



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**“MODELADO DE CENTRAL ELÉCTRICA DE BIOGÁS PARA SU
POSIBLE INTERCONEXIÓN A LA RED GENERAL DE
DISTRIBUCIÓN.”**

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

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

Presenta:

Ing. Enrique Francisco Canales Hernández

Director de Tesis:

M.C. Carlos Morán Ramírez

Co Asesor:

M.C. Ismael Albino Padilla

Puebla, Pue.

Agosto 2022



"HUP, 50 años de enseñanza y salud"

Oficio No. SIEP/1126/2022

C. Enrique Francisco Canales Hernández

Matrícula 220470064

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. Angel Cecilio Guerrero Zamora, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema titulado: **Modelado de central eléctrica de biogás para su posible interconexión a la red general de distribución**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia. Asignándose como Director de tesis al M.C. Carlos Morán Ramírez y Codirector al M.C. Ismael Albino Padilla.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Zaragoza, junio 12 de 2022.

M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora

Director

C.c.p. M.C. Carlos Morán Ramírez y M.C. Ismael Albino Padilla, Director y Codirector del Tema de Tesis

C.c.p. Archivo

AEPS/JCES/sco*

M.I. Ángel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería, BUAP.
Presente

En atención a su oficio No. SIEP/1126/2022, en el que me nombra asesor de la tesis: Modelado de central eléctrica de biogás para su posible interconexión a la red general de distribución. Que presenta el pasante de la Maestría en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia, C. Enrique Francisco Canales Hernández, Matrícula: 220470064; me permito informar a usted, que después de haber revisado la tesis correspondiente, no existe inconveniente alguno en Autorizar la Impresión de la misma.

Lo que hago de su conocimiento, para los efectos académicos a los que haya lugar.

Atentamente
H. Puebla de Zaragoza, agosto 08 de 2022

M.C. Carlos Moran Ramírez Asesor

M.C. Ismael Albino Padilla co-asesor

C.c.p. Interesado

Agradecimientos

A mi asesor M.C. Carlos Morán Ramírez, por el apoyo en el desarrollo de este trabajo de tesis se agradece el tiempo dedicado a este proyecto y por su gran experiencia profesional que compartió con un servidor.

A mi co-asesor Dr. Ismael Albino Padilla por su apoyo en clases desde el nivel licenciatura hasta la maestría y por todo el material bibliográfico y computacional.

Al Dr. Alejandro Bautista Hernández por el apoyo brindado durante su periodo como coordinador de posgrado de la facultad de ingeniería.

Al Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez y al M.I. Genaro Campos Castillo por el apoyo brindado como coordinadores de la maestría.

A todos los profesores que colaboraron a mi formación durante el posgrado, reconozco su esfuerzo para elaborar material de estudio durante la pandemia.

Agradezco también a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por abrirme las puertas para estudiar la maestría.

Dedicatoria

A mi madre Magdalena Hernández Timal por tu cariño, apoyo, educación, ejemplo y sacrificio. Gracias a ti se cumplió otro objetivo profesional.

A mi padre Enrique Canales Rufino que, aunque ya no está con nosotros me dejo como guía su ejemplo como profesional y gran ser humano, también fue una de las personas que me puso como meta estudiar el posgrado.

A mi novia Andrea Pérez Suarez por su cariño y apoyo durante este proyecto.

A mis hermanos Monserrat y Mario por su compañía y cariño.

A mi abuelo Rodolfo Canales Rodríguez por su apoyo brindado en los momentos difíciles.

A toda mi familia, siempre los tengo presentes.

A mis compañeros de generación Aislinn, Estefanía y Moisés excelente grupo de personas ustedes son los amigos que no me merecía, pero si necesitaba.

ABSTRACT

This research work will analyze the studies required by the National Center for Energy Control (CENACE) for the interconnection to the General Distribution Network (RGD) of a power plant whose primary energy source is biogas (methane), extracted and recovered of an Urban Solid Waste (RSU) landfill.

This type of project provides a landfill with sustainability and reduces the environmental impact by a certain percentage, extracting the methane gas that is generated by the decomposition of organic material, preventing it from being released into the atmosphere and preventing fires by reducing the volume of gas, eliminating dangerous concentrations.

The operation of the "Waste to Energy" technology for the generation of electrical energy and the procedures required by the current Mexican legal framework for the implementation of this type of project will be described.

The procedure of transient and dynamic stability studies for synchronous generators will be investigated.

Subsequently, simulations will be carried out in the PSSE program, and the results will be analyzed.

Contenido

ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLA.....	XI
Glosario.....	XII
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo general.....	3
1.4.2 Objetivos específicos	3
1.5 Hipótesis.....	3
1.6 Metodología	4
1.7 Variables Independientes y Dependientes	4
1.7.1 Variables Independientes.....	4
1.7.2 Variables dependientes	4
1.8 Estado del Arte.....	5
1.8.1 Contexto Internacional.....	5
1.8.2 Contexto nacional.....	6
Capítulo 2.....	9
2.1 Descripción de la tecnología “Waste to energy”	9
2.3 Gestión del proceso.....	21
2.3.1 Tramites ante la SEMARNAT	21
2.3.2 Permiso de generación de la CRE.....	21
2.4 Estudios requeridos por el CENACE	23
2.4.1- Diagrama(s) geográfico(s) con la localización de la Central Eléctrica.....	24
2.4.2.- Diagrama unifilar simplificado	25
2.4.3.- Información general de las Unidades de la Central Eléctrica instaladas en la Central Eléctrica.	26
2.4.4 Modelo matemático, diagramas de bloque y funciones de transferencia del control del sistema de excitación.	28
2.4.5 Modelo matemático, diagramas de bloque y funciones de transferencia del control del sistema de control de velocidad (motor-generator)	29

2.4.6 Modelo matemático, diagramas de bloque y funciones de transferencia del estabilizador del sistema de potencia (PSS).....	30
2.5 Resumen de la gestión	31
Capítulo 3	32
3.1 Introducción a los estudios de estabilidad	32
3.1.1 Elementos que integran un SEP	32
3.1.2 Descripción física del fenómeno	34
3.2 Clasificación de los estudios de estabilidad	37
3.2.1 De acuerdo con el rango de tiempo	37
3.2.2 De acuerdo con los tiempos de respuesta de los componentes del sistema	38
3.3 Respuesta de un sistema de potencia a un disturbio	39
3.4 Metodología general de los estudios de estabilidad	40
3.5 Modelos de los elementos para el cálculo de la estabilidad	42
3.5.1 Generador síncrono	42
3.5.2 Regulador de tensión y sistema de excitación.....	44
3.5.3 Regulador de velocidad y primo motor	48
3.5.4 Cargas.....	50
3.5.5 Líneas de transmisión y transformadores.....	51
3.6 Ecuación potencia – ángulo	52
3.7 Constante de inercia H.....	55
3.8 Ecuación de oscilación	57
3.9 Efectos de la inestabilidad.....	60
Capítulo 4.....	61
4.1 Sistema de estudio	61
4.2 Ejecución de flujos de potencia	63
4.3 Elaboración de estudios de estabilidad.....	69
4.3.1 Generadores.....	70
4.3.2 Excitador	72
4.3.3 Regulador de velocidad (gobernador).....	74
4.4 Casos de estudio	76
Conclusiones.....	90
Bibliografía.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructura de pozos de captura.[6].....	10
Figura 2.2 Colectores perimetrales.[6]	11
Figura 2.3 Unidad de enfriamiento. [6]	11
Figura 2.4 Diagrama del proceso de acondicionamiento de gas.[6].....	12
Figura 2.5 Quemadores de antorcha elevada y antorcha cerrada. [6]	13
Figura 2.6 Repercusiones de los contaminantes de un proyecto de biogás. [8],[9]	13
Figura 2.7 Sistema de Limpieza del Biogás. [10]	14
Figura 2.8 Grupo Motor – generador. [11].....	15
Figura 2.9 Proceso de generación de electricidad a partir de biogás. [2].....	15
Figura 2.10 Zonas climáticas de México. [12]	18
Figura 2.11 Resultados en metros cúbicos por hora (m ³ /h). [12].....	20
Figura 2.12 Clasificación de permisos de generación. [13]	22
Figura 2.13 Archivo .kmz del Google Earth.....	24
Figura 2.14 Ejemplo de un diagrama unifilar simplificado.	25
Figura 2.15 Implementación de un proyecto de aprovechamiento de biogás de relleno sanitario para generación eléctrica [2].	31
Figura 3.1 Modelo conceptual de un SEP. [15]	33
Figura 3.2 Descripción Física del Proceso de Conversión de Potencia del Vapor a Potencia Mecánica en la Turbina y a Potencia Eléctrica en el Generador. [15]	34
Figura 3.3 Angulo interno del generador ante diversos tipos de fallas. [15]	36
Figura 3.4 Rango de tiempo para los fenómenos dinámicos.[17].....	38
Figura 3.5 Clasificación de problemas dinámicos de acuerdo con la duración de los efectos principales. [15].....	39
Figura 3.6 Representación de un generador sincrónico de polos salientes mediante las bobinas de ejes directo y de cuadratura del equivalente de la armadura, rotando en sincronismo con el devanado de campo en el rotor.[16]....	42
Figura 3.7 Control Manual de voltaje.[15].....	46

Figura 3.8 Sistema de excitación de corriente directa.[18].....	46
Figura 3.9 Sistema de excitación de corriente alterna.[18].....	47
Figura 3.10 Sistema de excitación auto excitada.[18]	47
Figura 3.11 Diagrama de bloques de un motor de combustión interna y sus controles.[19].....	48
Figura 3.12 Diagrama de bloques de un regulador de velocidad y sus controles.[20].....	49
Figura 3.13 Circuito π de una línea de transmisión. [18].....	51
Figura 3.14 SEP elemental integrado por un generador, una línea y una carga (motor). [16].....	52
Figura 3.15 Suma Vectorial de los voltajes que se producen en el generador y motor. [16].....	53
Figura 3.16 Representación gráfica de la ecuación potencia – ángulo.[16]	54
Figura 3.17 Cilindro sólido con radio de giro R. [16].....	55
Figura 3.18 Simplificación con el eje de referencia móvil girando a la velocidad de sincronismo. [16]	58
Figura 4.1 Diagrama unifilar simplificado de la central eléctrica.....	62
Figura 4.2 Sistema de estudio representado en PSSE.	63
Figura 4.3 Datos de entrada de las líneas.	65
Figura 4.4 Datos de entrada para las barras del sistema.....	65
Figura 4.5 Datos de entrada de la carga local.....	65
Figura 4.6 Datos de entrada para el generador que representa el bus infinito.....	66
Figura 4.7 Datos de entrada para el generador 1 y el generador 2.....	66
Figura 4.8 Datos de entrada para los transformadores que se conectan a los generadores de la central eléctrica.	67
Figura 4.9 Datos de entrada para el transformador que energiza a los servicios auxiliares de la central eléctrica	67
Figura 4.10 Resultados de gráficos del estudio de flujos de potencia.....	68
Figura 4.11 Información de entrada y salida del modelo GENCLS.[20]	70
Figura 4.12 Información de entrada y salida del modelo GENSAL. [20]	71
Figura 4.13 Estructura del modelo AC8B. [20]	72

Figura 4.14 Estructura del modelo DEGOV1. [20].....	74
Figura 4.15 Comportamiento de la magnitud del voltaje en terminales de los generadores.	76
Figura 4.16 Ángulos de voltaje interno de los generadores con respecto al tiempo.	77
Figura 4.17 Potencia real inyectada al sistema durante el disturbio.....	78
Figura 4.18 Comportamiento de la potencia reactiva de los generadores.	78
Figura 4.19 Frecuencia de los generadores de la central eléctrica.	79
Figura 4.20 Voltaje en terminales de los generadores para el segundo caso de estudio.....	80
Figura 4.21 Ángulos de voltaje interno con respecto al tiempo para el segundo caso de estudio.	81
Figura 4.22 Potencia real en los generadores para el segundo caso de estudio. .	82
Figura 4.23 Potencia reactiva en los generadores para el segundo caso	83
Figura 4.24 Frecuencia de los generadores en el segundo caso.....	84
Figura 4.25 Voltaje en terminales de los generadores para el tercer caso de estudio.....	85
Figura 4.26 Ángulos de voltaje interno con respecto al tiempo para el tercer caso de estudio.....	86
Figura 4.27 Potencia real en los generadores para el caso tercer caso de estudio.	87
Figura 4.28 Potencia Reactiva aportada por los generadores para el tercer caso de estudio.....	88
Figura 4.29 Frecuencia en el generador 1 para el caso 3.	89

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 2.1 Valores del índice de generación de gas metano (k). [12].....	18
Tabla 2.2 Valores de la generación potencial de metano (L_0). [12].....	19
Tabla 2.3 Factor de corrección de metano (MCF). [12].....	19
Tabla 2.4 Clasificación de centrales eléctricas de acuerdo al Código de Red. [14]	23
Tabla 2.5 Datos de la(s) Unidad(es).....	26
Tabla 4.1 Datos de entrada de las barras.	64
Tabla 4.2 Datos de entrada de líneas en P.U.....	64
Tabla 4.3 Datos de entrada de los transformadores.	64
Tabla 4.4 Voltajes de barra y datos de generación y carga.	68
Tabla 4.5 Flujos de potencia entre barras del sistema de estudio.....	69
Tabla 4.6 Constantes del modelo GENCLS.	70
Tabla 4.7 Constantes del modelo GENSAL	71
Tabla 4.8 Constantes del modelo AC8B.	73
Tabla 4.9 Constantes del modelo DEGOV1.....	75

Glosario

CENACE: Centro Nacional de control de Energía.

RGD: Red General de Distribución.

SEN: Sistema Eléctrico Nacional.

IIE: Instituto de Investigaciones Eléctricas.

CFE: Comisión Federal de Electricidad.

Lixiviado: son todos los líquidos que circulan entre los residuos que se encuentran en vertederos, rellenos sanitarios o cualquier lugar de disposición final donde los residuos no tienen una correcta separación ni tratamiento.

PMG: Generador de Imanes Permanentes.

EPA: Agencia de Protección Ambiental.

SEMARNAT: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CRE: Comisión Reguladora de Energía.

PSS: Son sistemas de control que actuando sobre los sistemas de excitación permiten mejorar el amortiguamiento de oscilaciones de baja frecuencia y en este sentido la estabilidad de pequeña señal, permitiendo maximizar la capacidad de transferencia de potencia del sistema de transmisión.

PSSE: Power System Simulator for Engineering.

SEP: Sistemas Eléctricos de Potencia.

IEEE: El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

Nunca permití que mis enseñanzas interfirieran con mi educación.
Mark Twain

Protocolo de investigación

1.1 Introducción

El presente trabajo de tesis aborda los estudios requeridos por el Centro Nacional del Control de la Energía (CENACE) para la interconexión a la Red General de Distribución (RGD) de una central eléctrica cuya fuente de energía primaria es el biogás (metano), extraído y valorizado de un vertedero de Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

Este tipo de proyectos aporta a un relleno sanitario sustentabilidad y reduce en un cierto porcentaje el impacto ambiental, extrayendo el gas metano que se genera por la descomposición del material orgánico, evitando que se libere a la atmosfera y previniendo incendios al reducir el volumen de gas eliminando concentraciones peligrosas.

En el capítulo 2 se describe el funcionamiento de la tecnología “Waste to Energy” para la generación de energía eléctrica y los tramites que solicita el marco legal mexicano vigente para la implementación de este tipo de proyectos.

El capítulo 3 es conformado por el marco teórico de los estudios de estabilidad transitoria y dinámica para generadores síncronos.

El capítulo 4 consiste en el análisis de simulaciones de estabilidad transitoria y dinámica de una supuesta planta usando datos reales de un generador.

Por último, se presentarán las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de tesis.

1.2 Planteamiento del problema

En los vertederos urbanos se generan gases de efecto invernadero por la descomposición de la basura, dichos gases tienen como destino la atmósfera o la acumulación por lo que representan un gran peligro para el medio ambiente y la población. Para controlar la aglomeración o emisión de estos gases actualmente existen dos opciones; la primera es extraer el gas mediante un sistema de recolección para quemarlo, la segunda opción consiste en extraer los gases y procesarlos para ser usados como fuente primaria de energía de una central eléctrica mediante su combustión en un motor de cuatro tiempos acoplado a un generador eléctrico esto permitiría evitar incendios y con ello para evitar daños al medio ambiente.

Al ejecutar este tipo de proyectos los ingenieros electricistas se enfrentan al enorme reto de realizar los estudios de estabilidad transitoria para la interconexión de dicha planta a la Red General de Distribución por lo que este trabajo de tesis abordara dicho problema.

1.3 Justificación

Los estudios de estabilidad forman parte de los requisitos que solicita el CENACE para autorizar la interconexión y con la información obtenida garantizar una correcta operación de la central para evitar disturbios en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

Otro punto para considerar es facilitar esta información para que se promueva este tipo de proyectos y que las comunidades o grandes ciudades donde están ubicados los vertederos aprovechen de los beneficios económicos y ambientales que se puedan derivar de este tipo de proyectos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar los estudios de estabilidad transitoria y dinámica requeridos por el CENACE para su posible interconexión a la Red General de Distribución.

1.4.2 Objetivos específicos

- Investigar el proceso de extracción de gas metano del vertedero y su posterior tratamiento para su adecuado aprovechamiento en un motor de cuatro tiempos que impulsa al generador eléctrico.
- Recopilar la información de las características técnicas de los generadores. Comprender los requerimientos que exige el CENACE plasmados en el Anexo cuatro del Manual para la Interconexión de Centrales Eléctricas y Conexión de Centros de Carga.
- Realizar una simulación de flujos de potencia de la central en el punto de interconexión mediante el método numérico de Gauss-Seidel.
- Analizar la estabilidad transitoria de la central en el punto de interconexión.
- Evaluar la estabilidad dinámica de la central en el punto de interconexión.

1.5 Hipótesis

Este trabajo de investigación aportará información sobre los nuevos requerimientos plasmados en el Código de red mexicano para lograr una posible interconexión a la Red General de Distribución de centrales eléctricas que aprovechan los gases recolectados de vertederos para su funcionamiento.

1.6 Metodología

1) Consultar bibliografía especializada sobre la tecnología “Waste to Energy” para entender los principios de funcionamiento e investigar sobre la normatividad vigente en nuestro país.

2) Recabar información sobre estudios de estabilidad transitoria en generadores síncronos.

3) Proponer datos típicos que se aproximen a datos reales del generador ya que por contratos de confidencialidad no se pueden divulgar los datos reales de fabricación.

4) Elegir un programa de simulación para ejecutar los estudios de estabilidad de los generadores síncronos.

5) Analizar dichos resultados en base al marco teórico y a la normatividad vigente.

1.7 Variables Independientes y Dependientes

1.7.1 Variables Independientes

Información técnica del generador y los elementos de control, también los parámetros eléctricos del punto de interconexión.

1.7.2 Variables dependientes

Las simulaciones de estabilidad transitoria y dinámica y los análisis de resultados.

1.8 Estado del Arte

1.8.1 Contexto Internacional

En la década de los setenta del siglo XX el mundo entraba en una crisis energética causada por la elevación en los precios de los petrolíferos, dicho evento fue provocado por la decisión de los miembros de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) de no vender más petróleo a los países aliados de Israel en la guerra de Yom Kippur, esta medida incluía a Estados Unidos y algunas naciones europeas. [1]

Los países afectados por las acciones de la OPEP tuvieron grandes problemas económicos por la dependencia a los hidrocarburos que fue y sigue siendo la principal fuente de energía que impulsa el desarrollo industrial y otras actividades de la sociedad. [1]

Las circunstancias de ese momento histórico impulsaron a la humanidad a buscar fuentes nuevas de energía, entre ellas surgió la basura como una interesante alternativa [1].

Una de las primeras tecnologías de obtención de energía eléctrica usando desechos fue la de incineración de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Así, los RSU son transportados a un horno de aproximadamente 2.5 metros de altura, luego los desechos son quemados a una temperatura de 1400°C. El calor generado alimenta a una caldera que produce vapor de agua, éste se puede comercializar directamente a las fábricas para sus procesos o usar dicho vapor para impulsar un conjunto turbina-generator para generar energía eléctrica, de este modo por cada tonelada procesada se pueden producir hasta 525 kw/h. [1]

Estas plantas de incineración de RSU tuvieron su mayor auge en el noreste de los Estados Unidos en la década de los ochenta, porque los vertederos de los estados como Minnesota, Nueva York, Florida Virginia y Texas ya enfrentaban una

crisis muy aguda de saturación. Los principales operadores de estas plantas en aquel momento fueron las empresas Ogden Martin y Wheelabrator Technologies.[1]

Otro tipo de tecnología que se ha implementado posteriormente para generar energía eléctrica usando los RSU, es la extracción y posterior tratamiento de biogás de los vertederos.

Una vez que el biogás ha sido procesado se usa como combustible en un motor de cuatro tiempos que acciona un generador eléctrico conectado a un transformador que eleva el voltaje de la potencia producida en el generador y permite la inyección de energía eléctrica a la red.

En la actualidad Europa tiene en funcionamiento 480 instalaciones Waste to Energy, el país líder es Francia que posee 126 seguido por Alemania que tiene 99 mientras que países con menor extensión territorial como Bélgica y Holanda mantienen en operación 12 y 18 plantas de valorización de residuos respectivamente. [4]

En Asia el primer lugar es China ya que en 14 años construyó 200 plantas ya que en Beijing cuentan con 500 vertederos alrededor de la ciudad. [4]

En la zona de Latinoamérica esta tecnología ya arribo tarde por el alto costo que representa edificar y poner en servicio este tipo de plantas. [4]

1.8.2 Contexto nacional

El primer proyecto de este tipo implementado en nuestro país fue una planta piloto de 20 kW de capacidad en el relleno de Santa Cruz Meyehualco construida por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en colaboración con la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la extinta Compañía Luz y Fuerza del Centro en el año de 1991.[2]

Para el año de 2003 se inauguró la planta de la empresa Bioenergía de Nuevo León, S. A. de C. V. (BENLESA) ubicada en el relleno sanitario del municipio de Salinas Victoria cuya propiedad es del Estado de Nuevo León. Dicha planta fue inaugurada con una capacidad de 7.42 MW, actualmente cuenta con un parque de

generación constituido por 16 motores de 1.06 MW de potencia de la marca GE Jenbacher, modelo JGC 320 GS-L.L. [2]

BENLESA es el producto de una alianza estratégica entre Sistema para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos (SIMEPRODE) y las empresas privadas Bioeléctrica de Monterrey, S. A. de C. V., empresa subsidiaria de Sistemas de Energía Internacional, S.A. de C. V. (SEISA).[2]

Los clientes de BENLESA actualmente son el municipio de Monterrey que utiliza la energía de dicha planta para alimentar el alumbrado público, las compañías estatales de agua potable, Paseo Santa Lucia y las líneas del Metro I y II. [2]

Otra característica de este proyecto es que fue el primero en su clase en México y Latinoamérica y fue modelo a seguir de proyectos consiguientes. [2]

Para el año 2009 en el relleno sanitario del municipio de San Nicolás ubicado en el estado de Aguascalientes, se interconectó otra planta con un paquete de generación conformado por dos motores de la marca Caterpillar con una capacidad de 1.35 MW cada uno. La empresa encargada de la operación de dicha planta se denomina como Sociedad de Autoabastecimiento de Energía Verde de Aguascalientes la cual nació a partir de la sinergia de la empresa ENER-G Natural Power con el municipio de Aguascalientes.

El único cliente de la Sociedad de Autoabastecimiento de Energía Verde de Aguascalientes es la empresa japonesa NISSAN que toma el 100% de la generación eléctrica de dicha planta. [2]

Además, en el año de 2011 entro en operaciones la planta del relleno sanitario de Ciudad Juárez, la empresa encargada de la generación y venta de energía se llama Biogás de Juárez y sus principales clientes son los municipios de Nuevo Casas Grandes y Ciudad Juárez que usan la energía para abastecer el alumbrado público, actualmente la planta tiene una capacidad instalada de 6.4 MW.[3]

En el año 2012 la Comisión Reguladora de Energía (CRE) le otorgó el permiso de generación a la planta del relleno de Saltillo Coahuila con una capacidad instalada de 2.122 MW, la operadora de dicha planta es la empresa mexicana Lorean Energy Group, la energía producida es empleada para alimentar al alumbrado público del municipio de Saltillo. [3]

En el año 2013 se interconectó a la red la planta del relleno sanitario Durango con una capacidad instalada de 1.6 MW, energía que es usada para alimentar a la mitad del alumbrado público del municipio de Durango. La empresa operadora del proyecto es Ener-G. [3]

En todos los casos de éxito que se han comentado previamente en nuestro país, se observa la combinación de capital privado con las instituciones de gobierno que se encargan del manejo de los vertederos. Por lo tanto, es de vital importancia realizar un análisis riguroso del potencial del biogás de relleno sanitario en nuestro país y el costo beneficio de este tipo de proyectos para las economías locales y el impacto al medio ambiente.

Hasta las noches más oscuras terminarán y el sol saldrá.

Víctor Hugo

Tecnología “Waste to Energy” y legislación vigente

Este capítulo describe la tecnología “Waste to energy”, los estudios y trámites ante las autoridades correspondientes que se deben realizar para implementar este tipo de proyectos en México.

2.1 Descripción de la tecnología “Waste to energy”

Los vertederos son lugares de almacenamiento final de los RSU, los cuales cumplen con la función de contener lixiviados y otros contaminantes tóxicos para amortiguar el impacto del medio ambiente de estas sustancias. [3]

Los rellenos sanitarios ayudan a solucionar el problema de la gestión de RSU solo a corto plazo ya que la experiencia en países desarrollados demuestra que a largo plazo los gastos de operación son insostenibles por lo que dichos países emplean políticas más rigurosas sobre la reutilización, clasificación de desechos y valorización de RSU. [3]

Para que un área determinada pueda usarse como relleno sanitario debe de cumplir con ciertos requerimientos que se describirán a continuación:

- Protección de los mantos acuíferos subterráneos mediante herramientas de aislamiento hidrológico para que los lixiviados no se filtren al subsuelo.

- Proyecto de ingeniería para que el diseño y funcionamiento del relleno sanitario cumpla con normas medio ambientales.
- Personal con experiencia y capacitación para realizar buenas prácticas en la gestión de desechos urbanos como el control del volumen de gas en el vertedero y la compactación y recubrimiento de los RSU. [3]

La tecnología “Waste to energy” tiene como objetivo la desgasificación del relleno sanitario aprovechando el biogás para la generación de energía eléctrica y su posterior comercialización; para lograr este propósito el proceso es el siguiente:

1. **Recolección del Biogás:** El proceso inicia con la recolección del biogás producido por la descomposición de la parte orgánica de los residuos mediante pozos de recolección verticales y oblicuos para posteriormente realizar su transporte a la central eléctrica a través de tuberías apropiadas, colectores secundarios y colectores perimetrales como se muestra en la figura 2.1[3]

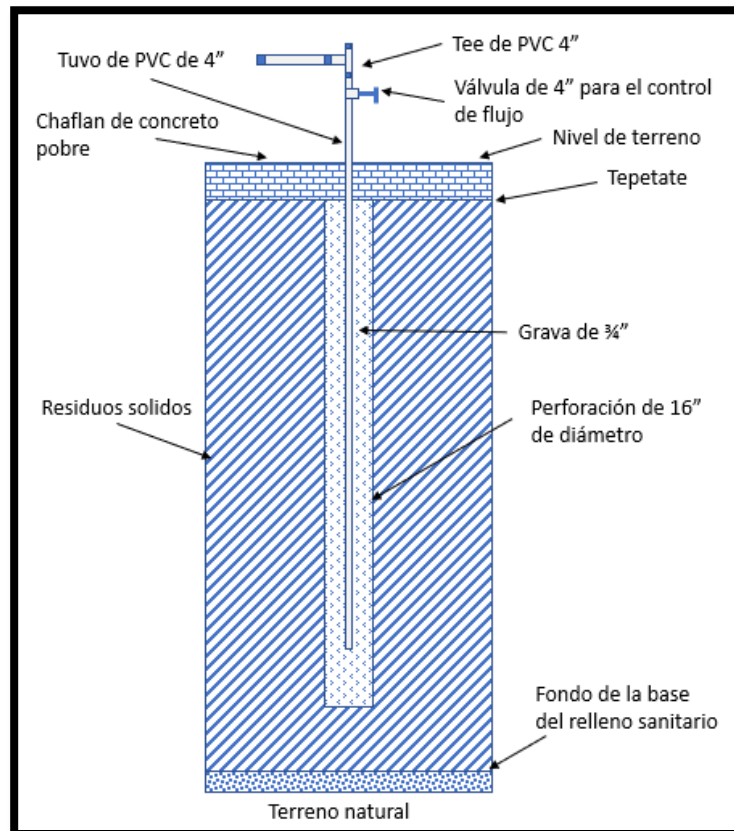


Figura 2.1 Estructura de pozos de captura.[6]

El biogás extraído en los pozos de captura recorre el colector perimetral mostrado en la figura 2.2, pasando a través de los pozos de condensado que retienen el lixiviado resultante de la condensación y las partículas pesadas contenidas en el biogás. El líquido condensado se envía a las lagunas de tratamiento del relleno sanitario. [3]

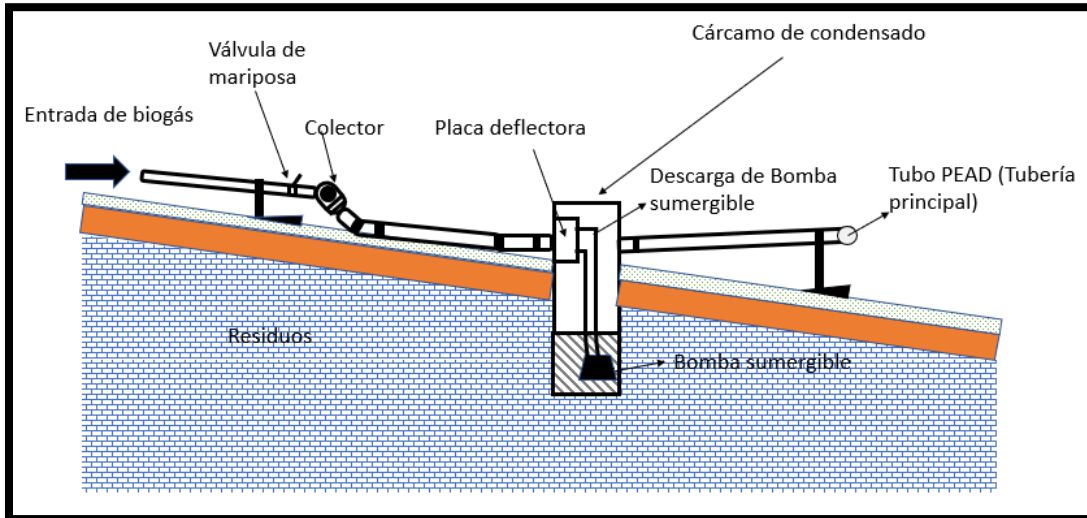


Figura 2.2 Colectores perimetrales.[6]

Unidad de Enfriamiento y Deshumidificación del Biogás:

En el segundo paso, el biogás se dirige a la unidad de enfriamiento y deshumidificación de biogás, donde se enfría mediante un intercambiador de calor que funciona junto con un deshumidificador dicha unidad se ilustra en la figura 2.3.[3]

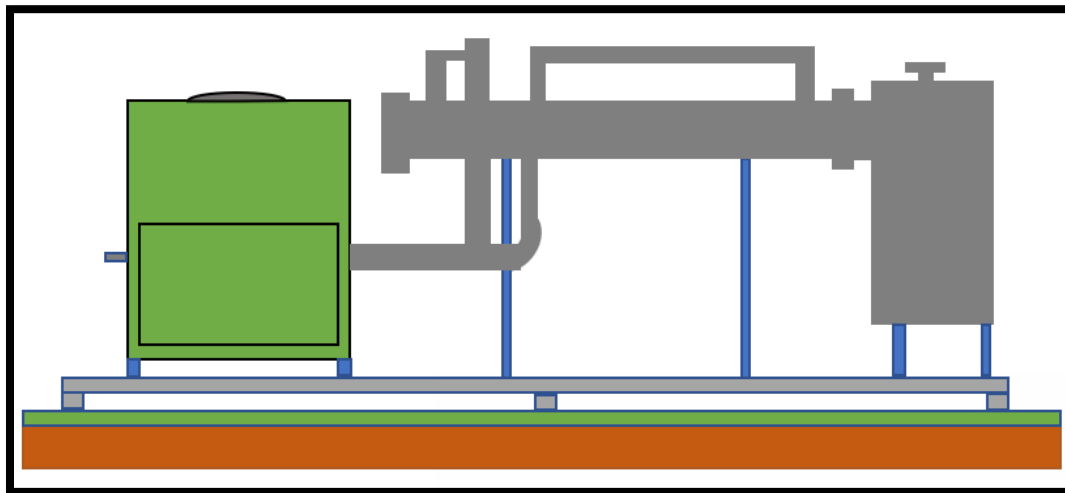


Figura 2.3 Unidad de enfriamiento. [6]

3. Unidad de acondicionamiento del Biogás

El biogás se envía a una unidad de acondicionamiento del biogás (UCG) cuya función es mantener la red de desgasificación y transporte de biogás con presión negativa y simultáneamente generar suficiente presión positiva al caudal de biogás que alimenta el generador de energía o al quemador (antorcha) que componen la planta. [3]

El proceso realizado en la UCG se muestra en la figura 2.4.

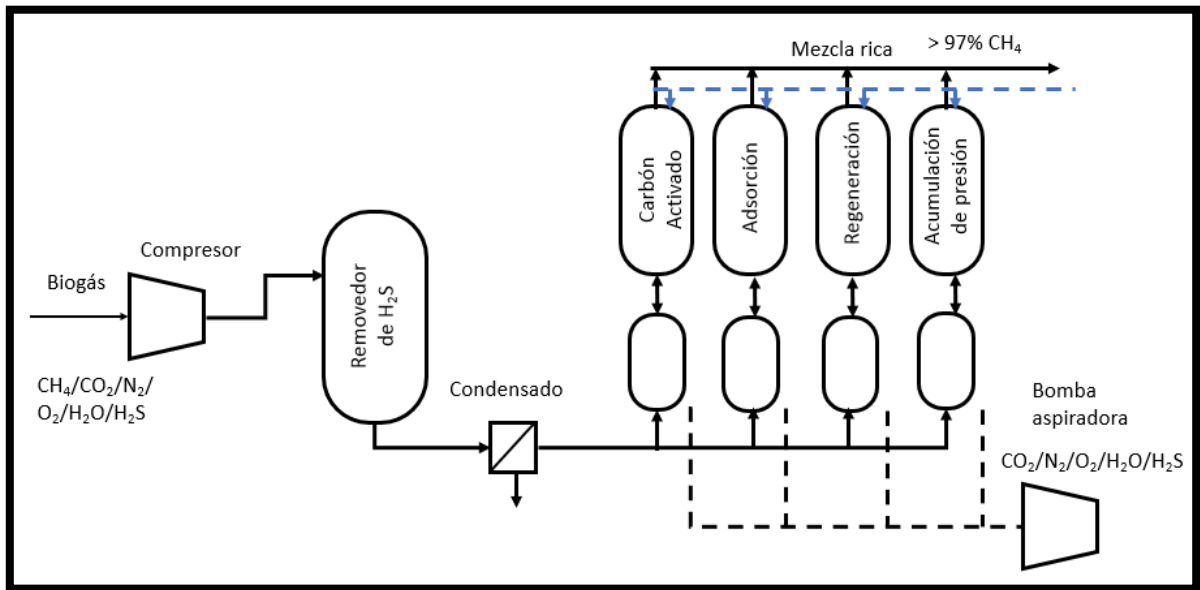


Figura 2.4 Diagrama del proceso de acondicionamiento de gas.[6]

4. Quemador

Al salir de la UCG, el flujo se dirige al grupo motor - generador o al quemador en líneas paralelas. El flujo de biogás está dirigido principalmente al grupo motor - generador mientras que el quemador se activa solo para quemar el exceso de biogás o cuando este esté en mantenimiento o reparación, ejemplos de quemadores se ilustran en la figura 2.5. [3]



Figura 2.5 Quemadores de antorcha elevada y antorcha cerrada. [6]

Limpieza del Biogás

El gas de relleno sanitario siempre contiene impurezas que son un foco de atención por su concentración y los efectos nocivos que provocan al equipo y al medio ambiente, por lo que se han desarrollado soluciones de tratamiento. En la figura 2.6 se muestran las repercusiones de la contaminación en este tipo de proyectos. [3]



Figura 2.6 Repercusiones de los contaminantes de un proyecto de biogás. [8],[9]

Los contaminantes más agresivos contenidos en el biogás son el ácido sulfhídrico (H_2S) que en ambiente húmedo es corrosivo para el motor y los siloxanos (SiO_2) que crea depósitos.

Eliminando los dos compuestos anteriores, se reducen las emisiones de otros contaminantes como, por ejemplo: Componentes Orgánicos Volátiles (COV), Óxido de Azufre (SO₂), Óxido de Nitrógeno (NO) y Monóxido de Carbono (CO).

Por lo tanto, es necesario intervenir con un sistema de limpieza del biogás y/o en el ajuste de las emisiones mediante el uso de convertidores catalíticos como el que esta ilustrada en la figura 2.7 que usa carbón activado. [3]

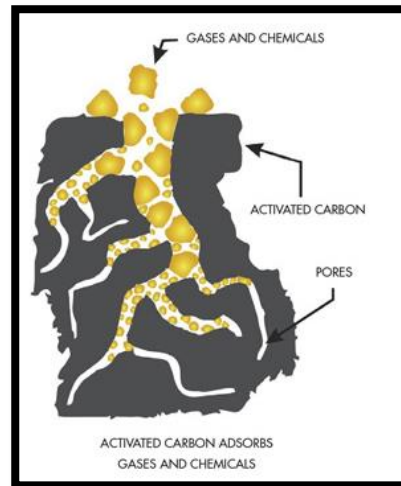


Figura 2.7 Sistema de Limpieza del Biogás. [10]

6. Grupo Motor – generador síncrono

Este elemento está constituido por dos equipos el primero es un motor de ciclo Otto con turbo alimentación de mezcla y un equipo de refrigeración para la misma, con sistema de encendido de rendimiento elevado y regulación electrónica para la formación de la mezcla, trabajando según el principio de combustión de mezcla pobre desarrollado por el fabricante.[11]

El segundo equipo es el generador síncrono que a su vez consta de un generador principal de polos internos y de una excitatriz compuesta de máquina de polos externos y de un sistema de control digital. El regulador recibe la alimentación de potencia de un devanado auxiliar en el estátor principal o un generador de imán permanente (PMG). [11]

Cabe agregar que este es ultimo equipo se estudiara a fondo a través de estudios de estabilidad transitoria en este trabajo, el grupo motor – generador se muestra en la figura 2.8.



Figura 2.8 Grupo Motor – generador. [11]

Para recapitular el proceso de aprovechamiento de biogás de vertedero y tener una visión completa de dicha actividad a continuación se muestra la figura 2.9 con los equipamientos principales para generar electricidad con el biogás producido en los rellenos sanitarios.

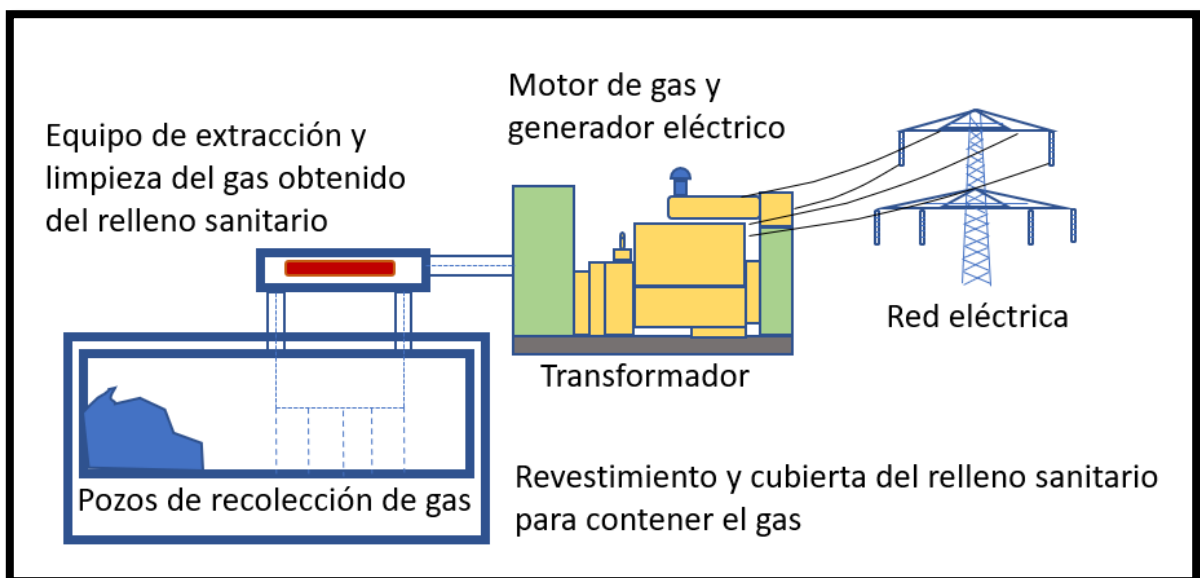


Figura 2.9 Proceso de generación de electricidad a partir de biogás. [2]

2.2 Estudios de factibilidad de un relleno sanitario

Para determinar la factibilidad de un relleno sanitario y poder realizar con éxito un proyecto de valorización del biogás lo primero que se debe de determinar es el volumen de gas que se puede generar en el vertedero a corto y largo plazo por ello se desarrolló el “Modelo Mexicano de Biogás” con ayuda de la US EPA (United States Environmental Protection Agency) como parte de actividades de cooperación entre los dos países para reducir la emisión de gases de efecto invernadero. [12]

Dicho modelo está basado en la ecuación (2.1) de degradación de primer grado.

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F) \quad (2.1)$$

Donde:

Q_{LFG} =Flujo máximo esperado de biogás (m³/año)

i= Incremento de tiempo de 1 año.

n= (año de cálculo) - (año inicial de disposición de residuos).

j= Incremento de tiempo en 0.1 años

k=índice de generación de metano

L_0 = Generación Potencial de metano (m³/Mg)

M_i =Masa de residuos dispuestos en el año i (Mg)

T_{ij} =Edad de la sección j de la masa de residuos M_i dispuestos en el año i (años decimales).

MCF= Factor de corrección de metano

F= Factor de ajuste por incendios

Con la ecuación 2.1 se estima la generación de biogás, tomando en cuenta las cantidades de residuos sólidos acumulados a lo largo de un año y diversos factores

que afectan el resultado por lo que a continuación se describirá como determinar estos valores.

Índice (k)

El índice k o índice de generación de metano, determina el nivel de producción de gas metano y está en función del contenido de humedad en los residuos, la disponibilidad de nutrientes para los metanógenos, el pH, la temperatura también está relacionada con el periodo de vida las unidades de la constante son (1/año). [12]

Para determinar los valores de k se toman de referencia los valores de la tabla 2.1 en función de la división del país en cinco regiones climatológicas que se observan en la figura 2.10 y la categoría de desechos que se encuentren en el vertedero que también se clasificación de acuerdo al índice de degradación como se enumera a continuación: [12]

1. Residuos de degradación muy rápida – residuos alimenticios, otros orgánicos, 20% de los pañales.
2. Residuos degradación moderadamente rápida – residuos vegetales, poda de casas o parques municipales, papel higiénico.
3. Residuos degradación moderadamente lenta – papel, cartón, textiles.
4. Residuos degradación muy lenta – madera, caucho. piel, huesos, paja.

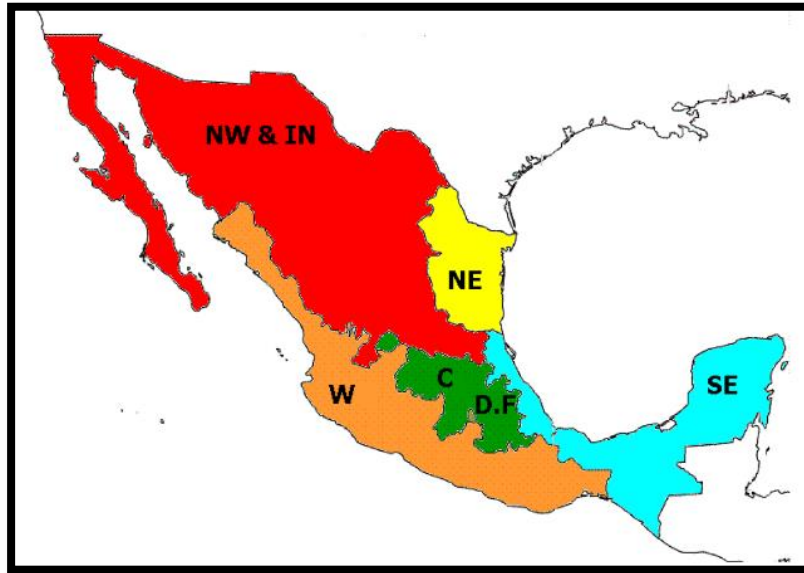


Figura 2.10 Zonas climáticas de México. [12]

Tabla 2.1 Valores del índice de generación de gas metano (k). [12]

Categoría de residuos	Región 1	Región 2	Región 3	Región 4	Región 5
	Sureste	Oeste	Centro/interior	Noreste	Norte interior norte
1	0.300	0.220	0.160	0.150	0.100
2	0.130	0.100	0.075	0.070	0.050
3	0.050	0.040	0.032	0.030	0.020
4	0.025	0.020	0.016	0.015	0.010

Generación Potencial de metano L_0

Es la constante del modelo que representa matemáticamente la capacidad del vertedero de generar metano esta depende de la concentración de celulosa en los residuos cuyas unidades son metros cúbicos por tonelada de residuos (m^3/Mg).

Al igual que el índice k depende de la ubicación geográfica del vertedero y la categoría de residuos por lo que igual manera se determina su valor usando los datos de la tabla 2.2. [12]

Tabla 2.2 Valores de la generación potencial de metano (L_0). [12]

Categoría de residuos	Región 1	Región 2	Región 3	Región 4	Región 5
	Sureste	Oeste	Centro/interior	Noreste	Norte interior norte
1	69	69	69	69	69
2	115	126	138	138	149
3	214	214	214	214	214
4	202	202	202	202	202

Factor de corrección de metano (MCF)

El factor de corrección de metano (MCF) es un ajuste a las estimaciones de generación de biogás del modelo que toma en cuenta el grado de descomposición anaeróbica de los residuos, manejo y profundidad de almacenamiento dichos valores están contenidos en la tabla 2.3. [12]

Tabla 2.3 Factor de corrección de metano (MCF). [12]

Manejo del sitio	Profundidad $d < 5m$	Profundidad $d > 5m$
Sin manejo	0.4	0.8
Con manejo	0.8	1.0
Semi-aerobico	0.4	0.5
Desconocida	0.4	0.8

Factor de ajuste por incendios (F)

Cuando un vertedero tiene en su historial registros de un incendio se debe de tomar en cuenta este factor ya que la materia orgánica que fue consumida en dicho siniestro se convierte en ceniza y por lo tanto ya no es capaz de producir biogás por lo que el valor de este factor se determina de acuerdo a la intensidad del incendio a continuación se muestra la escala: [12]

- 1/3 para impacto bajo
- 2/3 para impacto medio
- 1 para impacto severo

La estimación para más de un año es desarrollada variando la proyección anual. La cantidad de biogás es igual a dos veces la generación de metano calculado. La constitución del biogás que asume el modelo es de 50% metano (CH₄) y 50 % de otros gases, incluyendo el dióxido de carbono (CO₂) y trazas de otros compuestos.[12]

Una vez alimentado al modelo con los datos anteriormente expuestos se procede a calcular la producción y recuperación de biogás cuyas unidades son metros cúbicos por hora (m³/h) y pies cúbicos por minuto (ft³/min), como se muestra en la figura 2.11. Además, se estima la cantidad de energía que posee el biogás recuperado en millones de BTU por hora (mmBTU/h), la eficiencia de captura, que es la capacidad máxima de la planta de energía en (MW) y las toneladas de reducción de emisión de CO₂ en reducción de emisiones certificadas (CERS). [12]

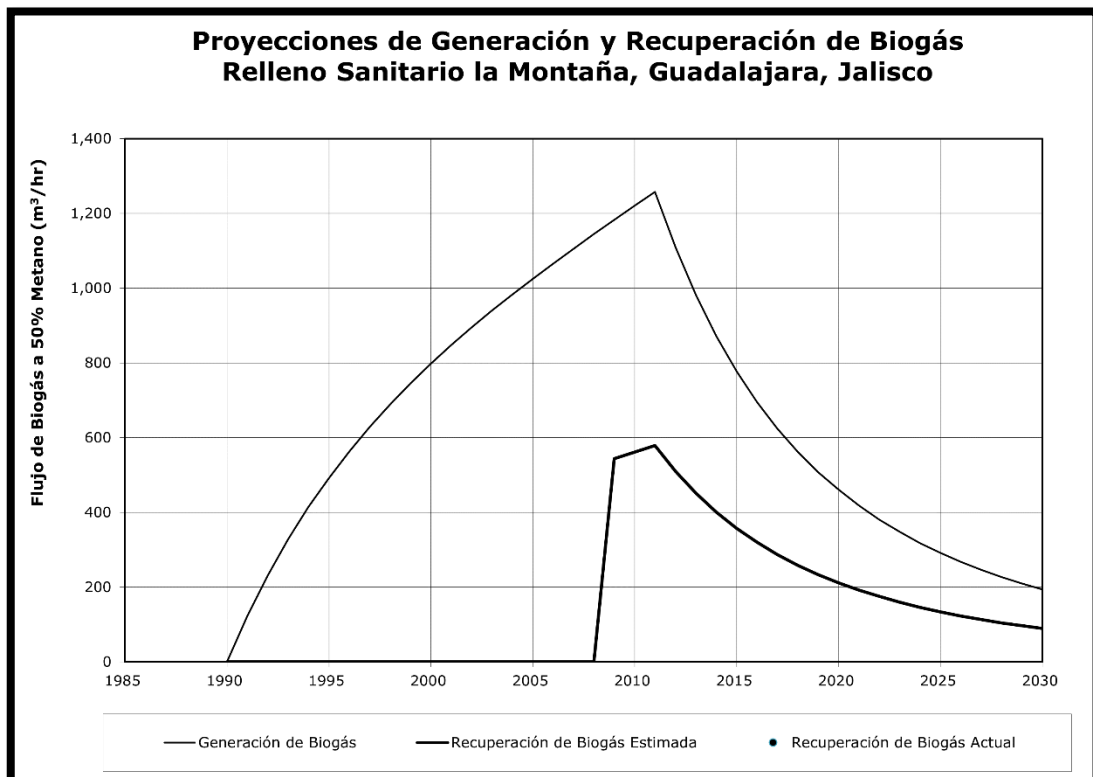


Figura 2.11 Resultados en metros cúbicos por hora (m³/h). [12]

2.3 Gestión del proceso

Para implementar este tipo de proyectos se deben de realizar y trámites ante diversas autoridades que vigilan aspectos importantes para la operación exitosa y segura de la planta, los permisos que se deben obtener se enumeran a continuación.

2.3.1 Tramites ante la SEMARNAT

El primer trámite que se debe llevar a cabo ante la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es un estudio de **impacto ambiental** en donde se debe plasmar la siguiente información que a continuación se enumera:

- 1) Datos generales del proyecto.
- 2) Información sobre la construcción y operación de la planta.
- 3) Procedimientos para la implementación de la normatividad ambiental vigente en nuestro país.
- 4) Datos del medio, natural, físico y social del sitio del proyecto.
- 5) Detección de impactos negativos que el proyecto pueda ocasionar al medio ambiente.
- 6) Soluciones para la mitigación de dichos impactos.

Una vez presentados los estudios de impacto ambiental, la SEMARNAT expide la Licencia de Impacto Ambiental Única (LAU) que aborda en un solo proceso administrativo, la evaluación, dictamen y resolución de tramites ambientales. [2]

2.3.2 Permiso de generación de la CRE

La Comisión Reguladora de Energía (CRE) es un órgano independiente en México cuya función es vigilar el funcionamiento del mercado eléctrico y del mercado de hidrocarburos mediante la regulación de los precios de suministro y venta, supervisión del cumplimiento de normas vigentes aplicables a estos sectores y expedición o suspensión de permisos de operación. [3]

Para que una planta de generación de energía eléctrica pueda entrar en funciones se debe gestionar ante la CRE un **permiso de generación** cuya clasificación se muestra en la figura 2.12.

La selección del tipo de permiso de generación se debe realizar tomando en cuenta el tamaño del proyecto y el tipo de necesidades que se desea cubrir. Los permisos que generalmente se solicitan para plantas de revalorización de biogás de vertedero son de **autoabastecimiento y cogeneración**. [3]

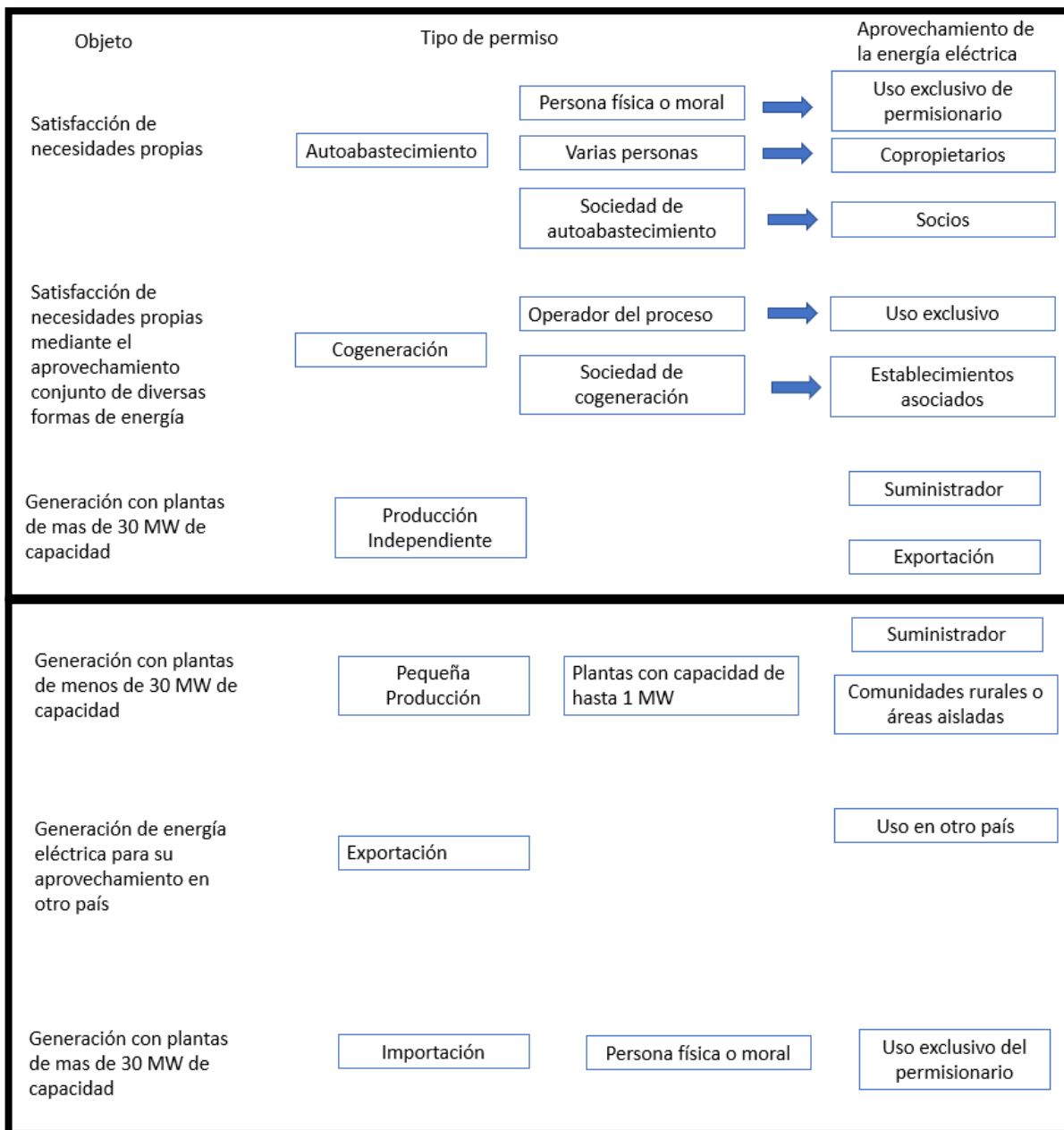


Figura 2.12 Clasificación de permisos de generación. [13]

2.4 Estudios requeridos por el CENACE

El CENACE requerirá al solicitante la información que exige el Manual para la Interconexión de Centrales Eléctricas y Conexión de Centros de Carga publicado en el Diario Oficial de la Federación el 9 de febrero de 2018 para realizar simulaciones de la interacción de la central con la red vecina y poder dimensionar el nivel de impacto de los generadores a la RGD, se debe proveer de ciertos datos técnicos que están en función de la capacidad de generación de la central, sistema interconectado al que se desea integrar y la tecnología implementada (síncrona o asíncrona) en la tabla 2.4 se muestra la clasificación de centrales eléctricas de acuerdo a este documento y posteriormente se nombrará la información técnica que el solicitante debe entregar a CENACE en el caso de que fuera una central tipo B que corresponde a la capacidad de generación promedio de plantas dependientes de biogás de vertedero.

Tabla 2.4 Clasificación de centrales eléctricas de acuerdo al Código de Red. [14]

Áreas síncronas	Central eléctrica Tipo A	Central eléctrica Tipo B	Central eléctrica Tipo C	Central eléctrica Tipo D
Sistema Interconectado Nacional	$P < 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} \leq P < 10 \text{ MW}$	$10 \text{ MW} \leq P < 30 \text{ MW}$	$P \geq 30 \text{ MW}$
Sistema Baja California	$P < 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} \leq P < 5 \text{ MW}$	$5 \text{ MW} \leq P < 20 \text{ MW}$	$P \geq 20 \text{ MW}$
Sistema Baja California Sur	$P < 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} \leq P < 3 \text{ MW}$	$3 \text{ MW} \leq P < 10 \text{ MW}$	$P \geq 10 \text{ MW}$
Sistema Interconectado Mulegé	$P < 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} \leq P < 1 \text{ MW}$	$1 \text{ MW} \leq P < 3 \text{ MW}$	$P \geq 3 \text{ MW}$

2.4.1- Diagrama(s) geográfico(s) con la localización de la Central Eléctrica

Se debe realizar un diagrama geográfico con Google Earth, que incluya las coordenadas de la superficie asignada a la subestación eléctrica particular y del predio total del proyecto. Las coordenadas geodésicas deberán presentarse en formato; grados, minutos y segundos, como lo muestra la figura 2.13.

También se recomienda al solicitante proporcionar él archivo con extensión .kmz.[14]



Figura 2.13 Archivo .kmz del Google Earth

2.4.2.- Diagrama unifilar simplificado

Realizar un diagrama unifilar de la central eléctrica que reúna los datos mostrados en la figura 2.14

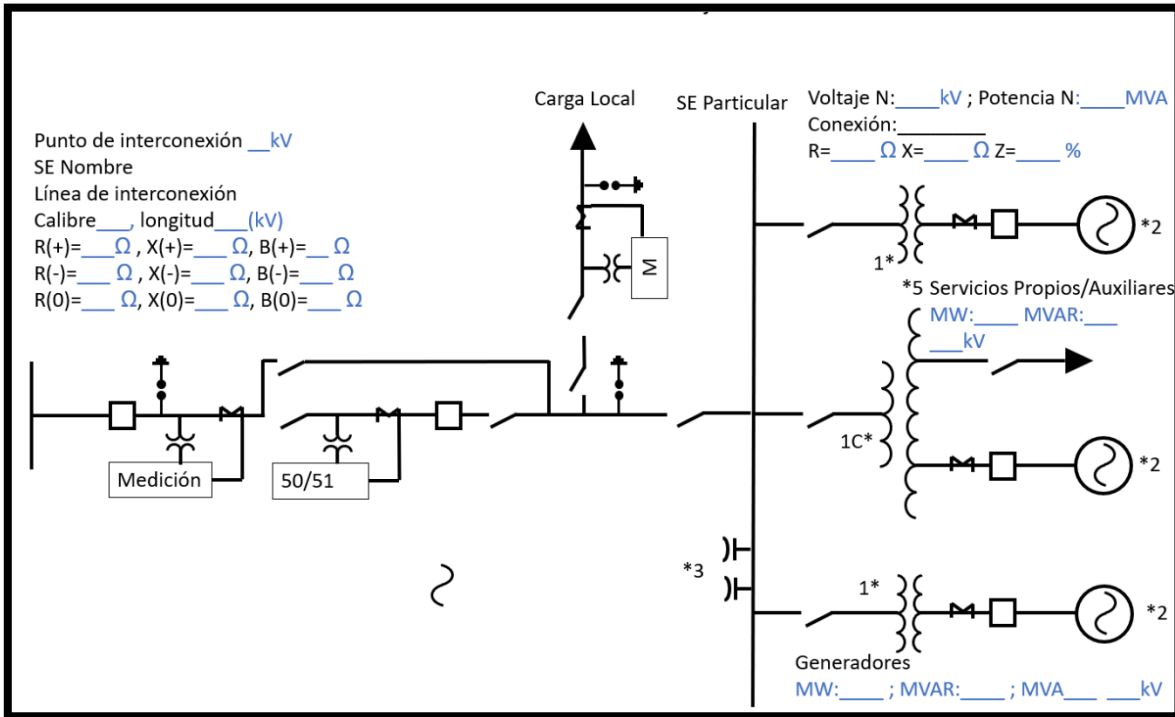


Figura 2.14 Ejemplo de un diagrama unifilar simplificado.

***1.a-** Cuando la central eléctrica disponga de más de un transformador de potencia o de servicios auxiliares se deberán colocar en el diagrama unifilar con sus respectivos datos técnicos. [9]

***1.b-** Si existen transformadores que sean exactamente iguales colocar una leyenda aclaratoria que los parámetros eléctricos corresponden a ambos.

***1.c-** Si en el proyecto se planea utilizar un transformador de tres devanados se deberán incluir la información técnica de cada devanado. [9]

***2-** En caso de que se instalen varias unidades de generación, se requiere presentar los datos técnicos de todas y cada una de ellas. [9]

***3-** Si también se plantea colocar equipos de compensación adicional en la central eléctrica se deberá proporcionar el nivel de tensión, potencia reactiva y

si aplica informar sobre el número de pasos que conforman dichos elementos.
[9]

***4-** Indicar los parámetros eléctricos totales en Ohms o en su caso especificar que son Ω/km de la línea de transmisión o del circuito de media tensión.

***5-** Presentar los datos de servicios propios o auxiliares. (Nivel de tensión, MW y MVAR)

***6-** Si el punto de interconexión sea una S.E. (Subestación Eléctrica) de maniobras se debe de indicar con que líneas de transmisión entronca.[9]

2.4.3.- Información general de las Unidades de la Central Eléctrica instaladas en la Central Eléctrica.

Este punto se refiere a proporcionar la información general de las unidades a instalarse, como mínimo se debe presentar la información solicitada en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Datos de la(s) Unidad(es)

Concepto	Datos del solicitante	Unidad
Fabricante del generador eléctrico (incluir modelo, eficiencia en sitio y manuales en formato PDF).		NA
Fabricante de la turbina (incluir modelo, eficiencia en sitio y manuales en formato PDF).		NA
Capacidad Nominal del generador eléctrico (Snom).		kVA
Potencia Nominal del generador eléctrico (Pnom)		kW
Eficiencia del generador eléctrico a potencia nominal.		%
Potencia nominal de la turbina		kW
HP máximos para la turbina y generador.		HP
Factor de potencia en atraso y adelanto		NA
Numero de polos		NA
Tipo de conexión		NA
Relación de corto circuito (SCR)		NA
Voltaje nominal		V
Curva de Capabilidad del generador eléctrico.		NA
Curva de Capabilidad del primomotor.		NA

*1- Los datos presentados deben ser en unidades establecidas en la tercera columna de la Tabla 4.

2*- En caso de que se cuenten con diferentes tipos de generadores se deberán de proporcionar la información de la Tabla 4 para cada uno.

a) Proporcionar el dato de la **capacidad Instalada**

Cantidad de potencia que una central Eléctrica o Recurso de demanda controlable diseñada para producir o dejar de consumir energía eléctrica, también es conocida como la capacidad de placa. [9]

b) Proporcionar el dato de la **capacidad instalada neta.**

Capacidad que resulta de restar a la capacidad instalada de una central eléctrica la capacidad dedicada a sus propios y cualquier carga que suministre de manera local, y que el solicitante declarara entregar en la solicitud correspondiente a la red nacional de transmisión y a las redes generales de distribución. [9]

2.4.4 Modelo matemático, diagramas de bloque y funciones de transferencia del control del sistema de excitación.

El sistema de excitación es un elemento importante en el control de las unidades generadoras ya que cumple con la función de regular la magnitud del voltaje de salida en rangos óptimos para una correcta operación por ello el CENACE requerirá la siguiente información:

- Manual de operación del fabricante.
- Modelo y su equivalente de IEEE que están establecidos en el estándar IEEE 421.5.
- Especificación del tipo de sistema de excitación. (Electromecánico con excitatriz, estático con excitatriz, amplificadores magnéticos, reactores saturables, brushless, estático analógico)
- Información técnica del transformador de excitación. (excitadores estáticos)
- Número de puentes en paralelos. (excitadores estáticos)
- Capacidad por puente MVA y corriente máxima en cada puente, A cd.
- Limitación de mínima excitación al 10, 50 y 100% de la potencia nominal del generador, MVar. [9]
- Descripción del dispositivo de control dinámico que se tienen considerados en la Central Eléctrica y sus características técnicas. [9]
- Plasmar los modelos matemáticos en el programa de PSS®E en versión 32.05 o 34 para centrales eléctricas que se planean interconectar en el sistema interconectado nacional a excepción del sistema eléctrico de Baja California en donde se requiere entregar los modelos matemáticos en la Librería de PSLF de General Electric por requerimientos del Western Electricity Coordinating Council (WECC) [9]

2.4.5 Modelo matemático, diagramas de bloque y funciones de transferencia del control del sistema de control de velocidad (motor-generador)

El regulador de velocidad es el conjunto de elementos cuya función es determinar el grado de apertura de las válvulas o distribuidores para controlar el flujo de aire, gas o vapor (dependiendo del tipo de primo-motor) con la finalidad de controlar la velocidad angular impactando sobre la potencia mecánica generada. El control de la velocidad tiene relación directa sobre un aspecto muy importante en la generación que es la frecuencia por ello el CENACE requerirá los siguientes datos:

- Manual del Fabricante
- Modelo y su equivalente de IEEE.
- Especificación del Tipo de regulador de velocidad (mecánico-hidráulico, electrohidráulico, analógico-hidráulico, digital-hidráulico).
- Entregar los modelos dinámicos que representen matemáticamente el funcionamiento de los dispositivos utilizados por la Central Eléctrica en los programas PSS®E y PSLF de General Electric.[9]

2.4.6 Modelo matemático, diagramas de bloque y funciones de transferencia del estabilizador del sistema de potencia (PSS)

El estabilizador del sistema de potencia es un dispositivo que envía señales suplementarias para eliminar oscilaciones electromecánicas sostenidas o bien para aumentar el amortiguamiento de las mismas, dichas señales estabilizadoras van dirigidas al sistema de excitación para mejorar su respuesta ante oscilaciones en el sistema de potencia por ello el PSS es un elemento vital para la operación de máquinas síncronas y por ello el CENACE exige al solicitante la siguiente información:

- Fabricante y manual
- Modelo y su equivalente de IEEE
- Descripción del dispositivo de control dinámico que se tienen considerados en la Central Eléctrica y sus características Técnicas.

Entregar los modelos dinámicos que representen matemáticamente el funcionamiento de los dispositivos utilizados por la Central Eléctrica en los programas PSS®E y PSLF de General Electric.[9]

2.5 Resumen de la gestión

En este capítulo se estudió los tramites a seguir bajo la legislación vigente en materia ambiental y eléctrica. Otro punto que se estudio fue el modelo de la estimación de generación de biogás para un relleno sanitario que es muy importante porque se justifica la inversión y todo el trabajo para llevar a cabo este tipo de proyectos.

En la figura 2.15 se muestra el proceso para la implementación de un proyecto de aprovechamiento de biogás de relleno sanitario para generación eléctrica.

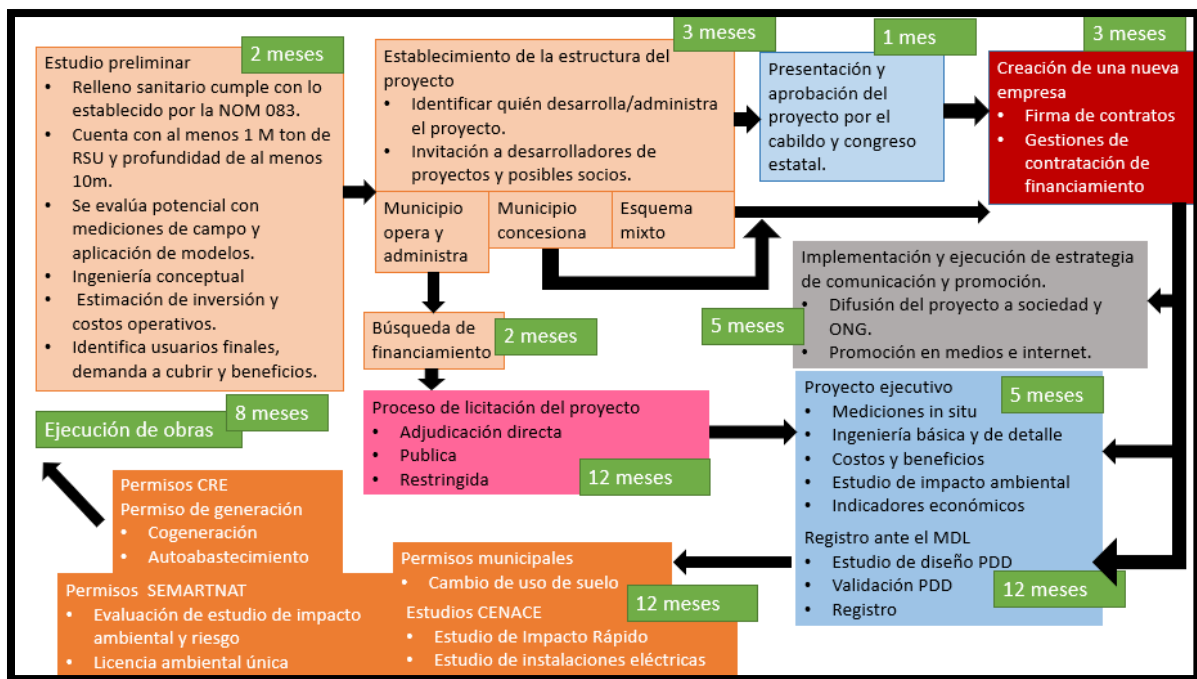


Figura 2.15 Implementación de un proyecto de aprovechamiento de biogás de relleno sanitario para generación eléctrica [2].

Es mejor fallar siendo originales, que triunfar imitando a alguien.
Herman Melville

Estudios de estabilidad en Sistemas Eléctricos de Potencia

3.1 Introducción a los estudios de estabilidad

Como se mostró en el capítulo 2 hay muchos estudios que se deben realizar para la interconexión de una central eléctrica y uno de los más críticos es el estudio de estabilidad de los generadores, por ello el objetivo de este capítulo es profundizar sobre este tipo de estudios y comprender la información técnica que el CENACE solicita en base al Manual de Interconexión de Centrales Eléctricas y Conexión de Centros de Carga.

3.1.1 Elementos que integran un SEP

Un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) está formado por centrales de generación, líneas de transmisión, cargas eléctricas, subsistemas de control y otros elementos integrados de forma eléctrica o mecánicamente tal como se muestra en la figura 3.1. [15]

Las centrales eléctricas por lo regular se ubican en lugares remotos de la carga ya que depende de la disponibilidad de la fuente primaria de energía, normativas ambientales y la cantidad de agua disponible ya que se usa como medio de enfriamiento o generador de vapor.

Para llevar la potencia generada en las centrales a los centros de carga se requiere de las líneas de transmisión en donde la energía fluye a altas tensiones para disminuir las pérdidas en su largo recorrido. [15]

Las cargas son centros de distribución concentrados, de los que se proporciona el suministro a los usuarios mediante redes eléctricas de bajo voltaje. Las dimensiones de los sistemas eléctricos son muy grandes ya que se conectan países enteros o varios países. Las simulaciones de estabilidad sirven para determinar la capacidad de estos enormes sistemas para soportar contingencias. [15]

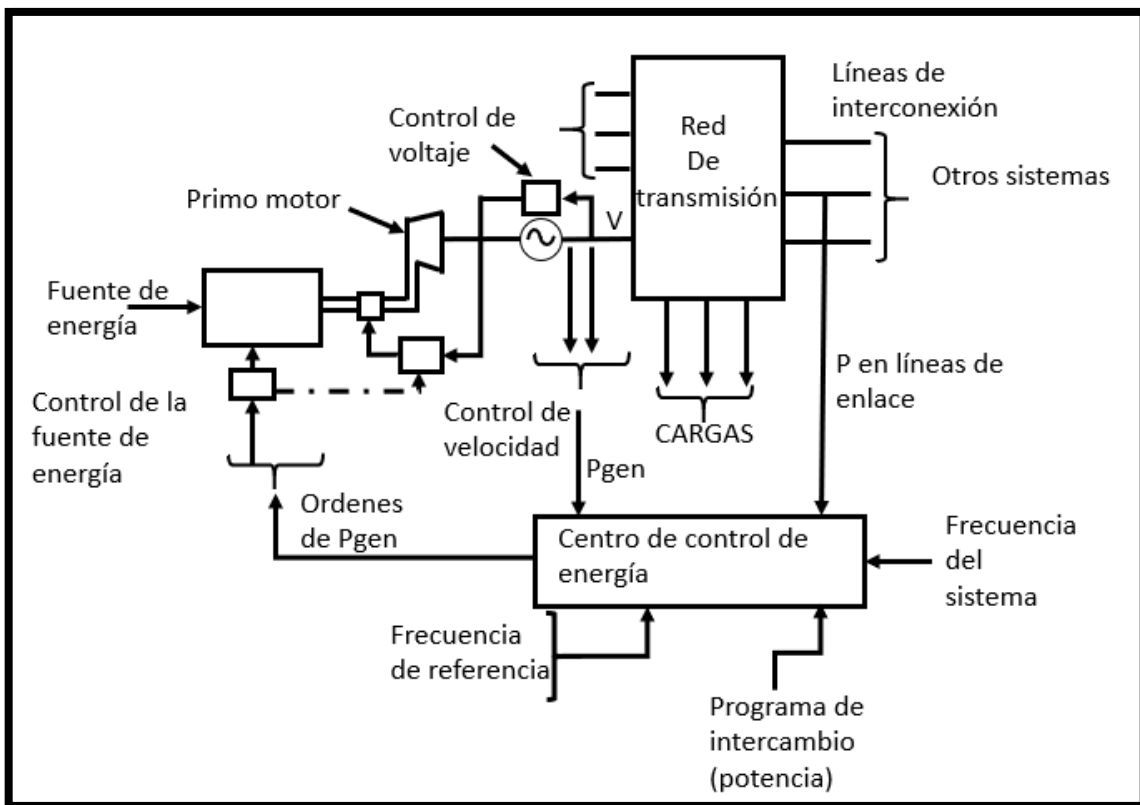


Figura 3.1 Modelo conceptual de un SEP. [15]

3.1.2 Descripción física del fenómeno

Para explicar este fenómeno se tomará como ejemplo un grupo turbogenerador integrado por una turbina y un generador unidos por una flecha.

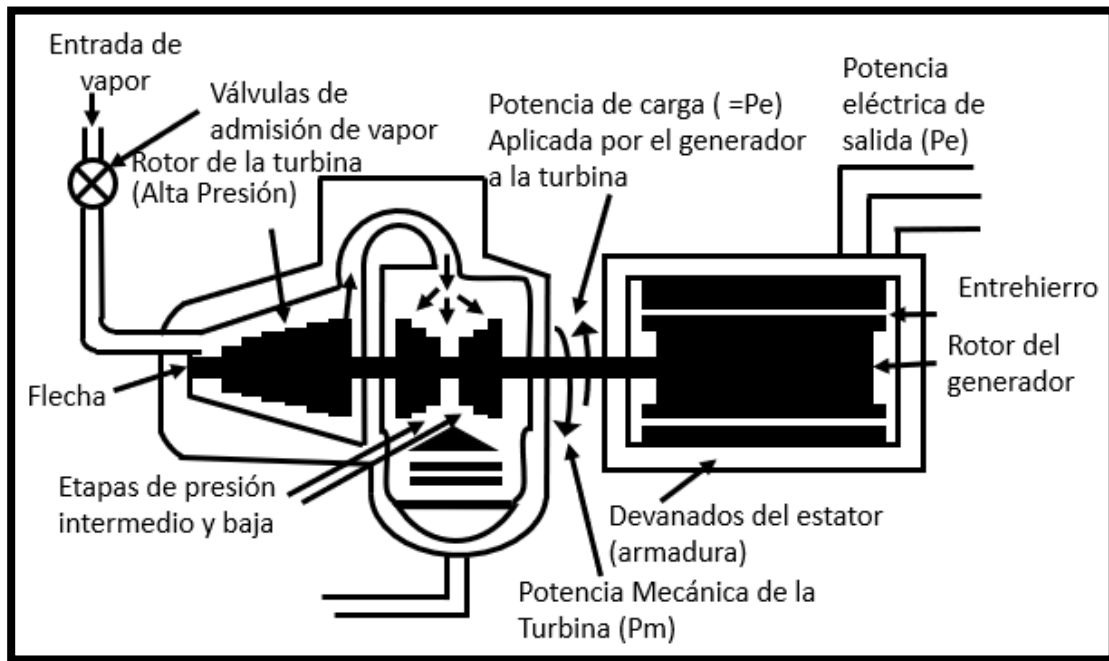


Figura 3.2 Descripción Física del Proceso de Conversión de Potencia del Vapor a Potencia Mecánica en la Turbina y a Potencia Eléctrica en el Generador. [15]

La potencia del vapor es empleada para impulsar la turbina, posteriormente la **potencia mecánica** (P_m) creada en la turbina es transmitida al generador eléctrico en donde se transforma la (P_m) en **potencia eléctrica** (P_e) que es inyectada al sistema eléctrico. [16]

El rotor de la turbina, el rotor del generador y la flecha conforman un ensamble único que puede contener otros elementos acoplados convirtiéndose en una masa girando a una **velocidad angular** (ω_m) expresada en (rad/seg). [16]

A las masas que están montadas en la flecha son representadas por un momento de inercia cuyas unidades son $\text{kg}\cdot\text{m}^2$.

Cuando la operación es constante, la entrada de vapor se regula por las válvulas de admisión con el propósito de que la potencia de la turbina sea igual a la carga que impone el generador. Bajo este régimen permanente de operación la velocidad angular del conjunto permanece constante, sin embargo, durante los periodos dinámicos estas cantidades no son iguales provocando que cambie la velocidad del rotor. [16]

La potencia mecánica se considera constante durante un segundo después de la perturbación por otro lado la potencia eléctrica puede cambiar de manera rápida por lo que se origina un cambio de la carga que el generador le impone a la turbina. La diferencia entre la potencia mecánica y la potencia eléctrica provoca un desbalance que se le conoce como Potencia acelerante. [16]

$$P_a = P_m - P_e \quad (3.1)$$

Cabe resaltar que el generador está conectado a un sistema eléctrico por lo que existe una interacción, si dicha interacción provoca una rápida recuperación del balance entre la P_m y la P_e se dice que el sistema es estable. [16]

El problema de la estabilidad consiste en estudiar el comportamiento de las máquinas durante y después una perturbación. Los disturbios en un SEP son ocasionados por:

- 1.- Fallas en el sistema de transmisión.
- 2.- Disparo de generación.
- 3.- Disparo de líneas.
- 4.- Pérdida de soporte de voltaje

En la figura 3.3 se observa en el efecto en el ángulo interno del generador ante diversos tipos de falla. [16]

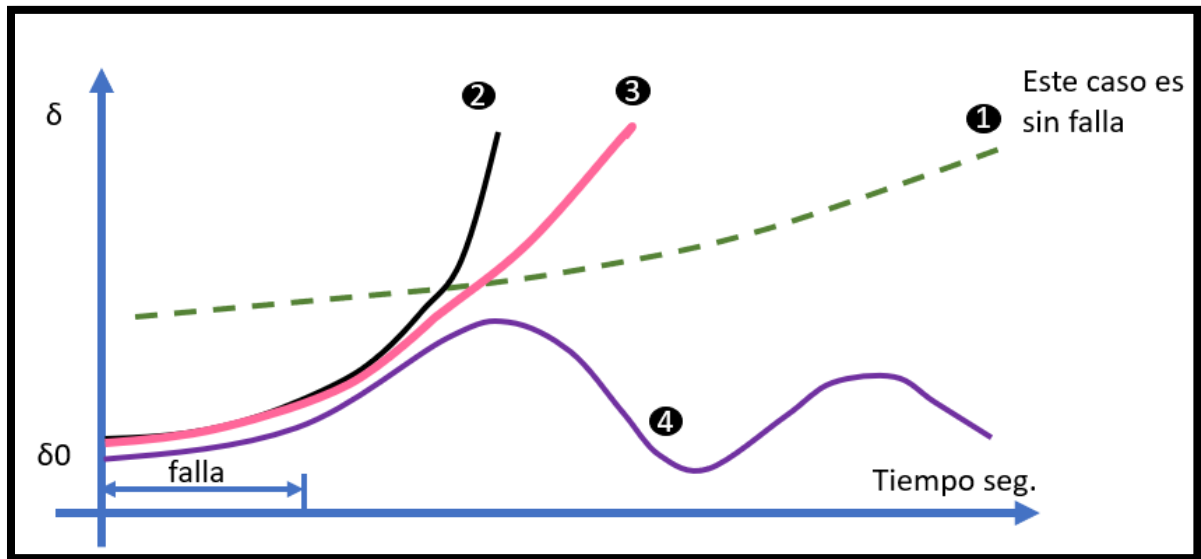


Figura 3.3 Ángulo interno del generador ante diversos tipos de fallas. [15]

Si el sistema es estable ante cierto disturbio, todas las máquinas permanecerán en sincronismo, es decir, seguirán operando en paralelo y a la misma velocidad. El periodo transitorio o dinámico siguiente al disturbio es oscilatorio. [16]

“Si la respuesta oscilatoria de un sistema de potencia, durante un periodo transitorio posterior a un cierto disturbio es amortiguada y el sistema alcanza un tiempo finito una nueva condición normal de operación, se dice que el sistema es estable” [16]

Por lo que se puede inferir que el ángulo en el caso 1 y 4 el ángulo interno del generador tiene un comportamiento estable ya que con el paso del tiempo regresa al valor inicial antes de la falla o se mantiene cerca de dicho valor.

Para los casos 2 y 3 el ángulo se comporta de una manera inestable ya que no trata de regresar a su estado anterior. [15]

3.2 Clasificación de los estudios de estabilidad

3.2.1 De acuerdo con el rango de tiempo

La estabilidad se puede dividir en tres estudios:

A) Estabilidad en estado transitorio, con una escala de tiempo de 0 a un segundo:

Los estudios de estabilidad transitoria tienen la finalidad de evaluar el sincronismo de los generadores en un sistema eléctrico de potencia. El criterio de estabilidad es analizar el desplazamiento angular relativo entre los rotores de las máquinas de manera que no crezca indefinidamente. Por la velocidad en que se desarrolla el fenómeno generalmente no se toma en cuenta los efectos de los controles de voltaje y velocidad en los generadores. [17]

B) Estabilidad dinámica de 1 a 300 segundos:

Los estudios de estabilidad dinámica tienen como objetivo analizar el comportamiento de las principales variables del sistema después de un disturbio sobre todo la frecuencia. El efecto del disturbio son oscilaciones con frecuencia típica de 2 a 4 Hz. En estos estudios se deben incluir las respuestas que se ejercen los controles de voltaje y velocidad de los generadores conectados en la red.

Si las acciones de los controles logran amortiguar las oscilaciones provocadas por el disturbio se dice que el sistema es dinámicamente estable.[17]

C) Estabilidad en estado permanente para más de 300 segundos.

El propósito de este tipo de estudios permite determinar la máxima transferencia de potencia que puede realizarse entre dos puntos del sistema. Las consideraciones que se toman en cuenta cuando se realizan este tipo de análisis, es que la respuesta de los controles ya tuvo lugar con el fin de no considerar el estado dinámico o transitorio entre las condiciones y el estado final. [17]

En la figura 3.4 se observan diferentes fenómenos electromagnéticos con su respectiva escala de tiempo, por lo que se debe elegir el tipo de estudio de estabilidad para determinar el impacto en el sistema de acuerdo con la duración de la perturbación.

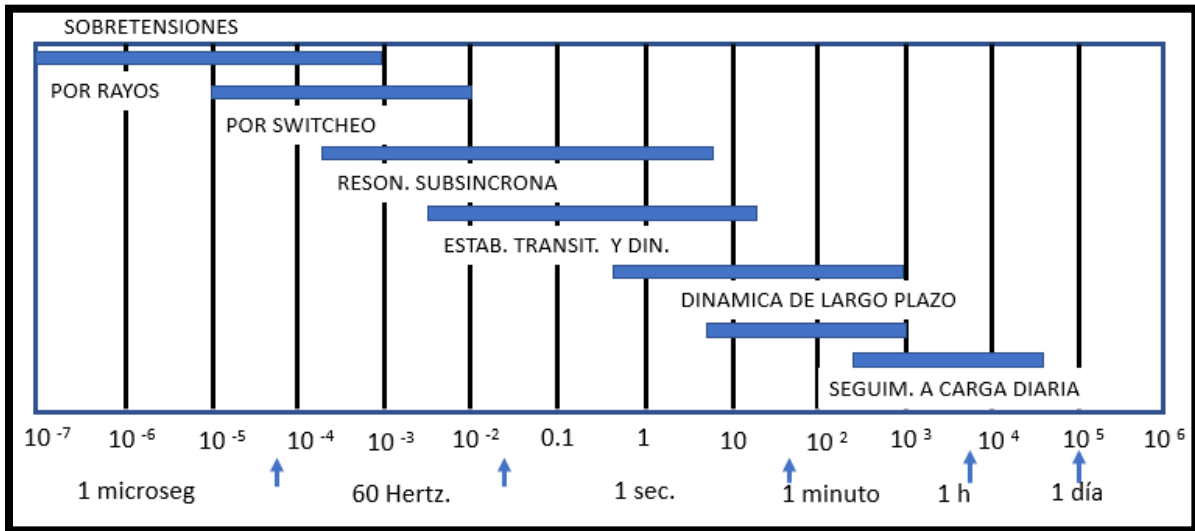


Figura 3.4 Rango de tiempo para los fenómenos dinámicos.[17]

3.2.2 De acuerdo con los tiempos de respuesta de los componentes del sistema

Los estudios de estabilidad, con base de los componentes del sistema, se pueden clasificar en las siguientes tres categorías:

- 1.- Dinámica del generador eléctrico y de los controles de excitación.
- 2.- Sistema de regulación de velocidad y Control Automático de Generación (CAG).
- 3.- Dinámica del sistema suministrador de energía (caldera) y sus controles.

Los efectos de cada categoría ocurren en rangos de tiempo con diferente duración como se muestra en la figura 3.5. [15]

	Dinámica del Generador eléctrico (Análisis de estabilidad transitoria)	Regulación primaria y CAG	Dinámica de la caldera y controles
Duración de efectos principales	Pocos segundos	✘	
	De varios segundos a pocos minutos		✘
	Varios minutos		✘

Figura 3.5 Clasificación de problemas dinámicos de acuerdo con la duración de los efectos principales. [15]

3.3 Respuesta de un sistema de potencia a un disturbio

Se presentan varios fenómenos cuando ocurre un disturbio, pero para el estudio de la estabilidad transitoria solo se consideran los siguientes:

Una redistribución de la carga eléctrica sobre cada uno de los generadores; esto se debe a que la red eléctrica equivalente, a que se conecta cada generador, cambia rápidamente y, por tanto, cambia la potencia eléctrica que suministra al sistema de cada unidad. [16]

La respuesta electromecánica esta próxima con una redistribución de la potencia de salida de las máquinas, de acuerdo con la energía cinética de las masas rotatorias. Si en el sistema existen motores grandes, sus inercias también se afectarán por esta redistribución de carga. [16]

La respuesta electromecánica resultará en una variación en la velocidad del rotor, cuyo giro dará un cambio en la carga eléctrica. [16]

3.4 Metodología general de los estudios de estabilidad

Desde la perspectiva de la simulación computacional del fenómeno, la estabilidad estática permite la linealización de las ecuaciones en torno a un punto de operación.[18]

Por otro lado, en el análisis de estabilidad transitoria es necesario tomar en cuenta que no se puede linealizar el problema. Cuando las oscilaciones producidas por una perturbación son de gran amplitud, es decir, que no se puede considerar el par sincronizante es directamente proporcional al desvío es una función no lineal de difícil solución.[18]

Las ecuaciones que representan el funcionamiento de los elementos que conforman el sistema que es objeto de estudio se resuelven por la técnica paso a paso, eligiendo pequeños intervalos de tiempo que van desde unos milisegundos a decenas de milisegundos. Cuando se lleva a cabo el uso de estos métodos es necesario recopilar los valores iniciales de todos los factores implicados por lo que se debe realizar un estudio de flujo de potencia. [18]

Las variables que cambian de una forma más lenta (par motor, velocidad relativa del rotor, control mecánico, etc.), se calculan cada intervalo resolviendo las ecuaciones diferenciales por los métodos de Euler, Runge Kuta o por la regla trapezoidal. [18]

A su vez, las variables que experimentan una variación rápida (intensidad, tensiones en bornes de las maquinas, intensidades y tensiones en las barras del sistema eléctrico, etc) se calculan de forma iterativa a partir de las ecuaciones algebraicas que las definen. [18]

Como ya se ha mencionado, el primer paso para la utilización del método paso a paso es la obtención del estado inicial del sistema a estudiar. Para lograr dicho objetivo se deben calcular las magnitudes de tensión e intensidad en cada una de las barras de la red, así como los ángulos de los mismos respecto a una referencia dada. [18]

Una vez obtenidos los valores antes mencionados se inicializan los modelos de los generadores, es decir, se hallan las condiciones iniciales para que cada maquina aporte a la red la intensidad determinada por los flujos de potencia de la barra que este conectada, con la tensión a la que está sometido dicho bus y el factor de potencia. Una vez inicializado el modelo, las variables de estado no cambian ya que se da por entendido que el flujo de cargas inicial corresponde a una forma de operación estable. [18]

En el sistema de estudio se pueden simular eventos en la red en donde se necesite evaluar sus impactos, tales como:

- Desconexiones de carga: Removiendo de la red de estudio el modelo de barras de carga.
- Perdidas de generación: Desconectando del sistema las barras de generación o pérdida de excitación en las maquinas síncronas.
- Cortocircuitos: Introduciendo ramas que conecten barras del sistema a tierra.

Una vez simulada la perturbación se obtiene un nuevo flujo de potencia para la situación dada, con este flujo de cargas y las variables de estado se hallan las expresiones de las derivadas de los estados. Estas variaciones se integran para obtener los nuevos valores de dichas variables, con los cuales, con los cuales se obtienen intensidades aportadas a la red. [18]

3.5 Modelos de los elementos para el cálculo de la estabilidad

3.5.1 Generador síncrono

Para realizar un análisis de carácter transitorio se necesita considerar un modelo de dos ejes en donde se transforman las variables de los devanados estáticos de las fases a, b, y c en cantidades denominadas de eje directo (d), de eje de cuadratura (q) y de secuencia cero (0), dicha transformación es llamada transformación de Park y la nueva representación esta ilustrada en la figura 3.6.[16]

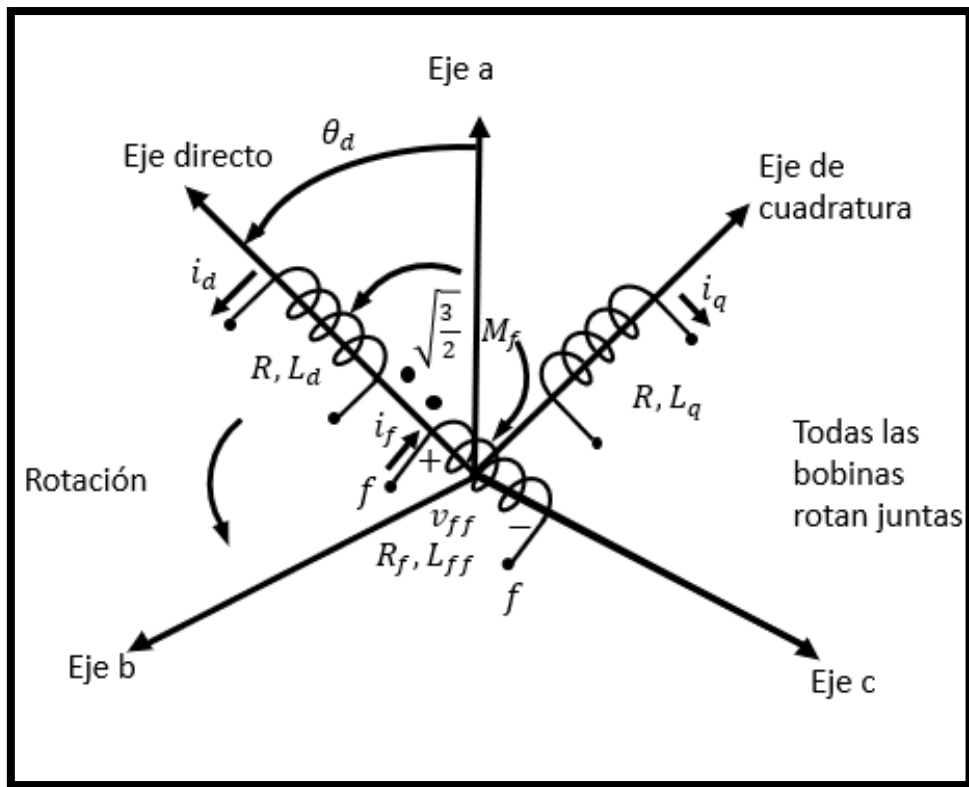


Figura 3.6 Representación de un generador síncrono de polos salientes mediante las bobinas de ejes directo y de cuadratura del equivalente de la armadura, rotando en sincronismo con el devanado de campo en el rotor.[16]

Los nuevos voltajes se expresan mediante el siguiente conjunto de ecuaciones.

$$e_d = \frac{d\Phi_d}{dt} - \Phi_q \frac{d\theta}{dt} - r i_d \quad (3.2)$$

$$e_q = \frac{d\Phi_q}{dt} - \Phi_d \frac{d\theta}{dt} - ri_q \quad (3.3)$$

$$e_0 = \frac{d\Phi_0}{dt} - ri_0 \quad (3.4)$$

En donde:

e_d : Voltaje en el eje directo.

e_q : Voltaje en el eje de cuadratura.

e_0 : Voltaje de secuencia cero.

Φ_d : Flujo magnético en el eje directo.

Φ_q : Flujo magnético en el eje de cuadratura.

Φ_0 : Flujo magnético de secuencia cero.

θ : Posición angular en grados del eje.

r : Resistencia eléctrica.

i_d : Corriente de eje directo.

i_q : Corriente de eje de cuadratura.

i_0 : Corriente de secuencia cero.

Las ecuaciones 3.2, 3.3 y 3.4 son parecidas a la representación de un voltaje de una bobina estática, solo que se agregan los términos diferenciales multiplicados con la variación del ángulo de posición del rotor. [18]

Los flujos que recorren los ejes d y q son constantes en funcionamiento estable y equilibrado de los generadores, pero varían en estado transitorio, dichos cambios tienen un valor considerable los cuales no se deben despreciar. [18]

La potencia eléctrica que el generador entrega en sus terminales es representada por la expresión 3.5.

$$P = \frac{3}{2} [e_d i_d + e_q i_q + e_0 i_0] \quad (3.5)$$

Cuando el generador está en estado estable la potencia está reflejada por la ecuación 3.6 ya que la corriente y el voltaje homopolar tienen valores nulos.

$$P = \frac{3}{2} [e_d i_d + e_q i_q] \quad (3.6)$$

Para obtener una expresión más completa de la potencia se puede sustituir en la ecuación 3.5 las tensiones que están en función del flujo magnético, de la posición angular del rotor y las corrientes en sus componentes d y q dando como resultado la ecuación 3.7. [18]

$$P = \frac{3}{2} \left[i_d \left(\frac{d\Phi_d}{dt} - \Phi_q \frac{d\theta}{dt} - r i_d \right) + i_q \left(\frac{d\Phi_q}{dt} - \Phi_d \frac{d\theta}{dt} - r i_q \right) + 2i_0 \left(\frac{d\Phi_0}{dt} - r i_0 \right) \right] \quad (3.7)$$

Aplicando la agrupación de términos en 3.7 se obtiene la ecuación 3.8.

$$P = \frac{3}{2} \left(i_d \frac{d\Phi_d}{dt} + i_q \frac{d\Phi_q}{dt} + 2i_0 \frac{d\Phi_0}{dt} \right) + \frac{3}{2} \frac{d\theta}{dt} (i_q \Phi_q - i_d \Phi_d) - \frac{3}{2} r (i_d^2 + i_q^2 + 2i_0^2) \quad (3.8)$$

La ecuación 3.8 se puede interpretar de la siguiente manera:

Potencia de salida= (grado de decrecimiento de la energía magnética del estator) + (potencia transmitida a través del entrehierro) - (pérdidas por las resistencias de los bobinados del estator) [18]

3.5.2 Regulador de tensión y sistema de excitación

El sistema de excitación se define como un conjunto de elementos diseñados para controlar y suministrar la corriente de campo del generador por medio de reguladores automáticos.[15]

El sistema de excitación comprende los siguientes equipos:

1) El devanado de campo: se encuentra en las ranuras del rotor encima de los polos en forma de bobinas, sus conexiones pasan por toda la flecha y finalmente llegan a los anillos deslizantes. Estos anillos deslizantes son energizados mediante

corriente directa a través de escobillas o un rectificador montado sobre la flecha del generador. [15]

2) El excitador: este elemento cumple con la función de alimentar de corriente directa al devanado de campo. Puede ser un rectificador estático, un generador de corriente directa o un alternador con rectificación. Existen dos tipos de clasificación el electrónico o electromecánico. [15]

3) El regulador automático de voltaje: su objetivo es mantener la corriente de campo de la maquina síncrona para que cumpla ciertos parámetros específicos. [15]

4) Circuitos y sistemas auxiliares para estabilización interna: entre ellos se pueden mencionar el cambio a operación manual y limitadores de corriente máxima y mínima. [15]

La función del sistema de excitación en estado estable es controlar la magnitud del voltaje que entrega el generador al sistema, dicha magnitud debe de variar muy poco para los diferentes escenarios de operación. [15]

El principio de operación básico de control de voltaje puede ser explicado con la ayuda de la figura 3.7 en donde se muestra un operador que realiza las tareas de control apoyándose de las lecturas de un voltímetro V_i . Las actividades de control consisten en controlar manualmente el reóstato R con el objetivo de mantener una tensión V_0 . El valor ΔV puede ser leído de dos formas continuamente (proporcionalmente) o discontinuamente (con zonas muertas). [15]

El operador tiene que vencer la resistencia mecánica del resorte (K) aplicando una fuerza proporcional al error ($F= K\Delta V$), si al operador se le sustituye con un elemento de control automático que debe ir acompañado por un instrumento de medición para dimensionar el error ΔV , y un regulador para ejercer la fuerza proporcional. El factor K se le llama ganancia, mientras el proceso de medición y la alimentación de la señal de entrada se le llama retroalimentación. El factor K_f se denomina ganancia de retroalimentación. [15]

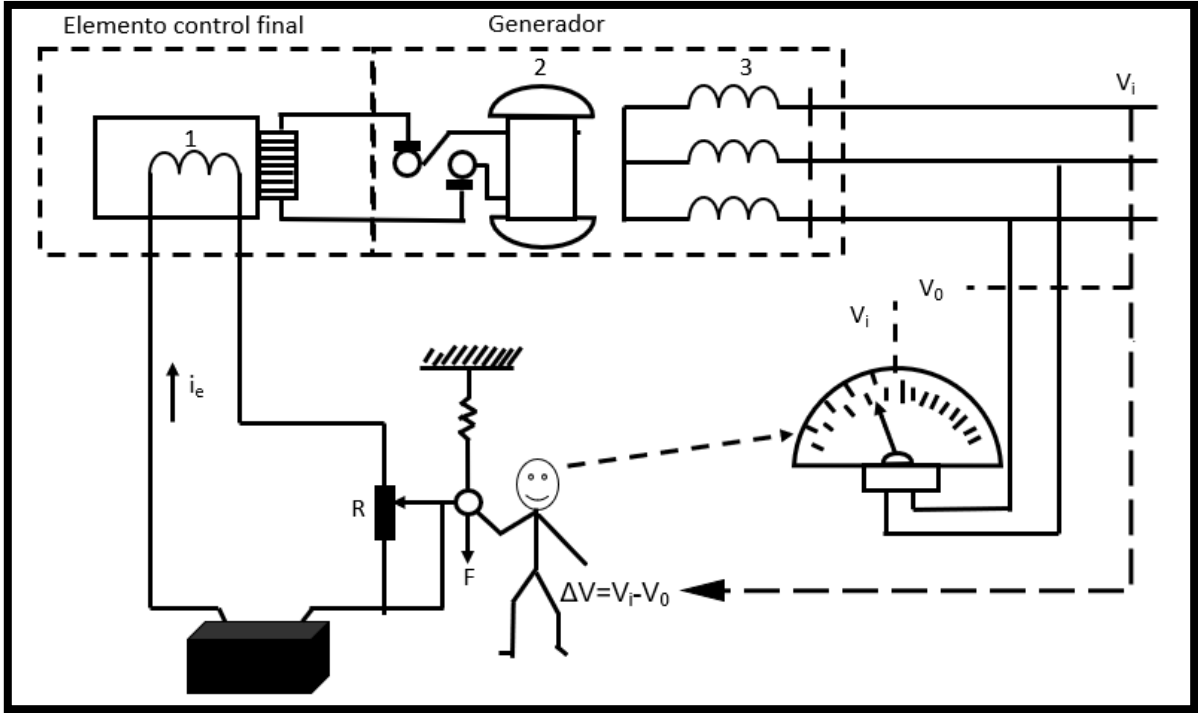


Figura 3.7 Control Manual de voltaje.[15]

Para realizar estudios de estabilidad y evaluar la respuesta de dicho sistema ante una perturbación la IEEE ha propuesto diversos modelos que a continuación se mostraran en las figuras 3.8,3.9 y 3.10.

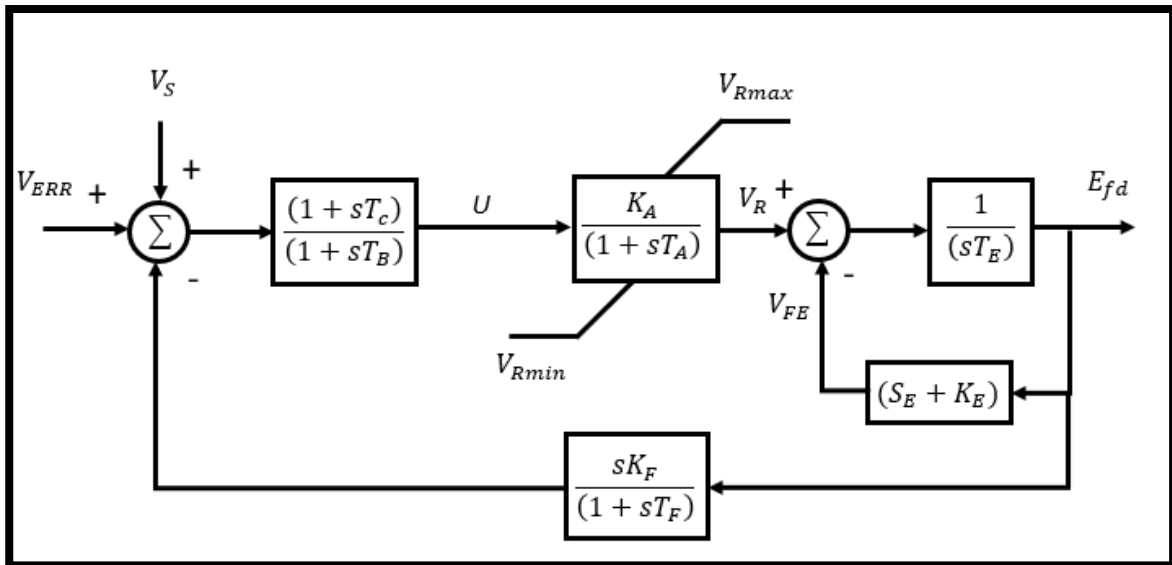


Figura 3.8 Sistema de excitación de corriente directa.[18]

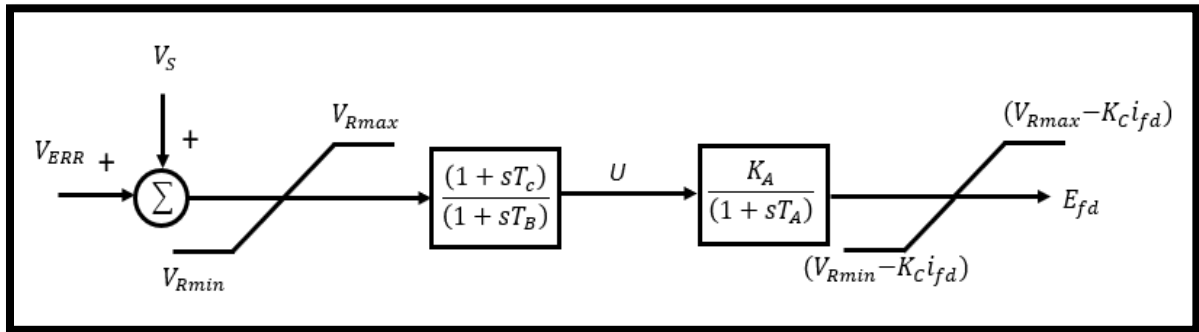


Figura 3.9 Sistema de excitación de corriente alterna.[18]

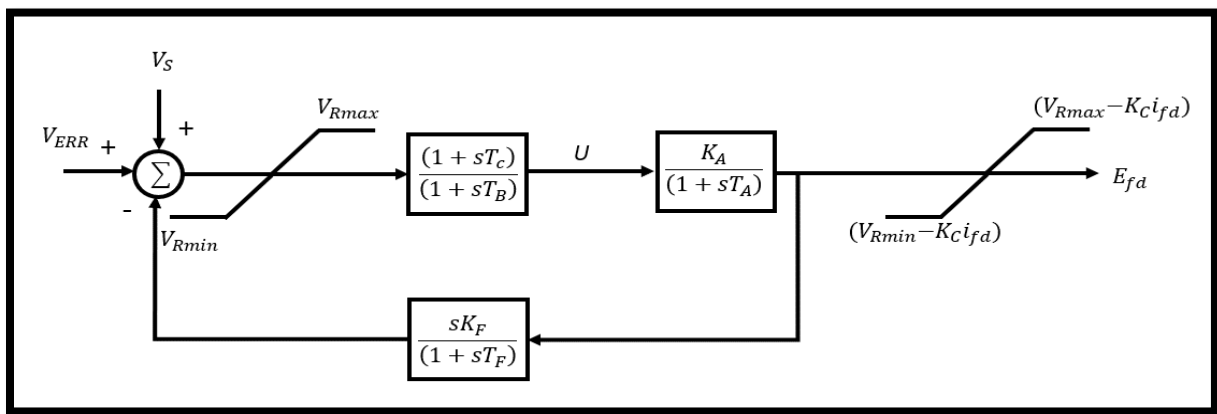


Figura 3.10 Sistema de excitación auto excitada.[18]

Donde:

V_{ERR} : Es la diferencia entre una tensión de referencia y la tensión medida entre los bornes.

V_S : Es la salida del bloque PSS (Power System Stabilizer).

T_c, T_B : Son las constantes de tiempo del compensador de adelanto - retraso.

K_A, T_A : Son la constante de tiempo y ganancia del regulador de tensión.

K_E, T_E : Son la constante de tiempo y ganancia de la excitatriz.

S_E : Es la función de saturación de la excitatriz.

K_F, T_F : Son la constante de tiempo y ganancia de la retroalimentación derivativa.

E_{fd} : Es la salida del sistema de excitación, que es proporcional a la tensión de campo del generador.

3.5.3 Regulador de velocidad y primo motor

La IEEE también ha propuesto diferentes modelos para diferentes tipos de primo-motor ya sea para turbinas hidráulicas, turbinas de vapor y motores de combustión interna. Dichos modelos sirven para representar la interacción de estos elementos y sus controles con la red en simulaciones de estudio de estabilidad dinámica. En la figura 3.11 se muestra como ejemplo el diagrama de bloques del control de un motor de combustión interna.[18]

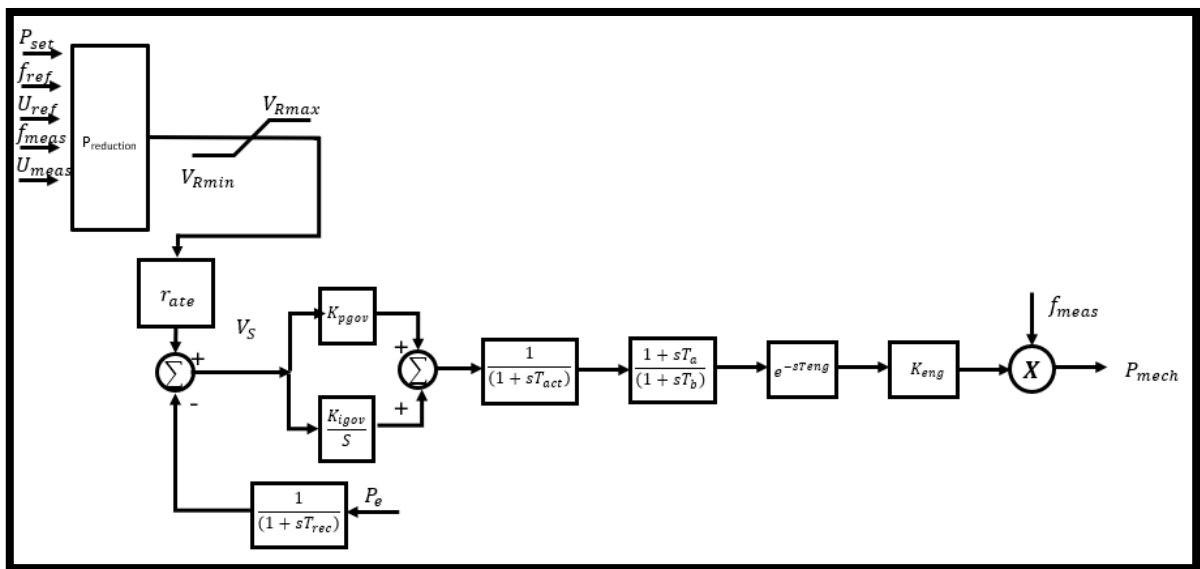


Figura 3.11 Diagrama de bloques de un motor de combustión interna y sus controles.[19]

Donde:

P_{set} : Set-point de Potencia.

P_e : Señal de entrada de potencia eléctrica.

P_{mech} : Señal de salida de potencia mecánica.

P_{min} : Punto de potencia mínima.

P_{max} : Punto de potencia máxima.

f_{ref} : Frecuencia de referencia.

f_{meas} : Frecuencia medida.

U_{ref} : Voltaje nominal.

U_{meas} : Voltaje medido.

K_{pgov} : Ganancia proporcional del gobernador.

K_{igov} : Ganancia integral del gobernador.

T_{act} : Constante de tiempo del actuador del motor.

T_b : Constante de tiempo del retraso del motor.

T_a : Constante de tiempo de entrega del motor.

T_{eng} : Constante de tiempo del retraso del motor.

K_{eng} : Ganancia del motor.

T_{rec} : Constante de tiempo del transductor de potencia eléctrica.

r_{rate} : Función escalón.

También se debe de incluir el modelo del regulador de velocidad ya que es el encargado de determinar el grado de apertura de los distribuidores o válvulas para así mantener la velocidad del giro del generador controlada a través de la potencia mecánica generada. Como ejemplo se muestra en la figura 3.12 el diagrama de bloques de un gobernador de una maquina síncrona acoplada a un motor de combustión interna.[18]

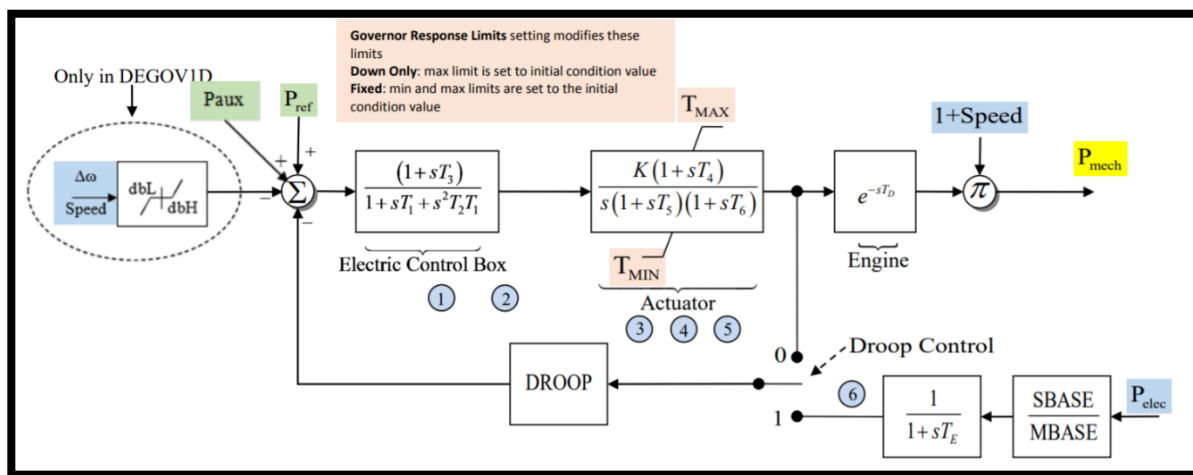


Figura 3.12 Diagrama de bloques de un regulador de velocidad y sus controles.[20]

3.5.4 Cargas

Hay ocasiones en donde no se tiene disponible información exacta de las cargas por lo que se realiza una primera estimación en donde se considera la carga como impedancias constantes conectada entre la barra del consumidor y tierra, representadas por la ecuación 3.12. [18]

$$Z = \frac{V^2}{P - jQ} \quad (3.12)$$

La expresión 3.12 resulta aún muy conservadora por lo que se sugiere usar una representación de la impedancia en función de la tensión y frecuencia tal como se indica en 3.13. [18]

$$\begin{aligned} P &= K_p V^{\alpha_p} f^{\beta_p} \\ Q &= K_q V^{\alpha_q} f^{\beta_q} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Donde:

K_p, K_q : son constantes

$\alpha_p, \alpha_q, \beta_p, \beta_q$: Coeficientes de sensibilidad de a la tensión y la frecuencia.

Para cargas estáticas los valores son $\alpha_p = \alpha_q = 2$ y $\beta_p = \beta_q = 0$ [18]

3.5.5 Líneas de transmisión y transformadores

Cuando se realiza un estudio de estabilidad las líneas de transmisión pueden ser representadas por su circuito equivalente π constituido por una impedancia serie y una admitancia Shunt como si estuvieran en régimen permanente.

Estos parámetros están distribuidos en toda la línea, pero se representan de forma concentrada en el modelo π mostrado en la figura 3.13. [18]

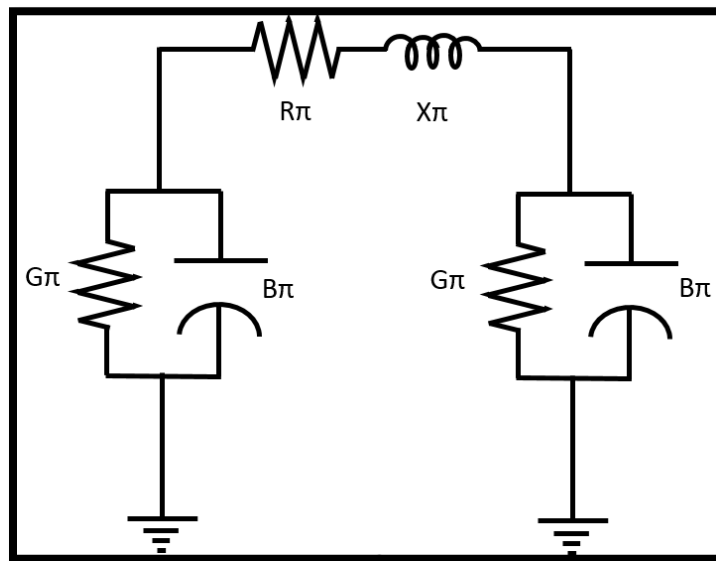


Figura 3.13 Circuito π de una línea de transmisión. [18]

Por otro los transformadores son representados con su resistencia y reactancia de dispersión ($R+jX$). Para equipos ya instalados se debe consultar la placa de datos para encontrar su impedancia ($Z\%$). Se realiza la aproximación que $X_T \approx Z_T$, ya que la resistencia es muy pequeña. [18]

Si se necesita modelar al transformador en su forma compleja se puede utilizar un valor estimado de R tomado de una lista de valores típicos de la IEEE. Una vez obtenido el valor se procede a sustituirlo en la ecuación 3.14 para encontrar la reactancia. Una vez obtenidos los valores correspondientes se deben representar en p.u. [18]

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (3.14)$$

3.6 Ecuación potencia – ángulo

Para introducción a los estudios de estabilidad considere el Sistema eléctrico de Potencia (SEP) elemental mostrado en la figura 3.14.

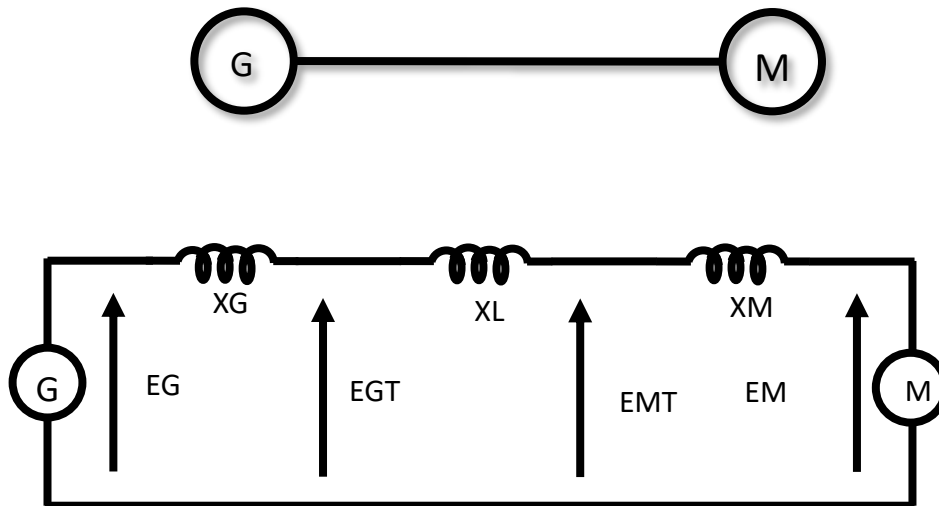


Figura 3.14 SEP elemental integrado por un generador, una línea y una carga (motor). [16]

La reactancia equivalente del circuito está dada por la ecuación 3.15

$$X = X_G + X_L + X_M \quad (3.15)$$

Donde:

X_G =Reactancia del generador

X_M =Reactancia del motor

X_L =Reactancia de la línea

Los voltajes E_G y E_M se generan por el flujo que producen los devanados de campo de las máquinas; su desfaseamiento es el mismo que el ángulo eléctrico entre los rotores de la máquina. El diagrama vectorial de voltajes se muestra en la figura 3.15. [16]

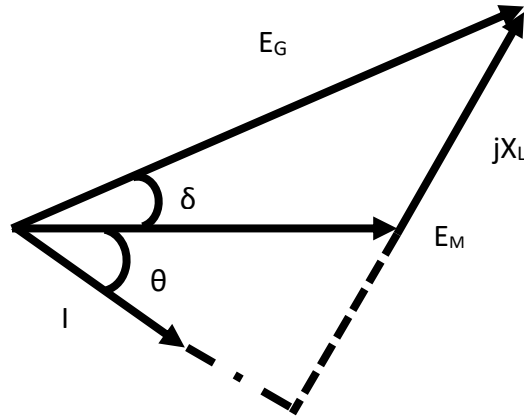


Figura 3.15 Suma Vectorial de los voltajes que se producen en el generador y motor. [16]

$$E_G = E_M + jX_L \quad (3.16)$$

$$E_M = E_M \angle 0^\circ \quad (3.17)$$

$$E_G = E_G \angle \delta \quad (3.18)$$

$$E_G^* = E_G \angle -\delta \quad (3.19)$$

E_G^* es el conjugado de E_G

La potencia de salida del generador se da por la ecuación 3.8

$$P = \text{Re}(E_G^* I) \quad (3.20)$$

Re: Representa la parte real

$$P = \text{Re}\left(E_G^* \frac{E_G - E_M}{jX}\right) \quad (3.21)$$

$$P = \text{Re}\left(E_G \frac{E_G \angle \delta - E_M \angle 0^\circ}{X \angle 90^\circ}\right) \quad (3.22)$$

Desarrollando y simplificando la ecuación (3.22) se obtiene la ecuación potencia – ángulo (3.23).

$$P = \frac{E_G E_M}{X} * \text{Sen} \delta \quad (3.23)$$

Se puede observar que la potencia transmitida del generador al motor depende del desfaseamiento Entre E_G y E_M , cuando dicho desfaseamiento alcanza un ángulo de 90° obtenemos la máxima potencia de transferencia durante una perturbación y se refleja en la expresión (3.24) y se ilustra en la figura 3.16. [16]

$$P_{\text{m}á\text{x}} = \frac{E_G E_M}{X} \quad (3.24)$$

Se dice que $P_{\text{m}á\text{x}}$ es el límite de la estabilidad en estado permanente, y representa la máxima potencia que puede transmitir sin perder el sincronismo. [16]

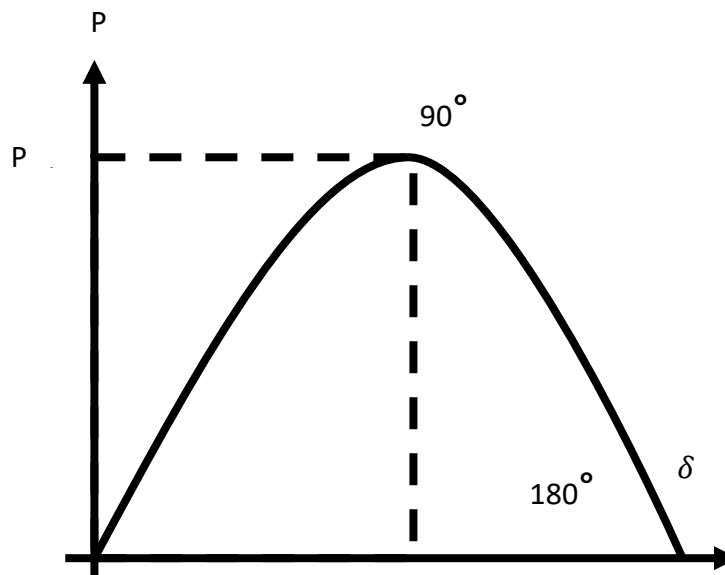


Figura 3.16 Representación gráfica de la ecuación potencia – ángulo.[16]

3.7 Constante de inercia H

El momento de inercia, de un cuerpo rígido de masa m , con respecto a un eje está representado por la expresión 3.25.[16]

$$I = \int r^2 dm \text{ (kg} - \text{m)} \quad (3.24)$$

Donde:

dm : es un elemento de masa del cuerpo.

r : es la distancia del eje a dm .

La interpretación física del momento de inercia I de un cuerpo es una representación de la resistencia a la aceleración angular. Un cilindro sólido uniforme como el de la figura 3.17 está dado por la ecuación 3.25.[16]

$$I = \frac{1}{2} mR^2 \text{ (kg} - \text{m}^2) \quad (3.25)$$

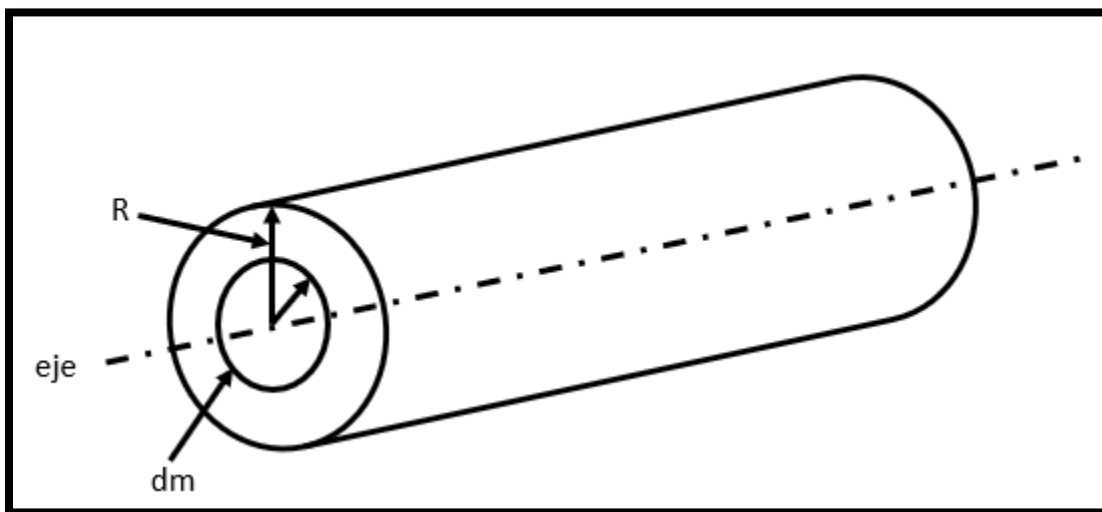


Figura 3.17 Cilindro sólido con radio de giro R . [16]

La energía cinética (E_c) de un cuerpo en rotación está dada por la ecuación 3.26.

$$E_c = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad \frac{J - \text{seg}^2}{\text{rad}^2} \quad (3.26)$$

Por lo que la constante de inercia H para un generador está definida en la ecuación 3.27.

$$H = \frac{\text{Energia cinetica a velocidad } \omega_n}{\text{MVA nominales}} = \frac{\frac{1}{2} I \omega_n^2}{S_n} \quad (3.27)$$

Cuando el fabricante no proporciona directamente el valor de H podemos usar la expresión 3.28 es cuando el peso de la unidad se expresa en libras y el radio de giro se expresa en pies.

$$H = \frac{2.31 \times 10^{-10} W R^2 (\text{rpm})^2}{S_n (\text{MVA})} \quad (3.28)$$

Donde:

W: peso expresado en libras. (lb)

R: radio de giro expresado en pies. (ft)

rpm: velocidad angular en revoluciones por minuto.

S_n : Potencia nominal aparente expresada en MVA.

Cuando los datos de la maquina son proporcionados en el sistema de medidas [m k s] la ecuación que se usa es la 3.29.

$$H = \frac{5.48 \times 10^{-9} J (\text{rpm})^2}{S_n (\text{MVA})} \quad (3.29)$$

Donde:

J: Momento de inercia ($kg - m^2$)

rpm: velocidad angular en revoluciones por minuto.

S_n : Potencia nominal aparente expresada en MVA.

La constante de inercia H es un parámetro de diseño que es determinante en la estabilidad. El valor de H esta referido a la capacidad nominal de la propia maquina por lo que cae en un rango pequeño de valores, esto independientemente del tamaño de la unidad. Desafortunadamente la tendencia en los diseños recientes es una disminución del valor de H por lo que todo el terreno ganado en la mejora de la estabilidad por la operación de esquemas de protección más rápidos se ha perdido por las H más pequeñas de las nuevas unidades. [17]

3.8 Ecuación de oscilación

Las leyes de la rotación son aplicables al movimiento de las máquinas síncronas; por ello el par de inercia es igual al producto de la aceleración angular por el momento de inercia. Para el sistema internacional de medidas la ecuación para el generador queda establecida en la expresión 3.30. [16]

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (N - m) \quad (3.30)$$

En donde:

J: Momento total de inercia de la masa del rotor en kgs-m²

θ_m : Desplazamiento angular del rotor con respecto al eje estacionario, en radianes mecánicos (rad)

t: Tiempo, en segundos

T_m : Par de la flecha o mecánico suministrado por la fuente de energía mecánica menos el par de retardo debido a las perdidas rotacionales, N-m

T_e : Par electromagnético o eléctrico total en N-m

T_a : Par de aceleración total, en N-m

En el estado permanente T_m y T_e son iguales por lo tanto T_a es igual a cero y no hay aceleración. Durante los disturbios considerados en el estudio de estabilidad transitoria esta diferencia existe y es de aceleración o retardación dependiendo si la diferencia es positiva o negativa. [16]

$$T_a = T_m - T_e \quad (3.31)$$

El siguiente paso es determinar la posición angular θ del rotor de la maquina como función del tiempo; para simplificar es conveniente medir la posición y la velocidad angulares con respecto a un eje de referencia que gira a la velocidad de sincronismo que medirla con un eje estacionario esto se muestra en la figura 3.18 y se establece en la ecuación 3.32. [16]

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (3.32)$$

Donde:

ω_{sm} : velocidad síncrona en radianes mecánicos.

δ_m : desplazamiento angular del rotor.

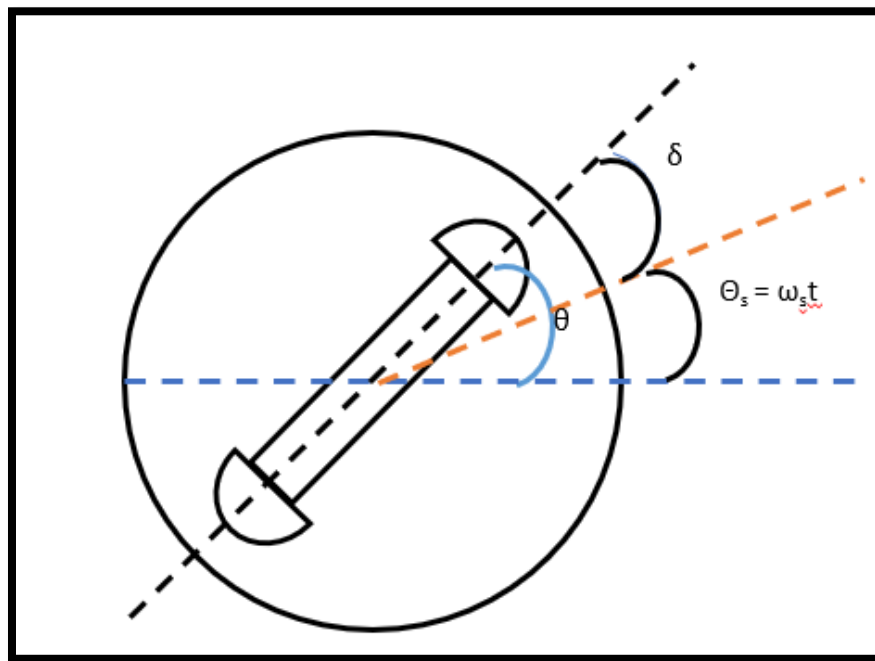


Figura 3.18 Simplificación con el eje de referencia móvil girando a la velocidad de sincronismo. [16]

Derivando con respecto al tiempo se obtiene la ecuación 3.33 que representa la velocidad angular del rotor y la ecuación 3.34 refleja la aceleración de este.

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (3.33)$$

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (3.34)$$

Al sustituir la ecuación 3.34 en la ecuación 3.30, se obtiene

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (N - m) \quad (3.35)$$

Multiplicando por ω_{sm} resulta:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = Pa = P_m - P_e \quad (3.36)$$

Donde:

$M=J\omega$ es el momento angular en Joule-seg/rad. (constante de inercia de la máquina)

$P_m = T_m\omega$ es la potencia de entrada en watts corregida por pérdidas rotacionales.

$P_e = T_e\omega$ es la potencia eléctrica de salida en watts corregida por pérdidas eléctricas.

$Pa = P_m - P_e$ es la potencia de aceleración en watts

3.9 Efectos de la inestabilidad

Cuando una maquina sale de sincronismo o de paso con respecto a otras del sistema, se presentan fenómenos desagradables; por ejemplo, un generador no constituye realmente una fuente de potencia eléctrica, un motor no entrega potencia mecánica a la velocidad adecuada, un condensador síncrono no mantiene su voltaje propio en las terminales. [17]

Produce fenómenos indeseables que se pueden resumir como sigue:

- a) Si la inestabilidad se presenta como consecuencia de una falla, la liberación de la falla puede no restaurar la estabilidad.
- b) Se producen fluctuaciones de voltaje que continúan después que se libere la falla.
- c) La máquina o grupo de máquinas que quedan fuera de paso con respecto a otras máquinas del sistema, pueden volver a estar en paso, o bien quedar desconectadas del resto del sistema.
- d) Se tiene una operación incorrecta de los relevadores, es decir que los relevadores pueden operar en falso, de tal forma que los interruptores pueden interrumpir circuitos que no es necesario interrumpir. [17]

Una gota de tinta puede hacer pensar a millones.

Lord Byron

Elaboración de simulación de estabilidad dinámica

4.1 Sistema de estudio

El sistema de estudio está constituido por un punto de interconexión a la red general de distribución propuesta en la subestación de la CFE más cercana a la localización de la central eléctrica.

La tensión de operación es de 23 kV y la impedancia de Thévenin del punto es:

$$Z_{TH (+)} = 0.018150 + j0.332868 \text{ PU}$$

$$Z_{TH (-)} = 0.018150 + j0.332868 \text{ PU}$$

$$Z_{TH (0)} = 0.016014 + j0.319857 \text{ PU.}$$

Otro elemento que considerar es una línea de distribución con longitud de 2.1 km que va desde el punto de interconexión hasta la central eléctrica, en los extremos cuenta con restauradores y sus parámetros eléctricos de dicha línea son:

Calibre: 1/0 AWG, longitud 2.1(km)

$$R (+) = 1.3852 \Omega, X (+) = 1.11813 \Omega, B (+) = 0.222S$$

$$R (-) = 1.3852 \Omega, X (-) = 1.11813 \Omega, B (-) = 0.222S$$

$$R (0) = 1.52646 \Omega, X (0) = 4.0795 \Omega, B (0) = 0.551S$$

También se cuenta con dos transformadores de 2000 kVA de potencia nominal, conexión: Δ -Y aterrizada con una $\%Z=5.66$ con voltajes de 23 kV en el

primario y 480 V en el secundario estos cumplen la función de elevar la tensión de la potencia generada en la maquina síncrona y poderla enviar a la línea de distribución.

La central cuenta con otro transformador de 300 kVA de potencia nominal, conexión: Δ -Y aterrizada con una $\%Z=4.96$ con voltajes de 23 kV en el primario y 220/127 V en el secundario para alimentar los servicios propios de la central tales como los equipos extractores de biogás, la unidad acondicionadora de gas, circuitos de control y protección y por último la iluminación y contactos.

Por ultimo los dos generadores que comparten los siguientes parámetros eléctricos:

MW:1.416 MVAR:1.0617 MVA:1.77, Tensión en los bornes:480 V

Todos estos equipos están ilustrados en la figura 4.1 en donde se muestra un diagrama unifilar

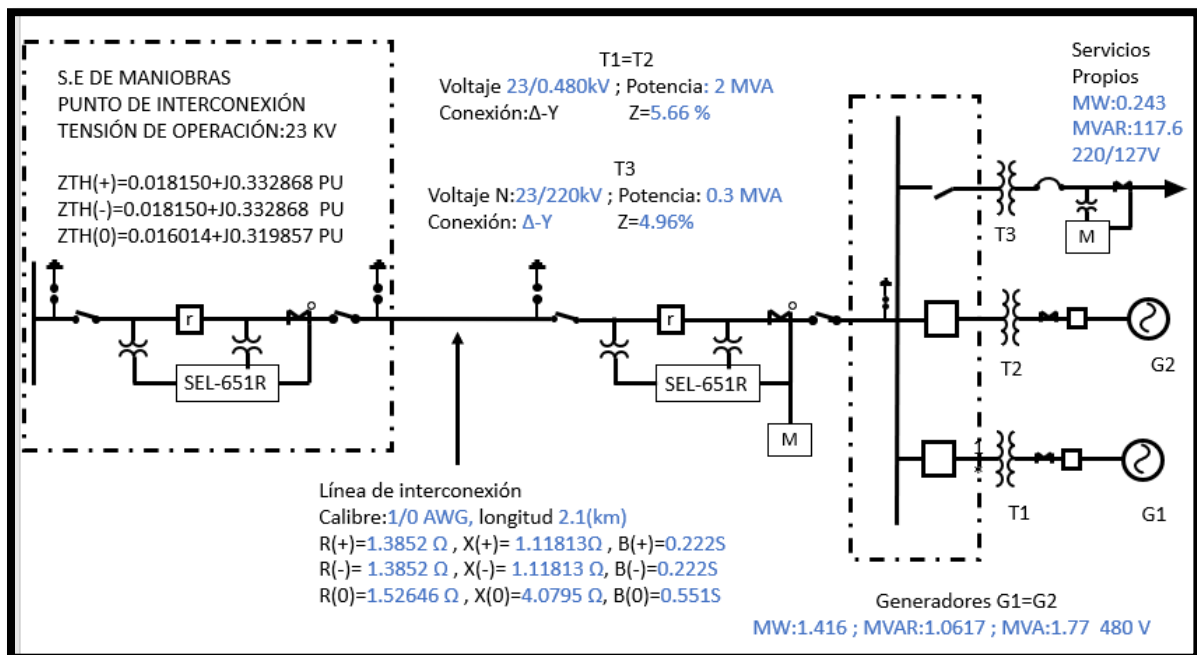


Figura 4.1 Diagrama unifilar simplificado de la central eléctrica.

4.2 Ejecución de flujos de potencia

La primera etapa de una simulación de estabilidad es un estudio de flujos de carga ya que con este análisis se obtiene el estado inicial de la red, para realizar dicha simulación se eligió el programa PSSE versión 32 con lo cual nuestro sistema de análisis queda modelado como se muestra en figura 4.2.

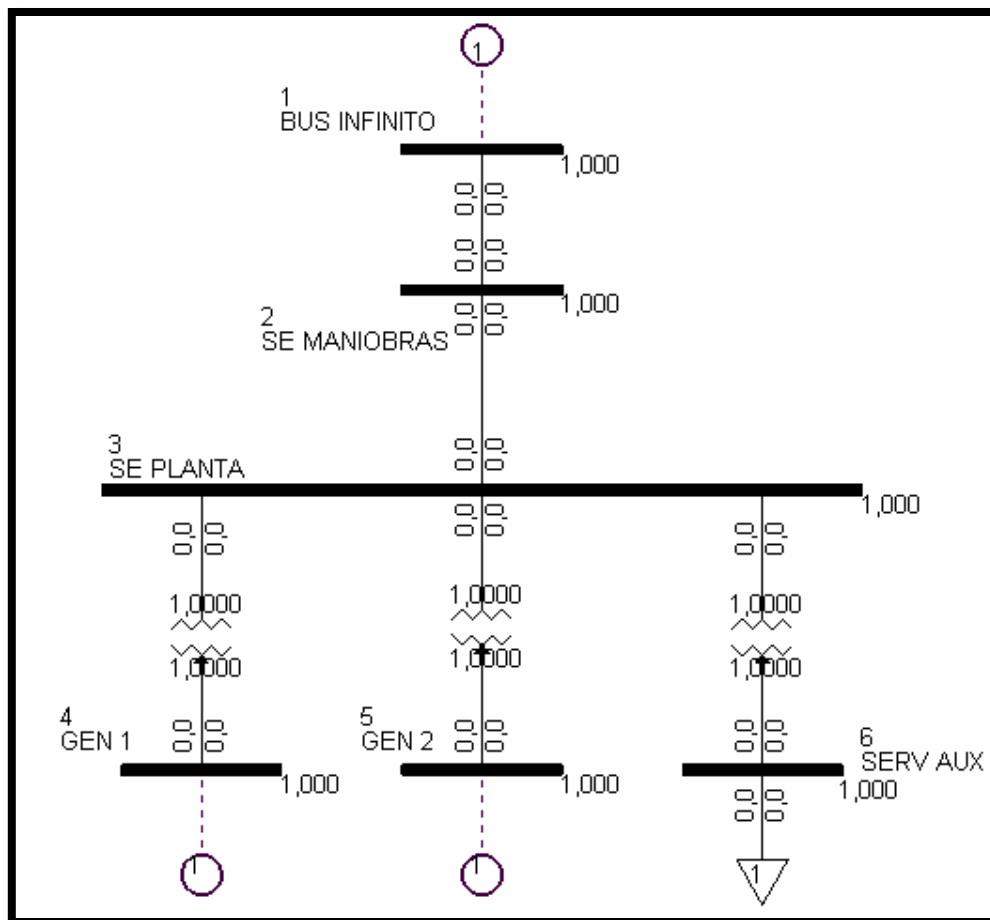


Figura 4.2 Sistema de estudio representado en PSSE.

Una vez realizada la topología propuesta y se asignaron nombres y números a los buses para una mejor organización de los datos de entrada se procede a reunir la información requerida en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 para iniciar nuestro estudio de flujos de potencia.

Tabla 4.1 Datos de entrada de las barras.

Barra	Tipo	Tensión (kV)	V (p.u.)	δ grados	P_G (MW)	Q_G (MVAR)	P_L (MW)	Q_L (MVAR)
1	Compensación	23	1.0	0	-	-	0	0
2	Carga	23	-	-	-	-	0	0
3	Carga	23	-	-	-	-	0	0
4	Voltaje controlado	0.480	1.0	-	1.416	-	0	0
5	Voltaje controlado	0.480	1.0	-	1.416	-	0	0
6	De carga	0.220	1.0	-	0	0	0.243	0.118

Tensión base de 23 kV, potencia base de 100 MVA

Tabla 4.2 Datos de entrada de líneas en P.U.

Barra a barra	Secuencia	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)
1-2	(+)	0.018150	0.332868	0
	(-)	0.018150	0.332868	0
	(0)	0.016014	0.319857	0
2-3	(+)	0.26185	0.211366	0.04196
	(-)	0.26185	0.211366	0.04196
	(0)	0.2885	0.7711	0.1041

Todas las impedancias están dadas en p.u. En la potencia base de 100MVA.

Tabla 4.3 Datos de entrada de los transformadores.

Bus a bus	X(p.u.)
3-4	2.83
3-5	2.83
3-6	16.53

Todas las impedancias están dadas en p.u. En la potencia base de 100MVA.

A continuación, se mostrarán las capturas de pantalla de la integración de los datos anteriores al programa PSSE de la figura 4.3 a la figura 4.9 Posteriormente en la figura 4.10 se mostrarán los resultados de flujos de potencia de manera grafica.

Bus Number	Bus Name	Base kV	Area Number/Name	Zone Number/	Owner Num	Code	Voltage (pu)	Angle (deg)	G-Neg Load (pu)
1	BUS INFINITO	23,000	1	1	1	3	1,0000	0,00	0,00000
2	SE MANIOBRAS	23,000	1	1	1	1	1,0000	0,00	0,00000
3	SE PLANTA	23,000	1	1	1	1	1,0000	0,00	0,00000
4	GEN 1	0,480	1	1	1	2	1,0000	0,00	0,00000
5	GEN 2	0,480	1	1	1	2	1,0000	0,00	0,00000
▶	6 SERV AUX	0,220	1	1	1	1	1,0000	0,00	0,00000
*									

Figura 4.4 Datos de entrada para las barras del sistema.

From Bus	From Bus Name	To Bus Number	To Bus Name	Id	Line R (pu)	Line X (pu)	Charging (pu)	
1	BUS INFINITO	23,000	2 SE MANIOBRAS	23,0	1	0,018150	0,332868	0,000000
2	SE MANIOBRAS	23,0	3 SE PLANTA	23,000	1	0,261850	0,211366	0,041960
*								

Figura 4.3 Datos de entrada de las líneas.

Load Data Record

Power Flow

Basic Data

Bus Number: 6 Bus Name: SERV AUX 0,2200

Load ID: 1 In Service Scalable

Load Data

Pload (MW): 0,2430 Qload (Mvar): 0,1180

IPload (MW): 0,0000 IQload (Mvar): 0,0000

YPload (MW): 0,0000 YQload (Mvar): 0,0000

Grouping Data

Area: 1

Owner: 1

Zone: 1

Figura 4.5 Datos de entrada de la carga local.

Machine Data Record

Power Flow | Short Circuit

Basic Data

Bus Number: 1 | Bus Name: BUS INFINITO23,000
 Machine ID: 1 | In Service | Bus Type Code: 3

Machine Data

Pgen (MW)	Pmax (MW)	Pmin (MW)
0,0000	9999,0000	-9999,0000
Qgen (Mvar)	Qmax (Mvar)	Qmin (Mvar)
0,0000	9999,0000	-9999,0000
Mbase (MVA)	R Source (pu)	X Source (pu)
10000000,00	0,000000	1,000000

Transformer Data

R Tran (pu)
0,00000
X Tran (pu)
0,00000
Gentap (pu)
1,00000

Owner Data

Owner	Fraction
1 Select ...	1,000
0 Select ...	1,000
0 Select ...	1,000
0 Select ...	1,000

Wind Data

Control Mode: 0 - Not a wind machine
 Power Factor (W/PF): 1,000

Plant Data

Sched Voltage: 1,0000 | Remote Bus: 0

OK | Cancel

Figura 4.6 Datos de entrada para el generador que representa el bus infinito.

Machine Data Record

Power Flow | Short Circuit

Basic Data

Bus Number: 4 | Bus Name: GEN 1 0,4800
 Machine ID: 1 | In Service | Bus Type Code: 2

Machine Data

Pgen (MW)	Pmax (MW)	Pmin (MW)
1,4160	1,4160	0,7080
Qgen (Mvar)	Qmax (Mvar)	Qmin (Mvar)
0,5308	1,0617	0,5308
Mbase (MVA)	R Source (pu)	X Source (pu)
1,77	0,007000	0,115000

Transformer Data

R Tran (pu)
0,00000
X Tran (pu)
0,00000
Gentap (pu)
1,00000

Owner Data

Owner	Fraction
1 Select ...	1,000
0 Select ...	1,000
0 Select ...	1,000
0 Select ...	1,000

Wind Data

Control Mode: 0 - Not a wind machine
 Power Factor (W/PF): 1,000

Plant Data

Sched Voltage: 1,0000 | Remote Bus: 0

OK | Cancel

Figura 4.7 Datos de entrada para el generador 1 y el generador 2.

Two Winding Transformer Data Record

Power Flow | Short Circuit

Line Data

From Bus Number: 3 From Bus Name: SE PLANTA 23,000 In Service
 To Bus Number: 4 To Bus Name: GEN 1 0,4800 Metered on From end
 Branch ID: Transformer Name: Winding 1 on From end

I/O Data

Winding I/O Code: 1 - Turns ratio (pu on bus base kV) Impedance I/O Code: 1 - Z pu (winding kV system MVA) Admittance I/O Code: 1 - Y pu (system base)

Transformer Impedance Data		Transformer Nominal Ratings Data		
Specified R (pu)	Specified X (pu)	Winding 1 Ratio (pu)	Winding 1 Nominal kV	Winding (1-2) Angle (degrees)
-0,000000	2,830000	1,0000	0,0000	0,00
Magnetizing G (pu)	Magnetizing B (pu)	Winding 2 Ratio (pu)	Winding 2 Nominal kV	Winding MVA
0,00000	0,00000	1,0000	0,0000	100,0000
Impedance Table		Rate A (MVA)	Rate B (MVA)	Rate C (MVA)
0		0,0	0,0	0,0
R table corrected (pu)	X table corrected (pu)	Control Data		
0,00000	0,00000	Controlled Bus Number	Controlled Bus Name	Control Mode

Figura 4.8 Datos de entrada para los transformadores que se conectan a los generadores de la central eléctrica.

Two Winding Transformer Data Record

Power Flow | Short Circuit

Line Data

From Bus Number: 3 From Bus Name: SE PLANTA 23,000 In Service
 To Bus Number: 6 To Bus Name: SERV AUX 0,2200 Metered on From end
 Branch ID: Transformer Name: Winding 1 on From end

I/O Data

Winding I/O Code: 1 - Turns ratio (pu on bus base kV) Impedance I/O Code: 1 - Z pu (winding kV system MVA) Admittance I/O Code: 1 - Y pu (system base)

Transformer Impedance Data		Transformer Nominal Ratings Data		
Specified R (pu)	Specified X (pu)	Winding 1 Ratio (pu)	Winding 1 Nominal kV	Winding (1-2) Angle (degrees)
-0,000000	16,530001	1,0000	0,0000	0,00
Magnetizing G (pu)	Magnetizing B (pu)	Winding 2 Ratio (pu)	Winding 2 Nominal kV	Winding MVA
0,00000	0,00000	1,0000	0,0000	100,0000
Impedance Table		Rate A (MVA)	Rate B (MVA)	Rate C (MVA)
0		0,0	0,0	0,0
R table corrected (pu)	X table corrected (pu)	Control Data		
0,00000	0,00000	Controlled Bus Number	Controlled Bus Name	Control Mode

Figura 4.9 Datos de entrada para el transformador que energiza a los servicios auxiliares de la central eléctrica

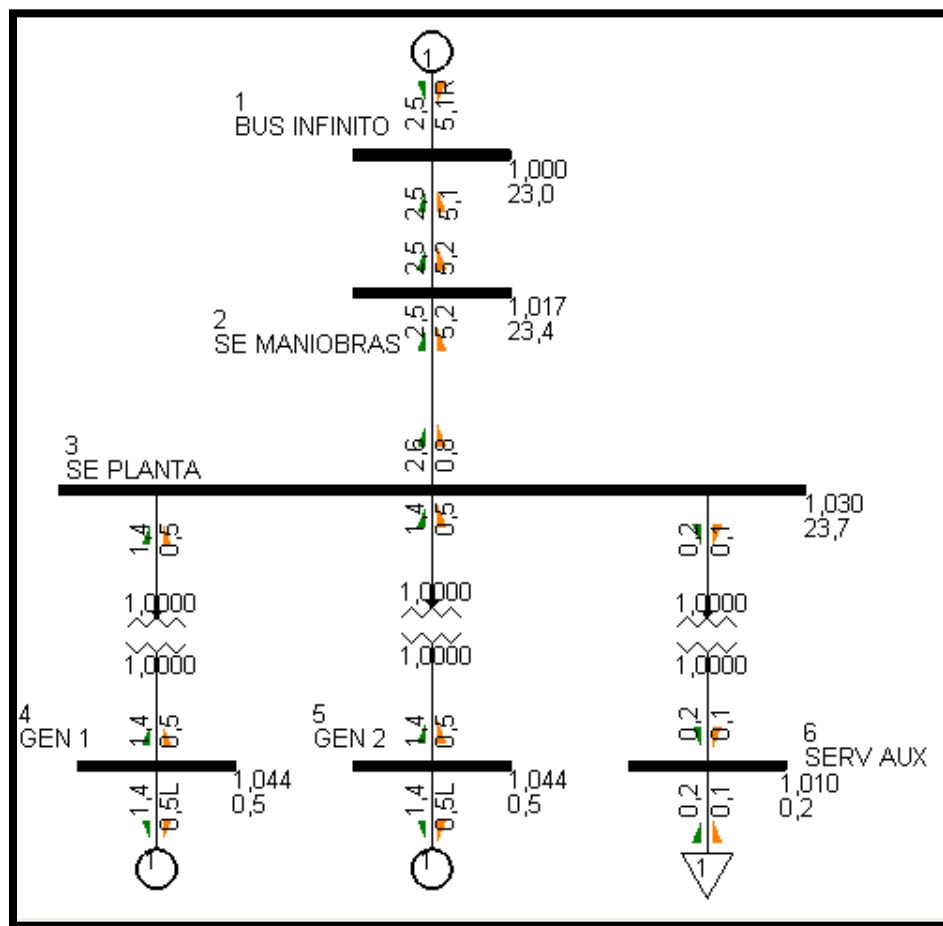


Figura 4.10 Resultados de gráficos del estudio de flujos de potencia.

Las tablas 4.4 y 4.5 contienen los resultados de la simulación de flujos de potencia en PSSE.

Tabla 4.4 Voltajes de barra y datos de generación y carga.

Bus #	Magnitud del voltaje (p.u.) / kV	Ángulo de fase (grados)	Generación		Carga	
			P _G (MW)	Q _G (MVAR)	P _L (MW)	Q _L (MVAR)
1	1.0000/23.000	0	-2.5	-5.1	0	0
2	1.0173/23.399	0.4	0	0	0	0
3	1.0301/23.693	0.3	0	0	0	0
4	1.0438/0.5010	2.4	1.4	0.5	0	0
5	1.0438/0.5010	2.4	1.4	0.5	0	0
6	1.0101/0.222	-1.9	0	0	0.2	0.1

Tabla 4.5 Flujos de potencia entre barras del sistema de estudio.

Flujo de líneas			
# Barra	A la barra	Flujo de líneas	
		(MW)	(MVAR)
1	2	-2.5	-5.1
2	1	2.5	5.2
	3	-2.5	-5.2
3	2	2.6	0.8
	4	-1.4	-0.5
	5	-1.4	-0.5
	6	0.2	0.1
4	3	1.4	0.5
5	3	1.4	0.5
6	3	-0.2	-0.1

4.3 Elaboración de estudios de estabilidad

Una vez obtenidos los parámetros iniciales como son tensiones de barra, flujos de potencia en líneas y transformadores y potencia reactiva generada en las maquinas síncronas, se procederá a integrar los modelos dinámicos que representan al generador, gobernador y excitador.

Estos modelos y los respectivos valores de las diferentes constantes y ganancias son proporcionados por el fabricante de las unidades de generación.

El programa PSSE cuenta con una gran variedad de modelos a utilizar, pero solo se describirán los modelos a usar en nuestro análisis específico.

4.3.1 Generadores

GENCLS

El modelo GENCLS es un modelo de generador clásico que solo se usó en el sistema de dos barras para simular una barra infinita, por ello se empleará en nuestro estudio para el generador que está conectado en la barra que representa al punto de interconexión. El modelo solo tiene constantes de inercia y amortiguamiento, que cuando se establecen en cero en combinación con una pequeña reactancia del generador dan como resultado una barra infinita. En la figura 4.11 se muestra la información de entrada y la de salida del modelo.

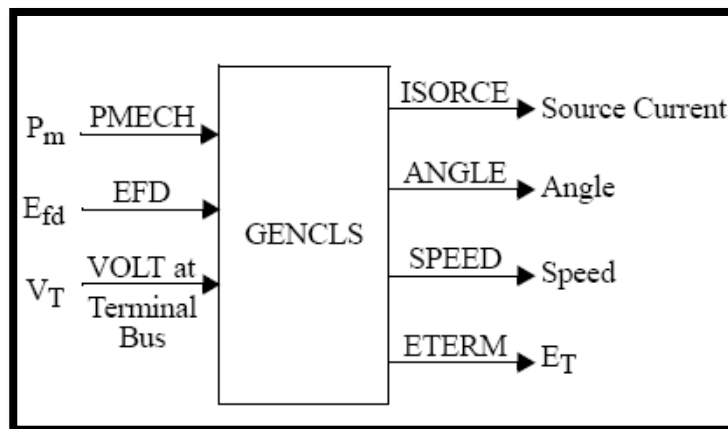


Figura 4.11 Información de entrada y salida del modelo GENCLS.[20]

En la tabla 4.6 se muestran las constantes que requiere el PSSE del modelo.

Tabla 4.6 Constantes del modelo GENCLS.

CONs	#	Valor	Descripción
J		100	H Constante de inercia
J+1		-	D Constante de amortiguamiento

Nota: los valores están en p.u. con base a los MVA_{base} del generador.

GENSAL

Este modelo describe las características eléctricas de los dos generadores de polos salientes que están instalados en la central eléctrica. En la figura 4.12 se ilustra los datos de entrada y de salida del modelo y en la tabla 4.7 las constantes con sus respectivos valores.

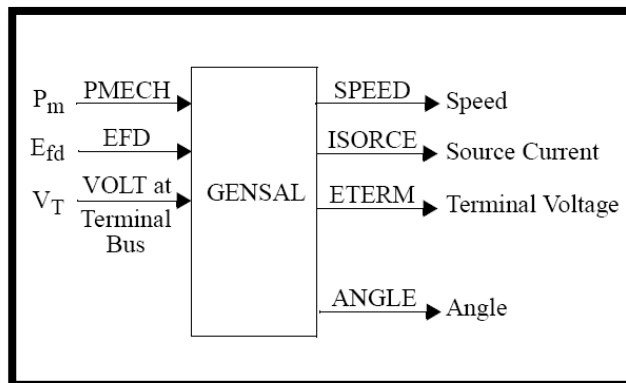


Figura 4.12 Información de entrada y salida del modelo GENSAL. [20]

Tabla 4.7 Constantes del modelo GENSAL

CONs	#	Valor	Descripción
J		2.46	T'_{do} (>0) (seg) Constante de tiempo transitoria de circuito abierto de eje directo.
J+1		0.027	T''_{do} (>0) (seg) Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto de eje directo.
J+2		0.23	T''_{qo} (>0) (seg) Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto de eje de cuadratura.
J+3		0.4504	H Constante de inercia
J+4		1	D Constante de amortiguamiento
J+5		2.045	X_d Reactancia síncrona de eje directo
J+6		1.315	X_q Reactancia síncrona de eje de cuadratura
J+7		0.124	X'_d Reactancia subtransitoria de eje directo
J+8		0.092	$X''_d = X''_q$
J+9		0.155	X_l Reactancia de dispersión
J+10		0.15	S (1.0) Factor de saturación a 1.0 p.u.
J+11		0.63	S (1.2) Factor de saturación a 1.2 p.u.

Nota: los valores están en p.u. con base a los MVA_{base} del generador.

4.3.2 Excitador

IEEE 421.5 2005 AC8B

Este modelo se usa especialmente para representar reguladores de tensión estáticos instalados en sistemas de excitación sin escobillas. También representan a los reguladores digitales de voltaje que alimentan a los excitadores giratorios principales con K_c y K_d establecidos en 0. En la figura 4.13 se muestra la estructura del modelo y en la tabla 4.8 las constantes con sus respectivos valores.

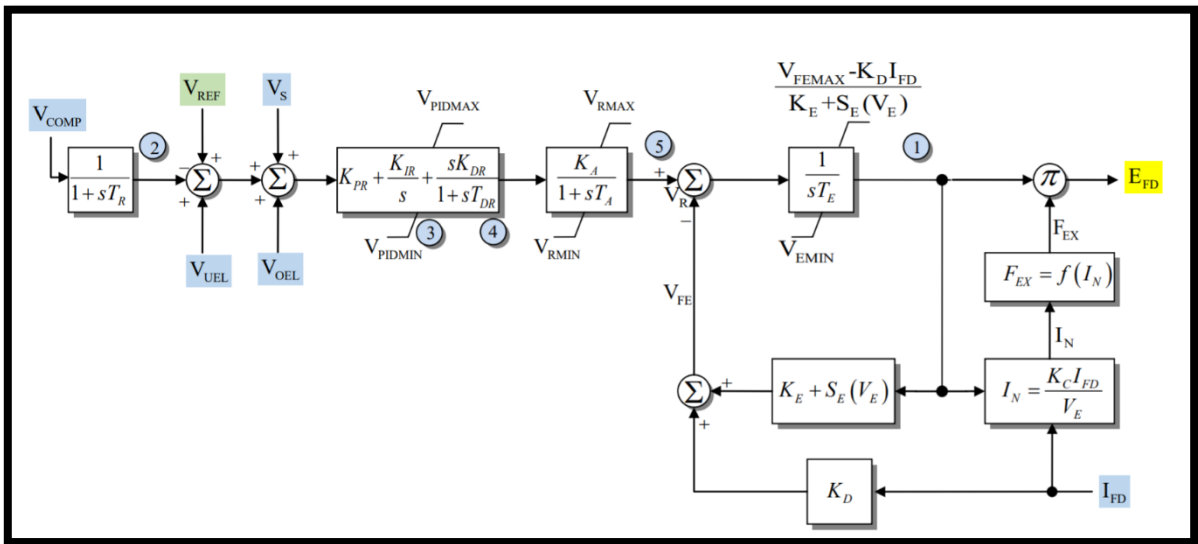


Figura 4.13 Estructura del modelo AC8B. [20]

Tabla 4.8 Constantes del modelo AC8B.

CONs	#	Valor	Descripción
J		0.06	T_R (seg.) Constante de tiempo del filtro de entrada del regulador
J+1		30	K_{PR} (p.u.) ganancia proporcional del regulador
J+2		60	K_{IR} (p.u.) ganancia integral del regulador
J+3		0.1	K_{DR} (p.u.) ganancia derivativa del regulador
J+4		0.03	T_{DR} (seg) constante de tiempo del bloque derivado del regulador
J+5		15	V_{PIDMAX} (p.u.) límite máximo del PID
J+6		0	V_{PIDMIN} (p.u.) límite mínimo del PID.
J+7		1	K_A (p.u.) ganancia proporcional del regulador de voltaje
J+8		0.58	T_A (p.u.) constante de tiempo del regulador de voltaje
J+9		15	V_{RMAX} (p.u.) límite máximo de salida del regulador
J+10		0	V_{RMIN} (p.u.) límite mínimo de salida del regulador
J+11		0.11	K_C (p.u.) factor de carga del rectificador proporcional a la reactancia de conmutación.
J+12		0.19	K_D (p.u.) factor de desmagnetización, función de las reactancias del excitador de CA.
J+13		0,111	K_E (p.u.) constante del excitador relacionado con el campo auto excitado
J+14		0.12	T_E (p.u.) constante de tiempo del excitador
J+15		15	V_{FEMAX} (p.u.) límite de corriente del campo del excitador
J+16		0	V_{EMIN} (p.u.)
J+17		6.15	E1
J+18		0.48	S (E1)
J+19		4.61	E2
J+20		0.03	S (E2)

Nota: los valores están en p.u. con base a los MVA_{base} del generador.

4.3.3 Regulador de velocidad (gobernador)

DEGOV1

Este modelo describe la respuesta de los controles de los reguladores de velocidad de tipo mecánico hidráulico que esta instalados en los motores de cuatro tiempos que funcionan con diésel o gas. En la figura 4.14 la estructura del modelo y en la tabla 4.9 las constantes con sus respectivos valores.

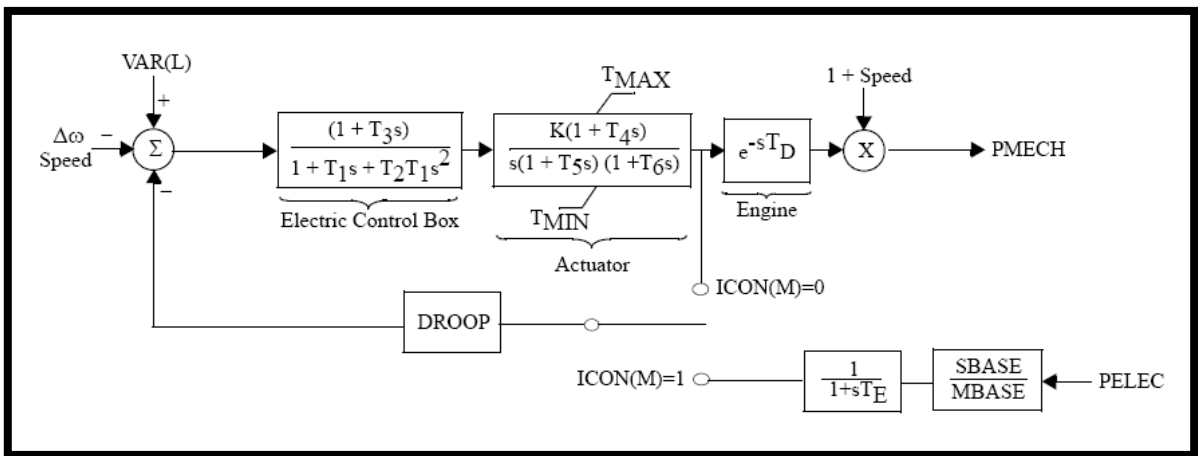


Figura 4.14 Estructura del modelo DEGOV1. [20]

Tabla 4.9 Constantes del modelo DEGOV1.

CONs	#	Valor	Descripción
J		0	T_1 (seg.) Constante de tiempo
J+1		0	T_2 (seg.) Constante de tiempo
J+2		0	T_3 (seg.) Constante de tiempo
J+3		0.42	K Ganancia del motor
J+4		1	T_4 (seg.) Constante de tiempo
J+5		1.9	T_5 (seg.) Constante de tiempo
J+6		1.1	T_6 (seg.) Constante de tiempo
J+7		0.2	T_D ($0 \leq T_D \leq 12 \cdot \text{DELTA}$) (seg) Tiempo de retardo
J+8		1.1	T_{MAX} Límite máximo
J+9		0.5	T_{MIN} Límite mínimo
J+10		1	DROOP Ganancia de retroalimentación
J+11		0.04	T_E Constante de tiempo de la potencia
ICON M		1	Control de caída 0 retroalimentación del acelerador 1 retroalimentación de energía eléctrica

Nota: los valores están en p.u. con base a los MVA_{base} del generador.

4.4 Casos de estudio

Para evaluar el nivel de estabilidad de la planta de generación se propondrán tres casos o escenarios donde ocurren diferentes disturbios en la red.

Primer caso de estudio

El primer caso se simulará una falla trifásica en la barra 2 (SE de maniobras) con un tiempo de liberación propuesto de 0.066 segundos (4 ciclos), se analizará la magnitud del voltaje en los bornes de los generadores, el ángulo del voltaje, potencia real, potencia reactiva y la frecuencia.

En la figura 4.15 se muestra como condición inicial una magnitud de 1.044 en P.U. (501 V), en el segundo uno de la simulación se introduce la falla trifásica en el bus 2 en donde el voltaje se abate hasta llegar a 0.2 P.U. (96V) durante la duración de la falla posteriormente del segundo 1.066 al segundo 2 los generadores recuperaron la magnitud del voltaje con una leve sobretensión y después de 9 segundos los dos generadores regresaron a la condición inicial.

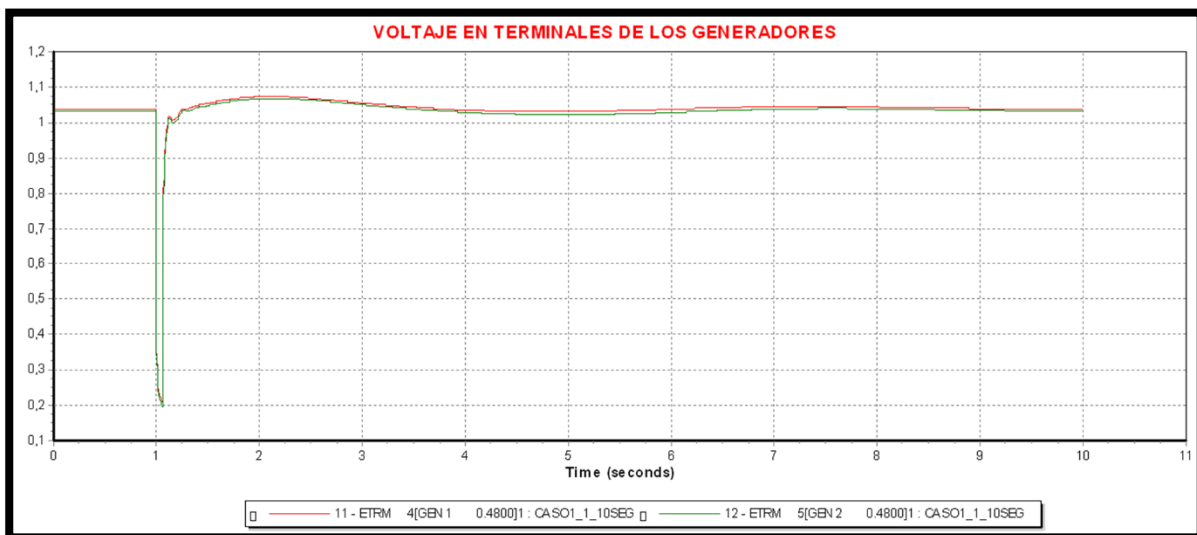


Figura 4.15 Comportamiento de la magnitud del voltaje en terminales de los generadores.

En la figura 4.16 se aprecia que en los ángulos del voltaje se produce una fuerte oscilación durante la falla, posteriormente vemos un amortiguamiento por acción de los controles de los generadores que va del segundo 1.5 hasta el segundo 9. Después se observa que a los 10 segundos los ángulos regresan a valores cercanos a los iniciales.

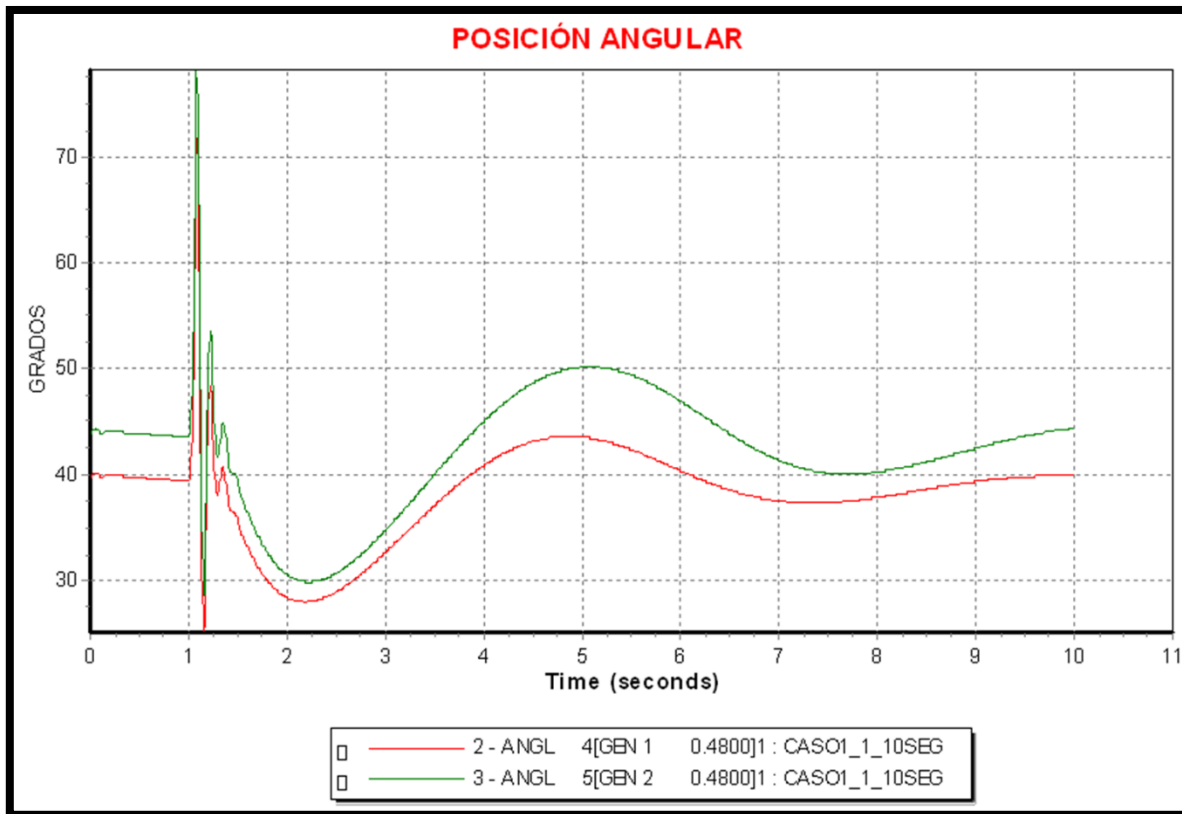


Figura 4.16 Ángulos de voltaje interno de los generadores con respecto al tiempo.

En la figura 4.17 la potencia real tiene un valor inicial de 0.01416 P.U. (1.416 MW) en los dos generadores durante la falla observamos una oscilación grande ya que se muestra un valor máximo de 0.052 P.U. (5.2 MW), regresando a los valores de las condiciones iniciales en un periodo aproximado de 0.5 segundos.

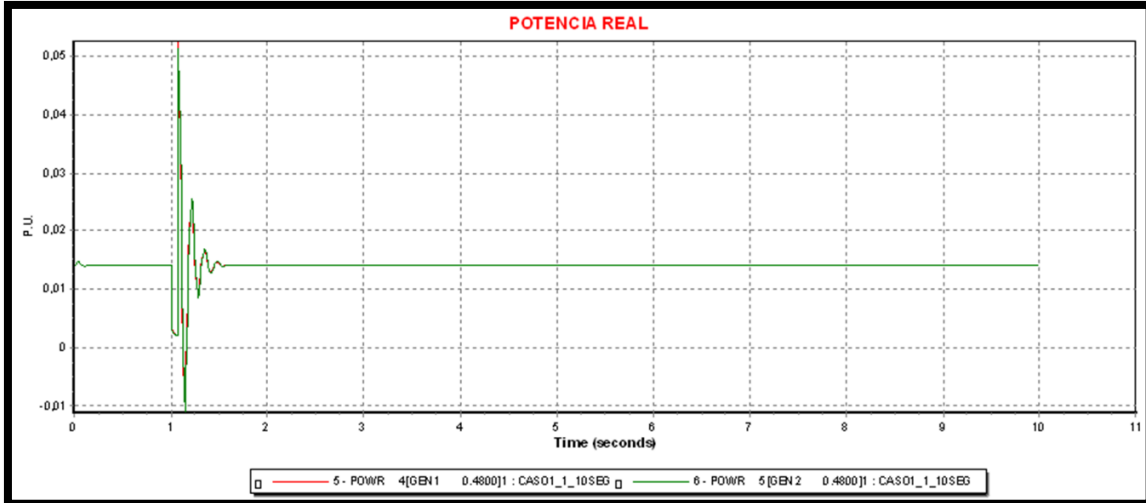


Figura 4.17 Potencia real inyectada al sistema durante el disturbio.

En la figura 4.18 se ilustra el comportamiento de la potencia reactiva aportada por las maquinas síncronas al sistema antes, durante y después del disturbio.

La potencia inicial de los generadores es de 0.005 P.U. (0.5 MVAR), pero cuando se introduce la falla se produce una oscilación grande con un valor máximo de 0.04 P.U. (4 MVAR) y mínimo de -0.045 P.U. (4.5 MVAR), los generadores recuperan sus condiciones iniciales en aproximadamente 9 segundos.

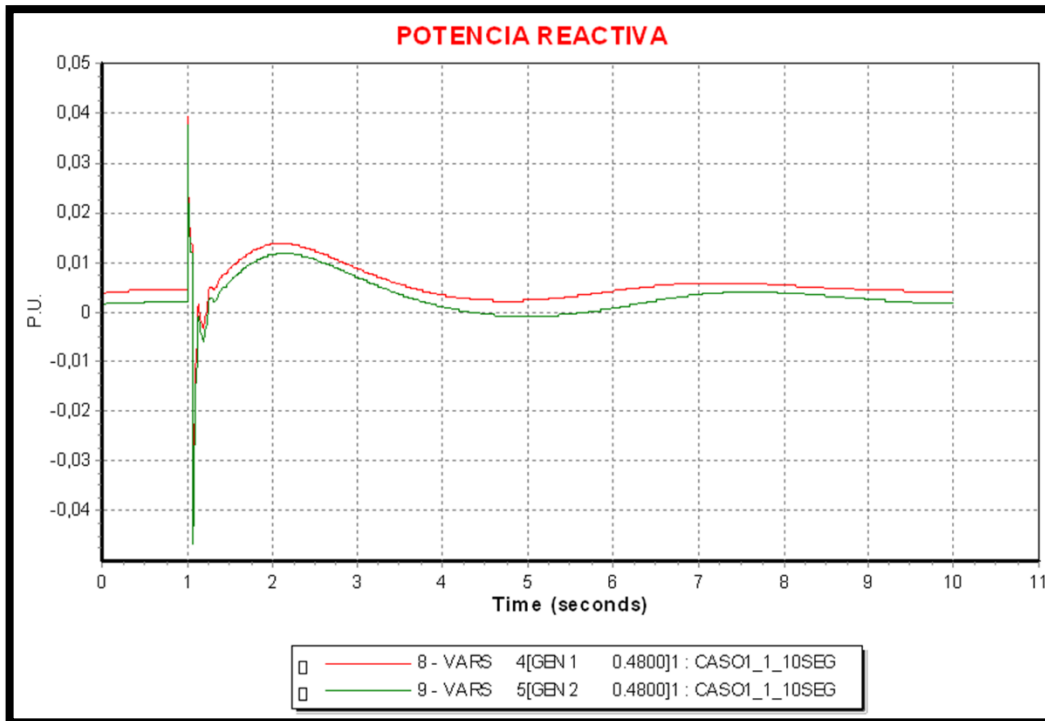


Figura 4.18 Comportamiento de la potencia reactiva de los generadores.

En la figura 4.19 se muestra la frecuencia de los generadores en el disturbio en donde se aprecia una oscilación durante el disturbio con un valor máximo de 62 Hz y un valor mínimo de 59.5 Hz. La oscilación es relativamente rápida a comparación con los otros parámetros con una duración de medio segundo.

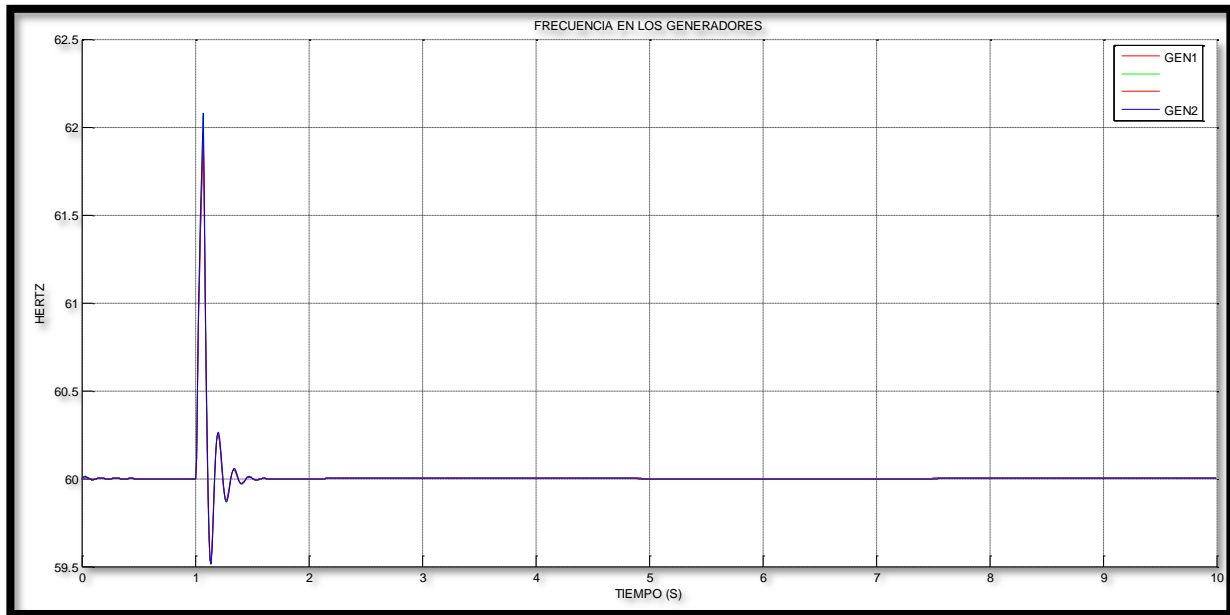


Figura 4.19 Frecuencia de los generadores de la central eléctrica.

Segundo caso de estudio

El segundo caso se simulará una falla trifásica en la barra 3 (SE de planta) con un tiempo de liberación propuesto de 0.066 y se analizarán los mismos parámetros que el primer caso.

En la figura 4.20 se observa una oscilación en la magnitud del voltaje muy parecida que en el primer caso donde se tiene como valor inicial de la tensión 1.044 en P.U. (501 V), en el segundo uno de la simulación se introduce la falla trifásica en el bus 3 en donde el voltaje se abate hasta llegar a 0.18 P.U. (86.4V) posterior a la liberación de la falla los generadores regresan a los valores iniciales en 9 segundos aproximados.

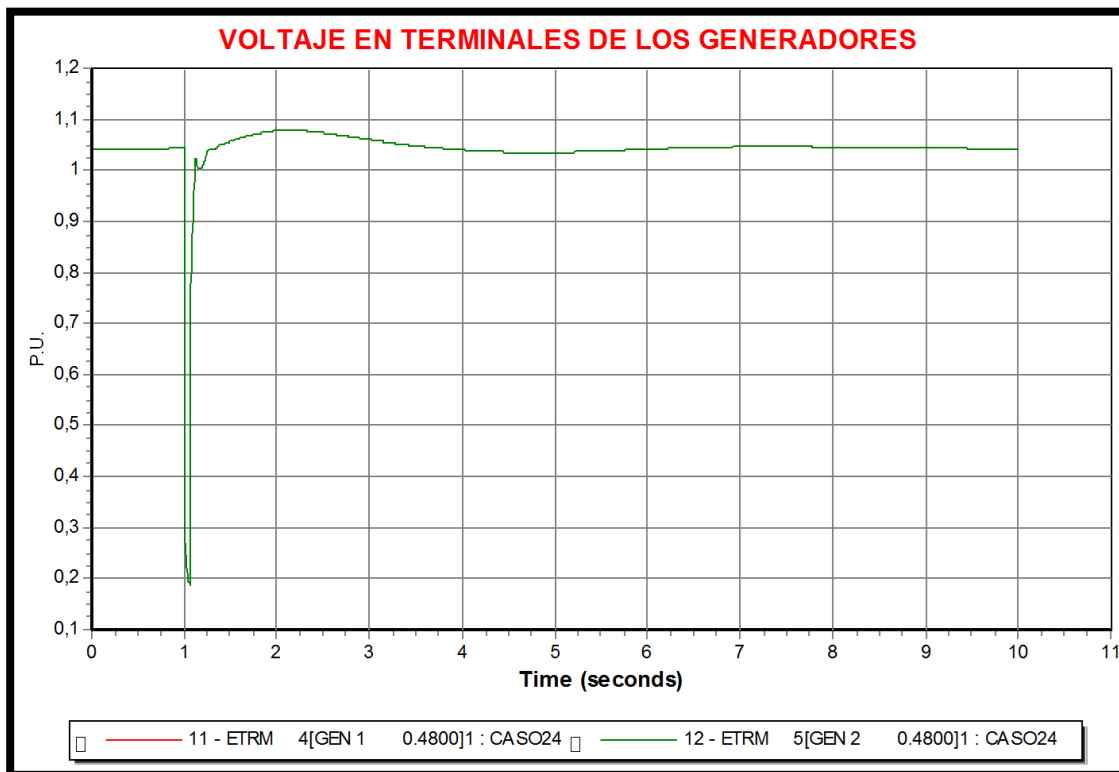


Figura 4.20 Voltaje en terminales de los generadores para el segundo caso de estudio.

En la figura 4.21 se ilustra a los ángulos del voltaje en donde se genera una fuerte oscilación durante la falla, posteriormente vemos un amortiguamiento por acción de los controles de los generadores que va del segundo 1.5 hasta el segundo 9. Después se observa que a los 10 segundos los ángulos regresan a valores cercanos a los iniciales.

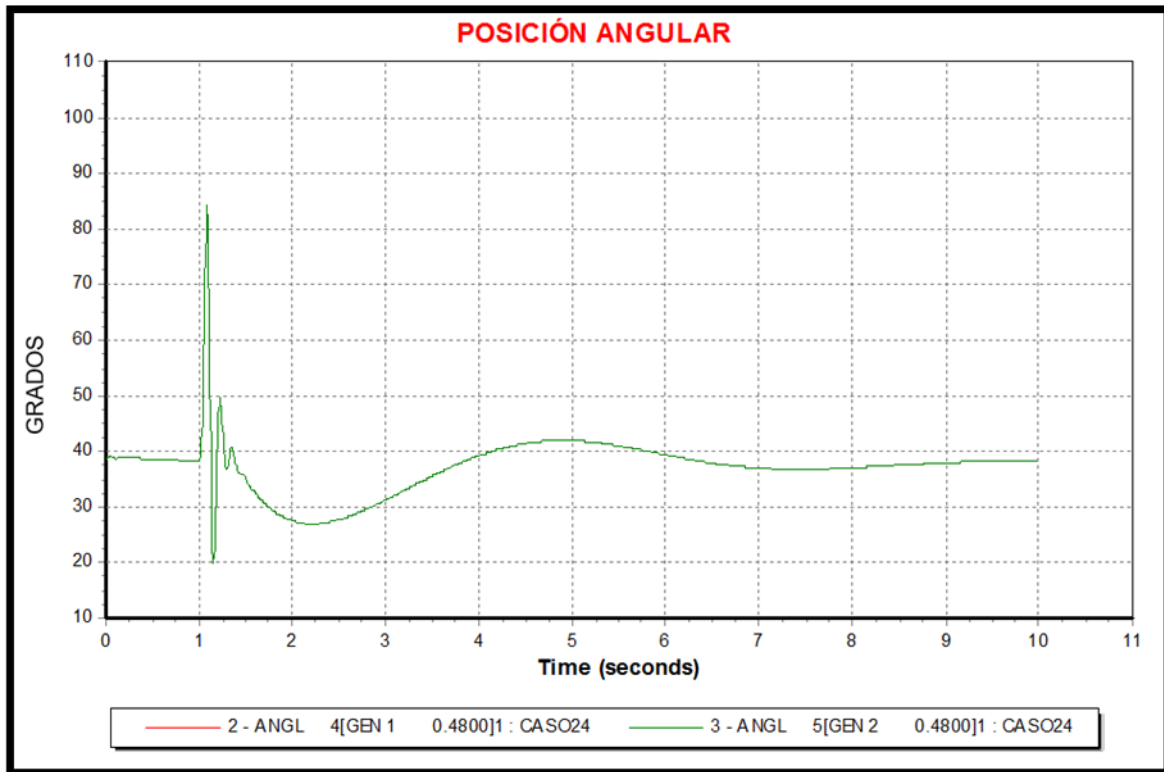


Figura 4.21 Ángulos de voltaje interno con respecto al tiempo para el segundo caso de estudio.

En la figura 4.22 la potencia real tiene un valor inicial de 0.01416 P.U. (1.416 MW) en los dos generadores, durante la falla observamos una oscilación grande ya que se muestra un valor máximo de 0.059 P.U. (5.9 MW), regresando a los valores de las condiciones iniciales en un periodo aproximado de 0.5 segundos.

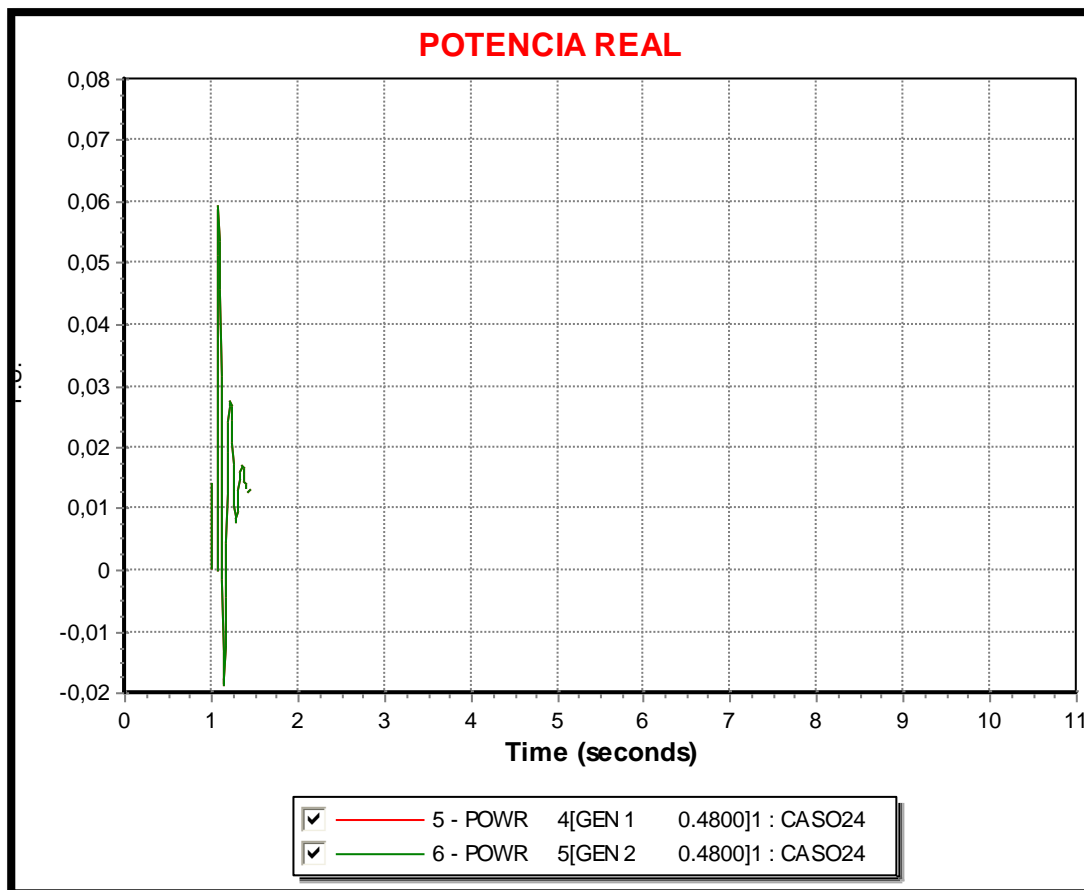


Figura 4.22 Potencia real en los generadores para el segundo caso de estudio.

En la figura 4.23 se ilustra el comportamiento de la potencia reactiva aportada por las maquinas síncronas al sistema antes, durante y después del disturbio. La potencia inicial de los generadores es de 0.005 P.U. (0.5 MVAR), pero cuando se introduce la falla se produce una oscilación grande con un valor máximo de 0.04 P.U. (4 MVAR) y mínimo de -0.045 P.U. (4.5 MVAR), los generadores recuperan sus condiciones iniciales en aproximadamente 9 segundos.

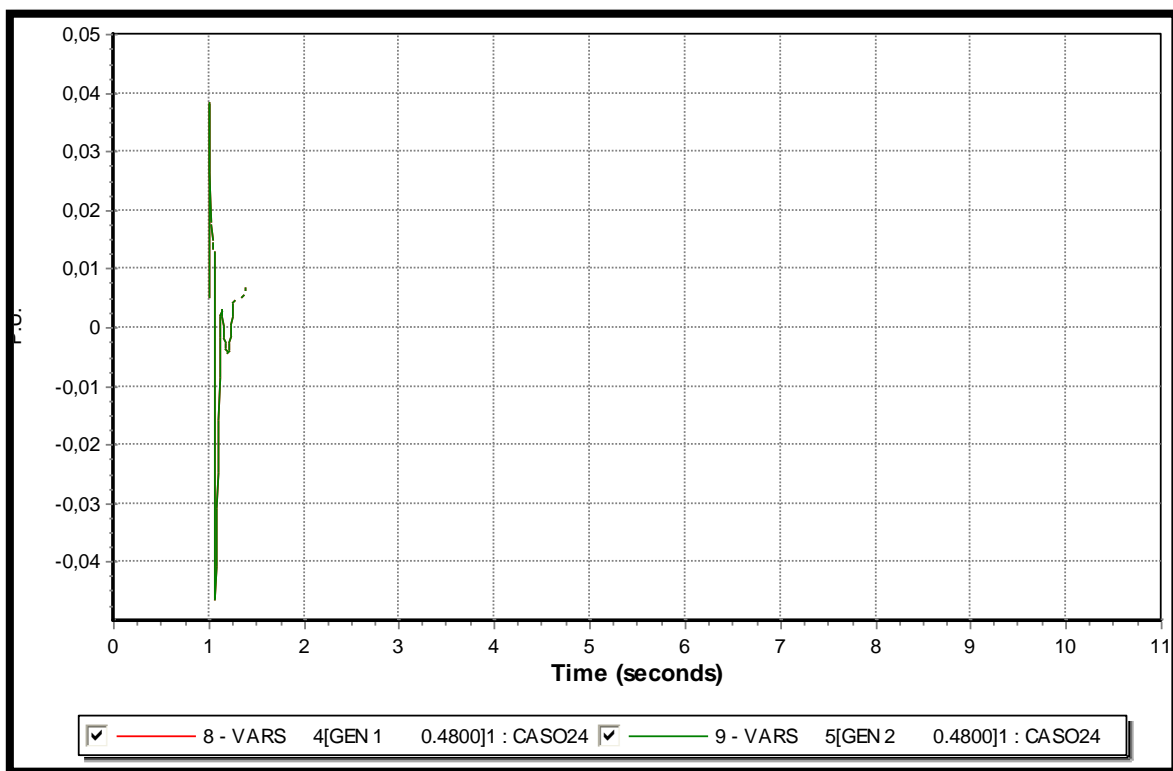


Figura 4.23 Potencia reactiva en los generadores para el segundo caso .

En la figura 4.24 se muestra la frecuencia de los generadores en el disturbio en donde se aprecia una oscilación durante el disturbio con un valor máximo de 62.4 Hz y un valor mínimo de 59.3 Hz. La oscilación es relativamente rápida a comparación con los otros parámetros con una duración de medio segundo.

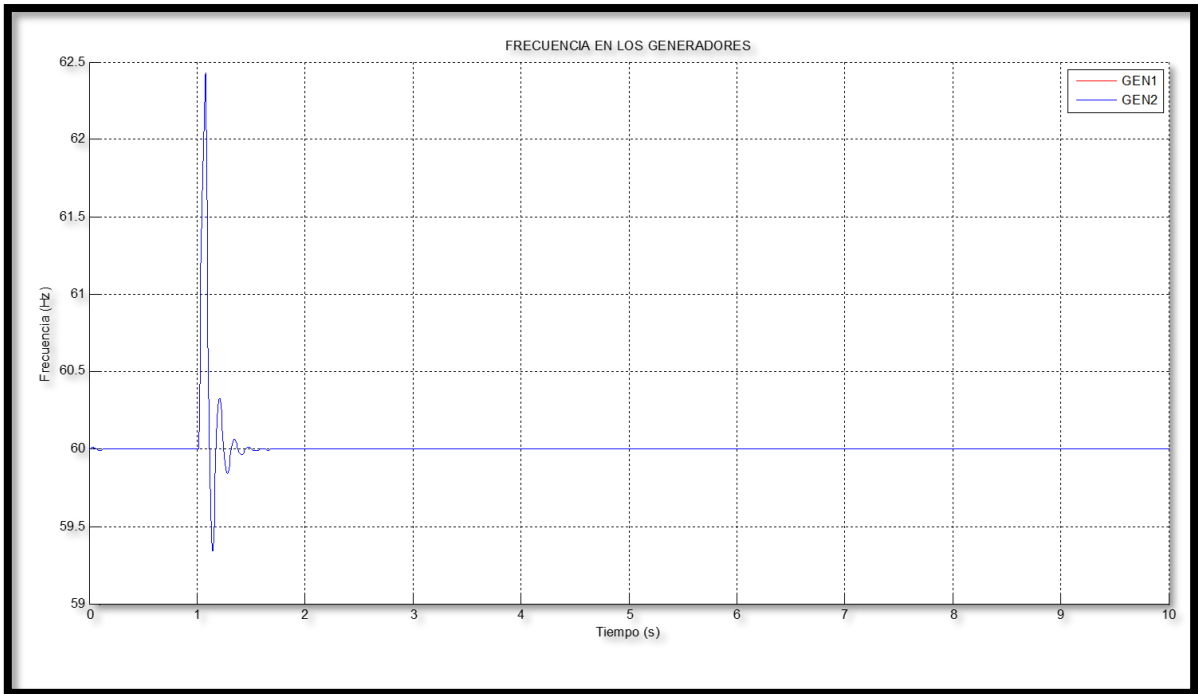


Figura 4.24 Frecuencia de los generadores en el segundo caso.

Tercer caso de estudio

El tercer caso se simulará el disparo de la unidad de generación dos en el segundo 3 de la simulación para examinar el comportamiento del generador uno en base a las variables estudiadas en el caso 2 y 3.

En la figura 4.25 se muestra que el voltaje del generador 1 se mantiene constante, aunque con una pequeña perturbación que dura dos segundos generada por la salida de operación de la unidad 2 de generación.

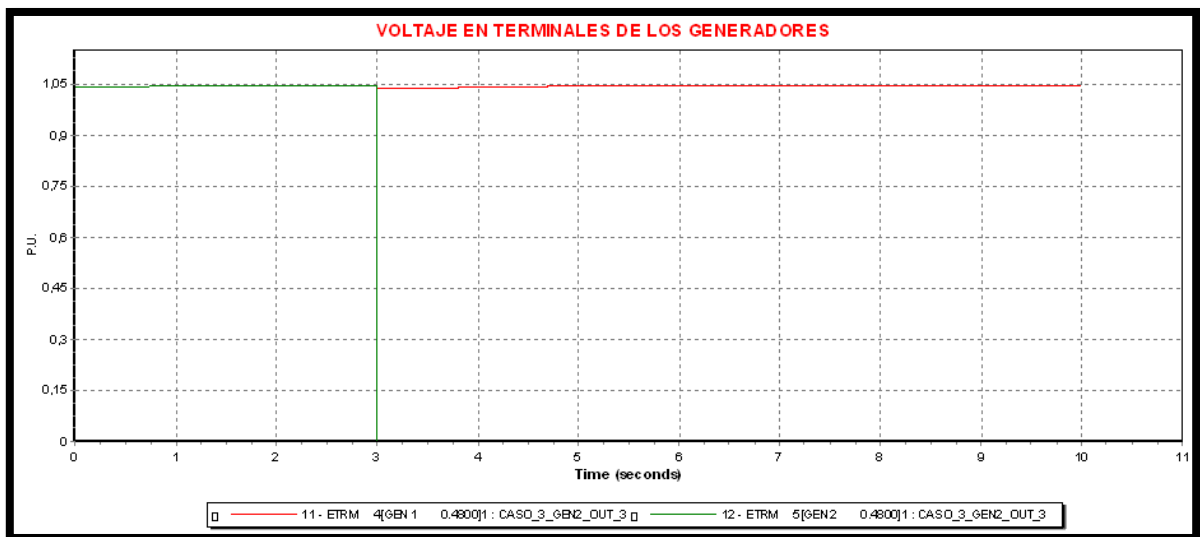


Figura 4.25 Voltaje en terminales de los generadores para el tercer caso de estudio.

En la figura 4.26 se observa el cambio de ángulo en el generador 1 provocada por la salida del generador 2 en el segundo 3, a partir de ese evento se presenta una pequeña oscilación con una duración aproximada de 4 segundos posteriormente el ángulo eléctrico del generador 1 alcanza un nuevo valor de operación estable.

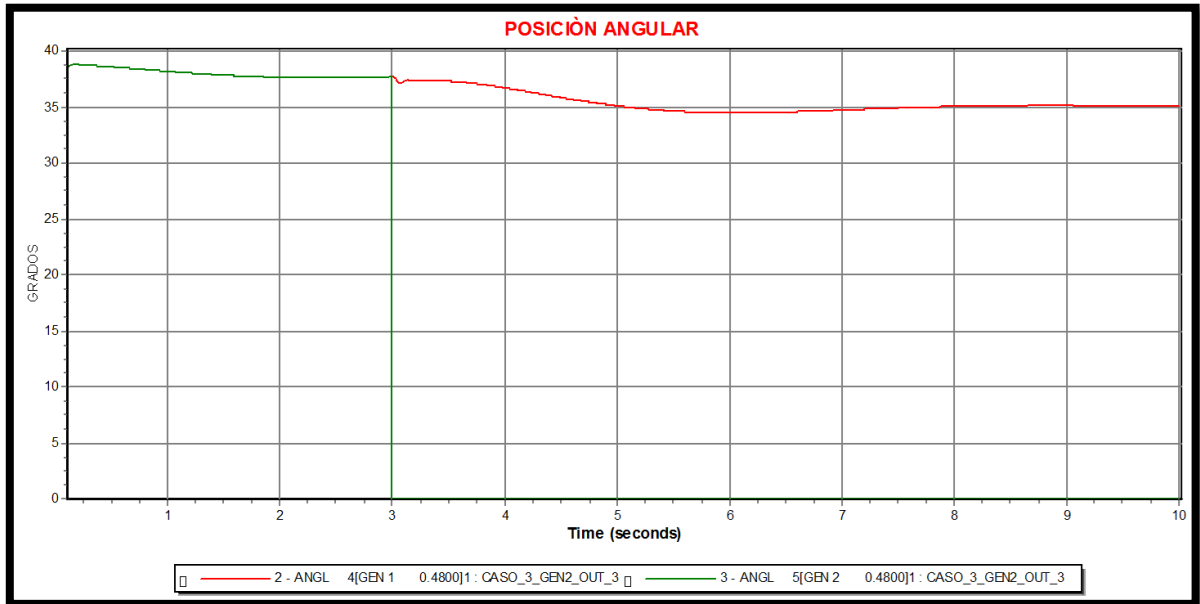


Figura 4.26 Ángulos de voltaje interno con respecto al tiempo para el tercer caso de estudio.

En la figura 4.27 se muestra el comportamiento de la potencia real de los dos generadores con un valor inicial de 0.01416 P.U. (1.416 MW) en las dos unidades, en el segundo 3 dicha potencia en la unidad 2 decae hasta un valor de cero, provocando una leve oscilación en la potencia generada en la unidad 1 que posteriormente recupera su valor inicial manteniéndose constante.

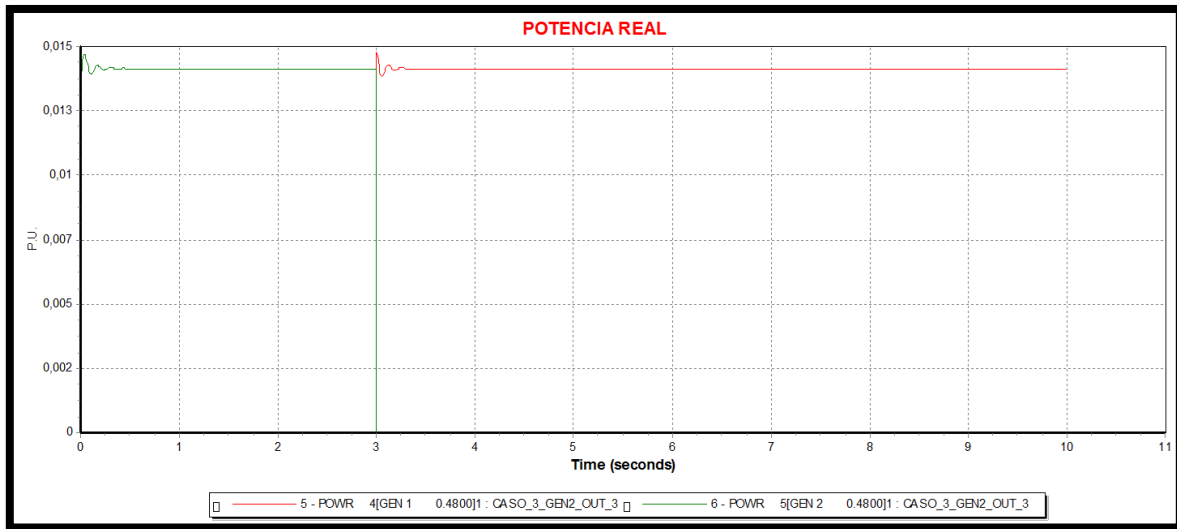


Figura 4.27 Potencia real en los generadores para el caso tercer caso de estudio.

En la figura 4.28 se muestra el comportamiento de la potencia reactiva aportada por los generadores al sistema, a partir de la salida de operación del generador 2 se observa que la unidad de generación 1 aporta la totalidad de potencia reactiva requerida por el sistema.

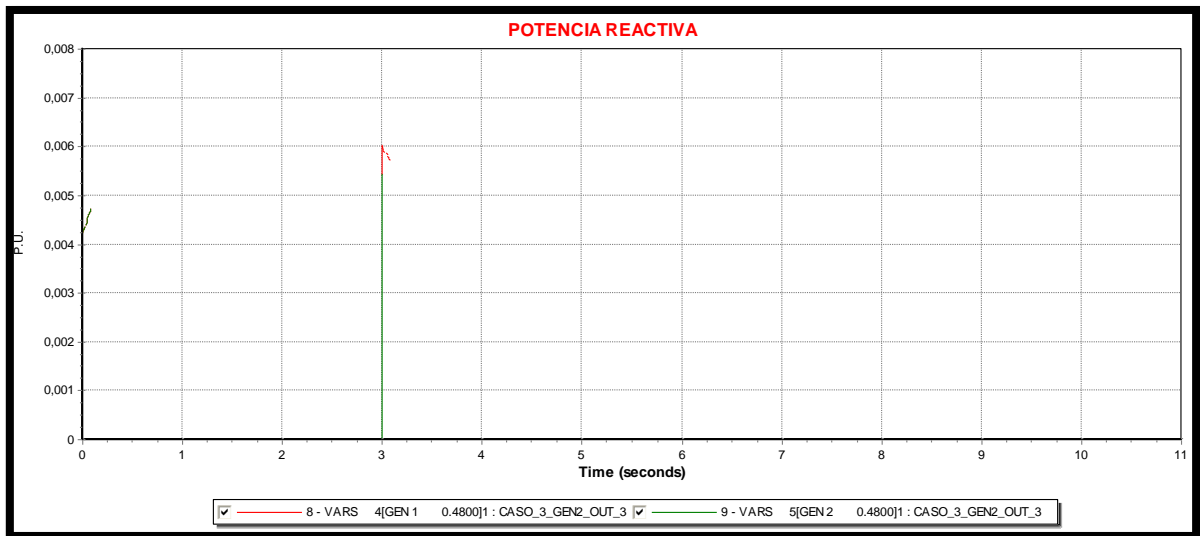


Figura 4.28 Potencia Reactiva aportada por los generadores para el tercer caso de estudio.

La frecuencia de operación del generador 1 no se vio afectada, solo hubo una pequeña oscilación cuando salió de operación el generador 2 que duro medio segundo posteriormente permanecio constante hasta finalizar el tiempo de simulación esto se pude observar en la figura 4.29.

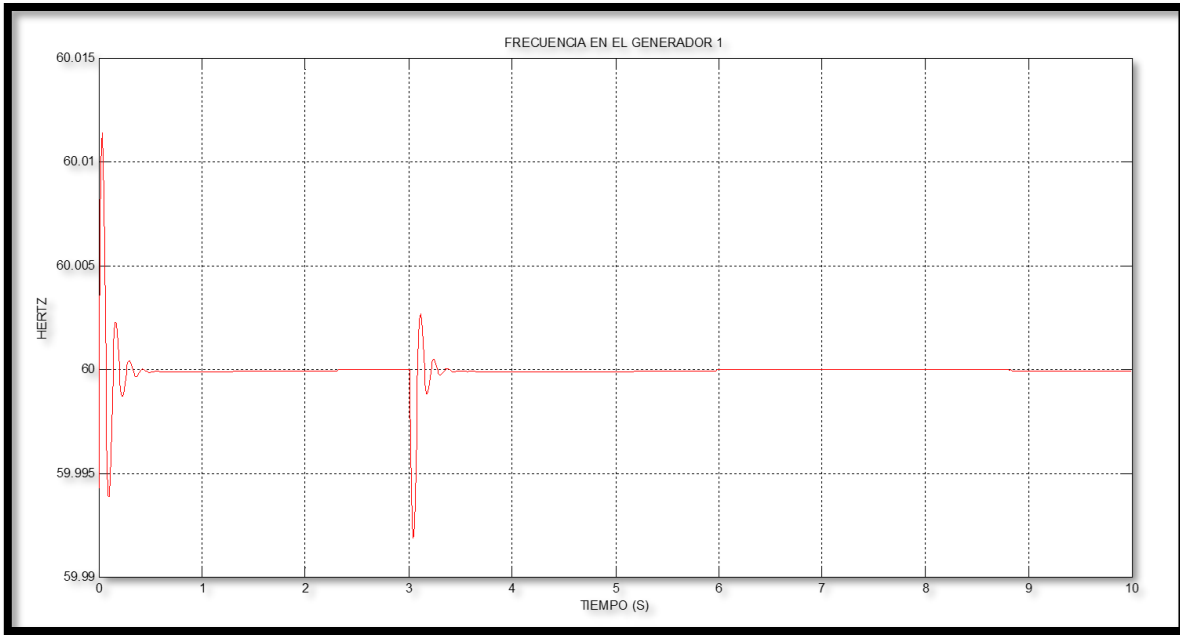


Figura 4.29 Frecuencia en el generador 1 para el caso 3.

El hombre que mueve montañas empieza apartando piedras pequeñas.

Confucio.

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Conclusiones de los estudios requeridos para una interconexión de una central eléctrica.

Los requerimientos que CENACE le exige a un solicitante de una interconexión de una central eléctrica al sistema eléctrico nacional que están plasmados en el anexo IV del Manual para la Interconexión de Centrales Eléctricas y Conexión de Centros de Carga es la información técnica necesaria para realizar diversos análisis sobre el efecto de la entrada en operación de dicha central a la red eléctrica en especial para realizar estudios de estabilidad transitoria comprobado en el capítulo cuatro de este trabajo de tesis.

La reunión de los modelos matemáticos de los controles de la maquinas síncronas no es una tarea sencilla ya que le lleva tiempo al mismo fabricante de los generadores recabar dichos datos técnicos porque a su vez depende de otros proveedores y la ingeniería de construcción no la hacen en México por lo que se debe de tener en cuenta dicha situación.

En la simulación del primer caso de estudio desarrollada en el capítulo cuatro se simuló una falla en el punto de interconexión a la red de la central para corroborar si los generadores con los ajustes obtenidos tienen la capacidad de soportar dicho disturbio y los datos que se obtuvieron fueron alentadores ya que regresaban a valores iniciales después de un periodo corto de tiempo.

En la segunda simulación se introdujo una falla en la subestación de la central, físicamente más cercana a los generadores y también se obtuvieron datos que validaban el nivel de estabilidad de las unidades de generación ante ese disturbio.

En el tercer caso de estudio se analizó el efecto de la salida de operación de una unidad de generación sobre el generador restante en donde no se observaron perturbaciones importantes en los parámetros analizados.

Conclusiones generales sobre el proyecto de una planta de generación de energía eléctrica a partir de biogás de vertedero.

Las plantas de revalorización de biogás de vertedero pueden ser una opción para prevenir incendios en los vertederos y disminuir el daño al medio ambiente que la actividad humana ha provocado. El éxito de este tipo de proyecto depende en gran medida de localizar un vertedero que cumpla con las normas de manejo de desechos sólidos urbanos, años de operación requeridos y nivel apropiado de material orgánico.

Otro factor a tener en cuenta es contar con un buen equipo multidisciplinario que analice desde varios campos de conocimiento la planeación y ejecución del proyecto como es el caso de los ingenieros ambientales para la elaboración de la manifestación de impacto ambiental y la proyección de generación de biogás del vertedero, ingenieros químicos que analicen la composición del biogás, ingenieros mecánicos que diseñen el sistema de extracción del biogás, ingenieros civiles que proyecten la cimentación y estructuras requeridas por los diferentes equipos y de

ingenieros electricistas que apoyen a la proyección de las instalaciones de servicios propios y estudios requeridos para la interconexión de la misma central.

También se requiere un equipo de apoyo legal para que en base al marco legal se supervise que las dependencias encargadas cumplan con los tiempos de atención a las solicitudes de los permisos que se requieren y se revisen contratos.

Otro punto para considerar es buscar diferentes clientes potenciales ya sea plantas industriales que requieran energía eléctrica para impulsar sus procesos productivos o gobiernos municipales que necesiten energizar los sistemas de bombeo de agua, alumbrado público y sistemas de transporte.

Trabajos futuros

Para trabajos futuros propondría elaborar análisis más profundos de estabilidad considerando criterios de operación de los esquemas de protecciones de la central eléctrica para tener datos de tiempos reales de liberación de fallas.

Investigar también de como elaborar análisis de estabilidad para centrales asíncronas como plantas solares y parques eólicos es otro tema que sería de mi agrado estudiar.

Bibliografía

- [1] Anne Knight, “*Energy from Waste*”, *IEEE Power Engineering Review*, February 1989
- [2] Dr. Cesar Alfredo Romo Millares, la M. en C. M. Consolación Medrano Vaca, Dr. Hipólito Romero Tehuitzil, Ing. José Luis Arvizu Fernández, Dr. Jorge Huacuz Villamar, y el Ing. José Beltrán Adán, “*Guía de Usuario - Generación de Electricidad mediante residuos Sólidos urbanos 2012*”, Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) Gerencia de Energías Renovables.
- [3] Autor: Equipo técnico EnRes , “*Proyectos de Aprovechamiento Energético a partir de residuos Urbanos en México*”, Dirección General de Energías Limpias SENER, septiembre 2018
- [4] Inciner8, 27 de diciembre de 2017, [Online]. Available: <https://inciner8latam.com/2017/12/27/waste-to-energy/>
- [5] Andrade, A., Restrepo, A. y Tibaquirá, J. E. “*Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia*”, *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 12, no. 23, pp. 40-47, enero - junio, 2018
- [6] J.P Weihs “*Conceptos básicos sobre biogás*”, 17 de agosto de 2010, https://www.globalmethane.org/documents/events_land_20100817_conceptos_basicos_sobre_biogas.pdf
- [7] A. Moraga Paredes Curso de Formación Especializada en Biogás para Profesionales Módulo 1 Introducción, Biogás, Chile, 2018.
- [8] Medioambiente y Seguridad 29 de septiembre de 2021 [Online]. Available: <https://medioambienteysseguridad.es/presencia-de-siloxanos-en-biogas-y-su-efecto-en-motores-y-turbinas/>
- [9] Aqualimpia 1 de septiembre de 2020, [Online]. Available: <https://www.aqualimpia.com/biodigestores/biogas-purificacion/>
- [10] Corodex industries 2017 [Online]. Available: https://www.corodexindustries.com/products-and-services/odor_control_systems/activated_carbon_filters/
- [11] innio fs-j420-2019, Jenbacher Type 4, INNIO- JENBACHER, Austria.
- [12] G. Alex Stege Jose Luis Davila, “*Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0*”, EPA, Phoenix, AZ,2009

- [13] CRE, “*Guía para solicitar permisos de generación, exportación e importación de energía eléctrica*”, 25 de julio de 2016.
- [14] Manual para la Interconexión de Centrales Eléctricas y Conexión de Centros de Carga, Diario Oficial de la Federación, 2018.
- [15] CFE, “*Estabilidad Transitoria en Sistemas Eléctricos de Potencia*”, Hermosillo, Sonora 24 al 28 de octubre del 2011.
- [16] J. /. D. S. J. J. Grainger, “*Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia*”, México: McGraw-Hill/Interamericana de México, S.A de C.V, 2000.
- [17] IIE, “Curso de capacitación sobre estudios eléctricos en áreas industriales”, Cuernavaca: IIE, 2009.
- [18] M. Zamora, A. Mazón, E. Fernández, K.J., I. Albizu, P. Eguía, E. Torres y V. Valverde, *Simulación de sistemas eléctricos*, Madrid: Pearson educación S.A. , 2005.
- [19] IEEE Transaction on Power Systems, “Conventions for Block Diagram Representations”, Vol. PWRS-1, No. 3, August 1986
- [20] Siemens Power Technologies International, PSS®E Model Library, October 2010.