



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA UNA PROPUESTA DE MEJORA DE LOS  
SISTEMAS DE EXCITACIÓN DE LAS UNIDADES GENERADORAS DE LA PLANTA  
HIDROELÉCTRICA LOS ESCLAVOS**

**Manuel Josué López Lima**

Asesorado por Msc. Mynor Rafael Celis González

Guatemala, enero de 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA UNA PROPUESTA DE MEJORA DE LOS  
SISTEMAS DE EXCITACIÓN DE LAS UNIDADES GENERADORAS DE LA PLANTA  
HIDROELÉCTRICA LOS ESCLAVOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MANUEL JOSUÉ LÓPEZ LIMA**

ASESORADO POR MSC. ING. MYNOR RAFAEL CELIS GONZÁLEZ.

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELÉCTRICO**

GUATEMALA, ENERO DE 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Edgar Estuardo Chaj Ramírez
EXAMINADOR	Ing. Carlos Alberto Navarro Fuentes
EXAMINADORA	Inga. Ana María Navarro Orozco
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

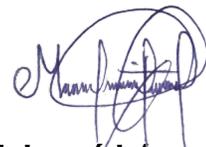


## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA UNA PROPUESTA DE MEJORA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DE LAS UNIDADES GENERADORAS DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA LOS ESCLAVOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 15 de octubre de 2022.



**Manuel Josué López Lima**



**EEPFI-PP-2122-2022**

Guatemala, 17 de noviembre de 2022

**Director**  
**Armando Alonso Rivera Carrillo**  
**Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica**  
**Presente.**

**Estimado Ing. Rivera**

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

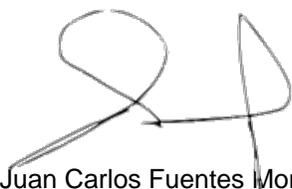
El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE PROPUESTA DE MEJORA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DE LAS UNIDADES GENERADORAS DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA LOS ESCLAVOS**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión y uso eficiente de la energía - Análisis de sistemas de generación y cogeneración**, presentado por el estudiante **Manuel Josué López Lima** carné número **201801525**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Energía Y Ambiente.

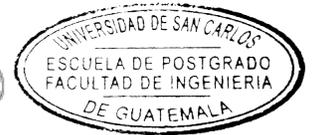
Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Mtro. Mynor Rafael Célis González  
Asesor(a)

  
Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque  
Coordinador(a) de Maestría



  
Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-1732-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE PROPUESTA DE MEJORA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DE LAS UNIDADES GENERADORAS DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA LOS ESCLAVOS**, presentado por el estudiante universitario **Manuel Josué López Lima**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director  
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, noviembre de 2022

Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189101- 24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.032.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA UNA PROPUESTA DE MEJORA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DE LAS UNIDADES GENERADORAS DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA LOS ESCLAVOS**, presentado por: **Manuel Josué López Lima**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, enero de 2023

AACE/gaoc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por darme toda la sabiduría y paciencia para llegar hasta este punto de mi vida profesional
<b>Mis padres</b>	Por su apoyo incondicional, cariño y comprensión durante toda la vida, gracias a ellos me he convertido en la persona que soy.
<b>Mis hermanas</b>	Por estar siempre presentes, velar por mi salud y apoyarme en todos retos que he afrontado.
<b>Mis amigos del ITI GK</b>	Por las desveladas en la biblioteca central y el apoyo moral incondicional.
<b>Compañeros de la Universidad</b>	Más que compañeros de estudio, se volvieron mis amigos y un gran apoyo para lograr esta meta.



## AGRADECIMIENTOS A:

<b>Mis padres</b>	Por apoyarme durante todo el proceso de estudio y realización de mi trabajo de graduación.
<b>Mi asesor de tesis</b>	Por la orientación incondicional brindada durante la realización de este trabajo de graduación.
<b>Mis compañeros de estudio</b>	Por el apoyo moral y realización de los proyectos en la universidad
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi <i>alma mater</i> y sede de todo el conocimiento adquirido.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	III
LISTA DE SÍMBOLOS .....	V
GLOSARIO .....	VII
RESUMEN .....	XI
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
3.1 Descripción del problema .....	7
3.2 Formulación del problema .....	8
3.3 Delimitación del problema .....	9
4. JUSTIFICACIÓN .....	11
5. OBJETIVOS .....	13
5.1. General.....	13
5.2 Específicos .....	13
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN .....	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Hidroeléctrica.....	17
7.2. Generador síncrono.....	17

7.3.	Parámetros de estabilidad en sistemas de potencia .....	19
7.4.	Estabilidad en frecuencia .....	20
7.5.	Estabilidad en tensión .....	21
7.6.	Sistema de excitación .....	24
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	29
9.	METODOLOGÍA .....	33
9.1.	Características del estudio .....	33
9.2.	Unidades de análisis .....	33
9.3.	Variables .....	33
9.4.	Resultados esperados.....	34
9.5.	Fases del estudio .....	35
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS.....	39
11.	CRONOGRAMA.....	43
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	45
12.1.	Recursos humanos .....	45
12.2.	Recursos financieros.....	45
12.3.	Acceso a la información .....	45
12.4.	Permisos .....	46
	REFERENCIAS .....	47
	APÉNDICES.....	49

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Árbol de problemas .....	8
2.	Partes de un generador.....	18
3.	Ejemplo de un Sistema Eléctrico de Potencia.....	19
4.	Curva de capacidad de un generador para regulación primaria.....	23
5.	Componentes generales del sistema de regulación de voltaje y frecuencia de un generador .....	25
6.	Sistema de excitación dinámico .....	26
7.	Elementos de un sistema de excitación estático o directo al campo.....	27

## TABLAS

I.	Desglose de variables principales .....	34
II.	Datos recopilados en campo del generador 1 .....	40
III.	Datos recopilados en campo del generador 2.....	41
IV.	Cronograma de actividades .....	43
V.	Presupuesto .....	46



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Amperios
<b>Hz</b>	Hertz
<b>KVA</b>	Kilovoltio-amperio
<b>KVAr</b>	Kilovoltio-amperio reactivo
<b>KWh</b>	Kilowatt-hora
<b><math>\Omega</math></b>	Ohm
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>V</b>	Voltios
<b>W</b>	Watts



## GLOSARIO

<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista
<b>CNEE</b>	Comisión Nacional de Energía Eléctrica
<b>Corriente eléctrica</b>	Flujo de electrones en un circuito eléctrico
<b>CT</b>	Transformador de corriente
<b>Energía eléctrica</b>	Es el flujo de electrones entre dos puntos cuando existe una diferencia de potencial eléctrico.
<b>Frecuencia eléctrica</b>	Es la cantidad de veces que la onda senoidal se repite en un segundo.
<b>Generador síncrono</b>	Es una máquina eléctrica rotativa que convierte la energía mecánica en energía eléctrica por medio de campos magnéticos que giran en sincronismo con el rotor.
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
<b>INDE</b>	Instituto Nacional de Electrificación
<b>NCO</b>	Norma de Coordinación Operativa

<b>Potencia eléctrica</b>	Es la energía por unidad de segundo que fluye en un circuito eléctrico.
<b>Potencia reactiva</b>	Es la energía por unidad de segunda necesaria para la formación de los campos magnéticos de las bobinas.
<b>PT</b>	Transformador de potencial
<b>RAV</b>	Regulador automático de voltaje
<b>SE</b>	Sistema de excitación
<b>SEP</b>	Sistema eléctrico de potencia
<b>Sistema de excitaciones</b>	Es el sistema encargado de regular el voltaje en terminales de un generador por medio del control de la potencia reactiva.
<b>Sistema de potencia</b>	Es una red de componentes eléctricos que se interconectan para generar, suministrar y transferir energía eléctrica.
<b>SNI</b>	Sistema Nacional Interconectado
<b>Tensión</b>	Es la fuerza que se encarga de empujar el flujo de electrones en un circuito.
<b>TIR</b>	Tasa interna de retorno

**VAN**

Valor Actual neto



## RESUMEN

En el trabajo de investigación titulado: *Diseño de Investigación de Propuesta de Mejora de los Sistemas de Excitación de las Unidades Generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos*, se detalla el proceso de recopilación de datos en campo, análisis de información bibliográfica, análisis técnico y económico, cotización de equipos y selección de un sistema de excitación para los generadores síncronos de la planta.

A partir de la toma de los datos técnicos de los generadores tomados en campo y el análisis de las normativas vigentes de operación juntamente con la bibliografía utilizada se sentaron las bases para la elección de los sistemas de excitación de cada generador.

La renovación de estos equipos tiene como fin primordial mejorar la eficiencia de operación de las unidades generadoras de la planta Hidroeléctrica Los Esclavos en cuanto a continuidad de servicio, estabilidad de voltaje y tiempos de reacción inmediatos ante disturbios en el sistema de potencia. Por lo tanto, los beneficios de la actualización de los equipos de control de voltaje de los generadores ven reflejados en innumerables beneficios para planta.



# 1. INTRODUCCIÓN

El propósito de este estudio es determinar los sistemas de excitación más viables para los generadores síncronos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, evaluando sus características para que sean sistemas eficientes, modernos, robustos, modulares, compactos, económicos y compatibles con los demás equipos de control de generación de energía eléctrica dentro de la planta.

Un sistema de potencia está conformado por tres componentes principales, los cuales son: centrales de generación, sistema interconectado (redes de transmisión y distribución) y finalmente por los consumidores o usuarios que cada día requieren mejores índices de calidad de energía.

Para lograr que un sistema eléctrico de potencia cumpla con los altos estándares de calidad de energía, se debe trabajar en sus tres componentes principales. El primer punto para garantizar un buen servicio eléctrico al usuario final se debe tratar en las centrales de generación por lo cual es necesario mejorar la calidad de respuesta de los equipos de control y así cumplir con los estándares impuestos por los entes reguladores del Sistema Nacional Interconectado (SNI).

Con la modernización de los sistemas de excitación, se busca fortalecer y automatizar el proceso de generación de energía eléctrica dentro de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos y así contribuir a la mejora del Sistema Nacional Interconectado, en cuanto a mejores niveles de calidad, confiabilidad y seguridad; debido a que en la actualidad se han incrementado el uso de cargas no lineales y los sistemas de potencia actuales están constantemente propensos a sufrir

cambios súbitos de carga y generación, fallas en los equipos, reconfiguraciones en líneas de transmisión-distribución y perturbaciones atmosféricas, las cuales afectan la forma de onda de tensión en cuanto a su magnitud, frecuencia y ruido eléctrico, lo que ha hecho que el índice de cumplimiento de estándares de calidad en lo referente a la calidad de la energía suministrada a los usuarios haya incrementado.

## 2. ANTECEDENTES

La Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, propiedad del Instituto Nacional de Electrificación (INDE), con sede en el municipio de Cuilapa, departamento de Santa Rosa, Guatemala, inició operaciones en agosto de 1966. Cuenta con una capacidad instalada de 14 MW compuesta por dos unidades generadoras de 7.5 KVA por unidad. Cada unidad de generación cuenta un SE que permite regular los flujos de potencia reactiva capacitiva e inductiva y así mantener constante el voltaje en bornes de terminación en su valor nominal, sin embargo, debido al paso de los años, estos sistemas se han vuelto obsoletos, no se consiguen repuestos en el mercado y se pierde generación en el tiempo fuera de línea por lo cual es necesario realizar su cambio para mejorar la eficiencia de operación de la planta.

Últimamente, con el avance de la ingeniería eléctrica, existen muchas investigaciones que respaldan la idea de contar con sistemas de excitación eficientes, modulares y compactos para la operación de los generadores, así como se indica a continuación:

El sistema de excitación de una máquina síncrona se define como el conjunto de máquinas, dispositivos y mecanismos, que se utilizan para suministrar y mantener la regulación de la corriente directa al devanado de inducción. Entre sus principales funciones del SE del generador están: proporcionar corriente continua al devanado inductor del generador, regular el voltaje en bornes del generador, controlar los flujos de la componente reactiva capacitiva o inductiva, mejorar la estabilidad del

sistema nacional y proporcionar funciones de limitación, control y acción al generador. (Vázquez, 2009, p. 3).

El RAV está compuesto por muchas etapas funcionales, que consisten en: excitar el inductor del generador a partir del voltaje de cebado inicial de la central hidroeléctrica, ajustando el voltaje del generador al valor nominal en forma controlada en un lapso corto de tiempo, rectificar en forma controlada la tensión del transformador de excitación para posteriormente aplicarla en su inductor (canal automático) o la componente de excitación inicial (canal manual), mantener a la unidad generadora dentro de los límites permisibles de operación nominal controlando la corriente sin salir de lo que establece la curva de capacidad de la unidad generadora, estabilizar las funciones dinámicas y estáticas de los SEPS interconectados y participar en la regulación de tensión. (SERPRO S.A., 2012, p. 4).

Cuando el SEP opera en estado estable o régimen permanente, el SE controla la tensión del generador, la cual debe permanecer dentro de un rango de variación muy pequeña para las diferentes etapas de operación del sistema, también es el medio para acondicionar la componente reactiva entre las unidades que están operando en paralelo. Los sistemas de excitación también deben influir durante los procesos transitorios (Lira Sosa, 2009, p. 1).

Cuando el excitador funciona en la modalidad auto-excitado, su campo se obtiene a través de un rectificador con un puente de tiristores que toma la energía en bornes del propio excitador de la máquina. De esta forma, los rectificadores obtienen el control sobre la excitación del alternador, la cual modifica la tensión en bornes y, en consecuencia, modifica la tensión

continua de alimentación del campo del generador síncrono. (Nizama, 2013, p. 20).

El (RAV) controla el nivel de voltaje en los bornes del generador. Algunas veces se utiliza la compensación de carga para regular una tensión que es representativa de la tensión en un punto interno o externo. Esto se logra sumando circuitos a las funciones del regulador. El compensador tiene una resistencia que se ajusta  $R_c$ , y una reactancia inductiva  $X_L$  que simulan la impedancia entre las terminales del generador y el punto en el cual la tensión es controlada. (Zeceña Aguirre, 2012, p. 110).

La regulación de voltaje del Sistema Nacional Interconectado según el AMM en su norma de Coordinación Operativa (2008) establece que “El control de tensión se obtiene por los siguientes medios, generadores sincrónicos equipados con reguladores de tensión, los cuales, complementados con lazos estabilizantes (PSS), pueden contribuir a mejorar la estabilidad dinámica del SIN” (p.5).



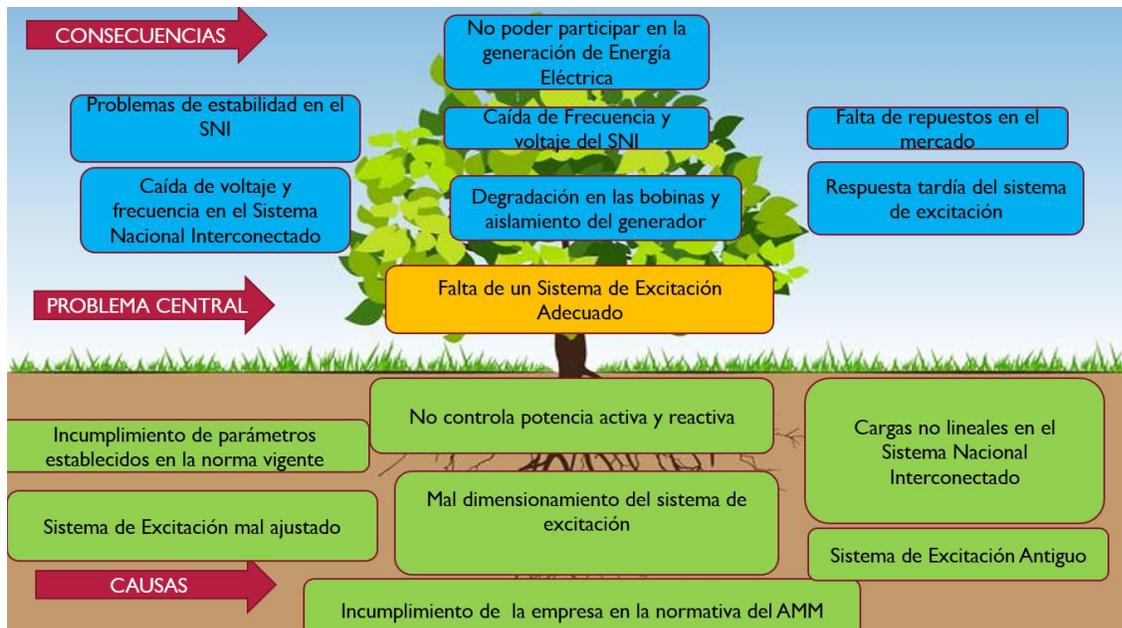
### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 3.1 Descripción del problema

En la actualidad muchos de los *black out* o apagones parciales que han ocurrido en el Sistema Nacional Interconectado (SNI) en Guatemala se han originado por disturbios en la tensión, este problema ocasiona pérdidas económicas y vulnerabilidad a un colapso de tensión y problemas de estabilidad estática y dinámica del SIN.

Existen muchas variables involucradas en este problema, una de ellas son los tiempos de respuesta de los sistemas de excitación en las plantas generadoras de energía eléctrica, debido a la incapacidad para regular el flujo de potencia reactiva ya sea consumida o entregada por los generadores a la red nacional. Además, debido a las exigencias de calidad de potencia, impuestas por el Administrador del Mercado Mayorista (AMM) en su norma de Coordinación Operativa No. 4. *Determinación de los criterios de la calidad y niveles mínimos de servicio*, se definieron parámetros de regulación de la energía para poder participar en la generación.

Figura 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

### 3.2 Formulación del problema

El presente estudio toma suma importancia debido a la necesidad presente de contar con sistemas de excitación modernos y eficientes que permitan mejorar la eficiencia de operación de los generadores síncronos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, considerando que los equipos de control de voltaje que se encuentran en operación han finalizado su ciclo de vida.

- Pregunta central

¿Existe alguna forma de mejorar los sistemas de excitación de los generadores de la planta Hidroeléctrica Los Esclavos que garanticen la continuidad del servicio y den estabilidad al Sistema Nacional Interconectado?

- Preguntas auxiliares
  - ¿Cuáles son las características técnicas por considerar para la elección de un sistema de excitación para un generador?
  - ¿Cuál es el beneficio económico que traerá la modernización de los sistemas de excitación?
  - ¿Cuáles son los criterios técnico-económicos a considerar para la elección del sistema de excitación que cumpla con las normativas vigentes para participar en la generación de energía eléctrica en Guatemala?
  - ¿Cuáles son las deficiencias en las que se encuentran actualmente los sistemas de excitación en operación y los ingresos que se dejan de percibir por el uso de estos?

### **3.3 Delimitación del problema**

El propósito de este estudio es determinar los sistemas de excitación más viables para los generadores síncronos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, evaluando sus características para que sean sistemas eficientes, modernos, robustos, modulares, compactos, económicos y compatibles con los demás equipos de control de generación de energía eléctrica dentro de la Planta.



## 4. JUSTIFICACIÓN

Este estudio toma suma relevancia debido a la necesidad presente de contar con sistemas de excitación vigentes con mayor robustez y confiabilidad para mejorar la operación de los generadores síncronos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, considerando que los equipos que se encuentran en operación han finalizado su ciclo de vida y tomando en cuenta el avance de la electrónica de potencia, ahora existen sistemas de excitación con tiempos de regulación más precisos que permiten tener un control más eficiente en la inyección de la corriente de campo en el inductor del generador con lo cual se logra dar más estabilidad, calidad y seguridad al voltaje en terminales del generador.

Muchos de los apagones parciales o totales que han ocurrido en el Sistema Nacional Interconectado (SNI) se han originado por problemas en el control de la tensión cuando esta cae en niveles inferiores muy bajos que ya no son controlables, por lo cual se producen pérdidas económicas y el Sistema de Potencia cae a un colapso de tensión y problemas de estabilidad estática y dinámica, esto debido a la incapacidad de los sistemas de excitación para regular el flujo de potencia reactiva ya sea consumida o entregada por los generadores a la red nacional.

Además, debido a las exigencias de calidad de potencia, impuestas por el Administrador del Mercado Mayorista (AMM) en su norma de Coordinación Operativa No. 4. Determinación de los criterios de la calidad y niveles mínimos de servicio, se definieron parámetros de regulación de la energía para poder participar en la generación.

Es por esto por lo que surge la necesidad de una propuesta de mejora para el cambio de los sistemas de excitación de los generadores sincrónicos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos que cumplan con satisfacer todos los requisitos mencionados anteriormente y que proteja la integridad del generador, suministre buena calidad de tensión ante disturbios en la red y controle los flujos de potencia reactiva entregada o absorbida por el generador.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Proponer la mejora de los sistemas de excitación de las unidades generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos.

### **5.2 Específicos**

1. Establecer un estudio técnico para la modernización de los sistemas de excitación de las unidades generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos.
2. Plantear un estudio económico para la toma de decisiones en materia de renovación de los sistemas de excitación de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos.
3. Establecer el sistema de excitación más viable para los generadores síncronos de la planta de acuerdo con sus características económicas, técnicas y normativas vigentes de operación en Guatemala.
4. Examinar el estado actual de los sistemas de excitación y comparar costos de operación de los sistemas de excitación en funcionamiento con un sistema de excitación nuevo.



## **6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

Actualmente en Guatemala se deben cumplir muchos requisitos para participar en la generación de energía eléctrica por lo cual se debe contar con equipos modernos en las plantas de generación que cumplan con las normativas vigentes de operación del Administrador del Mercado Mayorista.

Este estudio pretende ser una base sólida para futuras renovaciones o actualizaciones de los equipos de regulación de voltaje de las máquinas generadoras de energía eléctrica existentes en el país para que puedan cumplir con los índices de calidad de potencia impuestas por los entes reguladores del país.

Para realizar este estudio que pretende identificar el sistema de excitación adecuado para cada generador de la planta se realizarán los levantamientos de datos de acuerdo con las características técnicas y operativas de cada generador y se realizarán los análisis respectivos del sistema a elegir, pero que además cumpla con las normativas vigentes de operación y sea la mejor opción económica.

Dado que la maestría existe en el ámbito de la energía, este estudio pretende identificar la forma en que se aplica la parte de diseño y operación de los proyectos hidroeléctricos que es parte de la maestría y abarca esta investigación.

Derivado que la Maestría de Energía y Ambiente, existe el área energética este estudio que puede incluirse en la línea de operación de una central

hidroeléctrica y contribuye específicamente a desarrollar una metodología técnica para la elección adecuada de un sistema de excitación para un generador específico de acuerdo con sus características técnicas y normativas de operación

Al ser un profesional con conocimientos en la ingeniería eléctrica este proyecto contribuye a fortalecer nuestro Sistema Nacional Interconectado haciéndolo más robusto ante cambios bruscos de flujos de potencia activa y reactiva.

## **7. MARCO TEÓRICO**

### **7.1. Hidroeléctrica**

Las Centrales Hidroeléctricas obtienen su energía primaria a partir de la energía potencial presente en una columna de agua de una altura determinada. El lugar donde es almacenada el agua recibe el nombre de embalse, el canal transporta el agua del embalse a la tubería de presión que lleva el agua a la Casa de Máquinas. (Nuñez, 2015, p. 108)

Básicamente una central hidroeléctrica es la que aprovecha la energía del agua debido a la altura que esta posee. Se compone de cuatro partes principales que son la presa, canal, tubería de presión y casa de máquinas, lugar donde se encuentran las unidades generadoras.

### **7.2. Generador síncrono**

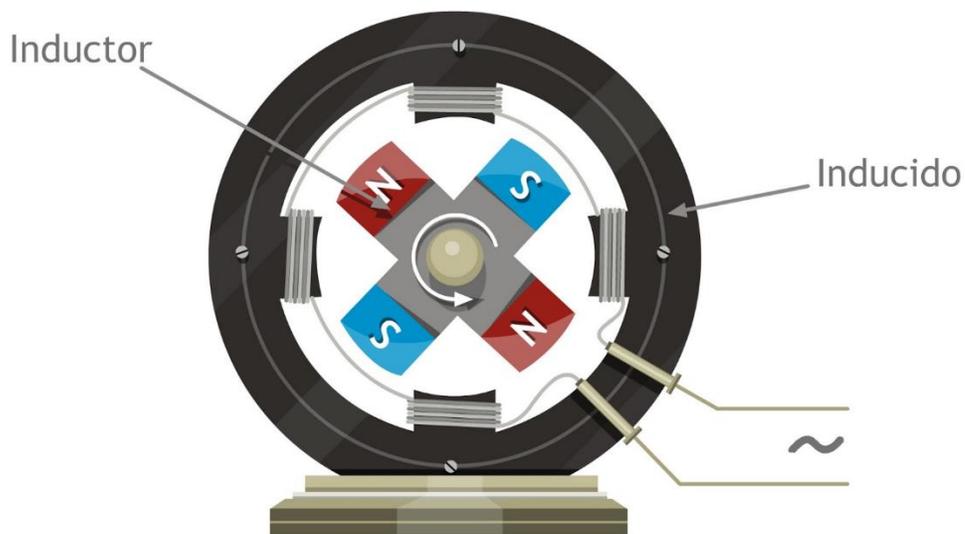
“Los generadores síncronos son máquinas eléctricas cuya velocidad de rotación rpm está vinculada rígidamente con la frecuencia  $f$  de la red de corriente alterna” (Mora, 2015, p. 381).

Un generador síncrono es una máquina eléctrica que tiene una velocidad de sincronismo proporcional a la frecuencia con que la máquina opera y que también es la misma en su rotor o inductor, de tal forma que giran de manera sincronizada y que trabajan mediante el principio de la Ley de Inducción de Faraday.

Chapman (2012), menciona que en un generador se produce un campo magnético en el devanado giratorio por medio del diseño de este como un imán permanente o mediante la aplicación de una cc a su bobinado para crear un electroimán. Por consiguiente, la parte giratoria del generador se mueve por medio de un motor primario también llamado turbina que puede ser de muchos tipos y produce un delta de flujo de campo magnético giratorio dentro de la unidad generadora. Este flujo magnético variante en el tiempo induce ondas sinusoidales o voltajes dentro de los devanados del inducido del generador. Dos términos que por lo general se usan para denominar los devanados de una máquina que son devanados de campo y devanados del inducido.

En general, el primer término se aplica a los devanados que producen el campo magnético principal en la máquina, mientras que el segundo se aplica a los devanados donde se induce el voltaje principal. (p.147)

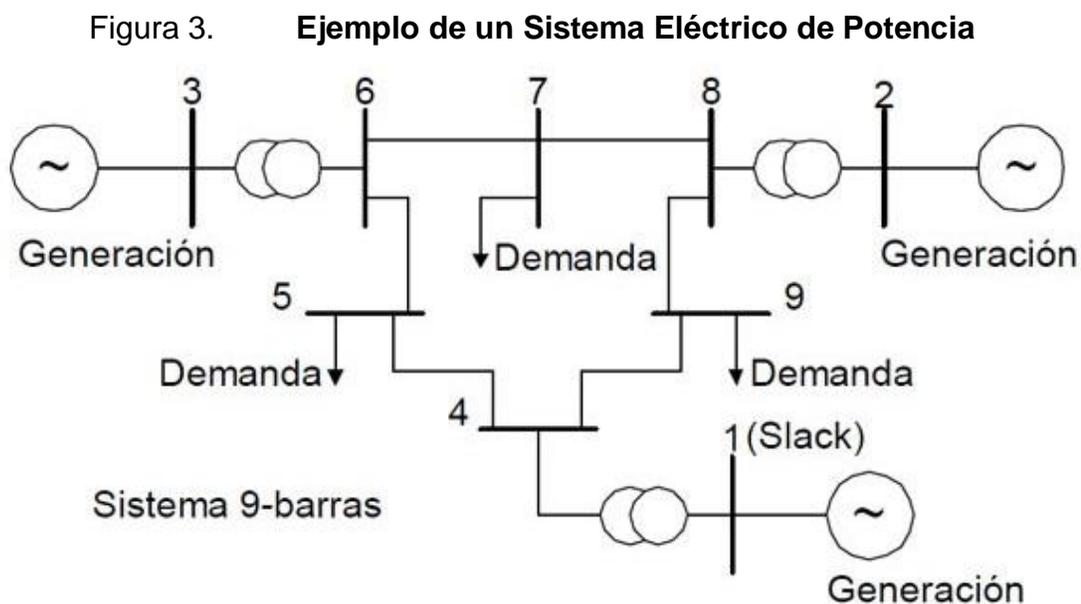
Figura 2. **Partes de un generador**



Fuente: Endesa (2017) *El generador eléctrico*.

### 7.3. Parámetros de estabilidad en sistemas de potencia

Para los sistemas de potencia modernos existen dos parámetros claves de calidad de la energía para mantener su estabilidad y que este no presente problemas de estabilidad dinámica y estática.



Fuente: SciELO (2018). *Sistema eléctrico de potencia*.

En la NCO-04 (2021) del Administrador del Mercado Mayorista (AMM) se define a la Inestabilidad Dinámica como:

La forma cuando el sistema es operado muy cerca de una condición inestable y pueden aparecer pequeñas oscilaciones no amortiguadas sin ninguna causa aparente

La inestabilidad estática o transitoria normalmente es el resultado de una falta y/o pérdida de generación que deriva a oscilaciones no amortiguadas entre partes del sistema, las cuales pueden llegar a su separación en pocos segundos. (p. 7)

Las faltas anteriormente mencionadas son originadas por la variación de dos parámetros importantes en un Sistema de Potencia, las cuales son: Frecuencia y Tensión.

#### **7.4. Estabilidad en frecuencia**

La frecuencia del Sistema Nacional Interconectado tiene un valor nominal de 60 Hertz, en condiciones normales de operación obtiene valores de 59.9 a 60.1 Hertz y en condiciones de emergencia de 59.8 y 60.2 Hertz.

El control de la frecuencia en un SEP se obtiene mediante:

- Regulación primaria: por medio del gobernador de los generadores
- Regulación Secundaria: mediante unidades de generación que incorporan un control automático o control local de frecuencia.
- Reducción manual de la carga conectada en ese instante
- Disminución de tensión en el SEP

La frecuencia está relacionada directamente proporcional a la inyección de energía de entrada de las turbinas de los generadores (agua, gas, vapor, radiación solar, viento), donde un cambio repentino en la energía activa del sistema, implica un delta de cambio en su frecuencia.

Un sistema de potencia tendrá estabilidad en frecuencia si se cumple la siguiente la siguiente condición:

$$\sum P_{in} = \sum P_{out} + \sum P_{loss} \quad (1)$$

Dicho de otra forma, la ecuación (1) explica que la estabilidad en frecuencia del Sistema de Potencia se mantendrá cuando la potencia activa de entrada sea igual a la potencia activa de salida más las pérdidas del sistema.

## **7.5. Estabilidad en tensión**

“El control de las tensiones del SNI es crítico para asegurar que los niveles de tensión de los usuarios permanezcan dentro de valores aceptables como para no producir daños a equipos por alta o baja tensión” (NCO-04, 2021, p. 6).

La estabilidad en tensión se obtiene por los siguientes medios:

- Generadores síncronos equipados con reguladores de tensión, los cuales, complementados con lazos estabilizantes (PSS), pueden contribuir a mejorar la estabilidad dinámica del SNI
- Compensadores sincrónicos o compensadores estáticos de VAR´s
- Capacitores o Reactores
- Conmutadores de tomas en transformadores y auto transformadores
- Unidades generadoras forzadas
- Desconexión Automática de Carga por Bajo Voltaje (DACBV)
- Desconexión Automática de Transmisión por Alto Voltaje (DATAV)

La tensión en un Sistema de Potencia es dependiente de los cambios de potencia reactiva del mismo. Un cambio de potencia reactiva afecta al valor nominal del voltaje del sistema.

Un sistema de Potencia tendrá estabilidad en tensión si se cumple la siguiente condición:

$$\sum Q_{gen} = \sum Q_{demanda} + \sum Q_{pérdidas} \quad (2)$$

En otras palabras, la ecuación (2) explica que el sistema de potencia permanecerá con tensión constante si la Potencia Reactiva entregada o generada es igual a la potencia reactiva demandada más las pérdidas de Potencia Reactiva del sistema.

Como bien se estableció anteriormente la estabilidad del Sistema Nacional Interconectado es de mucha importancia para brindar un buen servicio de calidad de energía a los grandes y pequeños usuarios.

Regulación primaria de frecuencia y tensión:

La regulación primaria de Frecuencia y Tensión de un Sistema de Potencia se realiza en las centrales de generación a través de los equipos de control de cada generador.

La regulación primaria constituye la base fundamental para dar estabilidad a un sistema de potencia, por lo cual se requieren de equipos capaces y eficientes de realizar esta operación.



A continuación, se define lo que es un sistema de excitación.

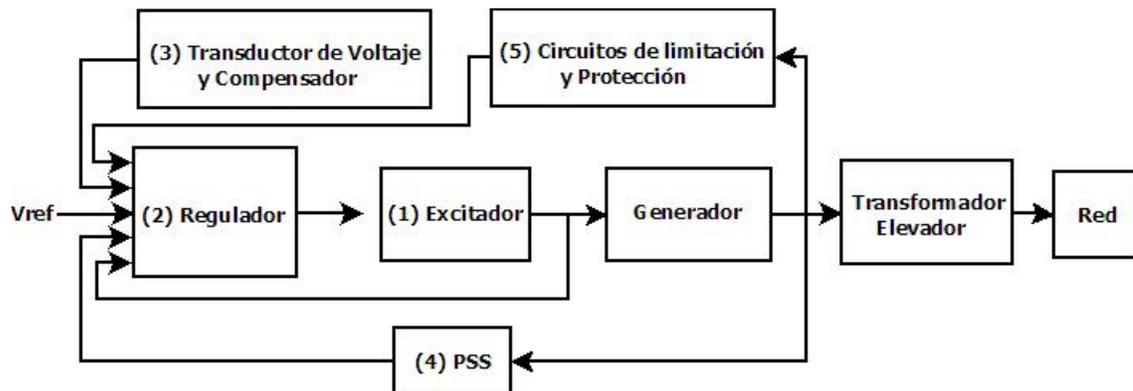
## **7.6. Sistema de excitación**

IEEE STD 421.1 (2007) describe que un sistema de excitación “es el equipo que proporciona corriente de campo para una máquina síncrona, incluidos todos los elementos de potencia, regulación, control y protección” (p. 4).

Las funciones del sistema de excitación son las siguientes:

- Inyectar la corriente directa en el inductor para producir el campo magnético necesario para la conversión de torque mecánico a eléctrico de la máquina síncrona.
- Mantener constante en su valor nominal la tensión de salida del generador
- Controlar el flujo de potencia reactiva (KVAR) entregada o absorbida por el generador.
- Contribuir a la estabilidad del sistema de potencia.
- Proteger el generador para que no opere fuera de los límites establecidos por el fabricante para su operación nominal

Figura 5. **Componentes generales del sistema de regulación de voltaje y frecuencia de un generador**



Fuente: IEEE STD 421.1. (2007). *Definitions for excitation systems for synchronous machines.*

Los sistemas de excitación se clasifican en dos grandes grupos: estáticos y dinámicos

Sistema de excitación dinámico o sistema de Excitación con diodos rotativos Brushless:

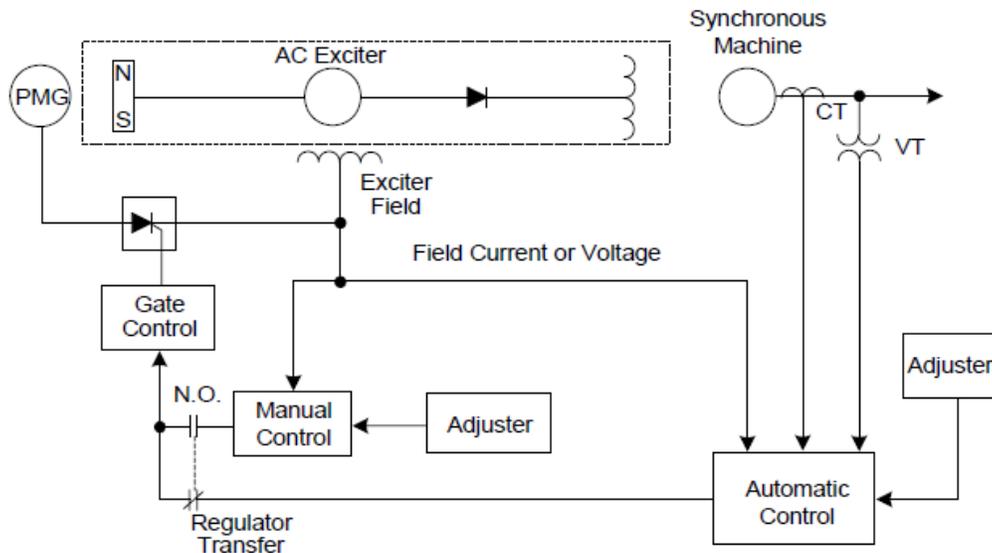
“El Sistema de Excitación Rotativo consiste en un generador de corriente continua con un regulador acoplado directamente, o por medio de una caja reductora, al eje del generador principal, el cual excita el campo de dicho generador” (Nuñez, 2015).

El *Sistema de* Excitación Dinámico consiste en los siguientes componentes principales:

- Excitador Rotativo o Excitatriz
- Generador de DC con imanes permanentes (PMG)
- Regulador Automático de Voltaje (AVR) con control manual y automático
- Puente de diodos giratorios

- Transformadores de Potencial (PT's)
- Transformadores de Corriente (CT's)

Figura 6. Sistema de excitación dinámico



Fuente: IEEE STD 421.1. (2007). *Definitions for excitation systems for synchronous machines.*

Sistema de Excitación Estático o excitación directa al campo:

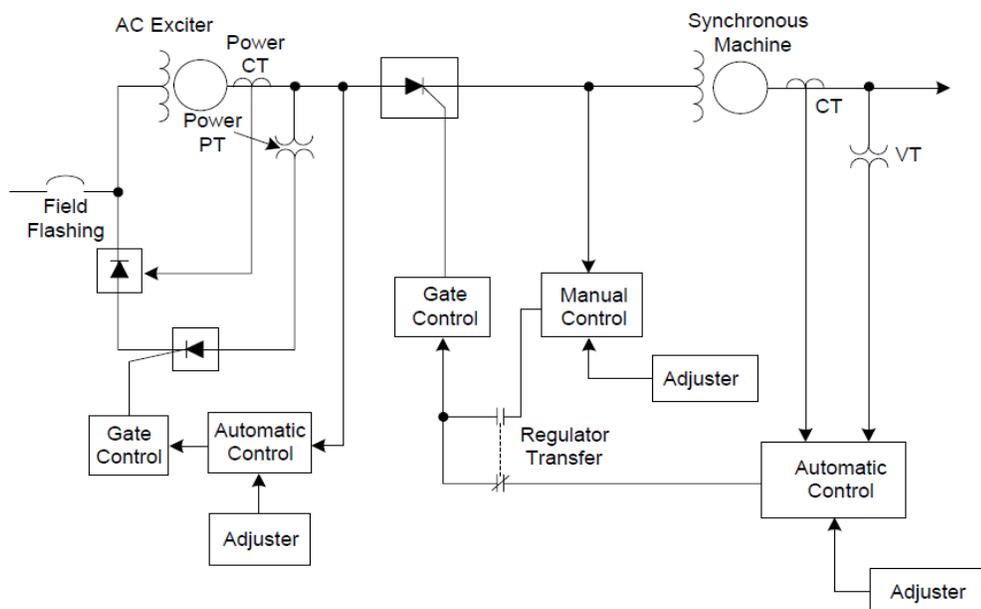
“El Sistema de Excitación Estático es un sistema no giratorio que obtiene la energía de excitación del campo del generador a partir de los terminales de la armadura y a través de los devanados potenciales y de corriente de los transformadores de excitación” (Nuñez, 2015).

El sistema estático consiste los siguientes elementos fundamentales:

- Transformador de excitación tipo seco de alimentación del sistema
- Rectificador trifásico compuesto por módulos de SCR's o puente de tiristores

- Regulador de tensión controlados por corriente alterna y continua
- Regulador Automático de Voltaje (AVR) con control manual y automático
- Excitador con escobillas o sin escobillas
- Preexcitación o circuito de cebado inicial
- Transformadores de Potencial (PT's)
- Transformadores de Corriente (CT's)

Figura 7. **Elementos de un sistema de excitación estático o directo al campo**



Fuente: IEEE STD 421.1. (2007). *Definitions for excitation systems for synchronous machines.*

Para la justificación económica de la compra de un nuevo sistema de excitación se deben evaluar ciertos indicadores para darle validez, estos son:

VAN:

Es un análisis financiero que sirve para tomar decisiones respecto a la inversión en un proyecto para conocer cuánto se va a ganar o perder con esa inversión, consiste en la actualización de los cobros o pagos, también se le conoce como valor presente neto (VPN). La expresión para determinar el VAN es la siguiente:

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{F_t}{(1+i)^t}$$

(3)

TIR:

La tasa interna de retorno o también llamada tasa interna de rentabilidad se puede utilizar como un indicador de rentabilidad de un proyecto donde a mayor TIR hay mayor rentabilidad, esta tasa se compara con una tasa mínima o tasa de recorte y el costo de oportunidad del proyecto. Para calcular la TIR se emplea el VAN haciéndolo cero de la siguiente manera:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+TIR)} + \frac{F_2}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+TIR)^n} = 0$$

(4)

Amortización:

En economía la amortización se refiere a la depreciación o disminución de valor de un producto o equipo con el paso del tiempo ya que como se puede intuir, todos los bienes van perdiendo valor conforme avanza el tiempo.

## **8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS**

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES GENERALES
  - 1.1. Central Hidroeléctrica Los Esclavos
    - 1.1.1. Misión y Visión
    - 1.1.2. Presa y obras conexas
      - 1.1.2.1. Cámara de Carga
      - 1.1.2.2. Desarenadores
      - 1.1.2.3. Canal
      - 1.1.2.4. Tubería de presión y desfogue
    - 1.1.3. Casa de Máquinas
2. FUNCIONAMIENTO Y COMPONENTES DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN DE UN GENERADOR
  - 2.1. Sistema excitación
  - 2.2. Principio de funcionamiento de un sistema excitación

- 2.3. Tipos de sistemas de excitación
  - 2.3.1. Excitación con diodos rotativos o Brushless
  - 2.3.2. Excitación estática o excitación directa al campo
- 2.4. Curva de capacidad o capacidad de un generador
- 2.5. Limitadores
  - 2.5.1. Limitador de excitación mínima (MEL)
  - 2.5.2. Limitador de excitación máxima (OEL)
  - 2.5.3. Limitador de Volt/Hertz
- 2.6. Regulador de voltaje
  - 2.6.1. Generador de sincronismo de pulsos
  - 2.6.2. Sincronizador de pulsos
  - 2.6.3. Aislador de pulsos
  - 2.6.4. Modo de operación manual
  - 2.6.5. Modo de operación automático
- 2.7. Circuito de cebado inicial con banco de baterías
- 2.8. Transformador de excitación
- 2.9. Transformadores de medición
  - 2.9.1. Transformadores de corriente (CT's)
  - 2.9.2. Transformadores de potencial (PT's)
- 2.10. Puente de tiristores

### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

- 3.1 Sistemas de excitación de las unidades generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos
  - 3.1.1. Situación actual y antecedentes
  - 3.1.2. Sistema de excitación unidad generadora 1
  - 3.1.3. Sistema de excitación unidad generadora 2
- 3.2 . Estudio técnico para la mejora de los sistemas de excitación
  - 3.2.1. Marco Regulatorio

- 3.2.2. Normas de Coordinación Operativa del AMM
- 3.2.3. Normas complementarias
- 3.3. Requerimientos técnicos para la elección del sistema de excitación de los generadores síncronos de Planta Hidroeléctrica Los Esclavos.
  - 3.3.1. Características del canal manual
    - 3.3.1.1. Potenciómetro digital de referencia 70E
    - 3.3.1.2. Seguidor automático
    - 3.3.1.3. Sistema de retroalimentación de la corriente de excitación (Shunt de corriente)
    - 3.3.1.4. Amplificador de error de corriente
    - 3.3.1.5. Sistema de estabilización
    - 3.3.1.6. Amplificador de referencia de ángulo
  - 3.3.2. Características del canal automático
    - 3.3.2.1. Potenciómetro digital de referencia 90R
    - 3.3.2.2. Sistema de retroalimentación del voltaje del generador (CT'S y PT'S)
    - 3.3.2.3. Compensador de reactivos
    - 3.3.2.4. Limitador de máxima excitación (OEL)
    - 3.3.2.5. Limitador de mínima excitación (MEL)
    - 3.3.2.6. Limitador Volt/Hertz
    - 3.3.2.7. Función escalón
    - 3.3.2.8. Estabilizador del sistema de potencia (PSS)
  - 3.3.3. Rectificador
  - 3.3.4. Transductores
  - 3.3.5. Puente de tiristores y sus protecciones
  - 3.3.6. Protecciones del regulador de tensión
  - 3.3.7. Transformador de excitación
  - 3.3.8. Transformadores de potencial (PT's)

- 3.3.9. Transformadores de intensidad (CT's)
- 3.4. Estudio económico para la toma de decisiones en materia de renovación de los sistemas de excitación
  - 3.4.1. Variables para el estudio económico
    - 3.4.1.1. Inversión inicial
    - 3.4.1.2. Depreciación y amortización
    - 3.4.1.3. Costos de oportunidad
  - 3.4.2. Análisis y resultados
- 3.5. Propuesta técnica económica para la modernización de los sistemas de excitación de las unidades generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos
  - 3.5.1. Evaluación técnica de opciones
  - 3.5.2. Evaluación económica de opciones
  - 3.5.3. Propuesta final

#### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICE

ANEXOS

## **9. METODOLOGÍA**

### **9.1. Características del estudio**

En esta investigación las variables estudiadas, potencia reactiva y voltaje, pueden ser manipuladas por el sistema de excitación del generador por lo cual se utilizará un método de investigación experimental ya que el fin de contar con un sistema de excitación es mantener en un valor constante estos valores.

Además, la investigación será del tipo correlacional ya que se pretende escoger el sistema de excitación más idóneo para cada generador y esto es posible realizarlo solamente evaluando las características técnicas del generador, por lo cual se busca correlacionar las dos variables.

### **9.2. Unidades de análisis**

Las unidades de estudio serán los dos generadores síncronos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos en el municipio de Cuilapa, departamento de Santa Rosa. En dicha planta actualmente se encuentran con problemas derivados de la falta de repuestos y obsolescencia de los sistemas de excitación de las dos unidades generadoras.

### **9.3. Variables**

Las variables para estudiar durante el desarrollo de esta investigación serán las que se indican a continuación:

- Sistema de excitación

- Transformador de excitación
- Regulador de voltaje
- Puente de tiristores
- Generador
- Voltaje
- Potencia activa
- Potencia reactiva
- Potencia aparente

Tabla I. **Desglose de variables principales**

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL
Generador Síncrono	“Los generadores síncronos son máquinas eléctricas cuya velocidad de rotación $n$ (rpm) está vinculada rígidamente con la frecuencia $f$ de la red de corriente alterna, con la cual trabaja” (Mora, 2015, p. 381).
Sistema de Excitación	IEEE STD 421.1 (2007) describe que un sistema de excitación “es el equipo que proporciona corriente de campo para una máquina síncrona, incluidos todos los elementos de potencia, regulación, control y protección” (p. 4).

Fuente: elaboración propia.

Las variables indicadas anteriormente son de tipo cuantitativo y cualitativo. Al analizarlas y correlacionarlas permitirán realizar el análisis de los resultados para la elección del sistema de excitación idóneo para cada generador.

#### 9.4. Resultados esperados

Con esta investigación se espera tener como resultado una propuesta de cambio de los sistemas de excitación existentes en la planta por sistemas de excitación modernos, eficientes y robustos que satisfagan la necesidad presente de contar con equipos modernos debido a que los que se encuentran en

operación han concluido su vida útil y carecen de repuestos debido a su obsolescencia.

Además, con esta propuesta también se busca fortalecer el Sistema Nacional Interconectado ya que la evolución de las cargas ha traído consigo cambios muy bruscos de los parámetros eléctricos en el sistema de transmisión debido al aumento de cargas no lineales, por lo cual, al contar con equipos modernos y eficientes se tendrán tiempos de respuesta más cortos para mantener estos parámetros en su valor nominal de operación y no caer en problemas de estabilidad de tensión y frecuencia.

#### **9.5. Fases del estudio**

A continuación, se describirán cuatro fases del estudio que serán aplicadas durante el desarrollo de la investigación. Se realizará por medio de recolección de información en campo, libros, datos y entrevistas al personal técnico y administrativo de la planta hidroeléctrica Los Esclavos.

Fase 1: Exploración bibliográfica, recopilación de información técnica y estado actual de los sistemas

En esta fase, se detallarán conceptos claves para el entendimiento del tema y su finalidad, definiendo el sistema de excitación de un generador, su importancia en la generación de la energía eléctrica, su principio de funcionamiento, los tipos de sistemas de excitación que existen, las ventajas y desventajas de cada uno, los componentes que lo conforman y la manera en que estos se conectan y coordinan para regular y delimitar la corriente de campo del inductor del generador, para que este

opere en óptimas condiciones.

Además, se abordará la problemática actual en que se encuentra la generación de energía eléctrica en la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos debido a los sistemas de excitación que se encuentran en operación, estudiando las características técnicas de cada uno y las partes que los conforman, se tomarán datos en campo de cada equipo y el estado en que se encuentran.

Fase 2: Evaluación de la información bibliográfica e información recopilada en la planta para estudio técnico

Esta fase se enfocará en el estudio de todas las características técnicas que debe cumplir un sistema de excitación moderno para una selección adecuada a la necesidad presente del cambio de los equipos existentes en la planta, tomando como base la normativas vigentes y características técnicas de operación de los sistemas.

Se realizarán cálculos para los requisitos técnicos que debe cumplir el transformador de potencial, transformador de corriente, transformador de excitación, regulador de voltaje, banco de baterías, puente de tiristores, entre otros; para la correcta selección de cada equipo que conforma todo el sistema.

Fase 3: Estudio económico para la toma de decisiones en materia de renovación de los sistemas de excitación.

Esta fase se enfoca en la comparación de las características económicas de los sistemas de excitación existentes en el mercado por medio de indicadores de costo, eficiencia y calidad. También se realizará la comparación entre el costo de sustitución por un equipo nuevo y el costo de oportunidad generado por la

pérdida de generación de energía eléctrica derivada de una falla en el sistema de excitación que está en funcionamiento.

Fase 4: Propuesta técnica económica para la modernización de los sistemas de excitación.

Este capítulo tendrá como fin primordial establecer la opción más viable para la sustitución de los sistemas de excitación que cumplan con los requerimientos técnicos y económicos establecidos en los capítulos anteriores.



## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Con la finalidad de cumplir con el objetivo general y objetivos específicos de la investigación, se plantea realizar la investigación en cuatro fases que se describieron anteriormente.

Para la exploración bibliográfica se acudirá a fuentes confiables como: artículos científicos, libros relacionados con el tema, normativas nacionales e internacionales, mismas que serán de suma importancia para el entendimiento del tema, realización del marco teórico de la investigación y dimensionamiento de los equipos nuevos.

Se realizará también una investigación en campo como parte del desarrollo de los primeros capítulos concernientes al estado actual de los sistemas de excitación que se encuentran en funcionamiento. Se realizarán entrevistas a técnicos electricistas, personal administrativo, ingenieros de turno, operadores de planta e ingenieros electricistas jefes de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos.

Toda la información tanto bibliográfica como la recopilada en campo se ordenará y será analizada para determinar los problemas existentes en la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, referente a los sistemas de excitación en funcionamiento y para dimensionar los nuevos sistemas.

Con la finalidad de cumplir con los objetivos de la investigación, se realizará una recopilación de datos en campo de las dos unidades de generación

de energía eléctrica para dimensionar el sistema de excitación de cada una, los datos a recopilar se describen en la siguiente tabla:

**Tabla II. Datos recopilados en campo del generador 1**

<b>Datos de operación de unidad generadora 1</b>	<b>Valor</b>
Año de fabricación	
Potencia nominal	
Potencia máxima	
Voltaje nominal	
Intensidad nominal	
Cos phi	
Corriente de excitación nominal	
Voltaje de excitación nominal	
Corriente de excitación máxima	
Voltaje de excitación máximo	
Frecuencia	
Velocidad nominal	
Conexión	
Secuencia de fases	
Se cuenta con la curva de vacío del fabricante	
Se cuenta con la curva de capacidad del fabricante	

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Datos recopilados en campo del generador 2**

<b>Datos de operación de unidad generadora 2</b>	<b>Valor</b>
Año de fabricación	
Potencia nominal	
Potencia máxima	
Voltaje nominal	
Intensidad nominal	
Cos phi	
Corriente de excitación nominal	
Voltaje de excitación nominal	
Corriente de excitación máxima	
Voltaje de excitación máximo	
Frecuencia	
Velocidad nominal	
Conexión	
Secuencia de fases	
Se cuenta con la curva de vacío del fabricante	
Se cuenta con la curva de capacidad del fabricante	

Fuente: elaboración propia.



# 11. CRONOGRAMA

Tabla IV. Cronograma de actividades

FASE	INICIO				FIN				ENERO				FEBRERO				MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO				SEPTIEMBRE				OCTUBRE			
	02/01/2023	02/01/2023	02/01/2023	02/01/2023	24/03/2023	24/03/2023	24/03/2023	24/03/2023	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4								
<b>Fase 1: Exploración bibliográfica, recopilación de información técnica y estado actual de los sistemas.</b>	02/01/2023	02/01/2023	02/01/2023	02/01/2023	24/03/2023	24/03/2023	24/03/2023	24/03/2023	[Gantt bar for Fase 1]																																							
Recopilación bibliográfica, exploración de información en artículos científicos, tesis de pregrado y postgrado, normas técnicas	02/01/2023	02/01/2023	02/01/2023	02/01/2023	24/03/2023	24/03/2023	24/03/2023	24/03/2023	[Gantt bar for Recopilación bibliográfica]																																							
Entrevistas a personal técnico y administrativo de la planta	20/01/2023	20/01/2023	20/01/2023	20/01/2023	03/02/2023	03/02/2023	03/02/2023	03/02/2023	[Gantt bar for Entrevistas]																																							
Recopilación de información sobre los sistemas de excitación que se encuentran actualmente funcionando.	09/02/2023	09/02/2023	09/02/2023	09/02/2023	28/02/2023	28/02/2023	28/02/2023	28/02/2023	[Gantt bar for Recopilación de información]																																							
Clasificación de la información obtenida	01/03/2023	01/03/2023	01/03/2023	01/03/2023	24/03/2023	24/03/2023	24/03/2023	24/03/2023	[Gantt bar for Clasificación]																																							
<b>Fase 2: Evaluación de la información bibliográfica e información recopilada en la planta para estudio técnico</b>	20/03/2023	20/03/2023	20/03/2023	20/03/2023	31/05/2023	31/05/2023	31/05/2023	31/05/2023	[Gantt bar for Fase 2]																																							
Análisis de la información obtenida en la fase 1 para elaboración de marco teórico y estudio técnico	20/03/2023	20/03/2023	20/03/2023	20/03/2023	07/04/2023	07/04/2023	07/04/2023	07/04/2023	[Gantt bar for Análisis de información]																																							
Redacción de marco teórico y marco conceptual	10/04/2022	10/04/2022	10/04/2022	10/04/2022	05/05/2023	05/05/2023	05/05/2023	05/05/2023	[Gantt bar for Redacción de marco]																																							
Evaluación de las características técnicas que debe cumplir un sistema moderno	08/05/2023	08/05/2023	08/05/2023	08/05/2023	19/05/2023	19/05/2023	19/05/2023	19/05/2023	[Gantt bar for Evaluación de características]																																							
Propuestas de solución técnica para los sistemas de excitación nuevos	22/05/2023	22/05/2023	22/05/2023	22/05/2023	31/05/2023	31/05/2023	31/05/2023	31/05/2023	[Gantt bar for Propuestas de solución]																																							
<b>Fase 3: Estudio económico para la toma de decisiones en materia de renovación de los sistemas de excitación.</b>	01/06/2023	01/06/2023	01/06/2023	01/06/2023	18/08/2023	18/08/2023	18/08/2023	18/08/2023	[Gantt bar for Fase 3]																																							
Estudio de indicadores para la elección económica de un sistema	01/06/2023	01/06/2023	01/06/2023	01/06/2023	04/06/2023	04/06/2023	04/06/2023	04/06/2023	[Gantt bar for Estudio de indicadores]																																							
Cotización a empresas proveedor de sistemas de excitación de acuerdo a las características técnicas determinadas en el estudio	07/06/2023	07/06/2023	07/06/2023	07/06/2023	30/06/2023	30/06/2023	30/06/2023	30/06/2023	[Gantt bar for Cotización a empresas]																																							
De precación, amortización, inversión inicial	09/07/2023	09/07/2023	09/07/2023	09/07/2023	21/07/2023	21/07/2023	21/07/2023	21/07/2023	[Gantt bar for De precación]																																							
Costo de oportunidad derivado de la pérdida de generación por deficiencia de los sistemas de excitación actuales	21/07/2023	21/07/2023	21/07/2023	21/07/2023	04/08/2023	04/08/2023	04/08/2023	04/08/2023	[Gantt bar for Costo de oportunidad]																																							
Presentación de avances a asesor de tesis	07/08/2023	07/08/2023	07/08/2023	07/08/2023	18/08/2023	18/08/2023	18/08/2023	18/08/2023	[Gantt bar for Presentación de avances]																																							
<b>Fase 4: Propuesta técnica económica para la modernización de los sistemas de excitación.</b>	21/08/2023	21/08/2023	21/08/2023	21/08/2023	31/10/2023	31/10/2023	31/10/2023	31/10/2023	[Gantt bar for Fase 4]																																							
Evaluación técnica de opciones	21/08/2023	21/08/2023	21/08/2023	21/08/2023	01/09/2023	01/09/2023	01/09/2023	01/09/2023	[Gantt bar for Evaluación técnica]																																							
Evaluación económica de opciones	01/09/2023	01/09/2023	01/09/2023	01/09/2023	08/09/2023	08/09/2023	08/09/2023	08/09/2023	[Gantt bar for Evaluación económica]																																							
Propuesta final	08/09/2023	08/09/2023	08/09/2023	08/09/2023	22/09/2023	22/09/2023	22/09/2023	22/09/2023	[Gantt bar for Propuesta final]																																							
Preparación de resultados y aprobación de avances por el asesor	22/09/2023	22/09/2023	22/09/2023	22/09/2023	29/09/2023	29/09/2023	29/09/2023	29/09/2023	[Gantt bar for Preparación de resultados]																																							
Corrección de observaciones del asesor	02/10/2023	02/10/2023	02/10/2023	02/10/2023	06/10/2023	06/10/2023	06/10/2023	06/10/2023	[Gantt bar for Corrección de observaciones]																																							
Preparación y entrega del trabajo final	09/10/2023	09/10/2023	09/10/2023	09/10/2023	31/10/2023	31/10/2023	31/10/2023	31/10/2023	[Gantt bar for Preparación y entrega]																																							

Fuente: elaboración propia.



## **12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO**

El presente trabajo se realizará con recursos propios del estudiante de maestría, se cuenta con recursos humanos, financieros, acceso a la información, permisos.

### **12.1. Recursos humanos**

Se cuenta con el apoyo del asesor de esta investigación, ingenieros y técnicos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos.

### **12.2. Recursos financieros**

Se cuenta con un ahorro para la realización del trabajo de graduación, desde las visitas de campo, movilización

### **12.3 Acceso a la información**

Se cuenta con disposición de diversas útiles para las consultas bibliográficas, apoyo de las autoridades de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos para la recopilación de datos en campo de los sistemas de excitación en funcionamiento.

## 12.4. Permisos

Actualmente se cuenta con permisos del Instituto Nacional de Electrificación para llevar a cabo la investigación en una de sus plantas de generación.

Tabla V. Presupuesto

CANTIDAD	RECURSO	Costo por unidad	Subtotal
1	Curso de regulación de tensión en generadores síncronos	Q1,500.00	Q1,500.00
1	Energía eléctrica	Q200.00	Q200.00
1	Pasajes	Q400.00	Q400.00
1	Internet	Q500.00	Q500.00
1	Impresión y encuadernado	Q900.00	Q900.00
1	Recurso humano (tesista)	Q2,000.00	Q2,000.00
1	Instrumentos de medición	Q3,000.00	Q3,000.00
1	Cámara fotográfica	Q2,000.00	Q2,000.00
1	Honorarios del asesor	Q2,500.00	Q2,500.00
		<b>TOTAL</b>	<b>Q13,000.00</b>

Fuente: elaboración propia.

## REFERENCIAS

1. AMM NCO-04 (2021) *Norma de Coordinación Operativa No. 4. AMM.* Guatemala: CNEE.
2. Chapman, S. J. (2012). *Máquinas Eléctricas.* (5ª. Ed.) Estados Unidos: McGraw-Hill Latinoamericana, S.A.
3. IEEE STD 421.1 (2007) *Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines.* New York: Autor.
4. IEEE STD 421.2 (1990) *Guide for Identification, Testing, And Evaluation of The Dynamic Performance of Excitation Control Systems.* New York: Autor.
5. IEC 60076-11 (2007) IEC. *Power transformers- part 11: dry-type transformers* (1a edición.). Estados Unidos: Autor.
6. Mora, F. J. (2015). *Máquinas Eléctricas* (7ª edición). Madrid, España: Garceta.
7. Nuñez, F. H. (2015). *Centrales de Generación y Subestaciones Eléctricas* (1ª edición). Santo Domingo, República Dominicana: Universidad APEC.
8. Ocampo, J. E. (2013). *Costos y Evaluación de Proyectos* (8ª reimpresión y edición). México: Grupo Editorial Patria.

9. SEPAC, S.A. (2012). *Manual de Operación de Regulador Automático de Voltaje Digital*. México: Serpro S.A. de C.V.

## APÉNDICES

**Apéndice 1. Matriz de coherencia y conceptualización**

PROBLEMA	OBJETIVO GENERAL	MARCO TEÓRICO	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES
Necesidad presente de contar con sistemas de excitación modernos y eficientes que permitan mejorar la operación de los generadores síncronos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, considerando que los equipos que se encuentran en operación han finalizado su ciclo de vida	Proponer la mejora de los sistemas de excitación de las unidades generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos.	Hidroeléctrica  Generador  Estabilidad en Sistemas de Potencia  Normas de Coordinación Operativa del AMM			Regulación de voltaje  Regulación de frecuencia  Estabilidad del SIN
<b>PREGUNTA PRINCIPAL</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>		El presente trabajo de investigación no comprobará una hipótesis	Generador síncrono	Tiempo de respuesta corto ante disturbios en la red
¿Existe alguna forma de mejorar los sistemas de excitación de los generadores de la planta Hidroeléctrica Los Esclavos que garanticen la continuidad del servicio y den estabilidad al Sistema Nacional Interconectado?	1. Establecer un estudio técnico para la modernización de los sistemas de excitación de las unidades generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos.  2. Plantear un estudio económico para la toma de decisiones en materia de renovación de los sistemas de excitación de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos.	Sistema de Excitación  Tipos de Sistemas de Excitación			Eficiencia

Continuación apéndice 1.

<p><b>PREGUNTAS SECUNDARIAS</b></p>	<p>3. Establecer el sistema de excitación más viable para los generadores síncronos de la planta de acuerdo con sus características económicas, técnicas y normativas vigentes de operación en Guatemala.</p>	<p>Componentes del sistema de excitación</p>			<p>VAN</p>
<p>1. ¿Cuáles son las características técnicas por considerar para la elección de un sistema de excitación para un generador?</p>	<p>4. Examinar el estado actual de los sistemas de excitación de las unidades generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos</p>	<p>Sistema de excitación rotativo</p>			<p>TIR</p>
<p>2. ¿Cuál es el beneficio económico que traerá la modernización de los sistemas de excitación?</p> <p>3. ¿Cuáles son los criterios técnico-económicos a considerar para la elección del sistema de excitación que cumpla con las normativas vigentes para participar en la generación de energía eléctrica en Guatemala?</p> <p>4. ¿Cuáles son las deficiencias en las que se encuentran actualmente los sistemas de excitación de las unidades generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos?</p> <p>5. ¿Cuál es el ingreso que se deja de percibir por la utilización del sistema de excitación que actualmente está en funcionamiento comparado con un sistema de excitación nuevo?</p>	<p>5. Comparar costos de operación del sistema de excitación en funcionamiento con un sistema de excitación nuevo.</p>	<p>Sistema de excitación estático</p>		<p>Sistema de excitación</p>	<p>Amortización</p> <p>Depreciación</p>

Fuente: elaboración propia.