



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Energía y Ambiente

**PROPUESTA DE MEJORA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DE LAS
UNIDADES GENERADORAS DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA LOS
ESCLAVOS**

Ing. Manuel Josué López Lima

Asesorado por Msc. Mynor Rafael Celis González

Guatemala, septiembre de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**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

ING. MANUEL JOSUÉ LÓPEZ LIMA

ASESORADO POR MSC. ING. MYNOR RAFAEL CELIS GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE
DEFENSA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

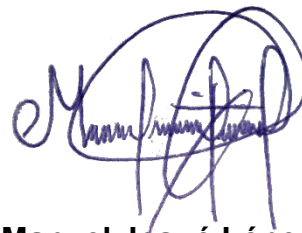
DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
EXAMINADOR	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes
EXAMINADOR	Dra. Aura Marina Rodríguez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

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 la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 15 de octubre de 2022.



Ing. Manuel Josué López Lima



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad e Ingeniería

24189101- 24189102

LNG.DECANATO.OIE.494.2024

El Decano 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 Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE MEJORA DE LOS SISTEMA 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:

Firmado electrónicamente por: José Francisco Gómez Rivera
Motivo: Autorización de entrega de trabajo de graduación
Fecha: 11/09/2024 10:47:28
Lugar: Facultad de Ingeniería, USAC.

Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.



Guatemala, septiembre de 2024

Para verificar validez de documento ingrese a <https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento>

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2024 Correlativo: 494 CUI: 3067562770601

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de



Guatemala, septiembre de 2024

LNG.EEP.OID.2.2024

En mi calidad de DIRECTORA de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

"PROPUESTA DE MEJORA DE LOS SISTEMA DE EXCITACIÓN DE LAS UNIDADES GENERADORAS DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA LOS ESCLAVOS"

presentado por **MANUEL JOSUÉ LÓPEZ LIMA** correspondiente al programa de **MAESTRÍA EN ENERGÍA Y AMBIENTE** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

MAESTRA Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTORA
Escuela de Estudios de Postgrado

Oficina Virtual





Guatemala, 5 de junio de 2024

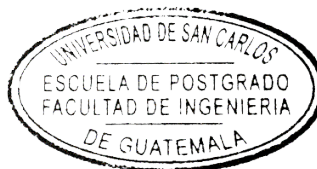
M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **PROPUESTA DE MEJORA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DE LAS UNIDADES GENERADORAS DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA LOS ESCLAVOS** del estudiante **Manuel Josué López Lima** quien se identifica con número de carné **201801525** del programa de Maestría En Energía Y Ambiente

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Maestría En Energía Y Ambiente
Escuela de Estudios de Postgrado

Oficina Virtual



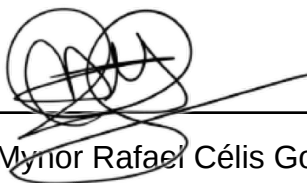
Guatemala, 5 de junio de 2024

M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"PROPUESTA DE MEJORA DE LOS SISTEMAS DE EXCITACIÓN DE LAS UNIDADES GENERADORAS DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA LOS ESCLAVOS"** de el/la estudiante **Manuel Josué López Lima** del programa de **Maestría En Energía Y Ambiente** identificado(a) con número de carné 201801525.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Mtro. Ing. Mynor Rafael Célis González

Colegiado No. 3598

Asesor de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por brindarme toda la sabiduría y paciencia para llegar hasta este punto de mi vida profesional.
Mis padres	Por su apoyo incondicional, cariño y comprensión durante toda la vida, gracias a ellos me he convertido en la persona que soy.
Mis hermanas	Por estar siempre presentes, velar por mi salud y apoyarme en todos los retos que he afrontado.
Mis amigos	Por todas las desveladas que pasamos juntos para llegar a esta meta.
Mis compañeros de la Universidad	Más que compañeros de estudio, se convirtieron en mis amigos y un gran apoyo para lograr esta meta.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis padres	Por apoyarme durante todo el proceso de estudio y realización de mi trabajo de graduación.
Mi asesor de tesis	Por la orientación incondicional brindada durante la realización de este trabajo de graduación.
Mis compañeros de estudio	Por el apoyo moral y realización de los proyectos en la universidad.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi <i>alma mater</i> y sede de todo el conocimiento adquirido.
Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, INDE	Por ser parte fundamental para la realización de este trabajo de graduación.
Ing. Manuel Morales e Ing. Alex Vicente	Por todo el conocimiento y orientación que me transmitieron para la realización de mi trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	IX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XI
OBJETIVOS.....	XV
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XVII
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MARCO REFERENCIAL	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Planta Hidroeléctrica Los Esclavos	5
2.2. Presa y obras conexas	5
2.3. Casa de máquinas.....	6
2.4. Generador síncrono.....	6
2.5. Funcionamiento de un generador síncrono	7
2.6. Partes de un generador síncrono	7
2.7. Devanado inductor	8
2.8. Devanado inducido	9
2.9. Funcionamiento del sistema de excitación	9
2.10. Sistema de excitación.....	9
2.11. Principio de funcionamiento de un SE.....	10
2.12. Tipos de sistemas de excitación.....	10
2.13. Excitación con diodos rotativos o Brushless.....	11
2.14. Excitación estática o excitación directa al campo.....	13
2.15. Curva de capacidad un generador eléctrico	14

2.16.	Limitadores.....	16
2.17.	Marco regulatorio	17
2.18.	Normas de coordinación operativa del AMM.....	17
2.19.	Parámetros de estabilidad.....	17
2.20.	Estabilidad en frecuencia	19
2.21.	Estabilidad en tensión	20
3.	RESULTADOS.....	23
3.1.	Comportamiento de la carga del SNI	23
3.2.	Curva de carga de una semana	24
3.3.	Comportamiento de la curva de carga de un día	25
3.4.	Resultados del análisis de las NCO del AMM	26
3.5.	Resultados en los riesgos técnicos de operación	27
3.6.	Riesgos en el área de máxima excitación	27
3.7.	Riesgos en el área de mínima excitación.....	28
3.8.	Exigencias a nivel regulatorio por el AMM	29
3.9.	Resultados en ajustes a limitadores.....	31
3.10.	Parte de sobreexcitación o sobrecalentamiento.....	32
3.11.	Parte de subexcitación o pérdida de estabilidad	33
3.12.	Lista de verificación de especificaciones técnicas	34
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	49
4.1.	Análisis interno	50
4.2.	Ajustes en el limitador de máxima excitación.....	50
4.3.	Ajustes en el limitador de mínima excitación.....	51
4.4.	Prueba de ajuste a limitadores	51
4.5.	Análisis externo	53
	CONCLUSIONES.....	57
	RECOMENDACIONES.....	59
	REFERENCIAS	61
	ANEXO	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Devanados de un generador síncrono.....	8
Figura 2.	Componentes generales de un sistema de excitación.....	11
Figura 3.	Componentes de un sistema de excitación dinámico	12
Figura 4.	Componentes de un SE estático para generador eléctrico.....	14
Figura 5.	Curva de capacidad de una máquina síncrona.....	15
Figura 6.	Ejemplo de un sistema eléctrico de potencia.....	18
Figura 7.	Curva de carga del SNI del 07/07/2024 al 13/07/2024	24
Figura 8.	Curva de carga horaria por día del SNI	25
Figura 9.	Puntos de calibración de limitadores	32

TABLAS

Tabla 1.	Planilla No.1. Características del sistema de excitación	29
Tabla 2.	Planilla No. 1. Sistema de excitación	30
Tabla 3.	Planilla No. 3. Datos del sistema de excitación	30
Tabla 4.	Planilla No. 5. Ajustes de dispositivos de control.....	31
Tabla 5.	Lista de verificación para condiciones de operación.....	35
Tabla 6.	Lista de verificación para el control de tensión	36
Tabla 7.	Lista de verificación para componentes e instalación	37
Tabla 8.	Lista de verificación para el transformador de excitación	38
Tabla 9.	Lista de verificación para los accesorios de control de tensión ...	39
Tabla 10.	Lista de verificación para indicadores de falla	40

Tabla 11.	Lista de verificación para los servicios de montaje del SE	41
Tabla 12.	Lista de verificación para cableados.....	42
Tabla 13.	Lista de verificación de otras consideraciones del proyecto.....	43
Tabla 14.	Lista de verificación de la entrega y recepción de los equipos	44
Tabla 15.	Lista de verificación de la garantía de los equipos	45
Tabla 16.	Lista de verificación de pruebas de funcionamiento	46
Tabla 17.	Lista de verificación de los certificados de calidad	47

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
Hz	Hertz
KVA	Kilovoltio-amperio
KVA_r	Kilovoltio-amperio reactivo
KWh	Kilowatt-hora
MW	Megawatt
Ω	Ohm
rpm	Revoluciones por minuto
V	Voltios
W	Watts

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
Corriente eléctrica	Flujo de electrones en un circuito eléctrico.
CT	Transformador de corriente.
Energía eléctrica	Es el flujo de electrones entre dos puntos cuando existe una diferencia de potencial eléctrico.
Frecuencia eléctrica	Es la cantidad de veces que la onda senoidal se repite en un segundo.
Generador síncrono	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.
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
INDE	Instituto Nacional de Electrificación.
NCO	Normas de Coordinación Operativa.

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

RESUMEN

El propósito primordial del presente trabajo de investigación consistió en la identificación mejoras técnicas que permitan incrementar la eficiencia de operación de las nuevas unidades generadoras de la planta Hidroeléctrica Los Esclavos y dar cumplimiento a la regulación nacional vigente para participar en la generación de energía eléctrica.

Mantener estable el nivel de la tensión nominal a lo largo del tiempo ha evolucionado a cumplir estándares cada vez más rigurosos; esto principalmente se debe al avance de la tecnología donde cada día se utilizan más dispositivos electrónicos y cargas no lineales donde se requieren estándares muy altos en la calidad de la tensión; por lo tanto, mantener continuo un valor fijo de tensión se vuelve un problema ya que el sistema tiende a sufrir cambios repentinos de potencia activa y reactiva.

El enfoque de este estudio es mixto, ya que la investigación incluye variables cualitativas y cuantitativas en cuanto a los sistemas de excitación, ya que se centra en comprender y analizar el impacto técnico de un control deficiente de la regulación de tensión de los nuevos generadores eléctricos de la planta. También establecer directrices en el ajuste de los equipos de control de la tensión para incrementar su eficiencia.

El resultado principal y más relevante de la investigación es la lista de verificación personalizada para la hidroeléctrica que contiene los requisitos técnicos y la documentación a presentar ante el AMM en cuanto a estos sistemas, para dar cumplimiento a los requisitos que exige la normativa para participar en

la generación de energía eléctrica y garantizar que la elección de los equipos se haga en cumplimiento a estándares de calidad que aseguren una operación continua de los generadores.

Se realizó la propuesta de mejora de los sistemas de excitación de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, que consistió en brindar ajustes en los equipos de control de la tensión y una lista de verificación de especificaciones técnicas que buscan garantizar que los nuevos generadores eléctricos de la planta aporten estabilidad en tensión en su nodo de conexión al SNI sin comprometer la seguridad de estos.

Es de mucha importancia tomar en cuenta que la propuesta de mejora de los sistemas de excitación de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos aporta conocimiento en la parte técnica y práctica para la elección de un sistema de excitación, pero también en la forma que se debe realizar el ajuste de los limitadores; por lo tanto, se debe cumplir con las dos partes para garantizar un mejor rendimiento de los equipos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Muchos de los apagones totales o 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.

- Contexto general

En el Sistema Nacional Interconectado (SNI) de Guatemala, uno de los problemas que padece es la estabilidad de tensión y frecuencia. Una forma de estabilizarlo es a través de compensación reactiva en los generadores eléctricos. Esta inestabilidad produce pérdidas económicas en el usuario, por apagones y mala calidad de la energía.

- Descripción del problema

Existen muchas variables involucradas en este problema; un problema relevante suele darse en el tiempo 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. En la actualidad muchas de las cargas en los sistemas de distribución son no lineales, por lo cual se requiere que los sistemas de excitación cuenten con tiempos cortos de respuesta ante cambios bruscos de potencia reactiva en la red. Además, debido a las exigencias de calidad de potencia, impuestas por el Administrador del Mercado Mayorista (AMM) en sus

normas de Coordinación Operativa, se definieron parámetros de regulación para poder participar en la generación.

- 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 operación de los generadores síncronos, considerando que se debe contar con los ajustes necesarios en los equipos de control de tensión para garantizar que los nuevos generadores de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos puedan contribuir a dar estabilidad en el sin.

- 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

- ¿Cómo repercute el hecho de tener un mal control en la regulación de la tensión en un generador eléctrico?
- ¿Cuáles son los ajustes que pueden realizarse en el regulador de tensión de los generadores eléctricos para que este tenga un mejor control de la tensión y cumpla con las normativas vigentes para participar en la generación de energía eléctrica en Guatemala?

- ¿Qué requisitos exige la normativa en Guatemala para que un generador eléctrico pueda participar en la generación de energía eléctrica?
- Delimitación del problema

El presente estudio parte de dar a conocer los problemas que se derivan de tener un mal control de la tensión en los generadores eléctricos, para luego determinar ajustes en los limitadores de los sistemas de excitación que permita mitigar o disminuir estos problemas, hasta llegar a establecer una lista de verificación de requisitos técnicos con los que deben contar los nuevos sistemas de excitación. El fin es asegurar que los nuevos generadores puedan participar en la generación de energía eléctrica en Guatemala y operen de forma eficiente.

OBJETIVOS

General

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

Específicos

1. Analizar el impacto a nivel técnico de contar con un control deficiente de la regulación de tensión en los nuevos generadores eléctricos de acuerdo con la curva de carga del SNI de Guatemala.
2. Identificar mejoras técnicas en el ajuste del limitador de máxima excitación y el limitador de mínima excitación del regulador de tensión que permitan a los nuevos generadores eléctricos aportar estabilidad de tensión al Sistema Nacional Interconectado.
3. Elaborar una lista de verificación personalizada para la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos con las especificaciones técnicas que deben cumplir los nuevos sistemas de excitación y la documentación a presentar ante el Administrador del Mercado Mayorista respecto a lo establecido en las Normas de Coordinación Operativa (NCO).

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

En el siguiente apartado se explica la serie de fases y pasos que se siguieron para la elaboración de una propuesta de mejora de los sistemas de excitación de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, perteneciente al Instituto Nacional de Electrificación (INDE).

- **Características del estudio**

Se empleó un método no experimental debido a que se trata de un diseño de investigación para analizar el impacto de un control deficiente de la regulación de tensión, proponer mejoras técnicas en los ajustes de los limitadores de máxima y mínima excitación del regulador de tensión. Además, elaborar una lista de verificación que permita a la hidroeléctrica recopilar todos los requisitos técnicos y documentación a presentar ante el Administrador del Mercado Mayorista para que esta pueda participar en la generación de energía eléctrica en Guatemala.

- **Enfoque**

El enfoque de este estudio es mixto, ya que la investigación se centra en comprender y analizar el impacto técnico de un control deficiente de la regulación de tensión de los nuevos generadores eléctricos de la planta. También establecer directrices en el ajuste de los equipos de control de la tensión para incrementar su eficiencia y elaborar una guía de los requisitos que exige la normativa vigente de operación en Guatemala para participar en la generación de energía eléctrica. Por lo tanto, estas actividades requieren una comprensión detallada de los

problemas y las necesidades de contar con un sistema de control eficiente en la regulación de tensión de los nuevos generadores. Además, se identificará las mejoras técnicas se requerirá una comprensión cualitativa de cómo estas mejoras podrían abordar los problemas identificados. Por esto la investigación será cualitativa en su naturaleza, enfocada en describir y comprender los aspectos técnicos y operativos relevantes.

- Diseño

El diseño de la investigación es notoriamente no experimental ya que no se manipulan variables, se pretende trabajar con bibliografía existente sobre sistemas de excitación y las Normas de Coordinación Operativa (NCO) del Administrador del Mercado Mayorista, para identificar ajustes que incrementen la eficiencia de los nuevos generadores y que estos puedan participar en la generación de energía eléctrica en Guatemala.

- Tipo de estudio

El estudio realizado es de tipo descriptivo, ya que busca analizar el impacto técnico de contar con un control deficiente de la regulación de tensión en los nuevos generadores eléctricos de la planta. Además, identificar ajustes en equipos de control y elabora una guía, por lo tanto, se busca describir y comprender el funcionamiento de los sistemas de excitación y cómo un control deficiente afecta la operación de los generadores.

- Alcance

Será una investigación descriptiva y transversal, en ella se buscará exponer a grandes rasgos las causas de contar con un control deficiente de la

tensión en un generador eléctrico, explicar cómo se pueden ajustar los limitadores para incrementar la eficiencia y elaborar una guía de los requisitos a cumplir ante la entidad encargada de la operación del sistema eléctrico de Guatemala.

- Unidad de análisis

La unidad de análisis consistió en las características o parámetros técnicos con los que deben cumplir los nuevos sistemas de excitación con los que contará la planta Hidroeléctrica Los Esclavos para el control de la tensión en los generadores. Se utilizó un tipo de muestra por conveniencia ya que el análisis de centró únicamente en estos equipos.

- Operacionalización de variables

La siguiente tabla contempla o caracteriza en gran amplitud lo que concierne al proyecto y sus alcances, se detallan las variables a utilizar para el análisis y la propuesta de mejora.

Tabla 1.*Variables e indicadores*

Variable		Definición conceptual	Definición operacional
Estabilidad en Tensión	en	Capacidad de un sistema eléctrico de potencia de permanecer en un valor constante de tensión y variar en mínimas proporciones	Se caracteriza de acuerdo con un porcentaje de variación.
Control de tensión en Generadores eléctricos		Capacidad de un generador eléctrico de permanecer en un valor constante de tensión ante cambios bruscos en la potencia demanda por la carga.	Se mide en porcentaje de variación de la tensión de acuerdo con la tensión nominal del sistema
Limitador de Máxima Excitación (OEL)	de	Es un ajuste de la máxima corriente de excitación que se le puede inyectar a un generador para que este opere de forma segura.	Se mide en amperios.
Limitador de Mínima Excitación (MEL)	de	Es un ajuste de la mínima corriente de excitación que se le puede inyectar a un generador para que este opere de forma segura.	Se mide en amperios.
Potencia Reactiva		Enfocada en el control de tensión es la que permite tener un control de la tensión en un sistema de potencia.	Se mide en KVAR
Corriente excitación	de	Es la cantidad de corriente eléctrica que se inyecta a un generador eléctrico para formar un electroimán.	se mide en amperios

Nota: Elaboración propia. Realizado con Microsoft Excel.

- Fases de la investigación

La elaboración de una propuesta de mejora de los sistemas de excitación de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos se realizó en cuatro fases.

- Fase 1. Revisión bibliográfica: en esta se realizó una revisión de bibliografía con el fin de conocer a detalle la forma en que se controla la tensión en un generador eléctrico por medio de un sistema de excitación, donde también se analizaron los problemas técnicos que conlleva el no contar con un eficiente control de la potencia reactiva, partiendo de la premisa que en la actualidad muchas de las cargas de un sistema de potencia son no lineales y variables en el tiempo por lo cual se convierte en necesidad contar con equipos bien ajustados y eficientes para la operación de los nuevos generadores eléctricos de la planta.
- Fase 2. Identificación de mejoras para el control de la tensión: posterior a comprender a detalle la forma en que se ejecuta un eficiente control de la tensión, se recopiló información técnica y se analizó con el fin de identificar mejoras que se pueden realizar a los equipos de control de tensión de los nuevos generadores eléctricos, para que estos puedan aprovechar su potencia al máximo y regular efectivamente la potencia reactiva entregada o absorbida de la red a partir de un eficiente ajuste en los limitadores de máxima excitación y mínima excitación.
- Fase 3. Revisión de normativas vigentes de operación para participar en la generación de energía eléctrica en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala. Luego de realizar

propuestas de mejoras en los ajustes de los limitadores de máxima y mínima excitación se procedió a revisar las normas de coordinación operativa del Administrador del Mercado Mayorista, con el fin de identificar los requisitos que este exige en cuanto al sistema de excitación para participar en la generación de energía eléctrica.

- Fase 4. Elaboración de lista de verificación para dar cumplimiento a la normativa vigente de operación para la incorporación de las nuevas unidades de generación al Sistema Nacional Interconectado. A partir de la revisión de las normas de coordinación operativa se realizó una lista de verificación de la documentación indispensable correspondiente a los sistemas de excitación que se debe presentar ante el AMM, con el fin de cumplir la regulación y que los nuevos generadores eléctricos de la hidroeléctrica puedan participar en la generación de energía eléctrica en el Sistema de Potencia de Guatemala.
- Fase 5. Redacción del informe final: como resultado de finalizar las fases anteriores del estudio, se redactó el informe final que proporcionó como resultado la propuesta de mejora planteada en los objetivos.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación contribuye directamente en forma de innovación y sistematización en el proceso de elección de los sistemas de excitación de las unidades generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos al brindar una serie de requisitos técnicos que estos equipos deben cumplir para garantizar la operación continua de los generadores eléctricos.

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 contar con equipos modernos, robustos y ajustados correctamente para cumplir con los estándares impuestos por los entes reguladores del Sistema Nacional Interconectado (SNI).

Con la propuesta de mejora de los sistemas de excitación de la las unidades generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, se busca fortalecer el proceso de generación de energía eléctrica dentro de la planta 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 han provocado que el índice de cumplimiento de estándares de calidad en lo referente a la calidad de la energía suministrada a los usuarios haya incrementado.

Para la realización de este trabajo se utilizó una metodología de investigación del tipo mixto que consistió en un análisis detallado de las variables involucradas para llegar a establecer la propuesta de mejora de los sistemas de excitación.

Esta investigación aporta conocimientos sobre las consideraciones técnicas a tomar en cuenta para la elección de un sistema de excitación para un generador eléctrico, que cumpla con estándares de alta calidad para controlar de forma eficiente la tensión.

El esquema de la solución estuvo constituido en 5 fases, iniciando con la investigación documental o revisión bibliográfica del tema involucrado, seguidamente de la segunda fase en la que se identificaron diferentes tipos de mejoras para el control de la tensión en un generador. La fase 3 de la investigación involucró un análisis de la normativa vigente sobre el tema para ser tomado en cuenta en la fase 4 que consistió en la elaboración de la lista de verificación y propuesta final de mejora. Finalmente, en la fase 5 se redactó el informe final.

La realización de la investigación fue factible porque se contaron con los recursos necesarios, tales como la disponibilidad de realización de visitas técnicas a la hidroeléctrica, recurso humano por parte de la hidroeléctrica para recolección de la información y directrices a seguir, hardware y software como herramientas para el análisis de la información.

El informe final de la investigación está estructurado en cuatro capítulos: el Capítulo I es el marco referencial conteniendo información bibliográfica de investigaciones previas sobre sistemas de excitación de generadores eléctricos, enfocados en hidroeléctricas. En el capítulo II se desarrolla el marco teórico, que

detalla de forma amplia el tema a analizar, brindando la información necesaria para la comprensión de la investigación. El Capítulo III corresponde a los resultados de la investigación, en el que se determina a partir de bibliografía estudiada sobre sistemas de excitación, y el análisis de las vigentes normativas de coordinación operativa del AMM. Incluye propuesta de mejora de los nuevos sistemas de excitación, la cual parte de analizar el impacto negativo de contar con un sistema deficiente en el control de la tensión eléctrica, para luego establecer mejoras técnicas que se pueden realizar en los ajustes de los equipos para incrementar la eficiencia de operación de los generadores y que estos puedan aportar estabilidad a la red de potencia; asimismo, donde se realiza la lista de verificación personalizada para la hidroeléctrica que contiene los requisitos técnicos y la documentación a presentar ante el AMM en cuanto a estos sistemas para dar cumplimiento a los requisitos que exige la normativa para participar en la generación de energía eléctrica.

El capítulo IV contiene la discusión de resultados con un análisis interno y externo de la investigación. En el análisis interno se analizaron las principales fortalezas y obstáculos presentados durante el desarrollo de la investigación. El análisis externo consiste en el contraste de los resultados obtenidos con otras investigaciones relacionadas sobre sistemas de excitación.

1. MARCO REFERENCIAL

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 de cada generador, 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 se tomó la decisión de realizar el cambio de los generadores eléctricos, juntamente con todos los equipos necesarios para su operación.

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:

En cuanto a la definición de un sistema de excitación de una máquina síncrona, Vázquez (2009) lo 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.

Esta fuente proporcionó el conocimiento necesario para la realización del marco teórico ya que detalla a fondo el funcionamiento de cada uno de los componentes de un sistema de excitación.

Además, SERPRO (2012) menciona que un sistema de excitación 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.

Asimismo, a partir de esta fuente se establecieron los conocimientos necesarios para la realización del marco teórico y dar criterios técnicos a tomar en cuenta en la elección de un SE.

En cuanto a un sistema de potencia, Lira (2009), menciona que 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.

Por medio de esta fuente se conoció la forma en que el sistema de excitación se acopla al Sistema de Potencia para controlar los flujos de potencia ya sea reactiva capacitiva o inductiva y la forma en que se puede parametrizar.

El modo de operación, Nizama (2013) lo describe 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.

Esta fuente se basa en la ampliación de criterios técnicos que se consideraron en la realización de los resultados de la investigación.

El encargado de controlar la tensión, en palabras de Zeceña (2012) señala que 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.

A partir de esta fuente se logró ampliar el conocimiento y procedimientos a tomar en cuenta para realizar el control ajuste del regulador automático de voltaje a los parámetros del generador para lograr el control total del voltaje en terminales.

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) que proveen señales de control que mejoran el amortiguamiento de las oscilaciones, pueden contribuir a mejorar la estabilidad dinámica del SNI.

Esta norma nacional detalla la forma en que el AMM regula la tensión en el Sistema Nacional Interconectado y por lo tanto es base para tomar en cuenta en el ajuste o parametrización del regulador automático de voltaje.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Planta Hidroeléctrica Los Esclavos

La Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, propiedad del Instituto Nacional de Electrificación (INDE), con sede en el departamento de Santa Rosa, municipio de Cuilapa, inició operaciones en agosto de 1966, actualmente tiene 51 años de servicio aportando energía limpia y sustentable al sistema de potencia de Guatemala.

En época de verano, correspondiente a los meses que van de noviembre hasta abril, la planta opera a filo de agua regularmente a las horas pico de demanda de energía en Guatemala, las cuales son de las 12:00 a 13:00 horas y de las 18:00 a las 21:00 horas de cada día, sin embargo, esto no sucede en época de invierno, que corresponden a los meses de mayo a octubre, ya que las constantes lluvias permiten una generación diaria en las 24 horas del día.

2.2. Presa y obras conexas

La planta se compone por diferentes áreas que se describen a continuación:

- Embalse: esta planta cuenta con un embalse que tiene una capacidad de almacenamiento de aproximadamente doscientos cuarenta y cinco mil (245,000) metros cúbicos.

- Canal de conducción: para la generación de energía eléctrica, el agua es enviada desde el embalse hacia casa de máquinas; se abren dos compuertas de la bocatoma que convergen a un canal abierto o canal de conducción de aproximadamente mil trescientos treinta y cinco (1,335) Km de longitud.
- Desarenadores: al final del canal de conducción se encuentran dos reguladores de presión o desarenadores, los cuales permiten atrapar grandes cantidades de sedimentos y arena, para evitar daños mayores en los equipos de generación. Cada uno de los reguladores fue diseñado con dos compartimientos, los cuales permiten darle mantenimiento semanalmente en época de invierno sin afectar la generación.
- Tubería de presión y desfogue: previo a la llegada del agua en la casa de máquinas se encuentra la tubería de presión, cual tiene una longitud de ciento setenta y cinco (175) metros con una caída neta de ciento ocho (108) metros.

2.3. Casa de máquinas

En la casa de máquinas, actualmente se encuentran instalados dos generadores síncronos con turbina tipo Francis de eje vertical con una capacidad de 15 MVA, donde cada generador cuenta con 7.5 MVA de potencia instalada.

2.4. Generador síncrono

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

2.5. Funcionamiento de un generador síncrono

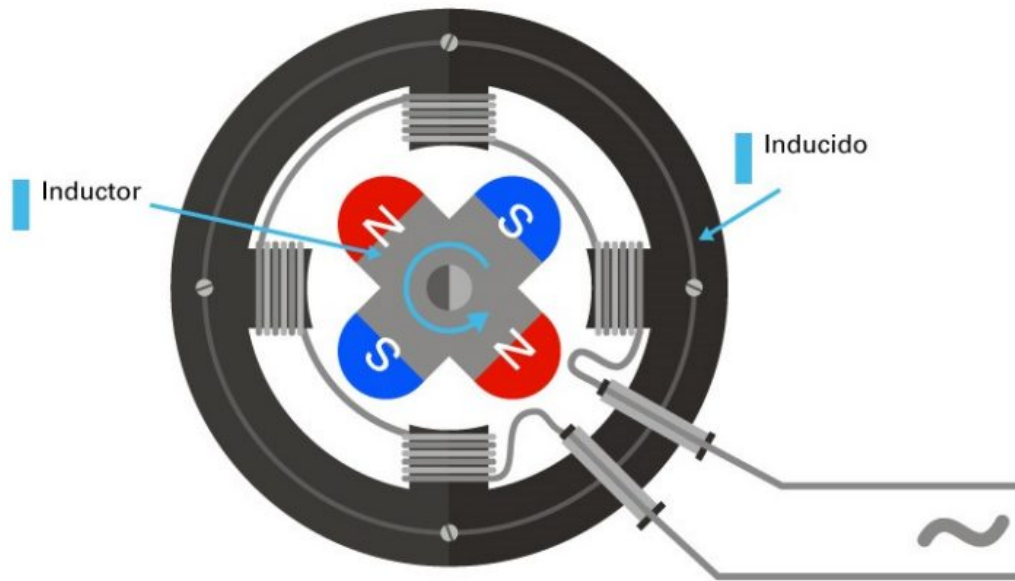
En cuanto al principio de funcionamiento de un generador síncrono, Chapman (2012) menciona que primeramente se debe producir un campo magnético en el devanado giratorio por medio del diseño de este como un imán permanente o mediante la aplicación de una corriente continua a su bobinado para crear un 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.

2.6. Partes de un generador síncrono

Existen dos términos que por lo general conforman un generador síncrono y estos son los devanados o bobinados del inductor y el inducido, los cuales se describen a continuación:

Figura 1.

Devanados de un generador síncrono



Nota. Se muestran los dos componentes fundamentales de un generador síncrono. Obtenido de El generador eléctrico [imagen] Endesa, 2024.

(<https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/generador-electrico>).

Consultado el 10 de abril de 2024. De dominio público.

2.7. Devanado inductor

Este devanado consiste en un conjunto de bobinas de alambre enrolladas alrededor de un núcleo magnético, en ella se forma un electroimán que es el responsable de crear un campo magnético que es el responsable de realizar la conversión del torque mecánico proveniente de la turbina del generador, en torque eléctrico.

2.8. Devanado inducido

Al igual que el devanado inductor, se conforma por un conjunto de bobinas de alambre incrustadas en un núcleo magnético, sin embargo, su principal función es recibir el torque eléctrico que se genera por la conversión de la potencia mecánica a potencia eléctrica, donde finalmente se obtiene una tensión inducida.

2.9. Funcionamiento del sistema de excitación

En cuanto a un sistema de excitación, IEEE STD 421.1 (2007) explica 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.

2.10. Sistema de excitación

Un sistema de excitación de una máquina síncrona proporciona el control en la inyección de la corriente de excitación, encargada de crear el campo electromagnético necesario para la generación de energía eléctrica.

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

2.11. Principio de funcionamiento de un SE

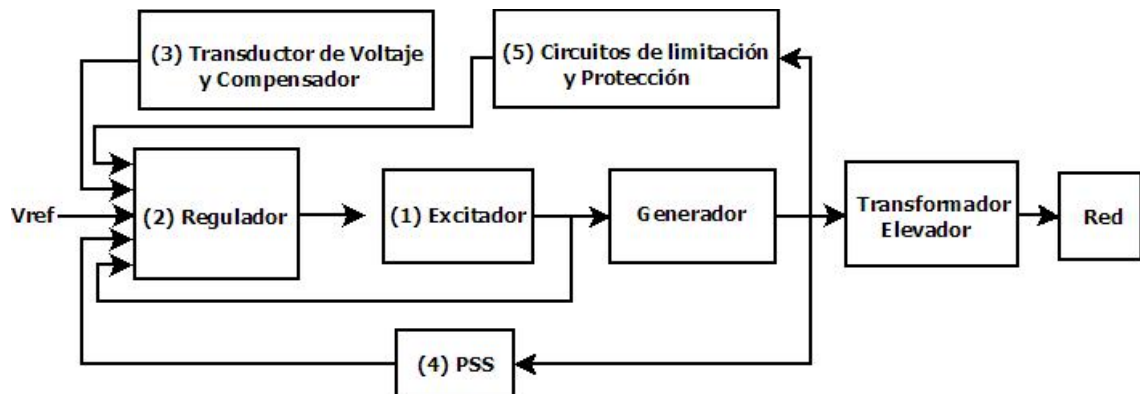
Partiendo de la toma del valor de tensión en bornes del generador, un sistema de excitación realiza operaciones a nivel eléctrico y electrónico de acuerdo con la variación de este valor comparado con el establecido o también llamado *set point*. Su funcionamiento se basa en que, al existir una variación en el valor nominal de la tensión, el regulador automático se encarga de aumentar o reducir la corriente de excitación al devanado inductor con el fin de mantener estable el valor nominal de la tensión.

2.12. Tipos de sistemas de excitación

Un sistema de excitación se compone por varios equipos que se interconectan entre sí con el fin de garantizar un control de la tensión en bornes del generador, estos equipos se detallan gráficamente a continuación:

Figura 2.

Componentes generales de un sistema de excitación



Nota. Se muestran los componentes fundamentales de un sistema de excitación para el control de la tensión. Obtenido de *IEEE 421.1 Definitions for excitation systems for synchronous machines* [imagen] IEEE 2007,

<https://home.engineering.iastate.edu/~jdm/ee554/421.1TermsDefs2007>. Consultado el 15 de abril de 2024. De dominio público.

En términos generales, un sistema de excitación se puede clasificar en dos grandes tipos: estáticos y dinámicos:

2.13. Excitación con diodos rotativos o Brushless

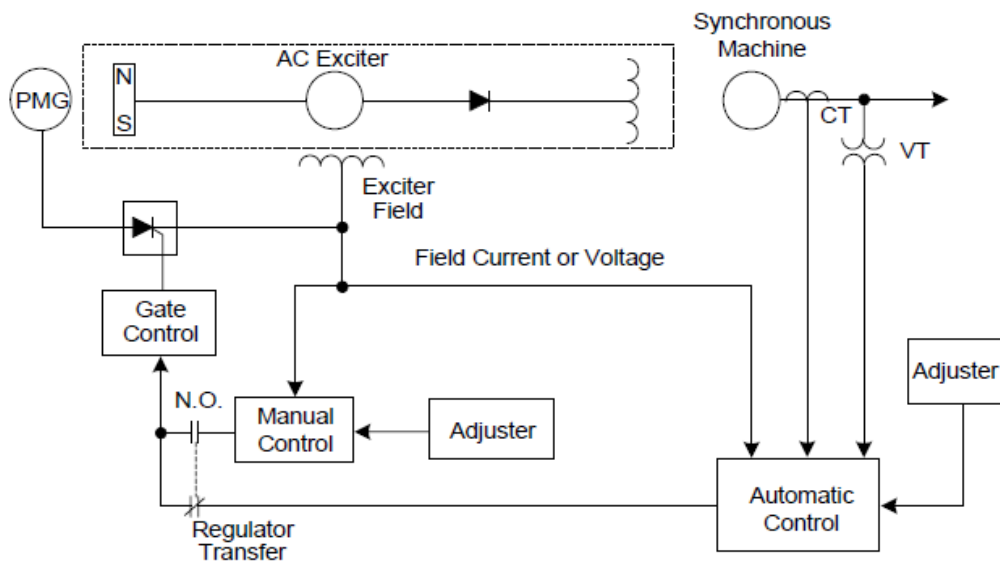
Referente a un sistema de excitación con diodos rotativos, Nuñez (2015), menciona que este sistema consiste en un generador de corriente continua con un regulador acoplado directamente, o por medio de una caja reductora, al eje del generador principal, el cual excita el campo de dicho generador.

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 3.

Componentes de un sistema de excitación dinámico



Nota. Se muestran los componentes fundamentales de un sistema de excitación dinámico. Tomado de *IEEE 421.1 Definitions for excitation systems for synchronous machines* [imagen] IEEE, 2007, <https://home.engineering.iastate.edu/~jdm/ee554/421.1TermsDefs2007>. Consultado el 18 de abril de 2024. De dominio público.

2.14. Excitación estática o excitación directa al campo

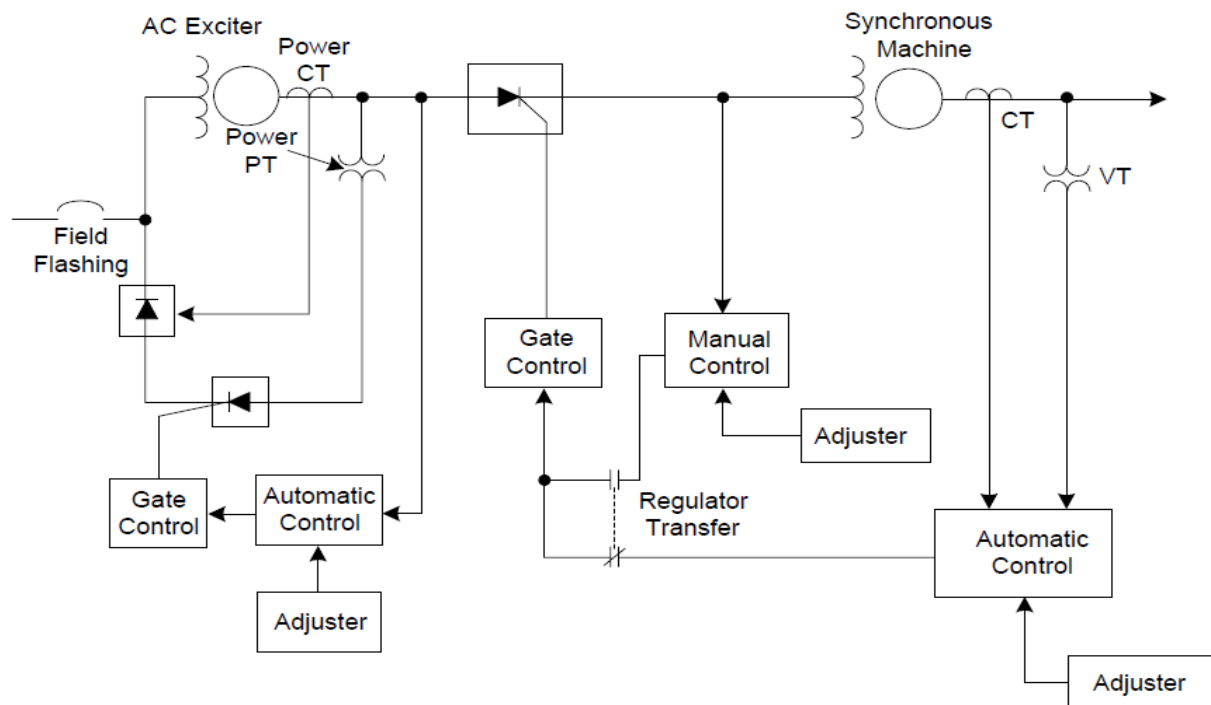
Referente a un sistema de excitación estático, Nuñez (2015) menciona que este sistema es un sistema no giratorio que obtiene la energía de excitación del campo del generador a partir de los terminales de la armadura y a través de los devanados potenciales y de corriente de los transformadores de excitación.

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 4.

Componentes de un SE estático para generador eléctrico



Nota. Se muestran los componentes fundamentales de un sistema de excitación estática. Tomado de *IEEE 421.1 Definitions for excitation systems for synchronous machines* [imagen] IEEE, 2007, <https://home.engineering.iastate.edu/~jdm/ee554/421.1TermsDefs2007>. Consultado el 20 de abril de 2024. De dominio público.

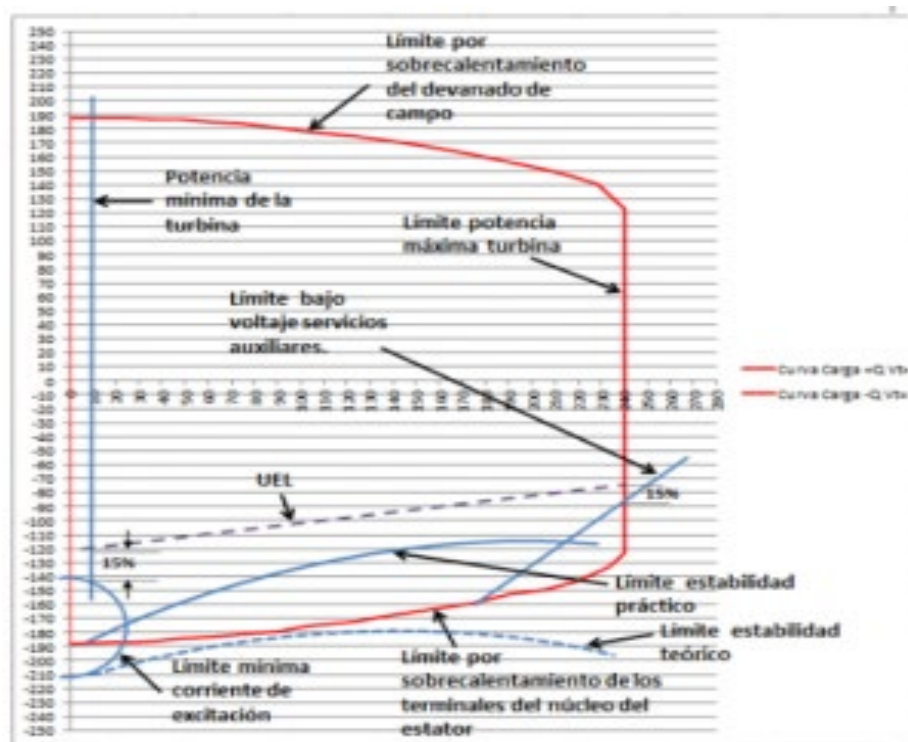
2.15. Curva de capacidad un generador eléctrico

Una curva de capacidad o capacidad de un generador eléctrico es representa gráficamente la relación entre la capacidad de generación de energía del generador y diversas condiciones operativas de funcionamiento. Esta curva es una herramienta importante para entender y optimizar el rendimiento del generador en diferentes situaciones.

Normalmente, en el eje horizontal de la gráfica se representa la condición operativa del generador, en este caso aplicado al control de la corriente de excitación, se representa la potencia real generada o potencia activa dada en Megawatts (MW). En el eje vertical se muestra la capacidad de generación de potencia reactiva, que puede ser expresada en unidades de MVAR. La curva de capacidad suele trazar cómo varía la capacidad del generador en función de factores como la carga eléctrica, la temperatura ambiente, la presión atmosférica, la humedad, la frecuencia de operación, entre otros.

Figura 5.

Curva de capacidad de una máquina síncrona



Nota. Se muestran los límites de seguridad de operación de una máquina síncrona. Tomado de *Auditorías de curva de capacidad de generadores* [imagen] Estudios Eléctricos, 2013, <https://www.estudios-electricos.com/casos/auditorias-de-curva-de-capacidad-de-generadores/>. Consultado el 21 de abril de 2024. De dominio público.

Por otro lado, la curva de capacidad también puede incluir límites de operación seguros, tales como los límites de temperatura, corriente eléctrica, y otros parámetros críticos que deben ser observados para evitar daños al generador o garantizar su operación eficiente y confiable. Para ello pueden definirse ciertas protecciones eléctricas que son en su gran parte una gran ayuda para controlar la potencia activa entregada y la potencia reactiva entregada o absorbida de la red.

En ese sentido se identifican las siguientes protecciones que se ajustan de acuerdo con la curva de capacidad de una máquina síncrona:

2.16. Limitadores

Los limitadores en un sistema de excitación se establecen de acuerdo con la curva de capacidad del generador eléctrico. Estos dependen de la región o el cuadrante en el que se desea analizar o realizar un ajuste; a continuación, se presentan algunos:

- Limitador de máxima excitación (MEL): es el encargado de limitar el máximo de corriente de excitación que se le puede inyectar al devanado de campo para evitar pérdidas en aislamiento y calentamiento en los devanados.
- Limitador de máxima excitación (OEL): es el encargado de limitar la corriente mínima de excitación que se le puede inyectar al devanado de campo para la pérdida ente el acople de torque eléctrico y torque mecánico del generador.

2.17. Marco regulatorio

Entre el marco regulatorio se detallan las siguientes normas por considerarse esenciales en la realización de este trabajo.

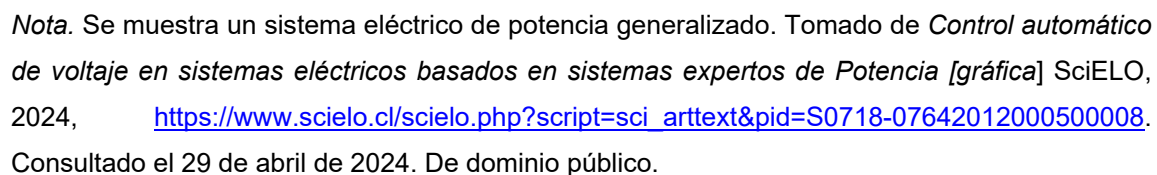
2.18. Normas de coordinación operativa del AMM

- Norma de Coordinación Operativa No. 1 (NCO1)
- Norma de Coordinación Operativa No. 2 (NCO2)
- Norma de Coordinación Operativa No. 3 (NCO3)
- Norma de Coordinación Operativa No. 4 (NCO4)

2.19. Parámetros de estabilidad

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.

Ejemplo de un sistema eléctrico de potencia



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.

Las faltas anteriormente mencionadas son originadas por la variación de dos parámetros importantes en un sistema de potencia, las cuales son la frecuencia y la tensión.

2.20. 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 el SNI 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.

2.21. 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

La estabilidad en tensión del SNI 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 SIN.
- 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.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos responden de forma directa al planteamiento de los objetivos de la investigación, llevando coherencia entre cada objetivo específico para así obtener el resultado esperado que es una propuesta de mejora de los sistemas de excitación de las unidades generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos. Para esto fue necesario realizar un análisis cualitativo a nivel de diferentes normas técnicas, artículos científicos y bibliografía sobre el tema.

A continuación, se analizará el impacto a nivel técnico de contar con un control deficiente de la regulación de tensión en los nuevos generadores eléctricos de acuerdo con la curva de carga del SNI de Guatemala.

3.1. Comportamiento de la carga del SNI

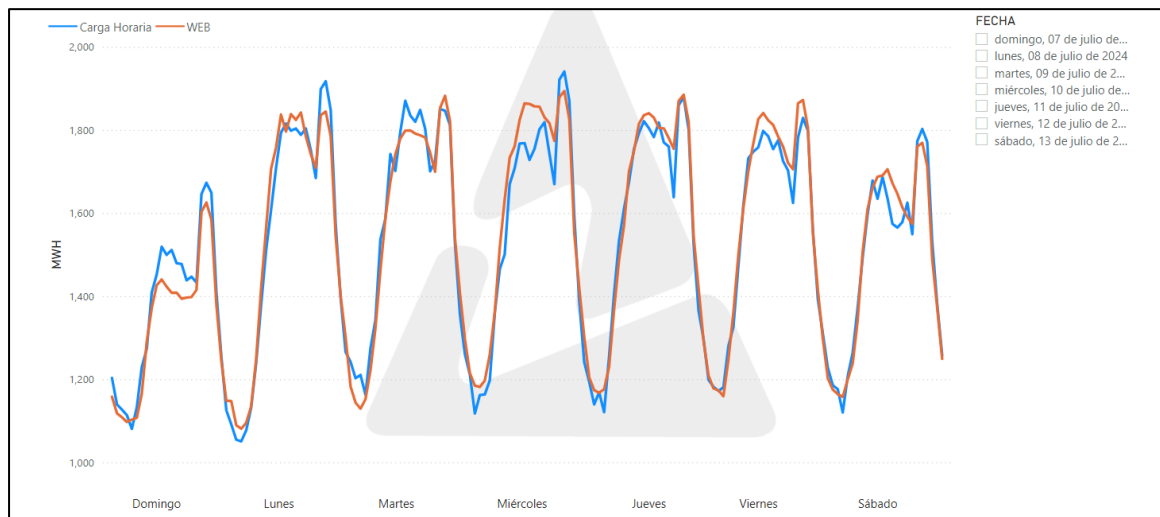
Por medio del análisis de los parámetros eléctricos del sistema de potencia de Guatemala, se establecieron criterios referentes al comportamiento de estos a lo largo del día, partiendo de la forma en que varían los niveles de potencia activa y reactiva que demanda el Sistema Nacional Interconectado y los cambios que en función del tiempo representan, esto se demuestra con la siguiente gráfica.

3.2. Curva de carga de una semana

A continuación, se muestra la curva de carga horaria semanal del SNI de Guatemala para un periodo de tiempo indicado en donde se pueden establecer comportamientos en la potencia demandada por cada día.

Figura 7.

Curva de carga del SNI del 07/07/2024 al 13/07/2024



Nota. Se muestra el comportamiento de la carga del SNI a lo largo de una semana. Tomado de *Reportes AMM [gráfica]* Administrador del Mercado Mayorista, 2024, <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoIOTYxZWYwZmEtYjk3NC00YzQxLTkwYzYtNmU3ZDYwM2VhMzNliwidCI6ImFINjg1NjQ3LWlyZmEtNGI3Yy1iZjU2LTg1ZTQyZDJmNjQzOCIsImMiOiR9.> Consultado el 18 de julio de 2024. De dominio público.

Con base en el análisis de datos reales y actualizados del ente operador del Sistema Nacional Interconectado, el Administrador del Mercado Mayorista (AMM), se determinó el comportamiento de la demanda de potencia, donde se encontró que, a lo largo del periodo de medición, los cambios en la energía activa

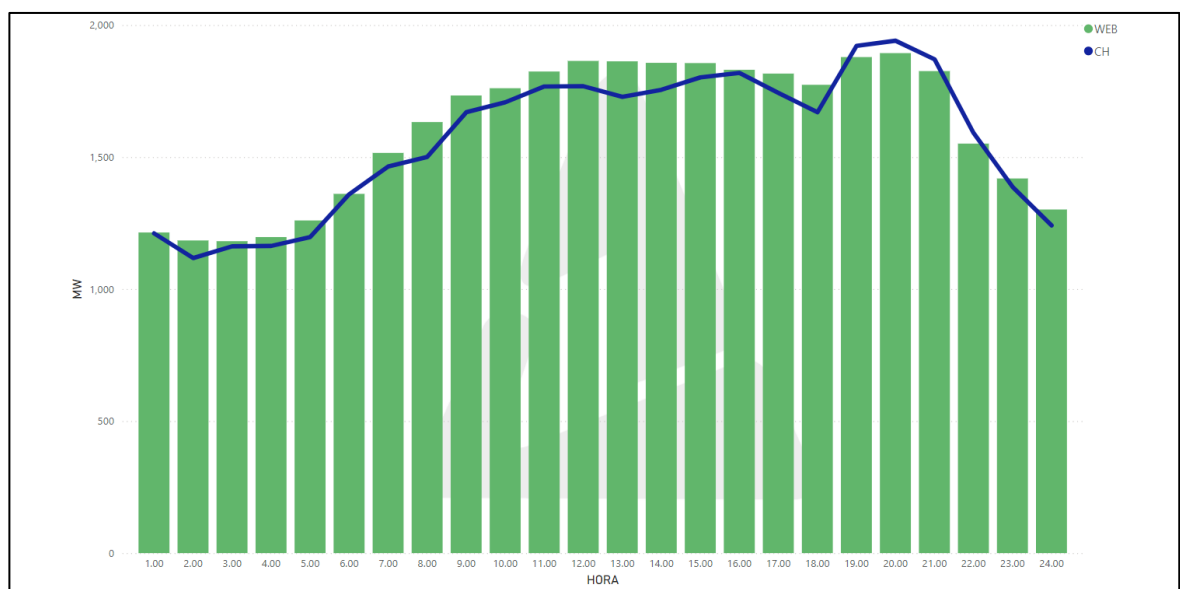
varían entre el orden de los 1200 MWH y casi los 2000 MWH, lo cual representa un reto en el control de la tensión debido a las variaciones.

3.3. Comportamiento de la curva de carga de un día

La siguiente figura es de mucha importancia dentro del análisis para la realización del estudio técnico de los sistemas de excitación, ya que presenta las variaciones bruscas de potencia a lo largo de un día, información que se toma en cuenta para los tiempos de reacción de estos sistemas.

Figura 8.

Curva de carga horaria por día del SNI



Nota. Se muestra el comportamiento de la carga del SNI a lo largo de un día. Tomado de *Reportes AMM [gráfica] Administrador del Mercado Mayorista, 2024*, <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiaOTYxZWYwZmEtYjk3NC00YzQxLTkwYzYtNmU3ZDYwM2VhMzNliiwidCI6ImFINjg1NjQ3LWlyZmEtNGI3Yy1iZjU2LTg1ZTQyZDZmNjQzOCIsImMiOiR9&pageName>. Consultado el 18 de julio de 2024. De dominio público.

De la misma forma, analizando estos datos a lo largo de una muestra de un día, como se muestra en la figura 8, donde se ve el comportamiento en la demanda de potencia por hora, se confirma nuevamente las variaciones que esta sufre continuamente.

3.4. Resultados del análisis de las NCO del AMM

Partiendo de la Norma de Coordinación Operativa No.3 Coordinación de Servicios Complementarios del Administrador del Mercado Mayorista, en su artículo 3.5 Control de Potencia Reactiva y Tensión donde se especifica la necesidad de que todos los participantes del mercado mayorista controlen la potencia reactiva en sus puntos de conexión, se distribuyen las siguientes responsabilidades hacia los agentes generadores:

Es responsabilidad de los generadores:

- Instalación de un regulador automático de tensión en cada unidad generadora que permita mantener un valor determinado de tensión en su punto de conexión actuando sobre el sistema de excitación de aquella y eventualmente sobre el conmutador de tomas del transformador.
- En condiciones normales, entregar o absorber potencia reactiva según lo requiera el AMM, siempre y cuando el punto de operación de las unidades generadoras se mantenga dentro de los rangos contemplados en la curva de capacidad y sin exceder el factor de potencia de diseño.
- En condiciones de emergencia, entregar o absorber potencia reactiva según lo requiera el AMM, hasta el ciento por ciento (100 %) de la

capacidad reactiva de sus unidades generadoras, o el máximo que debido a las características del sistema sea posible.

Derivado de estas aseveraciones descritas en normativas vigentes y del comportamiento variante de la carga del sin, se hace necesario contar con un sistema de control robusto, seguro y eficiente para el control de la tensión en un generador eléctrico. Sin embargo, tener un control eficiente en la tensión generada por un generador requiere del ajuste de parámetros específicos, de donde el objetivo es maximizar la potencia activa y reactiva entregada o absorbida por el generador y a su vez que este opere de forma segura sin ser comprometido a un daño.

3.5. Resultados en los riesgos técnicos de operación

Los siguientes riesgos técnicos a los cuales puede enfrentarse los nuevos generadores eléctricos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos al no contar con un control eficiente en la tensión debido a la variabilidad de la carga son:

3.6. Riesgos en el área de máxima excitación

Los siguientes riesgos técnicos se determinaron con base a la dinámica de operación del Sistema Nacional Interconectado en el área de mayor demanda de energía de la red y los problemas a nivel de generadores eléctricos que se pueden derivar ya que una mayor corriente o consumo de energía en la red de potencia exige que un generador se excite más, aportando potencia reactiva para compensar la caída interna de la tensión. Estos riesgos son:

- Aumento de disipación de calor en la resistencia interna del bobinado de campo por aumento en la corriente de excitación que puede provocar fundición en el cobre.
- Riesgo de sobrepaso del límite térmico del cobre del rotor.

3.7. Riesgos en el área de mínima excitación

- Pérdidas de estabilidad al bajar la corriente de excitación debido a la capacidad del generador de convertir el torque mecánico de la turbina a torque eléctrico ya que se pierde el enlace de transformación y el generador comienza a trabajar de forma aleatoria en velocidad, corriente y potencia.
- Incremento de temperatura en el hierro de las cabezas de los polos del estator debido a que al bajar en gran medida la corriente de excitación se reducen las líneas de campo que ingresan en las cabezas de los polos del estator, entonces la densidad de campo aumenta, aumentando también la temperatura en los bordes de las cabezas del estator por lo cual se funde el aislamiento.
- Pérdida de campo debido a la pérdida de flujo magnético.

Con respecto al objetivo 2, se identificará las mejoras técnicas en el ajuste del limitador de máxima excitación y el limitador de mínima excitación del regulador de tensión que permitan a los nuevos generadores eléctricos aportar estabilidad de tensión al Sistema Nacional Interconectado.

3.8. Exigencias a nivel regulatorio por el AMM

A partir de los requisitos que se exigen en la Norma de Coordinación Operativa No.1 Base de Datos, del Administrador del Mercado Mayorista, donde se detallan los requisitos más importantes del SNI para que tal entidad utilice la información en la evaluación técnica y operativa del Mercado Mayorista con el fin de garantizar la seguridad, confiabilidad y eficiencia del SNI, se encontró que los sistemas de excitación de las unidades generadoras deben cumplir con la siguiente documentación y requisitos técnicos:

Tabla 1.

Planilla No.1. Características del sistema de excitación

	Descripción	Unidad	Valor
1.8.1	Tensión de excitación a potencia, factor de potencia, tensión y frecuencia nominales	V	
1.8.2	Tensión de excitación máxima	p.u.	
1.8.3	Tensión de excitación mínima	p.u.	
1.8.4	Velocidad máxima de incremento de la tensión de excitación	V/s	
1.8.5	Velocidad máxima de decremento de la tensión de excitación	V/s	
1.8.6	Corriente de excitación máxima	A	
1.8.7	Corriente de excitación mínima	A	
1.8.8	Ganancia del lazo de excitación	p.u.	
1.8.9	Constante de tiempo del sistema de excitación	s	
1.8.10	Constante de tiempo del regulador de tensión	s	

Nota: Norma de Coordinación Operativa. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla 2.*Planilla No. 1. Sistema de excitación*

1.16	Descripción	Forma de presentación
1.16.1	Características de saturación del generador y sistema de excitación	Diagrama para 50 a 120 % de la tensión nominal
1.16.2	Características dinámicas del limitador de sobreexcitación	Texto, diagrama de bloques
1.16.3	Características dinámicas del limitador de subexcitación	Texto, diagrama de bloques

Nota: Norma de Coordinación Operativa. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla 3.*Planilla No. 3. Datos del sistema de excitación*

5.2	Descripción	Forma de presentación
5.2.1	Detalles del lazo de excitación en forma de diagrama de bloques, indicando las funciones de transferencia de los elementos individuales y unidades de medición	Texto, diagramas

Nota: Norma de Coordinación Operativa. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla 4.

Planilla No. 5. Ajustes de dispositivos de control

5.3	Descripción	Forma de presentación
5.3.1	Limitador de sobreexcitación	Texto, diagramas
5.3.2	Limitador de sobreflujo (V/Hz)	Texto, diagramas
5.3.3	Limitador de subexcitación	Texto, diagramas
5.3.4	Limitador de operación manual	Texto
5.3.5	Control conjunto de potencia activa	Texto, función
5.3.6	Control conjunto de potencia reactiva	Texto, función
5.3.7	Modelo dinámico del conjunto rotante turbina-generador en forma de elementos concentrados, indicando constantes de inercia de cada componente, amortiguamientos y rigidez	Diagrama

Nota. Norma de Coordinación Operativa. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

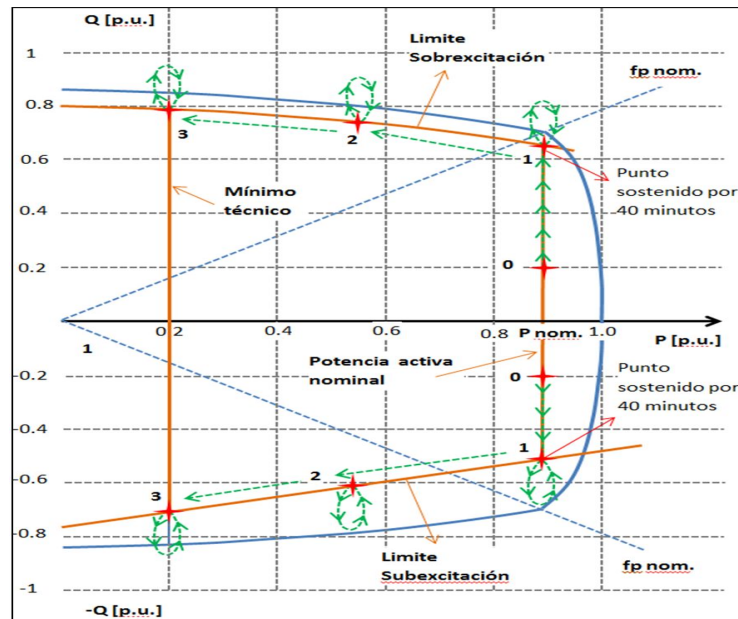
A partir de las tablas descritas, para cumplir con la regulación y garantizar que los nuevos generadores eléctricos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos operen de forma segura de acuerdo con su curva de capacidad se determinó la siguiente prueba o procedimiento para el ajuste de los limitadores de máxima y mínima excitación, partiendo de la siguiente gráfica.

3.9. Resultados en ajustes a limitadores

A continuación, se detallan con suma importancia los ajustes que se deben realizar en los limitadores de máxima y mínima excitación de un sistema de control de tensión para garantizar que el generador eléctrico opere de forma segura y eficiente dentro de su curva de capacidad.

Figura 9.

Puntos de calibración de limitadores



Nota. Se ejemplifican los seis puntos a verificar en la prueba de ajustes de los limitadores. Tomado de *Auditorías de curva de capacidad de generadores [gráfica]* Estudios Eléctricos, 2024, <https://www.estudios-electricos.com/casos/auditorias-de-curva-de-capacidad-de-generadores/>. Consultado el 18 de julio de 2024. De dominio público.

3.10. Parte de sobreexcitación o sobrecalentamiento

Se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Punto 1: se empieza a operar el generador en su punto de máxima potencia activa entregada a la red y el AMM obliga a que el regulador de voltaje aumente los reactivos sin cambiarle sus parámetros establecidos por medio de arreglos entre generadores aledaños que bajen la tensión en el nodo de conexión. Cuando se alcanza el valor seteado del punto se activa el OEL y se deja operando por 30 minutos mientras se toman los

valores de potencia activa, reactiva, corriente, tensión y temperatura del generador.

- Punto 2: se reduce la potencia activa entregada del generador mientras el OEL sigue activo y se deja operando el punto durante 10 minutos.
- Punto 3: se termina de reducir la potencia activa al punto de la mínima potencia declarada del generador y se deja operando el OEL durante 10 minutos.

3.11. Parte de subexcitación o pérdida de estabilidad

Primeramente, se procede a normalizar la tensión de la red nacional regresando las modificaciones hechas a sus valores nominales.

- Punto 1: Se procede a aumentar el valor de la tensión en los generadores aledaños en el punto de conexión para que la máquina en prueba trate de estabilizar la tensión por medio de la absorción de reactivos, cuando el generador empieza a absorber reactivos y llega a su máximo, se activa el MEL y se deja operando por 10 minutos mientras se toman las mediciones, en este punto el generador se encuentra operando en el punto de mínima potencia declarada.
- Punto 2: se procede a aumentar la potencia activa de la máquina y al alcanzar el valor de activa del punto 2 el MEL debe seguir operando mientras se toman mediciones durante otros 10 minutos.

- Punto 3: nuevamente se procede a aumentar la potencia activa hasta la máxima potencia activa nominal del generador mientras el MEL sigue operando y se toman las mediciones durante 20 minutos.

Al terminar la prueba de los 6 puntos se procede a normalizar la red nacional y las mediciones realizadas son analizadas por la empresa certificadora, la cual emite un informe técnico donde se concluya si el generador cumplió o no cumplió con los 6 puntos acordados.

A continuación, se presenta una lista de verificación personalizada para la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos con las especificaciones técnicas que deben cumplir los nuevos sistemas de excitación y la documentación a presentar ante el Administrador del Mercado Mayorista respecto a lo establecido en las Normas de Coordinación Operativa (NCO), según el objetivo 3. Se detalla la lista de verificación de todos los requisitos técnicos con los que debe contar un sistema de excitación para garantizar que el generador opere de forma eficiente. Se incluyen puntos en la parametrización a nivel de software y los aspectos a nivel de hardware.

3.12. Lista de verificación de especificaciones técnicas

La siguiente lista de verificación se realizó con base a consideraciones técnicas con las que debe cumplir un sistema de excitación de acuerdo con normativas vigentes de operación concerniente a la Norma de Coordinación Operativa No.1 del AMM, Base de Datos del SNI para la participación en la generación de energía y normativas complementarias para el aseguramiento de la operación del generador en su región segura de la curva de capacidad, maximizando el despacho de potencia activa y reactiva.

Tabla 5.*Lista de verificación para condiciones de operación*

ITEM	DESCRIPCIÓN	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SÍ	NO	
	Los sistemas de excitación con sus partes correspondientes deberán cumplir o contar con:			
	Rastrear y ajustar la señal de lazo de control (automático o manual), permitiendo la			
	▪ transferencia suave del control de voltaje del modo automático al manual, siempre que ocurra una condición anormal en el sistema. El control del regulador deberá ser digital basado en microprocesadores.			
	▪ Regular automáticamente el voltaje (AVR)			
	Regulador manual de corriente de campo (FVR), el control manual de corriente			
	▪ de campo es parte integral del sistema de excitación y sirve de respaldo al regulador de voltaje automático.			
	Control del factor de			
	▪ potencia (reactiva constante)			
	Control de potencia reactiva			
	▪ (factor de potencia constante)			

Nota. Criterios de normas referentes a sistemas de excitación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla 6.*Lista de verificación para el control de tensión*

ITEM	DESCRIPCIÓN	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SÍ	NO	
	Acumulación de voltaje para arranque suave; el control de excitación deberá estar provisto con un acumulador de voltaje para arranque suave, activo tanto en el modo regulación automática como en el modo manual.			
■	Fuentes de alimentación redundantes; el suministro de energía para el controlador del regulador de voltaje y el control manual será a través de una fuente de alimentación dual de 120 VAC/125 VCD			
■	Transformadores de potencial (PT's) y de corriente (CT's); se deberán proporcionar los transformadores de medición de potencia utilizados para los algoritmos de control y los de medición de corriente directa para los algoritmos del circuito de paralelaje, así también transformadores de corriente y de potencial para aislamiento y condicionamiento de las señales de los transformadores de potencia y corriente de transformadores y corriente del generador.			
■	Bastidores estándar, con las tarjetas controladoras, teclas display y puntos de prueba.			
■	Fuentes reguladas para los circuitos analógicos, para los circuitos lógicos, para el disparo de los tiristores.			

Nota. Criterios técnicos de normas sobre sistemas de excitación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla 7.

Lista de verificación para componentes e instalación

ITEM	DESCRIPCIÓN	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SÍ	NO	
▪	Tarjeta de aisladores galvánicos y tarjetas de acoplamiento ópticos de entrada y salida del controlador.			
▪	Transformadores auxiliares y relés para las interfaces con los circuitos externos.			
▪	Dispositivos por instalar en la puerta frontal del gabinete para control local			
▪	Llave de control local y selección para comando remoto para interfaz con los circuitos existentes.			
▪	Instrumentos indicadores con escalas adecuadas (potencia activa, potencia reactiva, corriente de campo, voltaje de campo, etc.)			
▪	Componentes necesarios para el circuito de potencia (puente, interruptores, y otros dispositivos de potencia)			
▪	Excitación inicial forzada (Field flashing); proporcionar los dispositivos para la formación del circuito de excitación forzada, a partir de una fuente, externa independiente de 125 VDC.			
▪	Circuito de descarga; para protección del puente rectificador y del campo se deberá tener un comando gobernado por el control del regulador de voltaje para hacer la descarga del campo del generador a través de las resistencias de descarga.			
▪	Interruptor de potencia; interruptor montado sobre la barra CC biestable eléctricamente comandada con intertrabamiento mecánico y cámara de extinción de arco por soplo magnético.			

Nota. Criterios técnicos de normas sobre sistemas de excitación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla 8.

Lista de verificación para el transformador de excitación

ITEM	DESCRIPCIÓN	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SÍ	NO	
	Transformador de excitación Si se requiriera de acuerdo con el tipo de SE a utilizar deberá contar con: - Tipo seco encapsulado clase H montado en el interior de una celda metálica con grado de protección IP-33 según normas IEC, separada de las celdas del sistema de excitación. - La elevación de la temperatura media de los devanados no debe exceder los 80 K. - Debe ser del tipo rectificador y considerar una mayor potencia de al menos un 10% debido a las corrientes armónicas originadas por las cargas no lineales (puente de tiristores). - El transformador debe incluir un sistema de medición y monitoreo continuo de la temperatura de sus devanados, se deben incluir alarmas y debe ser capaz de dar una señal de disparo por alta temperatura. - El transformador y la celda metálica deben cumplir con un diseño sísmico. - Se recomienda que el diseño del transformador sea un esquema delta/estrella para evitar la circulación de armónicos. - Se debe especificar un factor techo (2 a 4) para ser tomado en cuenta en el diseño del transformador.			

Nota. Criterios técnicos de normas sobre sistemas de excitación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla 9.

Lista de verificación para los accesorios de control de tensión

ITEM	DESCRIPCIÓN	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SÍ	NO	
	■ Accesorios de control, medición y protección; se deberá suministrar los accesorios, equipos, algoritmos y funciones que sean requeridas para un buen funcionamiento de la unidad generadora ■ Limitador de Mínima Excitación (MEL) ■ Limitador de Máxima Excitación (OEL) ■ Control de VAR/FACTOR DE POTENCIA ■ Algoritmos de autorastreo de señal de regulador no activo o en operación ■ Transferencia automática del modo de operación automática a manual y var/factor de potencia ■ Estabilizador del sistema de potencia ■ Control remoto ■ Conmutadores tipo pistola para instalación en sala de mando (cierre de excitación, apertura de excitación, voltaje modo manual, voltaje modo automático, var/factor de potencia, subir/bajar voltaje) ■ Push button para restablecer bloqueos en la excitación (RESET) ■ Estación remota de pantalla táctil para monitoreo y control del sistema. ■ Medición remota: esta información deberá estar disponible a través de un puerto serial con protocolo abierto ModBus y documentos para realizar esta tarea.			

Nota. Criterios técnicos de normas sobre sistemas de excitación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla 10.

Lista de verificación para indicadores de falla

ITEM	DESCRIPCIÓN	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SÍ	NO	
	Panel de alarmas: el control del regulador de voltaje deberá proporcionar un panel de alarmas con indicación mediante señal luminosa y sonora de las fallas de los equipos asociados al sistema de excitación			
▪	Falla leve			
▪	Falla grave			
▪	Regulador listo			
▪	Bloqueo de grupo			
▪	Grupo excitado			
▪	Grupo sincronizado			
▪	Control automático			
▪	Control manual			
▪	Limitador de Mínima Excitación			
▪	MEL activo			
▪	Señalización remota			
▪	Excitación ON			
▪	Excitación OFF			
▪	Fin de curso			
▪	Limitador de Máxima			
▪	Excitación OEL activo			
▪	Disparo de protección			
▪	Falla leve en el regulador			
▪	Funciones de protección mínimas incorporadas			
▪	Sobre y bajo voltaje del generador			
▪	Sobre voltaje de campo			
▪	Vigilancia			
▪	Pérdida de voltaje			

Nota. Criterios técnicos de normas sobre sistemas de excitación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla 11.

Lista de verificación para los servicios de montaje del SE

ITEM	DESCRIPCIÓN	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
	SERVICIOS DE MONTAJE			
■	El contratista, para el montaje y la puesta en servicio del sistema de control de la excitación proporcionará la mano de obra, materiales, herramientas y equipo necesario para la ejecución de las siguientes actividades: Debe considerarse como parte del suministro e instalación el			
■	desmontaje de los equipos a sustituir en el sistema de control de la excitación actual con la finalidad de aprovechar los espacios ya existentes. El contratista será responsable del suministro, así como de la instalación			
■	completa y puesta en servicio del nuevo sistema de control de excitación.			
■	El contratista deberá considerar el diseño de la interconexión de los elementos de control, alimentación de corriente alterna CA y de corriente directa DC del sistema propuesto con los existentes en la planta.			
■	Para los cableados se podrán utilizar los ductos y canaletas existentes, el contratista será responsable de			
■	desconectar y quitar todo cableado antiguo que no se usará como resultado de la nueva instalación del nuevo cableado			
■	El contratista deberá asumir los gastos de mano de obra y materiales de obra civil que se lleve a cabo en la instalación completa del nuevo sistema.			

Nota. Criterios técnicos de normas sobre sistemas de excitación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla 12.*Lista de verificación para cableados*

ITEM	DESCRIPCIÓN	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SÍ	NO	
▪	El cableado de control desde el cubículo del sistema de excitación hacia sala de mando deberá ser nuevo.			
▪	El contratista será responsable por las pruebas de funcionamiento y operación del nuevo sistema de control de la excitación, ajustes de los componentes internos del mismo.			
▪	El contratista deberá considerar proveer la multiplicación de contactos auxiliares del interruptor principal de la unidad si fuera necesario, así como el cableado del sistema hacia estos contactos.			
▪	Para la puesta en servicio, pruebas y calibración del sistema de control de regulación, el contratista deberá proporcionar los servicios de un especialista de la casa fabricante, que compruebe y acredite su experiencia en trabajos similares y quedará a discreción del INDE aceptar o no dicha acreditación para su entera satisfacción.			
▪	El contratista debe dar capacitación técnica del montaje mantenimiento y operación del equipo al personal de mantenimiento y operación de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos.			

Nota. Criterios técnicos de normas sobre sistemas de excitación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla 13.

Lista de verificación de otras consideraciones del proyecto

ITEM	DESCRIPCIÓN	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SÍ	NO	
	Otras consideraciones			
■	En el caso que el oferente con base a su experiencia considere necesarias otras actividades deberá incluirlas en su oferta.			
■	Considerar el traslado del sistema de control de excitación, al sitio de montaje en la casa de máquinas de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, Km 66 1/2 carretera Guatemala - El Salvador			
■	Considerar a el personal profesional y técnico que permita el desarrollo de todas las actividades necesarias, para el montaje, pruebas y la puesta en operación del control de excitación y sus equipos auxiliares.			
■	La ejecución del proyecto deberá proporcionar un cronograma que contenga todas actividades y tiempos para el traslado, montaje, pruebas, puesta en operación; así como un detalle del personal técnico y especializado para cada actividad a ejecutar, en los trabajos de la casa de máquinas de Planta Hidroeléctrica Los Esclavos.			
■	El contratista está obligado a elaborar el protocolo de pruebas, indicando la norma a utilizar y acompañar una copia de la misma.			
■	El contratista está obligado a proporcionar la herramienta y equipo que sea necesario para el montaje, pruebas y puesta en operación, manteniendo en todo momento la propiedad de los mismos.			

Nota. Criterios técnicos de normas sobre sistemas de excitación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla 14.***Lista de verificación de la entrega y recepción de los equipos***

ITEM	DESCRIPCIÓN	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
■	Todas las pruebas serán verificadas y aprobadas por un representante de la Empresa de Generación de Energía Eléctrica del INDE.			
	Lugar de entrega			
■	El contratista deberá entregar el suministro de los bienes en la bodega de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, municipio de Cuilapa Departamento de Santa Rosa, Km 66.5 de la ruta a El Salvador.			
	Recepción			
■	Una vez concluidos los trabajos, el contratista informará por escrito al Supervisor del Contrato designado por el INDE, la finalización de los mismos, preparando toda la información para entregarla al Supervisor del Contrato, con esta diligencia se interrumpirá el plazo de entrega provisionalmente.			
	El supervisor designado por el INDE y el contratista, efectuarán la inspección final y si los trabajos no están conforme a los planos y especificaciones lo manifestará por escrito al contratista para que este proceda a subsanar las deficiencias, en cuyo caso el plazo del servicio seguirá corriendo a partir de la fecha de notificación.			
	Si los trabajos estuvieran correctamente concluidos, el Supervisor procederá a suscribir acta de recepción para liquidación del contrato.			

Nota. Criterios técnicos de normas sobre sistemas de excitación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla 15.*Lista de verificación de la garantía de los equipos*

ITEM	DESCRIPCIÓN	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SÍ	NO	
▪	Garantía Garantía del suministro: El contratista deberá presentar el certificado de garantía del fabricante, donde conste que el suministro es nuevo y de reciente fabricación, que se acoplan perfectamente a los equipos instalados y cumple con todos los requisitos que se especifican en estos Términos de Referencia. Así mismo, deberá acreditar una Garantía de equipos, contra fallas y desperfectos por un periodo igual o mayor a 18 meses y su vigencia será a partir de su puesta en servicio. Indicar el tiempo de vida útil esperado, funcionando en condiciones normales de operación Garantía del servicio: Acreditar una por servicios de montaje e instalación, contra fallas y desperfectos por un periodo igual o mayor a 18 meses y su vigencia será a partir de su puesta en servicio. La garantía también incluye, Certificados de Calidad de Materiales utilizados en su fabricación, Protocolo y Certificado de Pruebas de acuerdo con los requisitos establecidos en el renglón correspondiente, del Capítulo II de estos Términos de Referencia.			

Nota. Criterios técnicos de normas sobre sistemas de excitación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla 16.

Lista de verificación de pruebas de funcionamiento

ITEM	DESCRIPCIÓN	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
	Pruebas			
■	El contratista deberá presentar el certificado de las calibraciones y pruebas realizadas a los materiales y accesorios realizadas por el fabricante. El INDE se reserva el derecho de presenciar y verificar las pruebas anteriormente descritas. Las calibraciones, ajustes y pruebas que deberá realizar son:			
■	Disparo del puente rectificador con alimentación externa			
■	Polaridad con la pre-excitación			
■	Secuencia de fases a la salida del generador			
■	Ajuste de tensión terminal			
■	Ajuste de corriente de campo			
■	Ajuste de tensión de campo			
■	Excitación gradual de tensión en canal automático/manual			
■	Excitación por tensión terminal			
■	Excitación por corriente de campo			
■	Des-excitación por tensión terminal			
■	Ajuste de la malla dinámica del control de tensión/corriente			
■	Ajuste de limitar de corriente de campo			
■	Ajuste de limitador volt/hertz			
■	Protección de sobre tensión (Crow-Bar)			
■	Conmutación entre regulación de tensión/corriente			
■	Ajuste de transducción de potencia			
■	Ajuste de las mallas de carga			
■	Dinámica del control de tensión con carga (respuesta al escalón)			
■	Dinámica del control de corriente de carga (respuesta al escalón)			
■	Dinámica del control del reactivo (respuesta al escalón)			
■	Limitador de máxima/mínima de la excitación con carga			

Nota. Criterios técnicos de normas sobre sistemas de excitación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Tabla 17.

Lista de verificación de los certificados de calidad

ITEM	DESCRIPCIÓN	CUMPLE	
		SI NO	OBSERVACIONES
	Certificado de calidad		
▪	El contratista deberá presentar los certificados de calidad de equipos a suministrar son nuevos, de reciente fabricación y libres de desperfectos o defectos, originales, no reparados. Catálogos y planos		
▪	El contratista deberá proporcionar dos (2) copias impresas y dos (2) magnéticas de los catálogos, manuales de operación y mantenimiento, procedimiento para su montaje, operación y calibración de los componentes y accesorios, así como los planos generales y específicos donde se detalle cada uno de los componentes con sus respectivas medidas, materiales de manufactura, códigos, normas, etc.		
	Plazo de entrega		
	El plazo de entrega será de doce (12) meses, contados a partir del día siguiente de la notificación al Beneficiario de la apertura de la Carta de Crédito. Dentro de dicho plazo el Contratista dispondrá de diez (10) días para su instalación, pruebas y puesta en servicio previa coordinación con la Jefatura de la Planta quien gestionará ante el AMM la autorización de la Indisponibilidad requerida.		
	Las fechas de indisponibilidad ante el Mercado, (para poder trabajar con el Contratista) estarán sujetas a probables cambios derivados de disposiciones de Administrados del Mercado Mayorista, disponibilidad de altos caudales de aporte y sus compromisos contractuales. Preferentemente los trabajos se ejecutarán en época de verano, de acuerdo a las conveniencias del INDE.		

Nota. Criterios técnicos de normas sobre sistemas de excitación. Elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Una vez establecidos estos términos de referencia, se tiene respaldo y garantía para la mejora de los nuevos sistemas de excitación de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos.

La propuesta de mejora de los sistemas de excitación de las unidades generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, que es el objetivo general de esta investigación, se conforma por dos partes esenciales, las cuales son:

- Elaboración de protocolo de pruebas a realizar para el correcto ajuste de los equipos de control en la operación de los generadores eléctricos, enfocado a los limitadores de máxima y mínima excitación.
- Elaboración de una guía que indica los requisitos técnicos a solicitar con los que deban cumplir los equipos en la adquisición.

Para lograr un control eficiente de la tensión eléctrica en un generador eléctrico se debe controlar de forma correcta la potencia reactiva, esto con el fin de aumentar o disminuir la tensión según el requerimiento de la carga.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En Guatemala muchos de los eventos a nivel eléctrico en la tensión que han ocurrido en el Sistema Nacional Interconectado, tienen origen por en el deficiente control de la potencia reactiva en las unidades generadoras, lo cual ocasiona pérdidas económicas y colapsos de estabilidad en el sistema de potencia.

En este contexto surge la necesidad de implementar mejoras a nivel técnico en las diferentes partes que conforman todo el sistema de potencia para tratar de minimizar este tipo de problemas que como bien se explicó, pueden llegar a repercutir en pérdidas económicas, por tal razón, en la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, que se encuentra en proceso de renovación de sus dos unidades generadoras, se debe garantizar que estas aporten estabilidad al SNI por medio del correcto ajuste en sus dispositivos de control de tensión.

El presente estudio parte de dar a conocer los problemas que se derivan de tener un mal control de la tensión en los generadores eléctricos, para luego determinar ajustes en los limitadores de los sistemas de excitación que permita mitigar o disminuir estos problemas, hasta llegar a establecer una lista de verificación de requisitos técnicos con los que deben contar los nuevos sistemas de excitación con el fin de asegurar que los nuevos generadores puedan participar en la generación de energía eléctrica en Guatemala y operen de forma eficiente.

4.1. Análisis interno

Para la primera parte, como se mencionó en los resultados, la curva de carga del SNI varía ampliamente a lo largo del día, donde por las noches en el horario de 19:00 a 21:00 horas alcanza sus valores máximos de demanda. En esta región, los generadores eléctricos son los encargados en primera línea para regular el nivel de tensión del sistema ya que, a mayor demanda de potencia activa, la tensión en la red tiende a caer. Entonces, los generadores eléctricos entregan reactivos para compensar la caída interna de tensión. Al tener este tipo de variabilidad en la red, la seguridad de los nuevos generadores eléctricos puede verse comprometida debido al incremento de la potencia reactiva que sobrepasa los puntos limitados de la curva de capacidad, y puede resultar en temperaturas elevadas en los devanados que dañarían su aislamiento y acortarían su duración.

Conociendo esto, se debe garantizar que el sistema de excitación sea capaz de mantener al generador dentro de los límites nominales de operación, controlando la corriente, sin salir de los límites de capacidad del generador, compensación y ajustes de acuerdo con los requerimientos de la red que se presenten.

4.2. Ajustes en el limitador de máxima excitación

El limitador de subexcitación debe parametrizarse para garantizar que el generador opere manteniendo un margen de seguridad preestablecido para:

- Calentamiento de cabezas de bobina de estator
- Límite de estabilidad teórico y práctico
- Límite de mínima corriente de campo

- Mínima tensión de servicios auxiliares

4.3. Ajustes en el limitador de mínima excitación

El limitador de máxima excitación debe ajustarse de manera tal que opere manteniendo un margen de seguridad preestablecido con respecto a las curvas de:

- Máxima corriente de campo
- Máxima corriente de estator
- Máxima tensión de servicios auxiliares

4.4. Prueba de ajuste a limitadores

Para dar cumplimiento y garantizar la fiabilidad de que el sistema de excitación asegura la operación de los generadores, en el segundo objetivo de la investigación se propuso una prueba para validar estos ajustes, ya que en la Norma de Coordinación Operativa (NCO 1), el AMM solicita datos de respuesta y ajustes de los sistemas, de tal forma que la prueba a realizar a los limitadores garantiza que los datos entregados son verídicos. Sin embargo, para la realización de esta prueba se deben cumplir ciertas condiciones que se deben tomar muy en cuenta para aumentar las probabilidades de éxito en la ejecución.

Estas son:

Se debe garantizar que previo a la realización de las pruebas en la configuración de los limitadores de máxima y mínima excitación se satisfagan las siguientes condiciones y procedimientos:

- El generador declara al AMM su curva de fabricante del generador.
- El generador declara los puntos de operación de sus limitadores de mínima y máxima excitación.
- El AMM revisa los puntos de operación y si están muy por debajo de la curva de capacidad no debería permitirle salir despachado al generador debido a que no aporta estabilidad en tensión.
- El generador debe declarar tres puntos de operación en la zona de sobreexcitación y tres puntos de operación en la zona de subexcitación cercanos a los valores límites de la curva de capacidad de la máquina.
- El AMM aprueba los puntos debido a que están correctamente parametrizados para aportar estabilidad.
- Se procede a verificar y garantizar que el AVR opera en los 6 puntos declarados ante el AMM.
- Si no se está seguro, el generador debe llamar al fabricante del AVR para que ajuste las curvas del OEL y MEL para que cumpla estos 6 puntos.
- Se debe coordinar para que las protecciones no se disparen ante la operación de los limitadores cuando el generador opere en los límites de su curva de capacidad ya que se debe garantizar que la máquina soporte la operación en los puntos más extremos que son el punto de máxima potencia activa y máxima potencia reactiva.
- Garantizar que el sistema de enfriamiento esté operando correctamente para que el generador se proteja ante el calentamiento producido en los puntos extremos de la prueba.
- El generador debe contratar a una empresa certificadora que de fiabilidad que las mediciones y valores durante la prueba se cumplieron.
- Se debe garantizar que el generador opere a su tensión nominal o 1 p.u.
- Durante la prueba no se pueden realizar cambios en el AVR.
- El AVR tiene que estar en su funcionamiento de forma automática.

4.5. Análisis externo

SERPRO (2012) menciona que un sistema de excitación 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.

Con el fin de establecer una propuesta de mejora de los sistemas de excitación de las unidades generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, se realizó un análisis a nivel técnico que parte desde los impactos que conlleva un déficit en el control de la tensión en un generador eléctrico y el impacto que puede tener en un sistema de potencia. La bibliografía anterior establece que un sistema de excitación es el encargado de regular la corriente al generador y que este opere dentro de su curva de capacidad. Realizando un análisis más detallado la idea de contar con un sistema robusto y con características enfocadas a la protección y eficiencia del generador, se acopla a lo establecido en este estudio.

En cuanto a un sistema de potencia, Lira (2009), menciona que 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.

Los problemas en la calidad de la potencia eléctrica representan muchas de las fallas en la operación de las industrias, una de ellas es la regulación de la tensión eléctrica, que cada día se ve más obligada a cumplir estándares más altos debido a que muchas de las cargas conectadas a las redes eléctricas son cargas no lineales que cada día evolucionan debido al avance de la tecnología, por ello es de suma importancia que en los generadores eléctricos del sistema de potencia se tengan ajustados de forma correcta y eficiente los equipos de control de la tensión ya que son los primeros en responder ante cambios bruscos de potencia en la red.

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 SNI.

Una vez que se determinaron los problemas a los cuales pueden estar expuestos los nuevos generadores y se detallaron las pruebas necesarias para la calibración de los limitadores, se llegó a establecer una lista de verificación de cumplimiento con especificaciones técnicas que deben cumplir los nuevos equipos para completar la propuesta de mejora de los sistemas de excitación.

Sin embargo, la realización de la lista de verificación se obtuvo por medio del análisis de bibliografía sobre el tema, artículos científicos, normas y experiencia de personal técnico encargado de la planta a través de los múltiples

sistemas utilizados anteriormente, donde los criterios más relevantes para su realización se basaron en las siguientes características:

- Mantener el voltaje terminal de la máquina en el valor definido por el operador, debe ser capaz de mantener la relación entre voltaje y carga reactiva en toda la región de la operación.
- Mantener el voltaje terminal dentro de los límites aceptables de trabajo, lo mismo en rechazos de carga plena como también otros severos disturbios en el SEP.
- Mantener valores de voltaje de campo superiores al valor nominal del full carga.
- Que sea capaz de aplicar tensiones positivas y negativas al campo del generador, valores realmente superiores al valor básico de excitación, buscando influenciar el torque de aceleración de manera que se la máquina síncrona se mantenga en sincronismo con el SEP.
- En el caso de paralelo de unidades en la barra de alta tensión eléctrica, el SE debe ser capaz de compensar parte de la caída de tensión en la reactancia del transformador elevador, o deberá ser provisto de una característica adecuada del voltaje en función de la carga reactiva capacitiva o inductiva, a fin de propiciar el paralelo de otros generadores en la propia barra terminal.
- Ser capaz de limitar dinámicamente la corriente de excitación, de acuerdo con la característica de capacidad del propio campo, independientemente de la eventual necesidad de aumento de excitación que la malla de control del voltaje terminal imponga.
- Ser capaz de limitar dinámicamente la operación de la máquina en regiones próximas al límite de estabilidad, independientemente de la necesidad de decrecimiento de la excitación que la malla de control del voltaje terminal imponga.

- Ser capaz de contribuir de manera efectiva para la amortiguación de oscilaciones electromecánicas que aparezcan en el sistema de potencia o en la propia unidad.
- Ser capaz de limitar dinámicamente la operación de la máquina en condiciones de sobre flujo, limitando la relación Volts/Hertz.
- Opcionalmente ser capaz de limitar la corriente de armadura, referente a la carga reactiva, independientemente de la necesidad de aumento o decrecimiento de excitación que el control de voltaje imponga.
- También, como exigencia opcional, se puede exigir que el SE sea capaz de mantener el voltaje en la barra de alta voltaje dentro de una faja especificada, ofreciendo, todavía, una división equitativa de la carga reactiva de las unidades en paralelo.

Con este trabajo de investigación se aporta de forma objetiva al nuevo proyecto de renovación de los generadores eléctricos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos donde se brindan recomendaciones técnicas a considerar para el ajuste de sus equipos de control de la tensión y especificaciones técnicas que deben cumplir para su máxima eficiencia en la operación de los nuevos generadores.

CONCLUSIONES

1. Se analizó el impacto técnico donde se determinó que contar con un control deficiente de la regulación de tensión en los generadores eléctricos repercute en aumentos excesivos de temperatura en los devanados de campo y estator, además de pérdidas de estabilidad y acople magnético.
2. Al identificar e implementar mejoras técnicas en los limitadores de máxima y mínima excitación se establecieron que estas deben realizarse por medio de una prueba de verificación de la operación donde se busca ajustar los limitadores de acuerdo con la curva de capacidad del fabricante de los generadores eléctricos.
3. Se elaboró la lista de verificación de requisitos técnicos para aportar en las especificaciones técnicas con las que deben contar los nuevos sistemas de excitación de las unidades generadoras de la hidroeléctrica por medio del análisis de las normas de coordinación operativa del Administrador del Mercado Mayorista, bibliografía y artículos científicos del tema.
4. Se realizó la propuesta de mejora de los sistemas de excitación de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, que consistió en brindar ajustes en los equipos de control de la tensión y una lista de verificación de especificaciones técnicas que buscan garantizar que los nuevos generadores eléctricos de la planta Hidroeléctrica Los Esclavos aporten estabilidad en tensión en su nodo de conexión al SNI sin comprometer la seguridad de estos.

RECOMENDACIONES

1. Un control eficiente en la regulación de tensión debe garantizar que todos los sistemas de excitación de los entes generadores del Sistema Nacional Interconectado estén correctamente ajustados para que las unidades generadoras entreguen o absorban reactivos de acuerdo con la necesidad de la red. Por lo tanto, para fines de esta investigación, se sugiere al Instituto Nacional de Electrificación realizar el cálculo de la variación de la regulación de tensión de forma mensual para contar con un historial de mediciones que permita comparar las variaciones máximas a lo largo de cada año.
2. Una forma de mantener la estabilidad de tensión de un sistema eléctrico se logra por medio del correcto ajuste en los equipos de control de tensión de los generadores por medio de la realización de pruebas a los limitadores que aumenten la seguridad y eficiencia, por esta razón, se hace necesario realizar una prueba de ajuste a los limitadores cuando se realicen renovaciones a equipos, cambios o incorporaciones de nuevas máquinas generadoras y mantenimientos a los equipos de control.
3. La lista de verificación contiene muchos criterios técnicos a tomar en cuenta para la elección de los sistemas de excitación de los generadores eléctricos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, por lo tanto, es de mucha importancia dar cumplimiento a cada criterio que se menciona, ya que con la misma trae beneficios considerables a nivel técnico y económico para la hidroeléctrica.

4. Es relevante la implementación de la propuesta de mejora para los sistemas de excitación que se detalla en este trabajo de investigación ya que permitirá incrementar la eficiencia y seguridad en la operación de los generadores eléctricos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos debido a que aporta conocimiento en la parte técnica y práctica para la elección de un sistema de excitación, pero también en la forma que se debe realizar el ajuste de los limitadores de máxima y mínima excitación, por lo tanto, implementar las dos partes garantiza un mejor rendimiento de los equipos de generación.

REFERENCIAS

Acuerdo 1563 Procedimiento para la realización de las pruebas de verificación de la curva de capacidad de las plantas de generación y autogeneradores eólicos y solares fotovoltaicos conectados al STN y STR. (05 de mayo de 2022). Consejo Nacional de Operación. Acuerdo 1563. Colombia.
<https://www.cno.org.co/content/acuerdo-1563-por-el-cual-se-establece-el-procedimiento-para-la-realizacion-de-las-pruebas>

Chapman, S. (2012). *Máquinas Eléctricas*. McGraw-Hill Latinoamericana, S.A.

Consejo Nacional de Operación (2020). *Procedimiento General para la Realización de Pruebas de Verificación de la Curva de Capacidad*.
https://cnostatic.s3.amazonaws.com/cno-public/archivosAdjuntos/anexo1_acuerdo_1364.pdf

Estudios Eléctricos (2023). *Auditoría curva de capacidad Parque Solar El Paso*.
https://cnostatic.s3.amazonaws.com/cno-public/archivosAdjuntos/EE-EN-2023-1625-RD-Informe_Auditoria_Potencia_Reactiva_PS_El_Paso.pdf

Estudios Eléctricos (2024). *Auditoría de curvas de capacidad*.
<https://www.estudios-electricos.com/casos/auditorias-de-curva-de-capacidad-de-generadores/>

Estudios Eléctricos (2024). *Auditoría curvas de capacidad Portón del Sol*.
<https://cnostatic.s3.amazonaws.com/cno-public/archivosAdjuntos/EE-EN-2024-0184-RB>
[Informe Auditoria Potencia Reactiva PS Porton%20del%20Sol.pdf](#)

Fuentes, C. (2005). *Propuesta de cambio de un sistema de excitación dinámico en un generador síncrono, por un sistema de excitación estático de una planta de generación eléctrica*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital.
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0558_EA.pdf

IEEE STD 421.1 (2007) *Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines* [Definiciones para sistemas de excitación para máquinas síncronas]. IEEE.

IEEE STD 421.2 (1990) *Guide for Identification, Testing, And Evaluation of The Dynamic Performance of Excitation Control Systems* [Guía para la identificación, prueba y evaluación del desempeño dinámico de los sistemas de control de excitación]. IEEE.

Lira, D. (2009). *Instalación, pruebas y puesta en servicio de reguladores automáticos de voltaje en los generadores síncronos de la central Hidroeléctrica Chixoy*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. <http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis>

Mazariegos, H. (2005). *Determinación de curvas de capacidad de una máquina síncrona de polos salientes*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0542_EA.pdf

Mora, F. (2015). *Máquinas Eléctricas*. Garceta.

Norma de Coordinación Operativa No.1. (03 de junio de 2020). Administrador del Mercado Mayorista. Normas Operativas NCO-1: Base de Datos. Guatemala. https://www.cnee.gob.gt/wordpress/?page_id=571

Norma de Coordinación Operativa No. 2. (28 de mayo de 2013). Administrador del Mercado Mayorista. Normas Operativas NCO-2: Coordinación de la operación en tiempo real. Guatemala. https://www.cnee.gob.gt/wordpress/?page_id=571

Norma de Coordinación Operativa No. 3. (29 de febrero de 2024). Administrador del Mercado Mayorista. Normas Operativas NCO-3: Coordinación de servicios complementarios. Guatemala. https://www.cnee.gob.gt/wordpress/?page_id=571

Norma de Coordinación Operativa No. 4. (29 de febrero de 2024). Administrador del Mercado Mayorista. Normas Operativas NCO-4: Determinación de los criterios de calidad y niveles mínimos de servicio. Guatemala. https://www.cnee.gob.gt/wordpress/?page_id=571

Norma de Coordinación Operativa No. 5. (30 de octubre 2000). Administrador del Mercado Mayorista. Normas Operativas NCO-5: Auditorías. Guatemala. https://www.cnee.gob.gt/wordpress/?page_id=571

Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones. (24 de junio de 2003). Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Normas Técnicas: NTCSTS. Guatemala. https://www.cnee.gob.gt/wordpress/?page_id=555

Núñez, F. (2015). *Centrales de Generación y Subestaciones Eléctricas*. Universidad APEC.

Orellana, J. (2004). *Sistemas digitales de control de la excitación (DECS) y regulación primaria de voltaje en generadores eléctricos*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. <http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis>

Rosales, J. (2016). *Determinación de parámetros de regulador de tensión, regulador de velocidad y PSS de unidades generadoras de Central Hidroeléctrica Carena*. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Archivo digital. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/143567/Determinaci%C3%B3n-de-par%C3%A1metros-de-regulador-de-tensi%C3%B3n-regulador-de-velocidad-y-PSS-de-unidades-generadoras.pdf?sequence=1>

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

Tonato, J. (2020). *Manual de operación y mantenimiento eléctrico del generador síncrono de una unidad de generación de la central Hidroeléctrica Paute Sopladora*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca]. Archivo digital.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18457/1/UPS-CT008706.pdf>

Villa, A. (2014). Sistemas de excitación estática para generadores sincrónicos. *Trilogía*, 27(37), 138-147.

Zeceña, D. (2012). *Diseño de simulaciones del funcionamiento de la máquina síncrona utilizando herramientas de software Labview*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital.
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0178_ME.pdf

ANEXO

Anexo 1.

Matriz de coherencia propuesta de mejora de los sistemas de excitación

PROBLEMA	OBJETIVO GENERAL	METODOLOGÍA	CONCLUSIONES	RECOMENDACIONES
Contar con sistemas	Proponer la mejora de los sistemas de excitación de las unidades generadoras de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos	Fase 1: se realizó una revisión de bibliografía con el fin de conocer a detalle la forma en que se controla la tensión en un generador eléctrico por medio de un sistema de excitación, donde también se analizaron los problemas técnicos que conlleva el no contar con un eficiente control de la potencia reactiva, partiendo de la premisa que en la actualidad muchas de las cargas de un sistema de potencia son no lineales y variables en el tiempo por lo cual se convierte en necesidad contar con equipos bien ajustados y eficientes para la operación de los nuevos generadores eléctricos de la planta.	1. Se analizó el impacto técnico donde se determinó que contar con un control deficiente de la regulación de tensión en los generadores eléctricos repercute en aumentos excesivos de temperatura en los devanados de campo y estator, además de pérdidas de estabilidad y acople magnético.	1. Un control eficiente en la regulación de tensión debe garantizar que todos los sistemas de excitación de los entes generadores de la red nacional estén correctamente ajustados para que las unidades generadoras entreguen o absorban reactivos en el SNI de acuerdo con la necesidad de la red nacional. Por lo tanto, para fines de esta investigación, se recomienda al Instituto Nacional de Electrificación que realice monitoreos continuos en la operación de sus generadores eléctricos.
PREGUNTA PRINCIPAL	OBJETIVOS ESPECÍFICOS			
¿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. Analizar el impacto a nivel técnico de contar con un control deficiente de la regulación de tensión en los nuevos generadores eléctricos.	Fase 2: posterior a comprender a detalle la forma en que se ejecuta un eficiente control de la tensión, se recopiló información técnica y se analizó con el fin de identificar mejoras que se pueden realizar a los equipos de control de tensión de los nuevos generadores eléctricos para que estos puedan aprovechar su potencia al máximo, regulando efectivamente la potencia reactiva entregada o absorbida de la red a partir de un eficiente ajuste en los limitadores de máxima excitación y mínima excitación.	2. Al identificar e implementar mejoras técnicas en los limitadores de máxima y mínima excitación se encontró que estas deben realizarse por medio de una prueba de verificación de la operación donde se busca ajustar los limitadores de acuerdo con la curva de capacidad del fabricante de los generadores eléctricos.	2. Una forma de mantener la estabilidad de tensión de un sistema eléctrico se logra por medio del correcto ajuste en los equipos de control de tensión de los generadores por medio de la realización de pruebas a los limitadores que aumenten la seguridad y eficiencia, por esta razón, se hace necesario realizar una prueba de ajuste a los limitadores cuando se realicen renovaciones a equipos, cambios o incorporaciones de nuevas máquinas generadoras y mantenimientos a los equipos de control
PREGUNTAS SECUNDARIAS	2. Identificar mejoras técnicas en el ajuste del limitador de máxima excitación y el limitador de mínima excitación del regulador de tensión que permitan a los nuevos generadores eléctricos aportar estabilidad de tensión al Sistema Nacional Interconectado.	Fase 3: Luego de realizar propuestas de mejoras en los ajustes de los limitadores de máxima y mínima excitación se procedió a revisar las normas de coordinación operativa del Administrador del Mercado Mayorista con el fin de identificar los requisitos que este exige en cuanto al sistema de excitación para participar en la generación de energía eléctrica.	3. Se elaboró la lista de verificación de requisitos técnicos para apoyar en las especificaciones técnicas con las que deben contar los nuevos sistemas de excitación de las unidades generadoras de la hidroeléctrica por medio del análisis de las normas de coordinación operativa del Administrador del Mercado Mayorista, bibliografía y artículos científicos del tema.	3. La lista de verificación contiene muchos criterios técnicos a tomar en cuenta para la elección de los sistemas de excitación de los generadores eléctricos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, por lo tanto, es de mucha importancia dar cumplimiento a cada criterio que se menciona, ya que con la misma trae beneficios considerables a nivel técnico y económico para la hidroeléctrica.
1. ¿Cómo repercute el hecho de tener un mal control en la regulación de la tensión en un generador eléctrico?	3. Elaborar una lista de verificación personalizada para la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos con las especificaciones técnicas que deben cumplir los nuevos sistemas de excitación y la documentación a presentar ante el Administrador del Mercado Mayorista respecto a lo establecido en las Normas de Coordinación Operativa (NCO).	Fase 4: A partir de la revisión de las normas de coordinación operativa se realizó una lista de verificación de la documentación indispensable correspondiente a los sistemas de excitación que se debe presentar ante el AMM con el fin de cumplir la regulación y que los nuevos generadores eléctricos de la hidroeléctrica puedan participar en la generación de energía eléctrica en el Sistema de Potencia de Guatemala.	4. Se realizó la propuesta de mejora de los sistemas de excitación de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos, que consistió en brindar ajustes en los equipos de control de la tensión y una lista de verificación de especificaciones técnicas que buscan garantizar que los nuevos generadores eléctricos de la planta Hidroeléctrica Los Esclavos aporten estabilidad en tensión en su nodo de conexión al SNI sin comprometer la seguridad de estos.	4. Es de mucha importancia implementar la propuesta de mejora que se detalla en este trabajo de investigación para incrementar la eficiencia en la operación de los generadores eléctricos de la Planta Hidroeléctrica Los Esclavos ya que aporta conocimiento en la parte técnica y práctica para la elección de un sistema de excitación, pero también en la forma que se debe realizar el ajuste de los limitadores de máxima y mínima excitación, por lo tanto, cumplir con las dos partes garantiza un mejor rendimiento de los equipos de generación.
2. ¿Cuáles son los ajustes que pueden realizarse en el regulador de tensión de los generadores eléctricos para que este tenga un mejor control de la tensión y cumpla con las normativas vigentes para participar en la generación de energía eléctrica en Guatemala?				
3. ¿Qué requisitos exige la normativa en Guatemala para que un generador eléctrico pueda participar en la generación de energía eléctrica?		Fase 5: Como resultado de finalizar las fases anteriores del estudio, se redactó el informe final que proporcionó como resultado la propuesta de mejora planteada en los objetivos.		

Nota. Conceptualización de la idea. Elaboración propia.