba operado por la empresa Comisión Federal de Electricidad, ambas empresas interactuaban para el suministro eléctrico del país hasta el año 2009.

El 11 de octubre de 2009, se dio a conocer el decreto mediante el cual se extingue el organismo descentralizado Luz y Fuerza del Centro, a partir de esta fecha se realiza un operativo para el mantenimiento y operación por parte de la CFE, y es hasta el 11 de octubre donde se pone a disposición de la CFE los bienes de LyFC, con estos cambios en la operación del sistema en el centro del país, se crearon nuevas zonas de operación de transmisión y distribución.

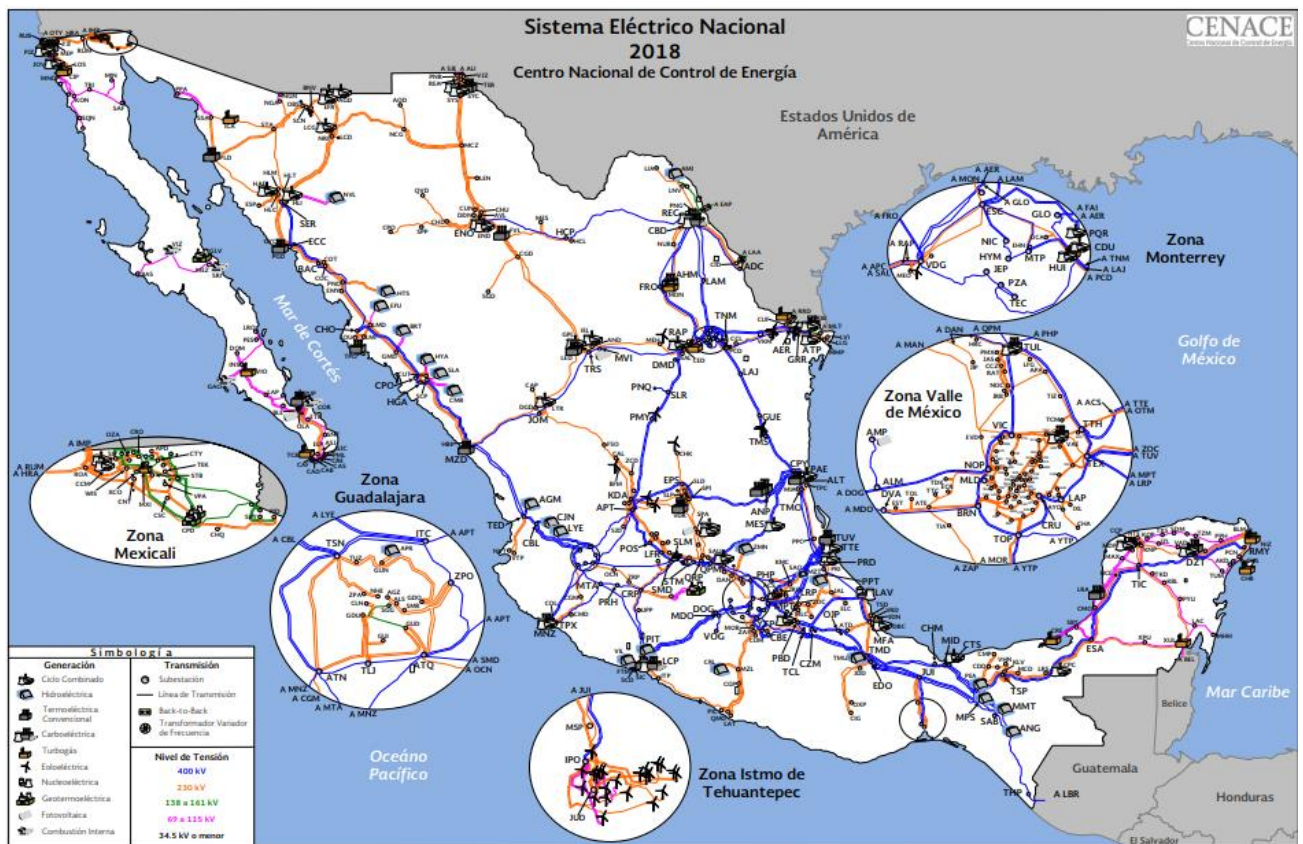


Figura xxx. Ubicación de la red eléctrica del valle de México dentro del sistema eléctrico nacional.

Las Zonas de Transmisión y Distribución que operan el sistema eléctrico en el Valle de México abarcan los estados de Morelos, Puebla, Hidalgo, Estado de México y Ciudad de México, y se encuentran divididas por 5 zonas de distribución y 4 Transmisión.



Para mantener la confiabilidad de este sistema, se encuentra un doble anillo de 400 kV's que rodea todas las Zonas del Valle de México, este doble anillo se interconecta con el resto del sistema con otras Zonas de Transmisión, dentro de las zonas de valle de México se transforma el nivel de 400 kV's a 230 Kv's a través de transformadores de potencia.

En la red de 230 kV's se tienen corredores y enlaces que interconectan con otras Zonas de Transmisión, este nivel de tensión se transforma a los niveles de 85 kV's y directamente a niveles de 23 kV's, la cuales son operadas por las zonas de distribución, a su vez se tiene líneas radiales que alimentan clientes importantes en este nivel de tensión.

En la red de 85 kV's se tiene la particularidad de que solo se maneja este nivel en las Zonas del Valle de México por lo que se tienen corredores que interconectan solo entre estas zonas de transmisión y distribución, este nivel de tensión alimenta clientes industriales y a su vez transforman de 85 kV's a 23 kV's, apoyando a la red de distribución.

La red de 23 kV's, es la conformada por circuitos radiales y en anillo que se enlazan para su respaldo con otras subestaciones cercanas, este nivel de tensión es el que suministra energía eléctrica a clientes industriales pequeños en el nivel de tensión de 23 kV's y a los servicios residencial y comercial en niveles de 220 Volts.

Las subestaciones de Transmisión y Distribución son en su mayoría de tipo intemperie, en diferentes niveles de tensión 400/23/85/23 kV's con diferentes arreglos eléctricos que permite la flexibilidad en la operación de estas. También se tiene en operación subestaciones aisladas en gas SF6

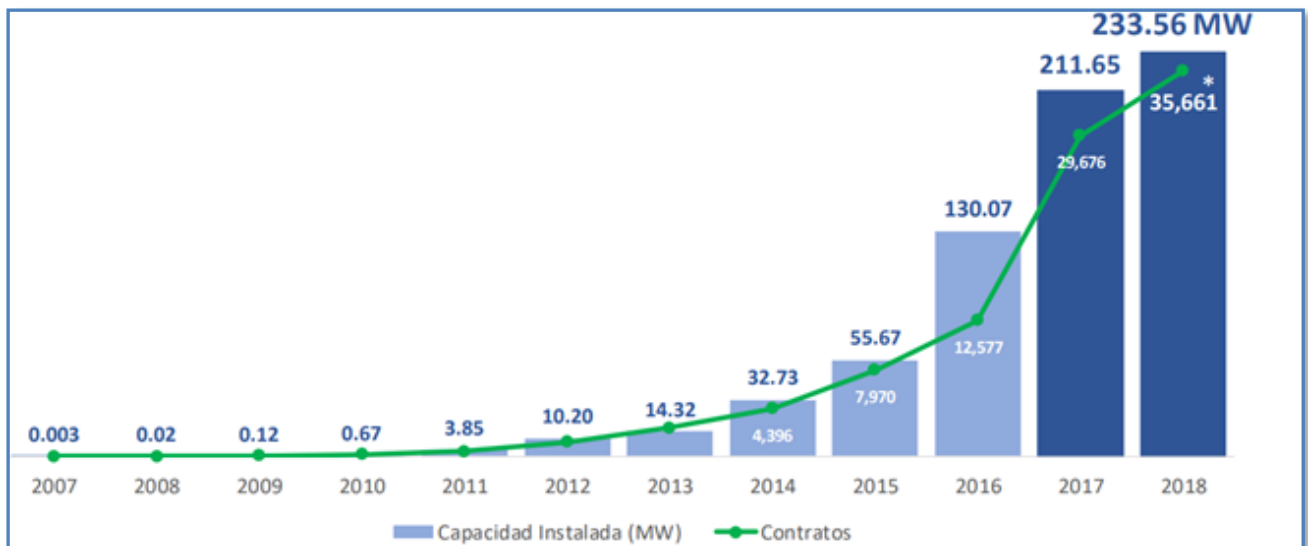


## 1.7. Sistema de Generación Distribuida en México.

La Generación Distribuida como se analiza a través de los años de evolución del sistema eléctrico nacional, existían estos sistemas de generación de forma aislada y conectada directamente al centro de consumo, con el crecimiento del sistema eléctrico los sistemas de generación fueron siendo de mayor capacidad y conectado a través de largas redes de Transmisión.

En la actualidad con el desarrollo de las tecnologías y para lograr reducir las pérdidas por el transporte de energía, reducción de infraestructura y beneficios económicos, se ha aumentado la instalación de Generadores colocados cerca de los puntos de conexión y consumo.

La Generación Distribuida se encuentra en una etapa de crecimiento exponencial, esto derivado a sus ventajas técnicas y económicas, con la reforma energética México abre un marco regulatorio para el sistema de Generación Distribuida contando con el acceso al mercado eléctrico nacional.



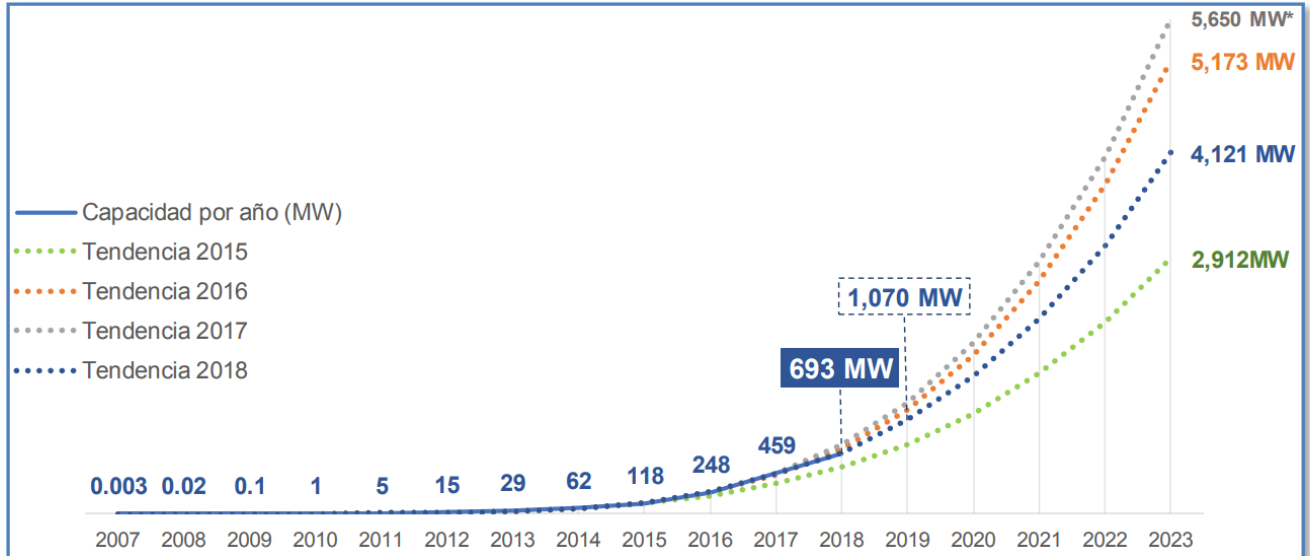
2. Evolución de Contratos y Capacidad Instalada de Generación Distribuida en México.

En la tabla 2 se presenta la evolución anual que se ha presentado a lo largo de 11 años en la Generación distribuida, estos datos son proporcionados por la empresa productiva subsidiaria de la Comisión Federal de Electricidad, CFE Distribución al cierre del año 2018, y como se nota en dicha grafica se tiene un crecimiento notorio desde el año 2014, [2]



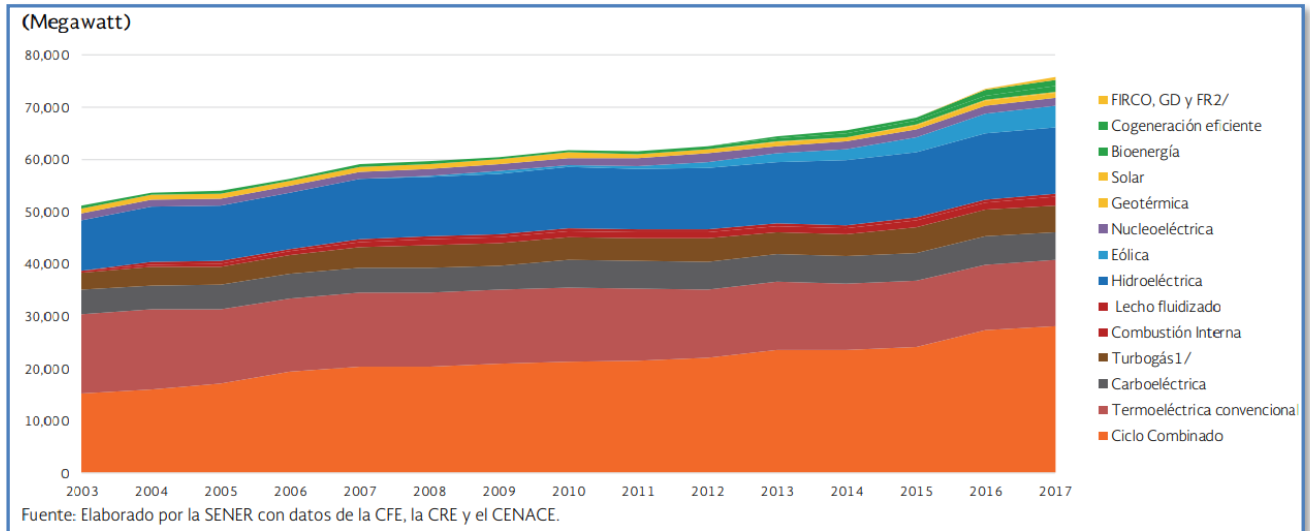
**“Análisis de estabilidad transitoria para unidad de Generación de 40 MVA conectada a la red de 23 kV en Subestación Victoria.”**

Así como el crecimiento se ve incrementado, también se tiene una proyección del incremento de la generación Distribuida, esta proyección es cambiante, sin embargo para

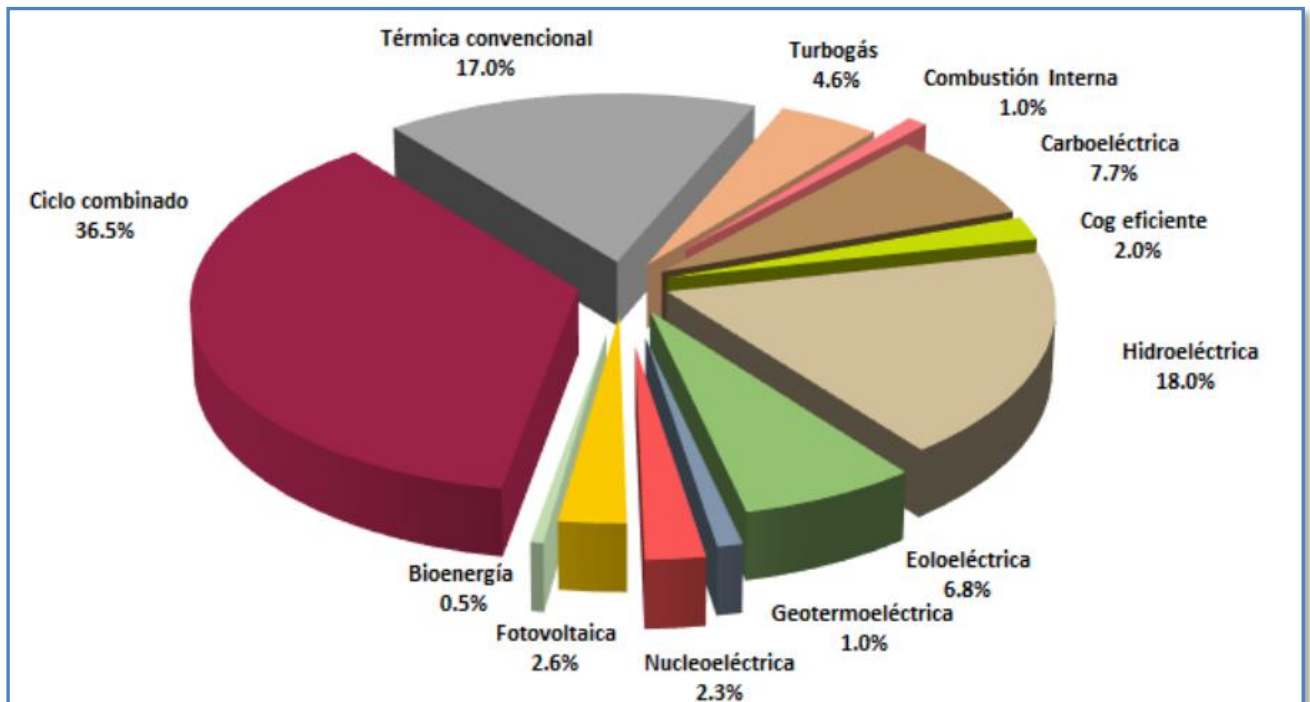




## “Análisis de estabilidad transitoria para unidad de Generación de 40 MVA conectada a la red de 23 kV en Subestación Victoria.”



### EVOLUCIÓN DE LA CAPACIDAD INSTALADA POR TIPO DE TECNOLOGÍA



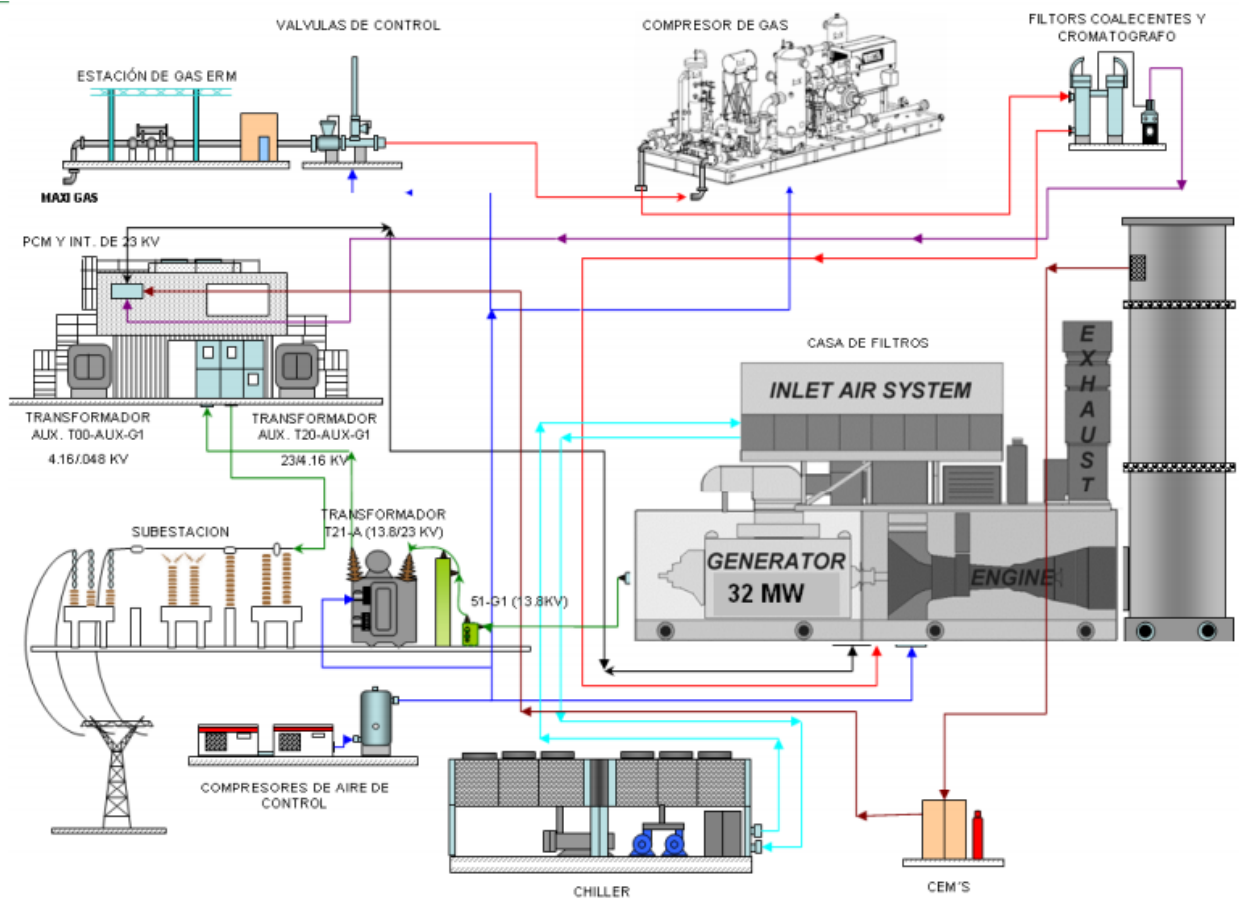
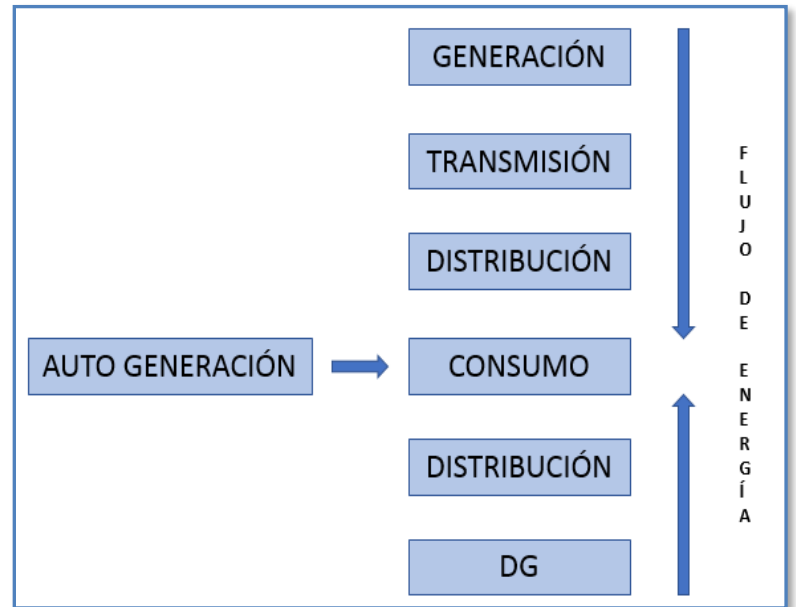
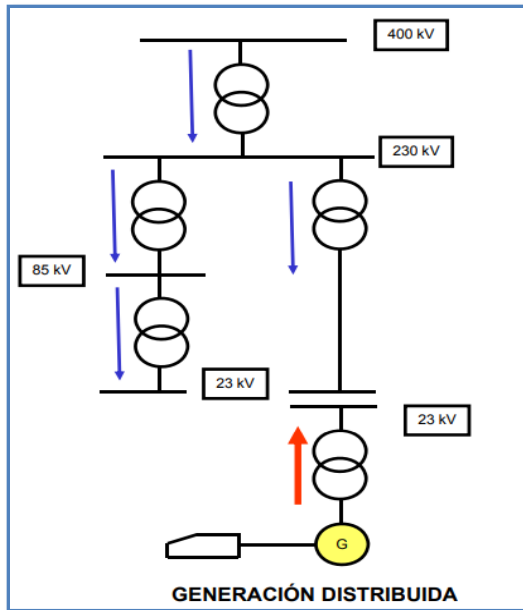
En los últimos 15 años se ha presentado un crecimiento anual en la generación eléctrica del 2.8 %





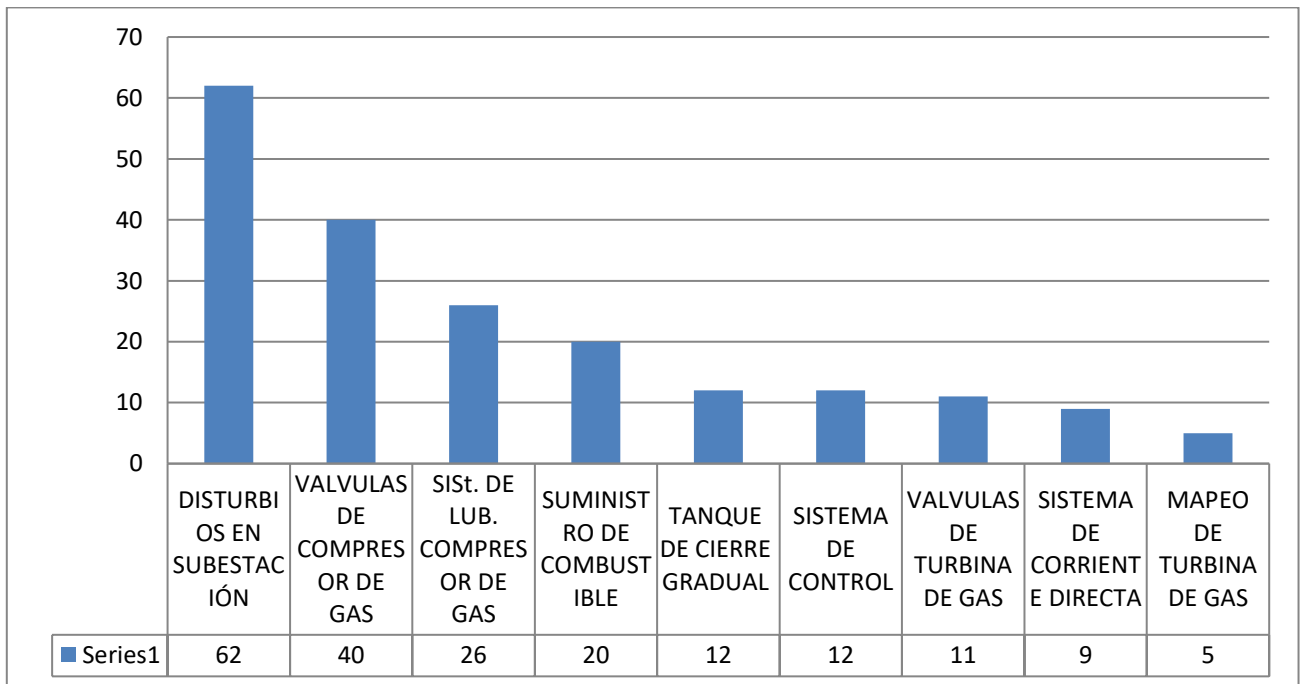
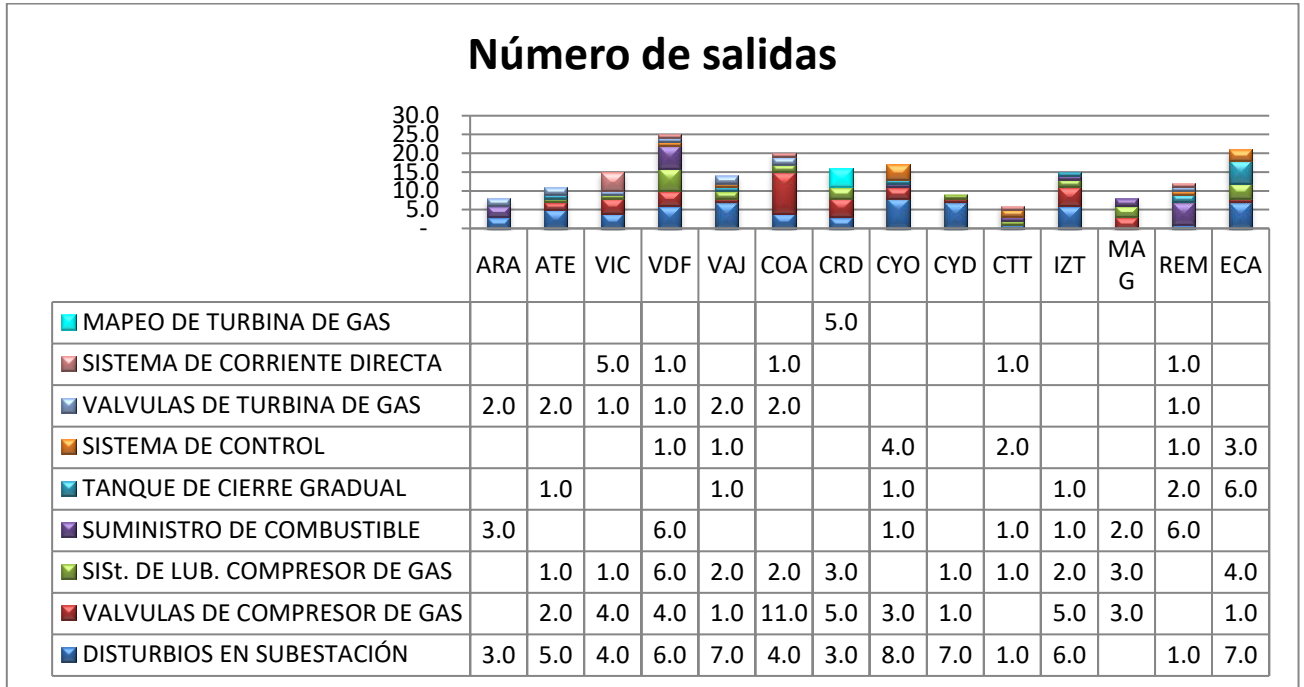


# "Análisis de estabilidad transitoria para unidad de Generación de 40 MVA conectada a la red de 23 kV en Subestación Victoria."





I.8. Estadística de fallas en la red de generación distribuida en el valle de México.





## Capítulo II.

### II.1. Estabilidad del sistema eléctrico de potencia.

El sistema eléctrico de potencia es un conjunto de elementos que interactúan y que tiene como finalidad Generar, Transformar, Transmitir, Distribuir y Consumir la energía eléctrica de tal forma que se logre la mayor calidad al menor costo posible.

Un sistema eléctrico de potencia consta de plantas generadoras que producen la energía eléctrica consumida por las cargas, las redes de transmisión y de distribución son utilizadas para transportar esa energía a los puntos de consumo, así como el equipo adicional necesario para lograr el suministro de energía.

Para el desarrollo a largo plazo del sistema eléctrico de potencia que se encuentra creciendo continuamente, se toma en consideración el impacto de la estabilidad, esto derivado que se dificulta el sincronismo de las maquinas dentro del sistema interconectado.

La estabilidad de un sistema eléctrico interconectado debe ser capaz de mantener sus parámetros en equilibrio en condiciones normales de operación y la capacidad de regresar a su condiciones operativas dentro de los rangos eléctricos permitidos cuando es sometido a perturbaciones, el incremento en la infraestructura hace que el sistema sea cada día mas complejo para su operatividad y para mantener su estabilidad, es por esto que para las ampliaciones y nuevas obras que se interconectarán al sistema son evaluadas y estudiadas para ver el comportamiento del sistema con el incremento de nuevos equipos. [3]



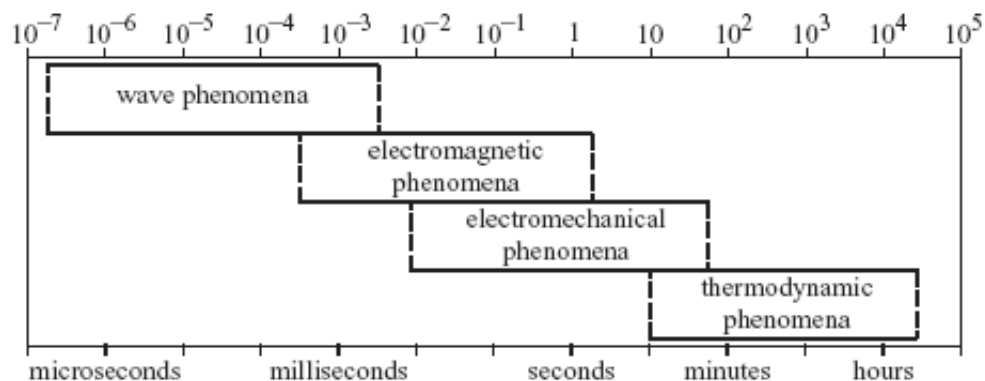
Los estudios de la estabilidad de un sistema se clasifican básicamente en dos tipos: estado estable y estado transitorio, la condición del análisis en estado estable se considera cuando todos sus parámetros de operación de un sistema se mantienen constantes, cerca de sus límites sin perder el sincronismos de la maquina, bajo estas condiciones de estado estable pueden ocurrir cambios en los parámetros del sistema, estos cambios se denominan disturbios, estos a su vez pueden ser pequeños o grandes dependiendo su origen, las perdida de unidades de generación y los cambios súbitos en el sistema como perdida de líneas de transmisión o transformadores de potencia ya sea por maniobra o por falla en los mismos generan cambios significativos en el sistema, estos son unos de los ejemplos de grandes disturbios, las variaciones en los parámetros del sistema por acciones de los sistemas de excitación o regulación de voltaje de grandes unidades que permite al sistema regresar a la misma condición del sistema son ejemplos de pequeños disturbios, para el caso del estado transitorio

[3]

el estado dinámico

Debido a esta conexión del sistema de potencia, se tiene una variedad de fenómenos dinámicos a los cuales el sistema se encuentra expuesto, y estos pueden afectar a menor o mayor escala según el origen, causa, intervalo de tiempo y el punto de la red en la cual se genera.

Estos fenómenos pueden clasificarse en cuatro grandes grupos; Onda, electromagnéticos, electromecánicos y termodinámicos. Los fenómenos de onda son principalmente son debido a descargas atmosféricas y por maniobra los cuales ocurren en la red de transmisión y distribución [3].

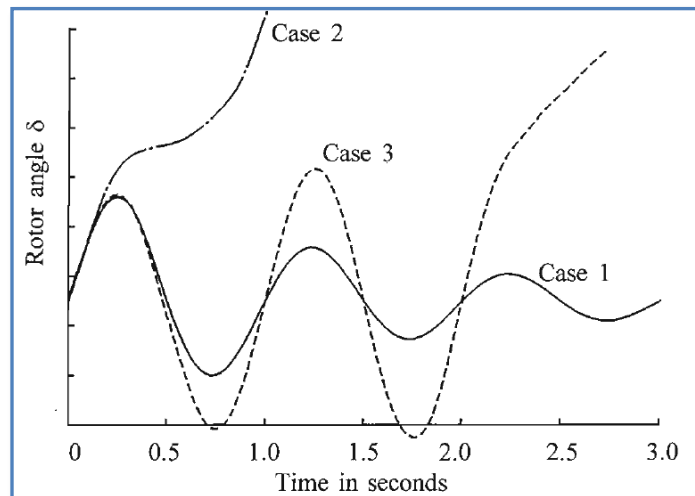


## Figura1. Marco temporal de los fenómenos dinámicos del sistema eléctrico básico.

### II.1.1. ESTABILIDAD TRANSITORIA.

### II.1.2. ESTABILIDAD ANGULAR.

En la siguiente figura xxx, se muestra el comportamiento del ángulo del rotor de una maquina síncrona, esto bajo tres condiciones de oscilación, las tres condiciones son sometidas a un disturbio y al momento de la liberación del mismo se generan los casos siguientes: en el caso un el ángulo Angulo del rotor aumenta hasta un punto donde comienza a decrecer y oscila hasta llegar a un estado estable, el caso número dos el ángulo del rotor continua creciendo de forma constante y es cuando se dice que es inestable, a este caso también se le conoce como inestabilidad de primera oscilación, para el caso número tres, es estable en la primera oscilación sin embargo el ángulo del rotor crece hasta ser inestable. [1]





**II.1.3. ESTABILIDAD VOLTAJE.**

**II.2. MODELO GENERADOR.**

**II.2. MODELO DE CARGAS.**

**II.3. CONTROL AUTOMATICO DE VOLTAJE.**



## CAPITULO III.

### III.1. GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Expansión de la Generación Instalación de centrales eléctricas Los resultados del ejercicio de planeación indican que se requieren 66,912 MW de capacidad adicional para satisfacer la demanda de energía eléctrica en el periodo 2018-2032, lo que representa una inversión de 1.7 billones de pesos (7.8% del PIB en 2017) en los siguientes 15 años (ver Anexo, Tabla 4.5.1.). La capacidad adicional para la generación eléctrica se integrará en 45% por tecnologías convencionales y 55% por tecnologías limpias. En el grupo de las tecnologías convencionales, predominan los proyectos de ciclo combinado con 28,105 MW (ver Tabla 4.5.2.). En cambio, en el grupo de las tecnologías limpias se espera una integración diversificada de proyectos, de los cuales, los eólicos, solares, nucleares y la cogeneración eficiente tendrán una mayor participación con respecto al resto de las tecnologías limpias (ver Gráfico 4.5.1.). Las Regiones de Control que concentran la mayor cantidad de capacidad adicional son la región Noreste y Oriental con 28,849 MW, 43% de la capacidad total. (ver Gráfico 4.5.2. y Anexo, Tabla 4.5.3.). Asimismo, se instalarán centrales eléctricas en la mayoría de las entidades del país para satisfacer las necesidades regionales. Destacan los estados de Veracruz, Tamaulipas, Nuevo León, Sonora, Oaxaca, Sinaloa y Coahuila, que en conjunto concentrarán 50% de la nueva capacidad a desarrollar en los próximos 15 años (ver Mapa 4.5.1; Anexo, Mapas 4.5.2 a 4.5.11, Tabla 4.5.4.).

**TABLA 4.5.2. EVOLUCIÓN DE LAS ADICIONES DE CAPACIDAD POR TECNOLOGÍA 2018-2032**  
(Megawatt)

Tecnología	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	Total <sup>1/</sup>
<b>Convencionales</b>	<b>2,268</b>	<b>3,752</b>	<b>1,656</b>	<b>985</b>	<b>2,041</b>	<b>4,315</b>	<b>1,350</b>	<b>1,326</b>	<b>2,169</b>	<b>1,068</b>	<b>2,256</b>	<b>2,255</b>	<b>812</b>	<b>1,801</b>	<b>2,155</b>	<b>30,207</b>
Ciclo Combinado	2,268	3,601	766	874	1,941	3,956	889	1,326	2,139	1,068	2,256	2,255	812	1,801	2,155	28,105
Carboeléctrica	0	129	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	129
Turbogás	0	0	890	0	100	317	0	0	30	0	0	0	0	0	0	1,337
Combustión Interna	0	22	0	111	0	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	176
Lecho fluidizado	0	0	0	0	0	0	461	0	0	0	0	0	0	0	0	461
<b>Limpia</b>	<b>3,165</b>	<b>4,200</b>	<b>2,740</b>	<b>2,699</b>	<b>2,810</b>	<b>1,856</b>	<b>3,029</b>	<b>1,541</b>	<b>1,266</b>	<b>1,872</b>	<b>1,342</b>	<b>2,843</b>	<b>2,959</b>	<b>2,576</b>	<b>1,805</b>	<b>36,705</b>
Renovable	2,483	4,199	2,740	2,659	2,569	1,487	2,760	1,541	710	1,492	1,218	821	1,599	1,216	1,805	29,301
Hidroeléctrica	0	29	0	0	0	0	464	63	0	46	432	71	646	0	463	2,213
Eólica	677	1,716	1,537	734	2,369	1,187	1,997	1,116	220	850	303	400	353	611	750	14,819
Geotérmica	25	0	0	0	0	0	0	26	150	250	133	0	100	105	53	842
Solar Fotovoltaica	1,767	2,455	1,203	1,925	200	300	300	336	340	346	350	350	500	500	540	11,413
Termosolar	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
Otras	682	1	0	40	241	370	268	0	556	380	124	2,022	1,360	1,360	0	7,404
Bioenergía	3	0	0	40	241	286	148	0	98	0	124	0	0	0	0	940
Cogeneración Eficiente	679	1	0	0	0	84	120	0	457	380	0	662	0	0	0	2,383
Nucleoeléctrica	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,360	1,360	1,360	0	4,081
<b>Total<sup>2/</sup></b>	<b>5,433</b>	<b>7,952</b>	<b>4,396</b>	<b>3,684</b>	<b>4,852</b>	<b>6,171</b>	<b>4,378</b>	<b>2,867</b>	<b>3,435</b>	<b>2,940</b>	<b>3,598</b>	<b>5,098</b>	<b>3,771</b>	<b>4,377</b>	<b>3,960</b>	<b>66,912</b>

#### III.1.1 GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL VALLE DE MEXICO.

##### III.1.1.1. GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA ZONA DE TRANSMISIÓN VALLE DE MÉXICO NORTE.



### III.1.1.1. GENERADOR GAS TURBINA.

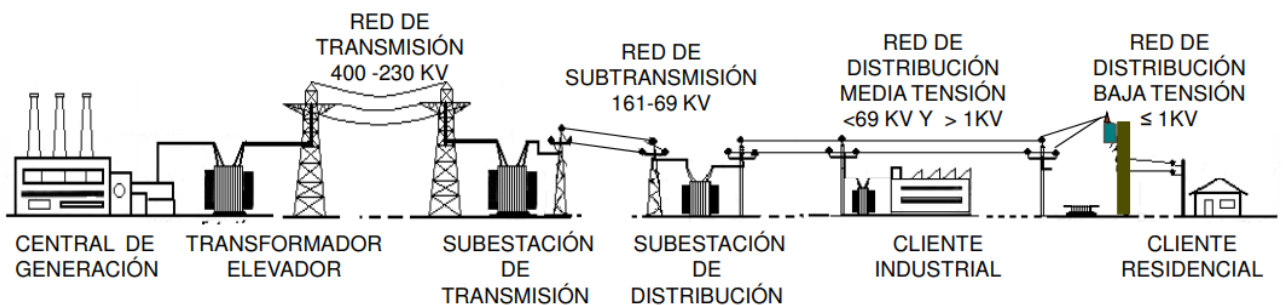
Turbogás En el país operan 131 centrales de turbogás que representan el 7% de la capacidad total y 4% de la generación eléctrica en 2017. Los estados de Campeche, Baja California, México, Guanajuato y Baja California Sur aportaron el 62.6% de la generación de energía eléctrica y concentraron el 53.4% de la capacidad en operación de centrales con turbina de gas en 2017 (ver Anexo, Mapa 2.2.7. y Tabla 2.2.12.).

Las turbinas de gas se componen de un compresor, una cámara de combustión y una turbina de expansión. El proceso de generación de electricidad inicia cuando el aire entra al compresor; después de la compresión, el aire entra a la cámara de combustión, donde una parte proporciona el oxígeno necesario para realizar la combustión, mientras la parte restante se utiliza para enfriar los gases y lograr la expansión en la turbina, provocando el movimiento mecánico que será transmitido al generador obteniendo así energía eléctrica. Los gases de escape son generalmente liberados a la atmósfera. Las plantas de turbinas de gas son utilizadas principalmente para atender la demanda punta debido a su capacidad de arranque rápido; utilizan como principales fuentes de energía primaria el gas natural y el diésel, son menos eficientes que el resto de las tecnologías convencionales (ofrecen una eficiencia media de 36%), y en promedio emiten 509 kilogramos de CO<sub>2</sub> por MWh con gas, o más de 660 kilogramos de CO<sub>2</sub> por MWh con diésel.

## III.2. RED ELECTRICA DEL SISTEMA DE POTENCIA.

### III.2.1. TRANSFORMADOR DE POTENCIA.

### III.2.2. REDES DE DISTRIBUCIÓN.





### III.3. Protecciones eléctricas en el sistema de generación.

Actualmente el sistema eléctrico interconectado trae mayores retos para la operación de los equipos en condiciones normales de operación y ante contingencias, las unidades de generación conectadas directamente a los centros de carga tienen un desarrollo tecnológico en los esquemas y ajustes de protección que deben cumplir con las especificaciones vigentes de la CFE, con la finalidad de tener una mayor flexibilidad, seguridad y confiabilidad en el sistema al que se interconectan.

Los esquemas de protección han evolucionado en su tecnología, siendo los primeros los relevadores electromecánicos, evolucionando posteriormente a los relevadores de estado sólido o estáticos, finalmente en la actualidad los relevadores son de tecnología digital, con la que se puede llevar a cabo la programación de diferentes lógicas de operación con mayor facilidad y practicidad.

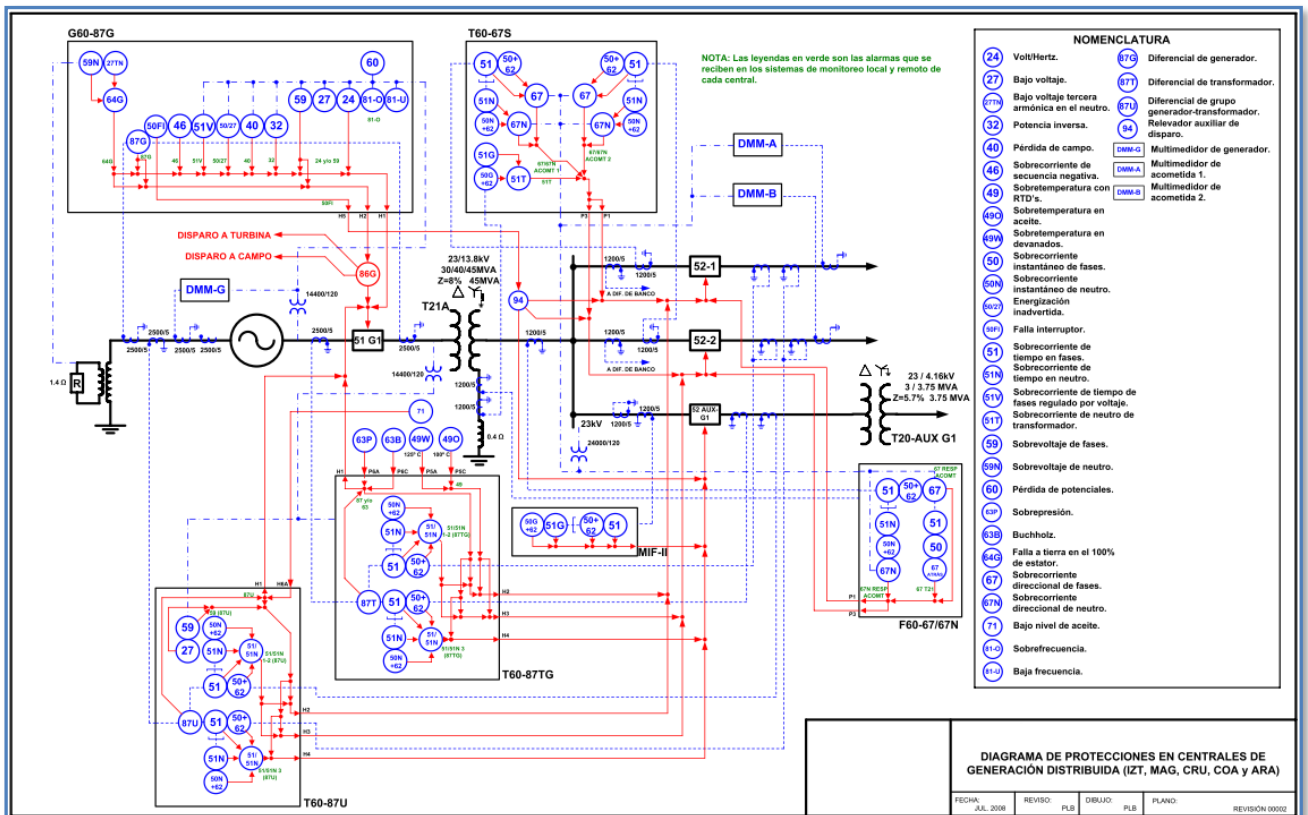


Figura xxx. Esquemático de Protecciones Eléctricas de las Unidades de Generación Distribuida en el Valle de México.



En la Figura xxx, se observa los esquemas de protección de la unidad generadora, esta obedece en gran parte al arreglo con interruptor de maquina en baja tensión del procedimiento CFE G0100-07, sin embargo, estas unidades cuentan con protecciones de sobre-corriente direccional para la protección de acometidas.

Las unidades de generación distribuida se encuentran integradas por seis grupos de protecciones eléctricas locales y de respaldo; Protecciones de Generador (G60-87G), Protecciones del Transformador Elevador (T60-87TG), Protecciones de Unidad de generación (T60-87U), Protección de Transformador de servicios propios (T20-AUX G1), protección de respaldo de acometida 1 (T60-67S) y protección de respaldo de acometida 2 (F60-67/67N).

Describir desglosado

Controles del generador



Además de las protecciones propias de la unidad de generación, se tiene un arreglo de sumatorias de corrientes del módulo de transferencias de acometidas en la unidad generadora y la sumatoria de corrientes de los alimentadores de 23 kV's de los transformadores de potencia de la S.E. Victoria, estas corrientes son conectadas al relevador de protección 87T de los transformadores de potencia en la S.E. Victoria.

Esta protección se logra con las tres aportaciones de corriente conectadas a la protección, aportación lado alta, aportación lado baja y aportación de la unidad generadora, o en su caso con la conexión en paralelo de las corrientes de aportación de la unidad generadora con las corrientes de aportación de los alimentadores de 23 kV de la S.E. Victoria.

La finalidad del alcance de esta protección es la de proteger de forma instantánea los cables de potencia que interconectan la unidad generadora con las barras de 23 kV de la S.E. Victoria, por lo que de existir una falla en esta zona se accionan los disparos los interruptores del transformador de potencia en S.E. Victoria y el interruptor de acometida de la unidad generadora con el que se encuentra suministrando la generación, quedando la unidad generadora en modo isla y con los servicios propios de la unidad generadora.

Las protecciones eléctricas de respaldo de la unidad de generación deben estar coordinadas con los tiempos de operación de las protecciones de respaldo del transformador de potencia y de las protecciones primarias de los circuitos de distribución, esto con la finalidad de no sobre-alcanzar a estas protecciones y tener operaciones en falso de la unidad generadora.

#### **III.4. MODELADO DE CONTROL AUTOMATICO DE VOLTAJE**

### IV.1. Características y configuración de la red.

La subestación Victoria está ubicada en el municipio de Cuautitlán Izcalli, en el Estado de México, atendida por la Zona de Transmisión Valle de México Norte, de la Gerencia Regional de Transmisión Central. la Subestación es de 400/230/85/23 kV's con diez bancos de transformación AT01, AT02 Y AT03 (400/230/13.8kV-330MVA'S); T04, T05, T06 Y T07 (230/85kV-100MVA'S); T08, T09 y T10 (230/23/13.8kV-60MVA'S); 4 líneas de transmisión de 400 kV's, 7 líneas de transmisión de 230 kV's, 7 líneas de subtransmisión de 85 kV's, 12 alimentadores de 23 kV's, 3 bancos de capacitores de 23 kV's y una unidad de generación de 40 MVA conectada a la red de 23 kV's.

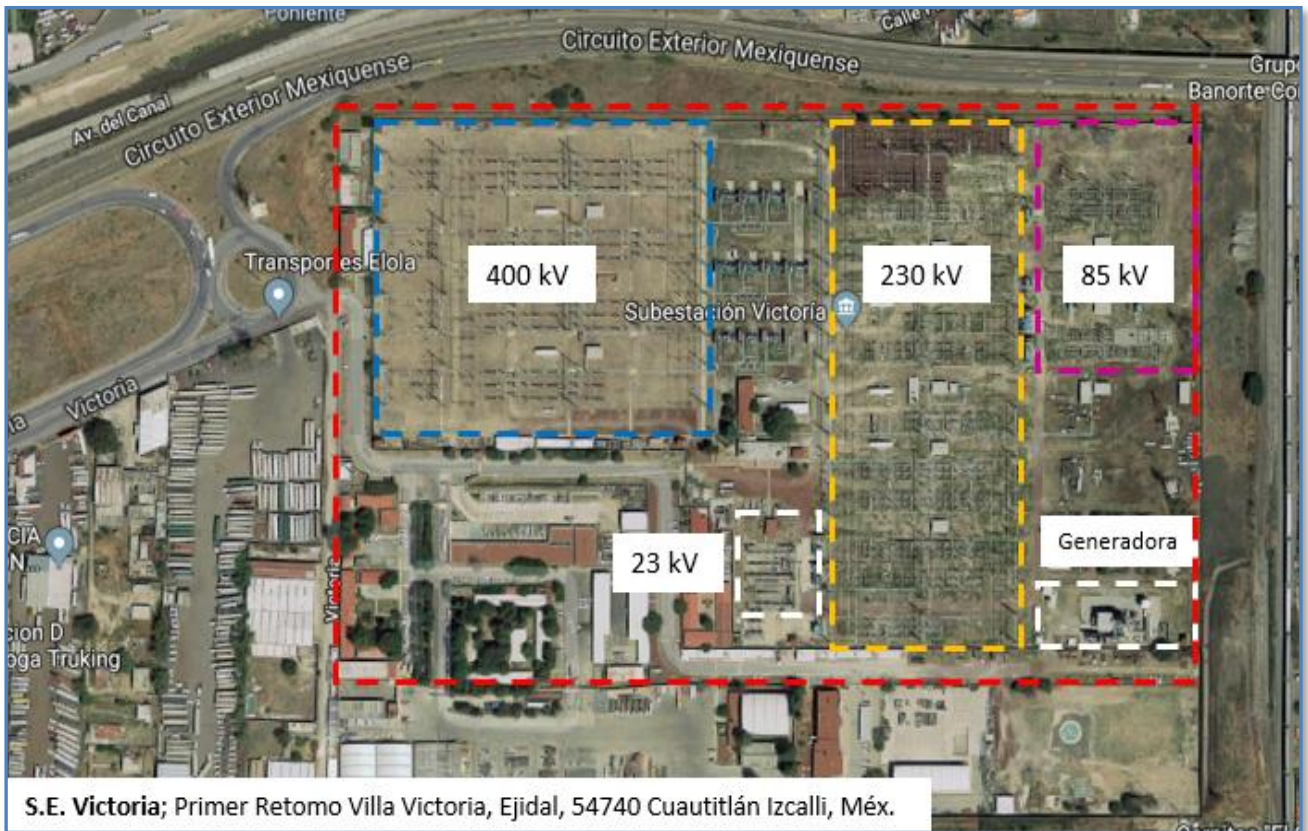


Figura xxx. Ubicación geográfica de la subestación y generadora Victoria.

El arreglo eléctrico que tiene la subestación victoria es de interruptor y medio, este arreglo lo tiene en todos sus niveles de tensión 400/230/85/23 kV's, por lo que se tiene una alta confiabilidad y flexibilidad en el mantenimiento de sus equipos.



En los transformadores de 230/23 kV's, se tiene una lógica de operación de cierre automático de enlaces (Transferencia Automática de Carga) ante la contingencia de una falla interna en los transformadores. Con esta operación el transformador fallado transfiere el 50% de carga a cada transformador que se tiene en operación, por lo que es de suma importancia el respetar un límite de carga por transformador, considerando que el transformador puede estar a un 120% de su carga en un periodo corto de operación, el límite de cada transformador se limita a un máximo de 80% de su capacidad total (48 MW).

El sistema de generación que se encuentra instalado en Subestación Victoria, se encuentra operando desde el año 2006, este sistema de generación es de gas turbina de ciclo simple, tiene un generador síncrono de rotor cilíndrico de dos polos y cuenta con un sistema de excitación sin escobillas. Este sistema tiene un arreglo eléctrico que le permite conectarse a dos puntos de la red de 23 kV a través de los buses de salida de los transformadores de potencia de 230/23 kV, esta interconexión la logra con un módulo metal clad de 3 interruptores, dos de estos interruptores interconectan con las barras de 23 kV del transformador de potencia de la subestación y un interruptor sirve para alimentar el transformador de servicios propios que alimenta los equipos propios de la unidad generadora.

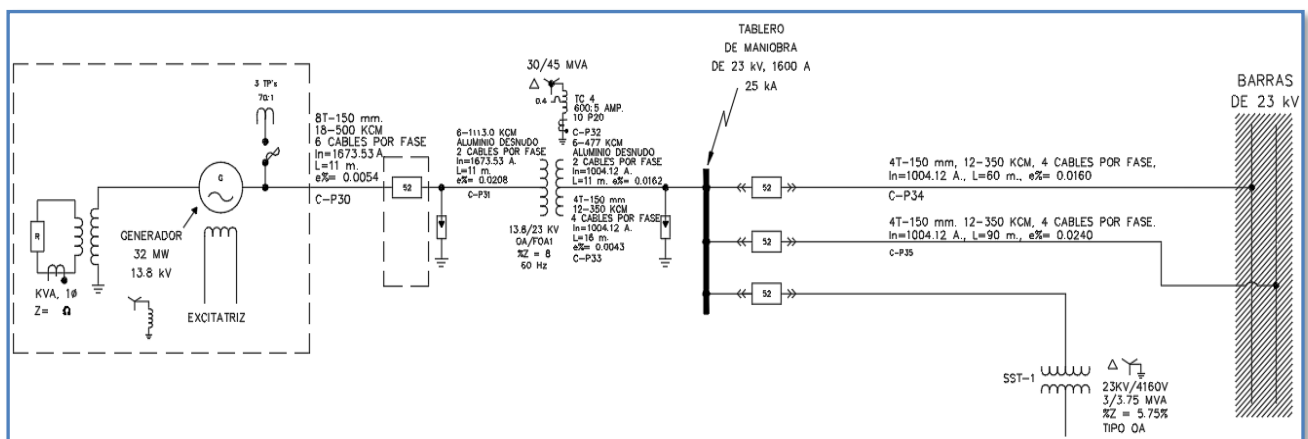


Figura xxx, Diagrama unifilar de conexión del generador con los buses de 23 kV en S.E. Victoria.

El sistema eléctrico que conforma la red bajo estudio se encuentra básicamente constituido por la unidad de generación, un transformador elevador de 13.8 a 23 kV's, un transformador de potencia de 230 a 23 kV's, la red de transmisión de 230 kV's y cuatro circuitos de distribución de 23 kV's.

Para obtener parámetros reales del sistema, se tomaron en consideración la red eléctrica modelada en el software Aspen On Liner que es utilizado por la Zonas de



Transmisión del Valle de México, en este software se tienen cargados datos del sistema de potencia de la red de Generación, Transmisión y distribución; Generador, Transformador elevador, transformador de potencia, líneas de 230 kV y 23 kV, esta red es utilizada principalmente para realizar las coordinaciones de protecciones de líneas de Transmisión y Transformadores de Potencia.

La red de 230 kV's es extensa, ya que se tiene el sistema eléctrico del valle de México, por lo que se realizo un equivalente de **Thévenin** de la red para incorporar este dato al sistema a analizar bajo la condición de bus infinito, para el caso de la red de 23 kV se tomó en consideración un circuito de distribución asociado a las barras de 23 kV del transformador de potencia y al sistema de generación, estos circuitos toman la generación directamente del punto de conexión del generador.

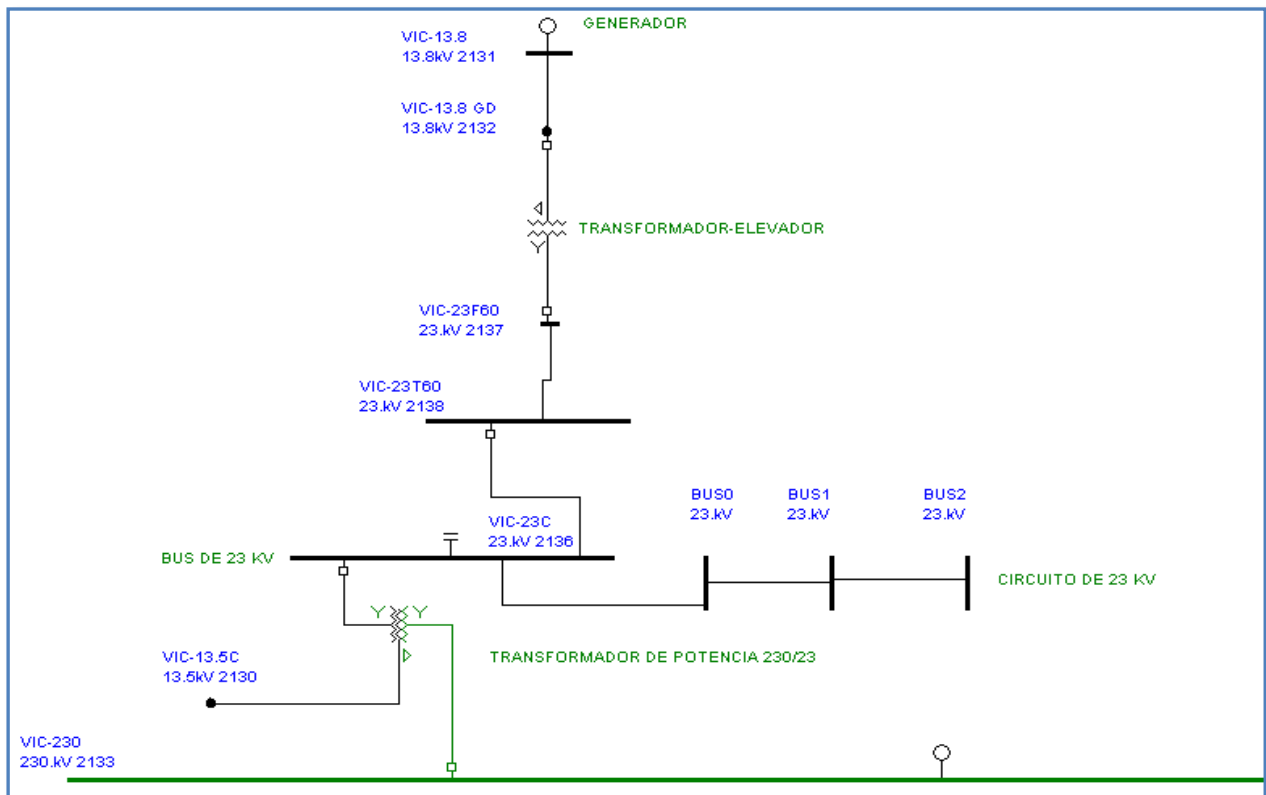


Figura xxx, Diagrama unifilar de la red Aspen.

En la Figura xxx. muestra la red de prueba, teniendo la misma infraestructura de la red eléctrica del sistema de la S.E. Victoria, la red de 230 kV's queda en un equivalente de red y se considera un circuito de 23 kV de la S.E Victoria, tomando en cuenta únicamente tres tramos equivalentes de la red troncal del circuito de distribución.



Para validar el modelo de la red de prueba , se realizó un comparativo de niveles cortocircuito con la red simulada en el PSSE y la simulada en el programa Aspen para cada nodo de la red bajo estudio, esto con la finalidad de tener las dos redes caracterizadas para las simulaciones correspondientes, los resultados fueron satisfactorios para su implementación.

#### **IV.21. Estudio de flujos de potencia.**

Para el análisis del comportamiento del generador con las simulaciones presentadas en este estudio, se tiene como principal punto de inicio, el análisis de flujos de potencia con la finalidad de obtener los perfiles de niveles de tensión en cada nodo del sistema bajo estudio, para lo que se obtuvieron flujos de potencia con los escenarios de alta y baja carga con cuatro circuitos de 23 kV (72MW's y 15MW's respectivamente).

Para las simulaciones de alta y baja carga, se consideró un nivel de tensión de +5%, siendo este de 1.05 p.u., con la finalidad de tener al generador en su máximo nivel de voltaje permitido.



“Análisis de estabilidad transitoria para unidad de Generación de 40 MVA conectada a la red de 23 kV en Subestación Victoria.”

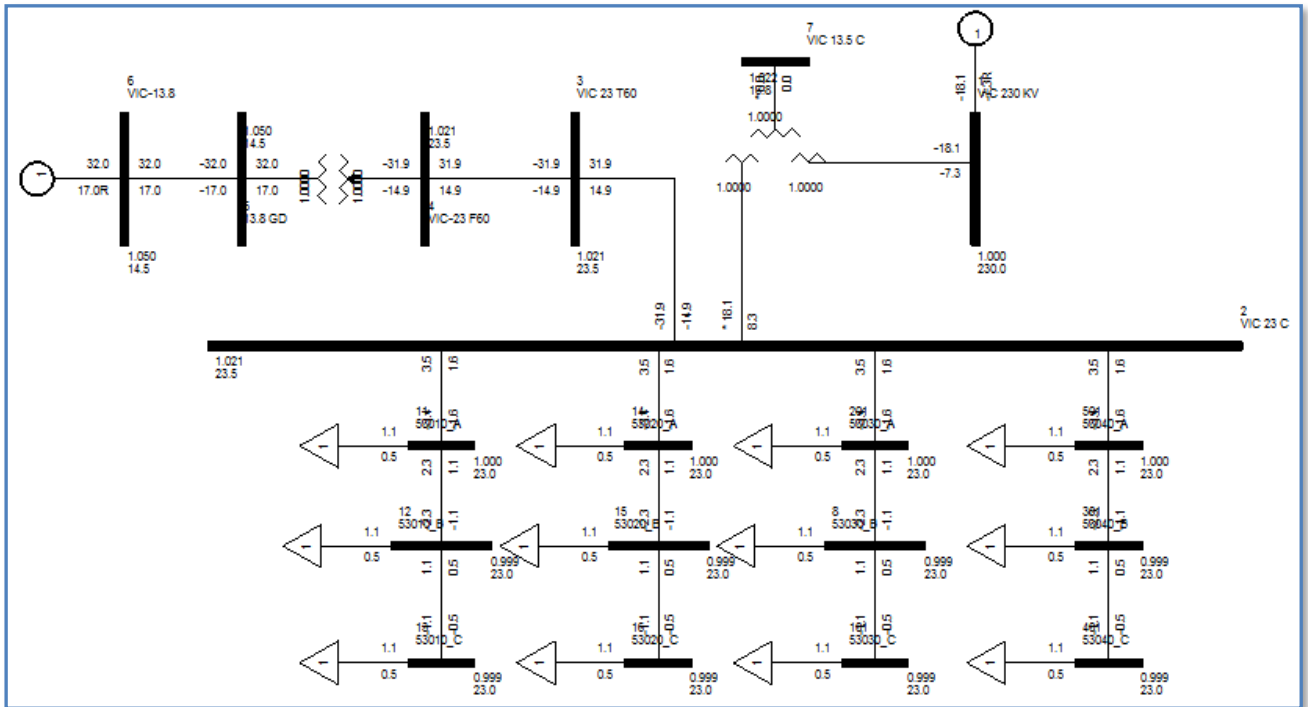


Figura xxx. Flujos de potencia con 15 MW

La figura xxx, se tiene los flujos de potencia con baja carga de 15 MW con cuatro circuitos de 23 kV, se observa la generación de 32 MW con un voltaje en el bus de 1.05 p.u. en el bus del generador, esto con la finalidad de llevar al generador a su máximo voltaje permitido del 5%, en el transformador de 230/23 kV's se tiene una potencia de -18 MW que es consumida por el sistema de la red de 230 KV, a través del transformador de potencia.

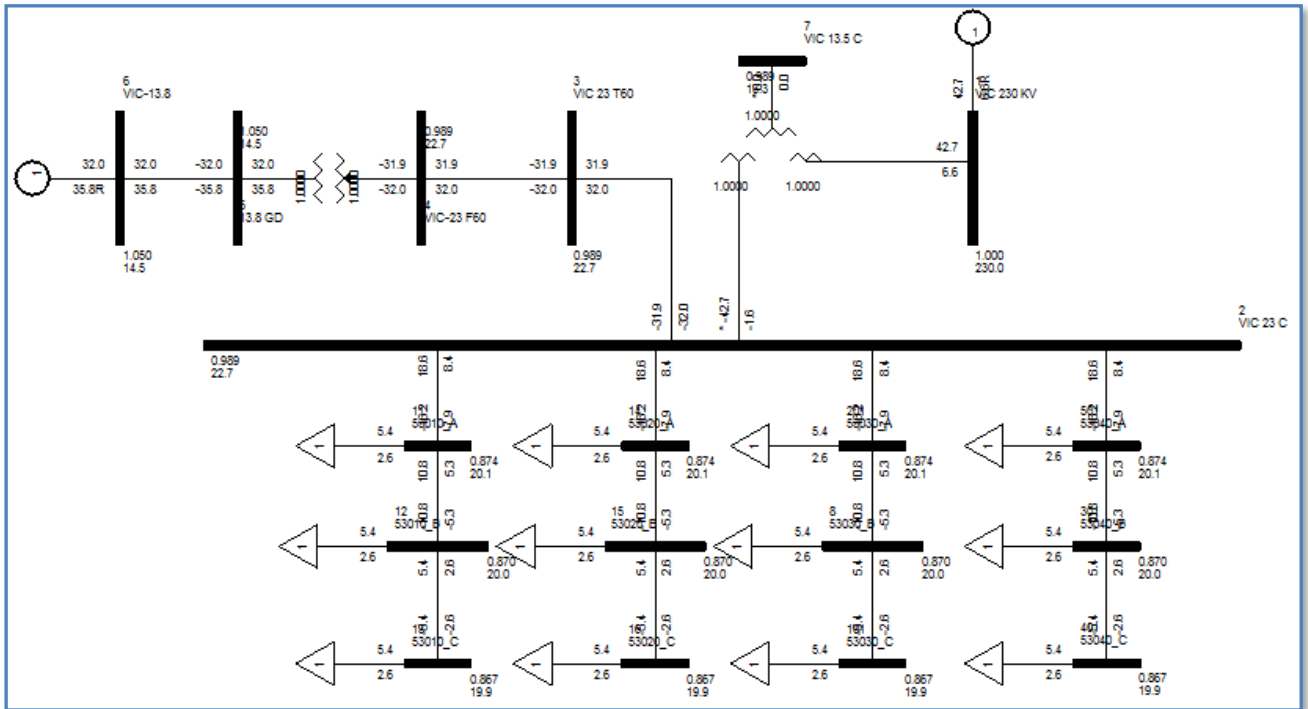


Figura xxx. Flujos de potencia con 72 MW

La figura xxx, se tiene los flujos de potencia con alta carga de 72 MW con cuatro circuitos de 23 kV, se observa la generación de 32 MW con un voltaje en el bus de 1.05 p.u. en el bus del generador, en el transformador de 230/23 kV's se tiene una potencia de 42.7 MW que es aportada por el sistema de la red de 230 KV a través del transformador de potencia.

#### IV.21. Parámetros del estado dinámico.

Para el análisis del comportamiento de la estabilidad de estos generadores se parte del origen de las fallas a la que están expuestas estas unidades de generación, para este caso se simulan fallas trifásicas balanceadas, para efecto de analizar el comportamiento del modelo de generador clásico y el modelo del generador GENROE.



## **IV.2. ANALISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA SIN CONTROL.**

Para el análisis de la estabilidad transitoria sin contar con los controles de regulador de voltaje, se tomó como propuesta para este estudio el modelo del generador GENROE, y se lleva a cabo el comparativo de

### **IV.2.1. ANALISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA BAJA CARGA.**

### **IV.2.2. ANALISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA ALTA CARGA.**



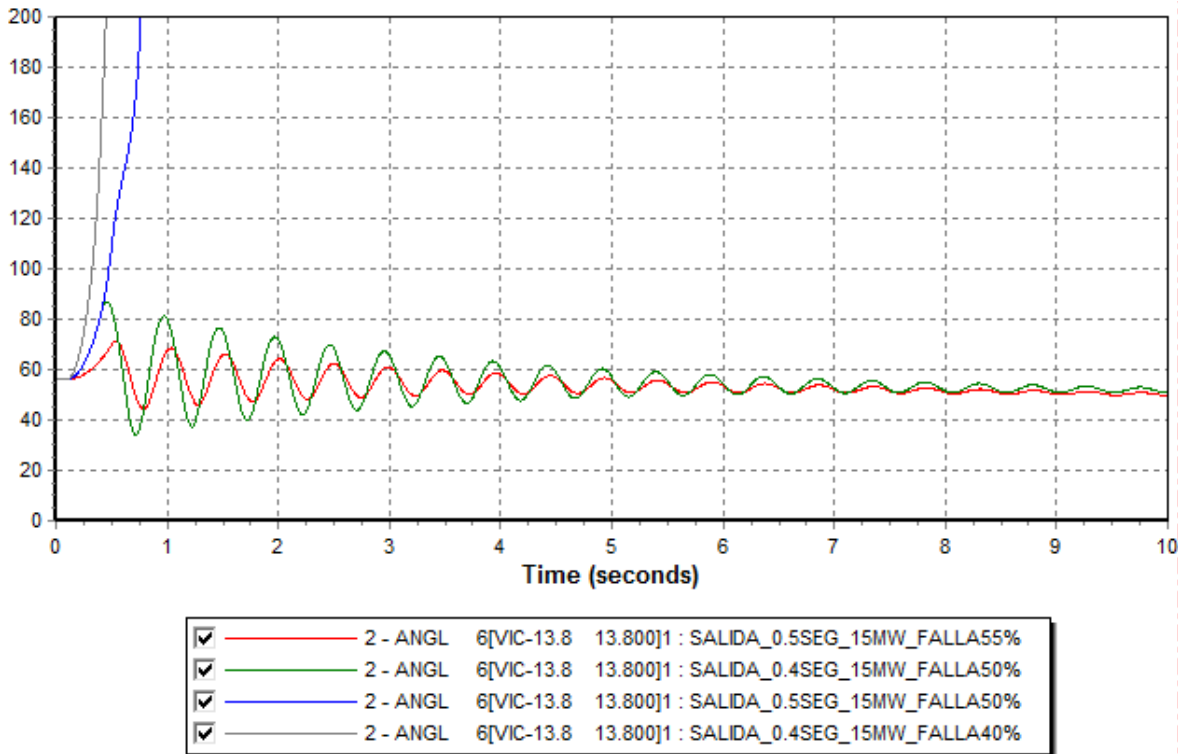
### **IV.3. ANALISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA CON AVR.**

#### **IV.3.1. ANALISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA BAJA CARGA.**

#### **IV.3.2. ANALISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA ALTA CARGA.**



VI.1. CONCLUSIONES.



II.1.1. Generación Distribuida

La generación distribuida o también conocida como generación dispersa o energía distribuida, es la que se genera en distintos puntos de la red con pequeños generadores en la cercanía de los puntos de conexión a las cargas.



[4]

### II.1.2. Nuevas tecnologías de generación distribuida

Un sistema eléctrico dependiendo de su confiabilidad se puede clasificar en tres tipos:

- **Sistema radial** (menos confiabilidad y más económico), En un sistema radial las cargas tienen una sola alimentación, de manera que una falla en la alimentación produce una interrupción en el suministro.
- **Sistema en anillo** (mayor confiabilidad y más caro), Con un sistema en anillo se tiene una doble alimentación y puede interrumpirse una de ellas sin causar una interrupción del suministro.
- **Red** (mayor confiabilidad y costo), Con éste tipo de sistema se aumenta el número de interconexiones y en consecuencia, la seguridad del servicio.

### II.1.3. Subestaciones eléctricas

Es un conjunto de dispositivos eléctricos que forman parte de un sistema eléctrico de potencia y se encarga de transformar tensiones y derivar circuitos de potencia. Las subestaciones pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de función que desarrollan en:

- a) Subestaciones variadoras de tensión
- b) Subestaciones de maniobra o seccionadoras de circuito
- c) Subestaciones mixtas

Asimismo, pueden agruparse de acuerdo con la potencia y tensión que operan en:

- a) Subestaciones de transmisión. Operan en intervalos de tensión desde 230 [kV], 400 [kV] y mayores.
- b) Subestaciones de subtransmisión. Operan en intervalos de tensión desde 69 [kV] hasta 161 [kV].
- c) Subestaciones de distribución primaria. Operan desde 4.16 [kV] hasta 34.5 [kV].
- d) Subestaciones de distribución secundaria. Operan desde 220/127 V hasta 480 [V].

### II.1.4. Líneas de Transmisión



Una línea de transmisión eléctrica es básicamente el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión y distribución de la energía eléctrica, está constituida por: conductores, estructuras de soporte, aisladores, accesorios de ajustes entre aisladores y estructuras de soporte, y cables de guarda (usados en líneas de alta tensión, para protegerlas de descargas atmosféricas); es de suma importancia el estudio de las características eléctricas en los conductores de las líneas, estas abarcan los parámetros impedancia y admitancia, la primera esta conformada por la resistencia y la inductancia uniformemente distribuidas a lo largo de la línea y se representa como un elemento en serie. La segunda esta integrada por la susceptancia y la conductancia y en este caso se representa como un elemento en paralelo, la conductancia representa las corrientes de fuga entre los conductores y los aisladores, esta es prácticamente despreciable por lo que no es considerado un parámetro influyente.

## **II.2. Estudio de los Sistemas Eléctricos de Potencia**

La planeación, diseño, y operación de un sistema de potencia requiere estudios de ingeniería para evaluar el sistema actual y el futuro, en aspectos como eficiencia, confiabilidad, seguridad, y economía. Estudios, que propiamente concebidos y conducidos, son una vía efectiva de costos para prevenir sorpresas y optimizar la selección de equipos. En la etapa de diseño, los estudios identifican y advierten potenciales deficiencias en el sistema antes que este entre en operación. En sistemas existentes, el estudio ayuda a localizar la causa de fallas en equipos y salidas de operación, y determina las medidas correctivas para mantener el desempeño del sistema.

La complejidad de los modernos sistemas de potencia, hacen el estudio por medios manuales difíciles, tediosos y de un consumo alto de tiempo. Las herramientas computacionales asociados con los estudios de sistemas de potencia han sido grandemente simplificados por el uso de programas de computadoras digitales. Algunas veces, requerimientos de estudios y economía obligan al uso de computadoras analógicas, el cual provee un modelo a escala del sistema de potencia.

### **II.2.1 Estudios de Flujo de Carga El estudio de flujo de carga.**

Determina el voltaje, corriente, potencia activa y reactiva además del factor de potencia, en un sistema de potencia. Los estudios de flujo de carga son una excelente herramienta para la planificación del sistema. Un número de



procedimientos de operación, pueden ser analizados, incluyendo condiciones de contingencias, tales como la pérdida de un generador, una línea de transmisión, o una carga. Estos estudios alertaran al usuario sobre las condiciones que pueden causar sobrecarga de los equipos o pobres niveles de voltaje. Los estudios de flujo de carga pueden ser usados para determinar el tamaño y localización óptima para capacitores de potencia para mejora de factor de potencia. También, son muy usuales en la determinación de los voltajes del sistema bajo condiciones de repentinas aplicaciones o desconexiones de carga. Los resultados de un estudio de flujo de carga son también punto de partida de estudios de estabilidad. Las computadoras digitales son usadas ampliamente en los estudios de flujo de carga debido a la complejidad de los cálculos involucrados.

### **II.2.2. Estudios de Cortocircuito**

Los estudios de cortocircuito son hechos para determinar la magnitud de la corriente que fluye a través del sistema de potencia a varios intervalos de tiempo que una falla ocurre luego que una falla ocurre. La magnitud de las corrientes que fluyen a través del sistema de potencia luego de una falla varía con el tiempo a menos que alcancen la condición de régimen permanente. Este comportamiento es debido a las características del sistema y dinámica. Durante este tiempo, los sistemas de protección son llamados a detectar, interrumpir e aislar esa falla. Los esfuerzos impuestos en estos equipos dependen también de la magnitud de la corriente, la cual dependen del tiempo de la inserción de la falla. Esto es hecho para varios tipos de falla (trifásica, fase a fase, doble fase a tierra y fase a tierra) a diferentes localizaciones a través del sistema. La información es usada para seleccionar el Equipo Eléctrico Primario en adición con los ajustes de los dispositivos de protección.

### **II.2.3. Estudios de Estabilidad**

La habilidad de un sistema de potencia, que contiene dos o más maquinas sincrónicas, de continuar operando luego que un cambio ocurre en el sistema es una medida de su estabilidad. El problema de estabilidad toma dos formas: estabilidad de régimen permanente y estabilidad transitoria. La estabilidad de régimen permanente puede ser definida como la habilidad del sistema de potencia de mantener sincronismo entre las maquinas dentro del sistema luego de una relativamente lento cambio de carga. La estabilidad transitoria es la habilidad del sistema de mantener en sincronismo bajo condiciones transitorias, tales como fallas, operaciones de maniobra, etc. En un sistema industrial de potencia, la estabilidad



puede envolver el sistema de la empresa eléctrica y uno o más generadores dentro de la empresa o motores sincrónicos. Las contingencias, tales como las pérdidas de carga, poseen un impacto directo sobre la estabilidad. Los esquemas de aislar (Load-shedding) cargas y el tiempo total de despeje de falla (critical fault-clearing times) pueden ser determinados en función de seleccionar los apropiados ajustes de los relés de protección. Este tipo de estudios son probablemente el más complejo de los hechos en un sistema de potencia. Una simulación debe incluir modelos de los generadores sincrónicos y sus controles, por ejemplo: reguladores de voltaje, sistemas de excitación, y gobernadores. Los motores son algunas veces representados por sus características dinámicas como son los compensadores estáticos y relés de protección.

#### **II.2.4. Matrices en Sistemas de Potencia**

Los cálculos de fallas es un problema muy cotidiano de la ingeniería electricista de potencia, su cálculo puede ser realizado, de múltiples modos, pero en forma tradicional los métodos se agrupan de dos categorías:

- Método Tradicional: Aplicación de los métodos de la F.E.M o Thevenin, basado en teoría circuital.
- Método de Zbus ó Impedancia de Barra. Basado en teoría circuital con orientación netamente de topología.

Un sistema de gran potencia en condiciones de cortocircuito, se puede considerar como una red alimentada por varios generadores y una carga simple en la barra en la condición de falla (que en función del tipo de falla es una condición terminal simétrica o asimétrica). Dentro del sistema fallado, se pueden despreciar las corrientes de carga, ya que las mismas son muy pequeñas en comparación de las que circulan en situación de falla. Al estudiar el sistema fallado (por cortocircuito) se pueden presentar las siguientes interrogantes:

- Determinar la corriente de cortocircuito en todas las barras.
- Determinar la tensión en las barras adyacentes al punto de falla.
- Determinar la tensión en la contribución de corriente de ramas.

Cuando estas incógnitas confluyen, junto con un número muy grande de barras en el sistema, se inclina por enfocar el problema a computadoras digitales de alta velocidad, utilizando el método de impedancia de barra Zbus.



### II.3. Estabilidad en los Sistemas de potencia.

La estabilidad de un sistema eléctrico de potencia puede ser ampliamente definida como aquella propiedad de un sistema de potencia que permite a este mantenerse en un estado de operación equilibrado bajo condiciones normales y recuperar un estado aceptable de equilibrio luego de ser sujeto a una perturbación.

Una condición necesaria para la operación satisfactoria del sistema es que todas las maquina síncronas mantengan el sincronismo, este aspecto de la estabilidad está influenciado por la dinámica de los ángulos de los rotores y las relaciones potencia-ángulo.

En la evaluación de la estabilidad el interés es el comportamiento del sistema cuando es sujeto a una perturbación transitoria. El sistema debe ser capaz de operar satisfactoriamente bajo esas condiciones y satisfacer satisfactoriamente el máximo de la carga.

Cuando una maquina síncrona pierde el sincronismo o sale fuera de paso, con el resto del sistema, su rotor gira a una velocidad más alta o baja que la requerida para generar voltaje a la frecuencia del sistema. El deslizamiento entre el campo rotatorio estatorico (correspondiente a frecuencia del sistema) y el campo del rotor resulta en grandes fluctuaciones de la potencia de salida de la máquina, esto causa que el sistema de protección aislé a la maquina inestable del sistema.

La estabilidad del ángulo del rotor, es la habilidad de las maquinas sincrónicas interconectadas en un sistema de potencia de mantener el sincronismo. El problema de estabilidad envuelve el estudio de las oscilaciones electromecánicas inherentes en los sistemas de potencia. Un factor fundamental en este problema es la manera en que las salidas de las maquinas síncronas varían con sus rotores oscilando.



### **II.3.1. Estabilidad del voltaje y colapso de voltaje.**

La estabilidad del voltaje es la habilidad de un sistema de potencia de mantener los voltajes aceptables en todas las barras en el sistema bajo condiciones operativas normales y después de ser sujeto a una perturbación, incremento de la carga demandada o cambio en las condiciones del sistema causa un progresivo e incontrolable caída de voltaje. El factor principal causante de la inestabilidad de voltaje de los sistemas es satisfacer las exigencias de la demanda de potencia reactiva, la magnitud del voltaje de barra incrementa con la inyección de potencia reactiva en la misma barra.

La progresiva caída del voltaje en la barra puede también ser asociado con la salida del paso de los ángulos rotoricos. Por ejemplo, la pérdida gradual de sincronismo de las maquinas como ángulos rotoricos entre dos o grupos de máquinas se aproxima o excede a los 180 grados, puede resultar en voltajes muy bajos en puntos intermedios de la red.

### **II.3.2. Estabilidad de Ángulo**

La estabilidad de ángulo es la capacidad del sistema para mantener el sincronismo de las maquinas del sistema luego de haber estado sometido a una perturbación.

La estabilidad de ángulo se divide en estabilidad oscilatoria (o angular de pequeñas perturbaciones) y en estabilidad transitoria (o angular de grandes perturbaciones). Por el impacto en el sistema global que puede ocasionar la estabilidad transitoria, este documento se concentrará en la Estabilidad transitoria.



### **III.1.- Introducción.**

Las unidades de Generación Distribuida del Valle de México en particular las unidades de 32 MW conectadas a los buses de 23 kV en las subestaciones de potencia de la red de Transmisión se encuentran integradas por varios elementos necesarios para su correcta operación, el grupo Generador-transformador tiene integrado por su diseño las protecciones necesarias para su operación segura, estas protecciones son coordinadas con la red de transmisión y distribución asociadas al punto de interconexión.

La conexión directa a la red de distribución a través de las subestaciones de transmisión trae problemáticas de exposición ante fallas que provocan pequeños disturbios a los generadores, provocando la salida de operación de las mismas, estos disturbios son muy recurrentes derivado que en la red de distribución se tiene un alto nivel de exposición ante agentes externos que provocan las fallas en la red, principalmente en las que por su diseño constructivo son de red de distribución aérea.



Los sistemas más relevantes en un control de generador síncrono son; el control del calentador, gobernador y excitador, como se muestra en la siguiente figura:

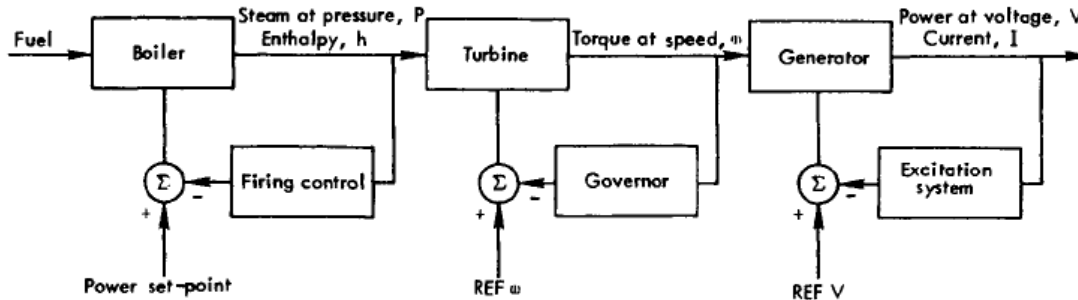


Fig. 7.1 Principal controls of a generating unit.

La función de cada elemento de este sistema es transformar toda la energía de vapor en energía eléctrica, siendo todo el sistema un dispositivo de conversión de energía

#### IV. Simulación.

Para el sistema de simulación del presente trabajo se toma como modelo de estudio un Generador tipo, el cual es tomado de la tabla 14.1 de la Guía de Aplicación de Programa PSS®E 32.0.5, tomando en consideración los datos del generador bajo estudio, reactancias del generador, constantes de tiempo, constantes de inercia y los parámetros de corriente y voltaje del generador.

De lo anterior se determina que el modelo GENROU es que se toma para el estudio



**“Análisis de estabilidad transitoria para unidad de Generación de 40 MVA conectada a la red de 23 kV en Subestación Victoria.”**

Reactance and Time Constants Used	Model				
	GENSAL and GENSAE	GENROU and GENROE	GENDCO	GENTRA	GENCLS
$X_d$	✓	✓	✓	✓	✓
$X_q$	✓	✓	✓	✓	
$X'_d$	✓	✓	✓	✓	✓
$X'_q$		✓	✓		
$X''_d$	✓	✓	✓		
$X''_q$	*	*	*		
$X_l$	✓	✓	✓	✓	
$T'_{do}$	✓	✓	✓	✓	
$T'_{qo}$		✓	✓		
$T''_{do}$	✓	✓	✓	✓	
$T''_{qo}$	✓	✓	✓	✓	
Saturation Factors	✓	✓	✓	✓	
$T_a$			✓		

\*  $X''_q$  is assumed to be equal to  $X'_d$ .



## Bibliografía

- [1] P. Kundur, «Power System Stability and Control,» McGraw-Hill, 1994, pp. 3-4-5.
- [2] C. R. d. Energia, «Comisión Reguladora de Energia,» CDMX, marzo 2019.
- [3] D.P Kothari, I.J. Nagrath, Sistemas electricos de Potencia, McGraw-Hill, 2008.
- [4] J. W. B. Jan Machowski, «POWER SYSTEM DYNAMICS Stability and Control,» de *POWER SYSTEM DYNAMICS* , 2008, pp. 6-7.
- [5] G. G. S. M. M. AGAH, «DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS, Design, Operation and Grid Integration,» de *DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS, Design, Operation and Grid Integration*, Cambridge, MA 02139, United States, Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 1-3.