



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE MECATRÓNICA

**PROPUESTA DE MODERNIZACIÓN DEL REGULADOR DE
VELOCIDAD DE LA TURBINA DE VAPOR DE LA CENTRAL
TÉRMICA ESMERALDAS I**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTOR: RENATO DAVID CARPIO CARRERA
TUTOR: ING. EDY LEONARDO AYALA CRUZ, M.SC. PH.D.

Cuenca – Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Renato David Carpio Carrera con documento de identificación N° 0105821367 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 7 de agosto del 2023

Atentamente,



Renato David Carpio Carrera
0105821367

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Renato David Carpio Carrera con documento de identificación N° 0105821367, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Propuesta de modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I“, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 7 de agosto del 2023

Atentamente,



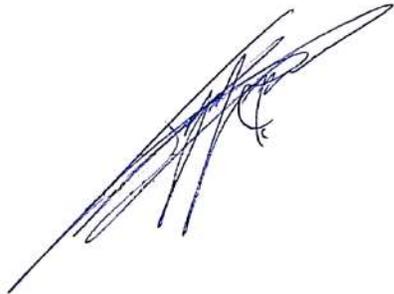
Renato David Carpio Carrera
0105821367

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, EDY LEONARDO AYALA CRUZ con documento de identificación N° 0105627277, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: PROPUESTA DE MODERNIZACIÓN DEL REGULADOR DE VELOCIDAD DE LA TURBINA DE VAPOR DE LA CENTRAL TÉRMICA ESMERALDAS I, realizado por Renato David Carpio Carrera con documento de identificación N° 0105821367, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 7 de agosto del 2023

Atentamente,



Ing. Edy Leonardo Ayala Cruz, M.SC. Ph.D

0105627277

Dedicatoria

Dedico esta tesis con profundo amor y gratitud a las personas que han sido el faro en mi camino, iluminando cada paso de esta travesía académica.

A mi querida mami Mercy, cuyo amor incondicional y constante apoyo han sido el motor de mi perseverancia. Tus bendiciones diarias han sido mi fortaleza, guiándome hacia el bien y alentándome a nunca renunciar. Todo lo que he logrado es un reflejo del amor y la dedicación que has invertido en mí.

A mi querido papi Rene, cuyo deseo incansable de verme triunfar ha sido un faro de inspiración. Su guía y enseñanzas han sido un pilar fundamental en mi búsqueda de convertirme en un profesional y en la persona que aspiro ser.

A mis queridos hermanos, Tania y Mateo, les agradezco por su apoyo constante y su infinita paciencia a lo largo de este viaje. Su aliento y comprensión han sido una fuente constante de ánimo en cada paso del camino.

A mi abuelita Mariana, cuyo cariño y tiempo dedicado a lo largo de las diferentes etapas de mi vida han dejado una marca profunda en mi corazón. Su amor inquebrantable me ha dado fuerzas para superar desafíos y alcanzar metas.

A cada uno de ustedes, mi familia, les dedico este logro. Sus valores, amor y apoyo han sido los cimientos de mi éxito y esta tesis es un testimonio de su influencia en mi vida.

Gracias por estar siempre a mi lado, guiándome, inspirándome y brindándome el regalo más preciado: su amor y apoyo incondicional.

Agradecimientos

En primer lugar, elevo mi más sincero agradecimiento a Dios, fuente de fortaleza y guía en cada paso que he dado. Su presencia constante en mi vida me ha brindado la fuerza para superar obstáculos y perseverar en este camino hacia el conocimiento.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi querida familia, quienes han sido mi pilar y fuente de inspiración a lo largo de este camino. Sus palabras de aliento, apoyo constante y amor incondicional han sido un faro en los momentos de desafío y éxito. A esa persona especial que ha estado a mi lado durante todo este camino, tu presencia ha sido un regalo que valoro profundamente.

Al Gerente y tutor Ingeniero Enrique de la Central Termoeléctrica Esmeraldas I - CELEC EP, extiendo mi agradecimiento por brindarme las facilidades y recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto de investigación. Su apertura y orientación fueron esenciales para mi comprensión y análisis.

Agradezco de manera especial a mi tío Joe y a mi primo Andrés, cuyo apoyo y disposición para compartir sus conocimientos y experiencias han enriquecido enormemente mi trabajo.

A mis respetados profesores de la Universidad Politécnica Salesiana, en particular a los docentes de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, por impartirme valiosos conocimientos y orientación a lo largo de mi formación académica. A mi Tutor de Tesis, cuyo compromiso y asesoramiento me guiaron en cada paso de este proceso.

Finalmente, a todos aquellos amigos y compañeros que me brindaron su amistad, consejo y aliento, les agradezco por ser una parte integral de mi viaje hacia la culminación de esta etapa académica.

Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en mi camino y les estoy profundamente agradecido por ser parte de mi éxito.

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	X
Abstract	XII
1. Introducción	1
2. Problema	2
2.1. Antecedentes	2
2.2. Descripción del problema	3
2.3. Importancia y alcances	4
2.4. Delimitación	5
2.4.1. Espacial o geográfica	5
2.4.2. Temporal	6
2.4.3. Sectorial o institucional	6
2.5. Problema General	6
2.6. Problemas Específicos	6
3. Objetivos	7
3.1. Objetivo General	7
3.2. Objetivos Específicos	7
4. Marco Teórico	7
4.1. Funcionamiento de las centrales térmicas	8
4.2. Estructura de la Central Térmica Esmeraldas I	8
4.3. Sistemas de generación	13

4.3.1. Turbogenerador	13
4.3.2. Caldera	14
4.3.3. Turbina	15
4.3.4. Transformador principal	18
5. Marco metodológico	18
5.1. Parámetros actuales de funcionamiento del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I.	18
5.1.1. Datos técnicos y visibles en la Central	18
5.1.2. Regulador de velocidad	20
5.1.3. Elementos que componen el sistema de regulación	22
5.1.4. Sistema de válvulas de protección	31
5.2. Problemas presentes en la operación del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I	33
5.2.1. Modo de operación del regulador de velocidad	33
5.2.2. Condiciones actuales del regulador de velocidad	36
5.3. Propuestas de modernización para el regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I	39
5.3.1. Propuestas para la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor	39
5.3.2. Ventajas y desventajas sobre los distintos métodos aplicables para la modernización del regulador de velocidad.	55
5.4. Establecimiento de la propuesta con mayor viabilidad para la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I.	59
5.4.1. Propuesta más viable de acuerdo al ámbito económico.	59
5.4.2. Propuesta más viable de acuerdo a los requerimientos del sistema. . .	60
6. Resultados	63
7. Conclusiones	65
8. Recomendaciones	66
Referencias	69
ANEXOS	70

Lista de Tablas

- 1. Matriz 1 de Decisión para la Modernización del Regulador de Velocidad . . . 62
- 2. Matriz 2 de Decisión para la Modernización del Regulador de Velocidad . . . 63
- 3. Especificaciones para el sistema de control distribuido: 71

Lista de Figuras

1.	Ubicación - Central Térmica Esmeraldas I	6
2.	Central Térmica Esmeraldas I	8
3.	Central térmica Esmeraldas I	10
4.	Turbo-generador Central Térmica Esmeraldas I	13
5.	Diagrama Caldera Central Térmica Esmeraldas I	15
6.	Turbina de la Central Térmica Esmeraldas I	17
7.	Turbina de la Central Térmica Esmeraldas I	19
8.	Sistema de aceite del bloque de regulador de la CTE I.	21
9.	Sistema de bombas de la Central Térmica Esmeraldas I	22
10.	Bloque de regulador de la Central Térmica Esmeraldas I	22
11.	Disposición de servomotor en válvula - CTE I.	23
12.	Diagrama Limitador de carga CTE I.	24
13.	Diagrama variador de velocidad CTE I.	25
14.	Diagrama acelerométrico CTE I.	27
15.	Diagrama sistema base de regulación - CTE I.	28
16.	Diagrama Configuración Válvulas de Regulación - CTE I.	29
17.	Válvulas de Interceptación (2 - izquierda y derecha) - CTE I.	30
18.	Copa de derrame que se encuentra en el sistema de regulación - CTE I. . . .	31
19.	Diagrama Sistema de Válvulas de Protección - CTE I.	32
20.	Pulsadores del Variador de velocidad y Limitador de carga.	33
21.	Tablero de supervisión y control de la turbina.	33
22.	Medidor RPM, tablero de sala de control.	34
23.	Sistema Delta V - CTE I.	36
24.	Elementos con desgaste y manipuladores con incorrecta alineación.	37
25.	Manipuladores con desgaste e incorrecta alineación.	37
26.	Manipuladores con incorrecta alineación y palanca de disparo con acción deficiente.	38
27.	Actuadores de las válvulas con desgaste (parcialmente desmontados).	38
28.	Sistema actual de tableros y paneles analógicos para la supervisión de la turbina.	43
29.	Sistema actual de monitoreo de la turbina.	45
30.	Arquitectura propuesta para el nuevo control - CTE I.	50
31.	Válvulas de intercepción.	52
32.	Válvulas de regulación.	52

Resumen

El presente trabajo de titulación se enfoca en la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor en la Central Térmica Esmeraldas I (CTE - I), una instalación clave en la generación de energía eléctrica mediante la combustión de "Fuel Oil No. 6". A lo largo de los años, el regulador actual ha enfrentado diversos problemas operativos debido a su antigüedad lo cual representa una falta de componentes de repuesto y diferentes fallos que han impactado negativamente en la eficiencia y confiabilidad del sistema de generación.

El principal objetivo del presente trabajo es consolidar un análisis exhaustivo del regulador de velocidad actual y proponer soluciones para su modernización sin realizar cambios sustanciales en el regulador de velocidad ni en la turbina. Se han considerado dos enfoques principales para lograr este objetivo: una modernización parcial y una modernización completa. Para ello, se ha implementado una matriz de decisión que evalúa criterios fundamentales como: eficiencia, costos de mantenimiento, compatibilidad con tecnologías actuales, así como la confiabilidad y redundancia del sistema.

Este estudio no solo se centra en la modernización del regulador de velocidad, sino también aborda otros factores específicos antes de tomar una decisión final. Se hace hincapié en la importancia de contar con recursos técnicos y humanos adecuados, así como una planificación y programación adecuada para minimizar la interrupción en la operación de la central térmica durante el proceso de modernización.

Tras un análisis y un proceso de evaluación comparativa, se ha determinado que la modernización completa del regulador de velocidad ofrece mayores beneficios a largo plazo a pesar de requerir una inversión inicial más elevada. Se estima que el costo aproximado de la modernización parcial sería de \$ 1 000 000 mientras que la modernización completa ascendería a \$ 1 500 000. De este modo, una vez analizada la matriz de decisión, se ha evidenciado que los beneficios de la modernización completa son significativamente superiores, lo que la convierte en la opción más viable para la modernización del sistema de regulación de velocidad en la Central Térmica Esmeraldas I.

La modernización completa proporcionará mejoras en la eficiencia operativa, una mayor integración con tecnologías avanzadas y mayor confiabilidad. Además, se espera una reducción en los costos de mantenimiento a largo plazo, lo que asegurará un funcionamiento más eficiente y una operación confiable en la central térmica.

Con esta propuesta se sentarían las bases para una modernización exitosa y eficiente del regulador de velocidad de la turbina de vapor en la Central Térmica Esmeraldas I, contribuyendo así al desarrollo sostenible del sector energético. Los resultados obtenidos se presentan

como una referencia valiosa para futuros proyectos de modernización en centrales térmicas similares, promoviendo una generación de electricidad más eficiente, segura y respetuosa con el medio ambiente.

Palabras clave: Central Térmica, Regulador de Velocidad, Turbina de Vapor, Modernización, Eficiencia, Energía Eléctrica, Combustibles Fósiles, Tecnologías Avanzadas, Confabilidad, Redundancia y Mantenimiento.

Abstract

The present thesis focuses on the modernization of the steam turbine speed controller at Esmeraldas I Thermal Power Plant (CTE - I), a key facility in electricity generation through the combustion of “Fuel Oil No. 6.” Over the years, the current speed controller has faced various operational issues due to its age, resulting in a lack of spare components and different failures that have negatively impacted the efficiency and reliability of the generation system.

The main objective of this work is to conduct a comprehensive analysis of the current speed controller and propose solutions for its modernization without making substantial changes to the speed controller or the turbine. Two main approaches have been considered to achieve this goal: partial modernization and complete modernization. To this end, a decision matrix has been implemented that evaluates fundamental criteria such as efficiency, maintenance costs, compatibility with current technologies, as well as system reliability and redundancy.

This study not only focuses on the modernization of the speed controller but also addresses other specific factors before making a final decision. Emphasis is placed on the importance of having appropriate technical and human resources, as well as proper planning and scheduling to minimize disruption in the operation of the thermal power plant during the modernization process.

After analysis and a comparative evaluation process, it has been determined that the complete modernization of the speed controller offers greater long-term benefits despite requiring a higher initial investment. The estimated cost of partial modernization would be approximately \$ 1 000 000, while complete modernization would amount to \$ 1 500 000. Thus, once the decision matrix has been analyzed, it is evident that the benefits of complete modernization are significantly superior, making it the most viable option for modernizing the speed control system at Esmeraldas I Thermal Power Plant.

Complete modernization will bring improvements in operational efficiency, greater integration with advanced technologies, and increased reliability. Furthermore, a reduction in long-term maintenance costs is expected, ensuring more efficient operation and reliable performance at the thermal power plant.

With this proposal, the groundwork would be laid for a successful and efficient modernization of the steam turbine speed controller at Esmeraldas I Thermal Power Plant, thus contributing to the sustainable development of the energy sector. The obtained results serve as a valuable reference for future modernization projects in similar thermal power plants, promoting more efficient, secure, and environmentally friendly electricity generation.

Keywords: Thermal Power Plant, Speed Controller, Steam Turbine, Modernization, Efficiency, Electric Power, Fossil Fuels, Advanced Technologies, Reliability, Redundancy, Maintenance.

1. Introducción

Las centrales térmicas, basadas en la conversión de calor en energía mecánica y, posteriormente, en energía eléctrica, representan un componente fundamental de la infraestructura energética. En este contexto, la eficiencia y confiabilidad operativa de estas instalaciones son esenciales para asegurar un suministro eléctrico constante y sostenible.

Según investigaciones en el campo, como lo indican Castillo (2019) y B. Camarena (2020), el funcionamiento básico de las centrales térmicas se basa en el ciclo Rankine, etapas tales como el calentamiento a presión constante, la expansión isotérmica, el enfriamiento a presión constante y la compresión isotérmica. En este ciclo, la generación de electricidad se materializa a través del movimiento de las turbinas, impulsadas por el vapor producido en la caldera mediante la quema de combustibles fósiles.

Dentro de la categorización de las centrales térmicas, es posible diferenciar los distintos tipos en función de los combustibles empleados y los procesos de generación eléctrica. G. Rodríguez (2019) clasifica principalmente en tres categorías: centrales de ciclo abierto, centrales de ciclo combinado y centrales de cogeneración. Las centrales de ciclo abierto se caracterizan por quemar el combustible en la caldera para generar vapor, que impulsa una turbina única para la generación eléctrica. No obstante, esta modalidad presenta una eficiencia relativamente menor y emisiones más elevadas, según Moya (2021).

Por otro lado, las centrales de ciclo combinado, como expone G. Tovar (2018), implementan un proceso dual de generación de energía. En primer lugar, el combustible se quema para generar vapor, el cual impulsa una primera turbina. El vapor remanente se aprovecha nuevamente para generar electricidad en una segunda turbina, logrando así un incremento en la eficiencia y una reducción en las emisiones.

Además, el concepto de cogeneración, destacado por Martínez (2020), introduce un enfoque innovador en la generación de energía térmica y eléctrica. Estas plantas, a través de la utilización conjunta de vapor para generación eléctrica y calefacción industrial, optimizan la eficiencia global del sistema y reducen los costos operativos.

En este contexto energético, la presente investigación se centra en la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor en la Central Térmica Esmeraldas I, con el objetivo de optimizar su funcionamiento y asegurar un rendimiento eficiente y sostenible en la generación de energía eléctrica. A medida que avanza la tecnología y surgen nuevas estrategias de control y monitoreo, se vuelve imperativo evaluar y adaptar sistemas existentes para mantenerlos acorde a los estándares modernos y los desafíos energéticos del siglo XXI.

Este trabajo aborda el desafío de plantear la modernización desde una perspectiva de

ingeniería mecatrónica, combinando principios de mecánica, electrónica y control automatizado para ofrecer una solución integral. Se consideran aspectos técnicos y económicos para evaluar opciones de modernización, incluyendo mejoras parciales y modernización completa. La toma de decisiones informada se basa en herramientas de análisis y evaluación, permitiendo determinar la opción más viable y beneficiosa para garantizar un funcionamiento óptimo de la turbina de vapor y la generación de la central.

En el transcurso del presente trabajo, se analizarán detalladamente los parámetros actuales de funcionamiento del regulador de velocidad, se identificarán desafíos en su operación y se propondrán soluciones a través de distintas estrategias de modernización. Se evaluarán las ventajas y desventajas de cada enfoque, considerando eficiencia operativa, costos de implementación y mantenimiento, integración tecnológica y confiabilidad del sistema. Finalmente, se presentarán recomendaciones y conclusiones que servirán como referencia para futuros proyectos de modernización en el ámbito de la generación de energía.

Como resumen, esta investigación busca contribuir al avance de la ingeniería mecatrónica en el ámbito de la generación de energía eléctrica, al proporcionar una perspectiva analítica y detallada sobre la modernización de sistemas de regulación en centrales térmicas. La optimización de estos sistemas no solo mejora la eficiencia y confiabilidad de la generación de energía, sino que también contribuye a un futuro energético más sostenible y resiliente.

2. Problema

2.1. Antecedentes

La central térmica Esmeraldas I, situada en la provincia de Esmeraldas, despliega un papel fundamental en el panorama energético. Esta instalación, en funcionamiento desde 1982 y operativa hasta la fecha, despliega una capacidad de diseño de potencia de 132,5 MW. Su operación implica la generación de energía termo-eléctrica mediante la combustión de Fuel Oil No. 6, un tipo de combustible relevante en este contexto y suministrado por la Refinería de la misma provincia. En la actualidad, su capacidad se sitúa en 125 MW (CELEC, 2022).

Las centrales térmicas como Esmeraldas I tienen un funcionamiento crucial en la producción de electricidad, aprovechando los principios termodinámicos y tecnologías relevantes. Estos fundamentos, que se basan en el ciclo de Rankine, incluyen etapas tales como el calentamiento a presión constante, la expansión isotérmica, el enfriamiento a presión constante y la compresión isotérmica. En este ciclo, el calor se convierte en trabajo mecánico y, finalmente, en electricidad, demostrando cómo la energía química se transforma en energía eléctrica útil (J. Camarena,

2020).

Dentro de la clasificación de las centrales térmicas, se destacan varias categorías según el tipo de combustible y proceso de generación. Entre estas, las centrales de ciclo abierto queman combustible en una caldera para producir vapor, que impulsa una turbina y un generador eléctrico (C. Rodríguez, 2019). Por otro lado, las centrales de ciclo combinado han revolucionado la eficiencia al aprovechar el calor residual del ciclo de vapor para impulsar una segunda turbina, mejorando la utilización de energía térmica y aumentando la eficiencia general (C. A. Tovar, 2018). Además, la tecnología de cogeneración, presente en algunas plantas, permite generar electricidad y calor simultáneamente, maximizando la eficiencia y la utilidad de los recursos energéticos (Martínez, 2020).

El Fuel Oil No. 6, también conocido como Bunker C, es un componente crucial en ciertas centrales térmicas. Derivado del proceso de refinación del petróleo crudo, este residuo pesado cumple un papel relevante en la generación de energía, especialmente en sistemas termoelectricos (U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2010).

En síntesis, la central térmica Esmeraldas I y su operación con Fuel Oil No. 6 encajan en un contexto más amplio de generación de electricidad a través de principios termodinámicos y tecnologías variadas. El entendimiento de estos conceptos sienta las bases para evaluar oportunidades y desafíos en la modernización de centrales térmicas, como se abordará en este estudio.

2.2. Descripción del problema

Las centrales térmicas, como es el caso de la Central Térmica Esmeraldas I (CTE I), desempeñan un papel crucial en la generación de energía eléctrica a través de la combustión de combustibles fósiles. En este contexto, el sistema de regulación de velocidad de la turbina juega un papel fundamental al controlar el ingreso de vapor y, por ende, la producción de energía. Estos dispositivos deben cumplir con los criterios de robustez, eficiencia y confiabilidad para garantizar un funcionamiento óptimo de la central.

Sin embargo, a pesar de que el sistema de regulación de velocidad de la CTE I operaba de manera óptima y conforme a los principios de operación establecidos en durante los primeros años, en los últimos 10 años se han enfrentado desafíos significativos en términos de eficiencia y confiabilidad. El sistema de regulación de velocidad, que se basa en tecnología oleohidráulica utilizada en los primeros años del proyecto, ha experimentado problemas y fallos operativos en la última década debido a su envejecimiento.

El sistema se enfrenta a fluctuaciones en la carga, una situación común en sistemas de

generación interconectados. No obstante, la respuesta del sistema mecánico existente ya no es adecuada debido al desgaste natural de su estructura, daños mecánicos acumulados y la obsolescencia tecnológica. Como resultado, las variaciones en la carga no son corregidas eficientemente, lo que disminuye la confiabilidad en la operación de la unidad y afecta la estabilidad del sistema de generación.

La ejecución de labores de reparación y mantenimiento de la unidad se ve gravemente limitada debido a la falta de disponibilidad de repuestos adecuados en el mercado actual. Esta carencia dificulta la realización de acciones correctivas y preventivas necesarias para mantener un rendimiento óptimo y confiable del regulador de velocidad de la turbina de vapor. La situación se agrava debido a la antigüedad del sistema y la discontinuidad de las piezas necesarias para llevar a cabo las intervenciones técnicas requeridas.

Estos problemas se han traducido en dificultades operativas para los operadores de la central. En la actualidad, los operadores se enfrentan a la tarea de recopilar datos sobre cómo se activan las válvulas, ya que el desgaste de los actuadores ha generado una diferencia en el recorrido y la respuesta de la apertura de las válvulas en comparación con el comportamiento indicado en los manuales de operación, es decir, esta parte del proceso actualmente se controla de manera manual y base únicamente de la experiencia del operario. La combinación de estos factores ha creado un entorno operativo desafiante en la CTE I, donde la eficiencia, confiabilidad y estabilidad del sistema de regulación de velocidad se ven comprometidas. La modernización de este sistema emerge como una solución crucial para superar estos obstáculos y asegurar un funcionamiento eficiente y confiable de la central térmica.

2.3. Importancia y alcances

El mal funcionamiento de la parte mecánica del regulador de velocidad de la turbina de vapor ha sido identificado como el problema principal en la Central Térmica Esmeraldas I. Por diversas causas, este mal funcionamiento afecta la operación eficiente y confiable del sistema. Por lo tanto, el objetivo principal de este proyecto es realizar un análisis exhaustivo para modernizar el regulador de velocidad, ya sea mediante la modificación de sus componentes o la sustitución del equipo en su totalidad, con el fin de lograr un correcto funcionamiento y operación.

La modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor tendrá un impacto significativo en el sistema de generación de la central térmica. Permitirá establecer parámetros adecuados para su funcionamiento, lo que resultará en un mejor desempeño en la regulación del sistema. Esto se logrará mediante la manipulación precisa de las válvulas de apertura y

cierre del vapor hacia la turbina, lo que conducirá a una generación de energía controlada bajo parámetros más precisos y a la mejora de las condiciones de funcionamiento en general.

Alcanzar una regulación óptima del sistema de generación de la turbina de vapor es de vital importancia, ya que esto permitirá maximizar la eficiencia energética, reducir los costos operativos y de mantenimiento. Además, una modernización exitosa del regulador de velocidad de la turbina de vapor en la Central Térmica Esmeraldas I servirá como un caso de estudio y referencia para otras instalaciones similares que enfrenten desafíos similares.

En términos de alcance, esta propuesta de tesis implica llevar a cabo un análisis detallado de los componentes y funcionamiento del regulador de velocidad actual. Se realizarán estudios tecnológicos y enfoques modernos disponibles en el mercado, considerando factores como la eficiencia, la confiabilidad y la viabilidad económica.

Con los resultados obtenidos, se desarrollarán recomendaciones concretas y viables para la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor. Estas recomendaciones abarcarán aspectos técnicos y económicos, con el objetivo de lograr una implementación exitosa y sostenible en la Central Térmica Esmeraldas I.

2.4. Delimitación

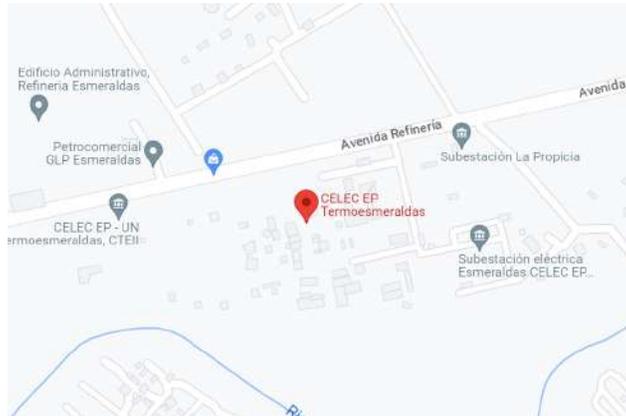
El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

2.4.1. Espacial o geográfica

El análisis para la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I se llevará a cabo en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay. Se realizarán visitas técnicas a la ciudad de Esmeraldas, provincia de Esmeraldas (figura 1), con el propósito de recopilar información detallada y parámetros actuales del equipo mediante un levantamiento de datos, que incluirá conversaciones y entrevistas con el personal y operarios del sistema relacionado con el regulador.

Figura 1

Ubicación - Central Térmica Esmeraldas I.



Nota: Ubicación en el mapa de la Central Térmica Esmeraldas I (Central Térmica Esmeraldas I, 2023).

2.4.2. Temporal

El lapso de tiempo o periodo de estudio para el desarrollo del presente proyecto es de seis meses con un total de 400 horas.

2.4.3. Sectorial o institucional

La investigación estará enfocada en el análisis de funcionamiento del regulador de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I, operada por CELEC - EP, limitando la recolección de información y datos al ámbito de esta instalación específica.

2.5. Problema General

- ¿Se podrá desarrollar una propuesta de modernización para el regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I?

2.6. Problemas Específicos

- ¿Es posible establecer los parámetros actuales de funcionamiento del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I.?

- ¿Se podrá identificar los problemas que se presentan en la operación del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I.?
- ¿Se podrá proponer y analizar diferentes ideas de modernización para el regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I.?
- ¿Es factible establecer cuál es la propuesta más viable para la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

- Desarrollar una propuesta de modernización para el regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I.

3.2. Objetivos Específicos

- Establecer los parámetros actuales de funcionamiento del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I.
- Identificar los problemas presentes en la operación del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I.
- Realizar y analizar propuestas de modernización para el regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I.
- Establecer la propuesta con mayor viabilidad para la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I.

4. Marco Teórico

Central térmica, en el diccionario panhispánico de español jurídico, es una instalación fija que produce electricidad mediante la combustión de combustibles fósiles como petróleo, gas natural o carbón(ALMACHI y cols., 2018).

Una central termal es una instalación diseñada para generar energía eléctrica a partir de la liberación de energía térmica mediante un proceso de combustión. En términos básicos, este

proceso implica la generación de vapor de agua mediante la combustión de un combustible, y este vapor se utiliza para hacer girar una turbina, además de máquinas con accionamiento de equipos eléctricos auxiliares, como bombas, ventiladores, válvulas, hogares mecánicos, excitatrices, etc., todos estos mecanismos son impulsados por vapor a presión, que a su vez impulsa un generador eléctrico. Si bien el principio es el mismo, existen variaciones en cuanto a la configuración de la caldera, el tipo de combustible utilizado y los circuitos auxiliares, lo que da lugar a distintas peculiaridades en cada central térmica.

4.1. Funcionamiento de las centrales térmicas

Estas instalaciones producen energía eléctrica mediante la conversión de calor, el cual es generado a través de la incineración de recursos fósiles como carbón, petróleo o gas natural. Estos combustibles son empleados para elevar la temperatura del agua hasta su estado de vapor, que luego impulsa una turbina generando movimiento mecánico que finalmente se convierte en energía eléctrica, tal como se describe brevemente a continuación. La figura 2 corresponde un diagrama ilustrativo de las partes principales de la central térmica Esmeraldas I (TERMOESMERALDAS, 2022).

Figura 2

Central Térmica Esmeraldas I.



Nota: Fotografía exteriores de la Central Térmica Esmeraldas I (Pallo, 2015).

4.2. Estructura de la Central Térmica Esmeraldas I

La Central Térmica Esmeraldas I, ubicada en la provincia de Esmeraldas, es una instalación de vital importancia en la generación de energía eléctrica mediante el empleo de tecnología

termoeléctrica a vapor. Esta central, que comenzó sus operaciones el 1 de agosto de 1982, desempeña un papel esencial en el abastecimiento de energía en la región. Su diseño original contemplaba una potencia de 132 MW, y actualmente, después de décadas de funcionamiento, tiene una capacidad de generación que alcanza los 130 MW (CELEC (2022)).

Uno de los elementos clave de esta central es su mecanismo de generación, que se basa en la combustión de Fuel Oil No. 6, un combustible suministrado por la Refinería de Esmeraldas. A través de este proceso, se obtiene vapor que, a su vez, impulsa las turbinas para generar electricidad. Este sistema de generación se halla interconectado con el Sistema Nacional Interconectado y opera a distintos niveles de voltaje: 138-69-13.8 kV (Aguirre Bustos, 2014).

La conexión a nivel de 138 kV se logra mediante una línea de transmisión radial de 154 Km, un doble circuito de 138 kV, que tiene un límite térmico de 141 MVA por circuito. Esta línea interconecta las Subestaciones de Sto. Domingo y Esmeraldas, permitiendo una transferencia eficiente de energía eléctrica.

Para atender las necesidades de la Provincia de Esmeraldas, la central dispone de autotransformadores trifásicos AA1 y AA2, con una capacidad de 75/75/25 MVA cada uno y voltajes de 138/69/13.8 kV. Estos autotransformadores alimentan las barras de 69 kV de la Subestación Esmeraldas, desde donde se distribuye la energía a EMELESA y REFINERÍA.

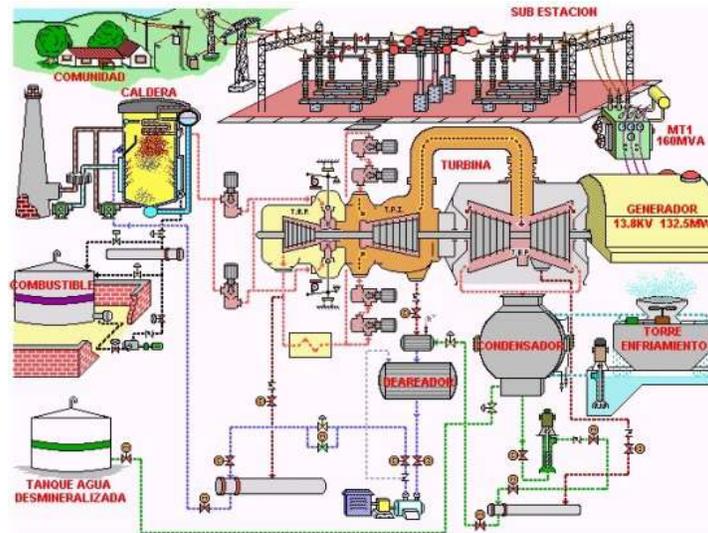
En el nivel de generación de 13.8 kV, la central está equipada con un transformador MT1 de 160 MVA que conecta el generador al sistema a nivel de 138 kV. Para alimentar los transformadores de servicios auxiliares UT1 y STO, con capacidades de 12 MVA y una relación de voltaje de 13.8/4.16 kV, se toma la salida del generador para UT1 y la salida del terciario del autotransformador AA1 para STO.

Esta infraestructura interconectada y su funcionamiento altamente especializado hacen de la Central Térmica Esmeraldas I una pieza crucial en la red de suministro eléctrico, contribuyendo significativamente a la generación y distribución de energía en la provincia de Esmeraldas y el sistema eléctrico nacional (CELEC (2022)).

En la figura 3 se describe la estructura de la central térmica Esmeraldas I, destacando sus principales elementos:

Figura 3

Central térmica Esmeraldas I



Nota: Dibujo de la Central Térmica Esmeraldas I (CELEC, 2022).

- Sistema de tanques.

Son responsables del almacenamiento y suministro del combustible utilizado en la central térmica. Se tienen tres tanques para almacenamiento de Fuel Oil y uno para Diesel Oil, el más importante de estos, es el tanque de 10.000 m³, cuyo diámetro es 36,00 m y su altura 12,00, la cimentación del mismo es un anillo de hormigón armado que en su interior aloja un relleno compactado. Perimetralmente, se encuentra en muro de hormigón armado que forma un dique de contención para un posible derramamiento de combustible del tanque de 10.000 m³, la altura de este muro es 2,20 m y un perímetro de 280,00 m (CELEC, 2022).

- Área casa de máquinas.

La sección correspondiente al área de la casa de máquinas en la Central Térmica Esmeraldas I se caracteriza por ser un edificio con una estructura de acero, con dimensiones de 44,00 x 25,00 metros y una altura de 27 metros. Las bases de esta estructura están constituidas por concreto armado. Internamente, se ha diseñado una disposición en tres niveles de pisos, situados a alturas de +3,60, +5,00 y +10,00 metros respectivamente. Estos niveles se construyen con materiales metálicos y concreto armado.

Parte integral de esta área es la estructura que alberga el turbogenerador, completamente elaborada en hormigón armado. Además, en la parte superior del edificio se encuentra un puente grúa que tiene la capacidad de desplazarse a lo largo de los 44,00 metros del edificio.

Esta configuración arquitectónica y estructural en el área de la casa de máquinas es un componente fundamental en el funcionamiento de la central termoeléctrica, ya que alberga las maquinarias y equipos esenciales para la generación de energía (CELEC, 2022).

Turbinas: Son impulsadas por el vapor generado en las calderas y su movimiento se transmite a los alternadores para la producción de electricidad. Alternadores: Transforman el movimiento de las turbinas en energía eléctrica.

Condensadores: Permiten que el vapor utilizado en las turbinas se enfríe y vuelva a convertirse en agua líquida. Bombas de circulación de agua: Se utilizan para mantener el flujo de agua en los diferentes circuitos de la central térmica.

Torres de refrigeración: La Torre de Enfriamiento es un elemento esencial en la Central Térmica Esmeraldas I, desempeñando un papel fundamental en la refrigeración de ciertos componentes críticos como los alternadores, así como en la condensación del vapor utilizado en el proceso. Esta torre es una característica distintiva y reconocible de las centrales térmicas.

En cuanto a su estructura, la Torre de Enfriamiento presenta un diseño mixto que combina elementos de madera y hormigón armado. En su parte superior, se compone de una celosía especial elaborada en madera, mientras que en la parte inferior, dispone de un depósito construido con hormigón armado. Las dimensiones totales de esta torre son de 60,00 metros de largo por 18,00 metros de ancho, y alcanza una altura de 14,00 metros (CELEC, 2022).

- Área de calderos.

La sección correspondiente al área de calderos desempeña un papel fundamental en la generación de energía en la Central Térmica Esmeraldas I. En este espacio, se lleva a cabo la producción del vapor necesario para impulsar las turbinas. La configuración de las calderas comprende el horno, donde tiene lugar la combustión del combustible, y una serie de tubos de intercambio de calor, los cuales elevan la temperatura del agua transformándola en vapor. Además de estos componentes, las calderas cuentan con dispositivos adicionales como economizadores de agua, sobrecalentadores y recalentadores

de vapor. Adicionalmente, se emplean calentadores de aire para aprovechar el calor contenido en los gases de la combustión.

Esta área se caracteriza por tener la estructura metálica de menor envergadura en la central, a pesar de lo cual soporta cargas significativas debido a los equipos que reposan sobre ella. La cimentación de esta sección se compone de una estructura corrida que adopta la forma de una zapata continua, unida a cuatro columnas que transmiten las cargas desde los niveles superiores hasta el suelo. La estructura de las calderas se eleva hasta una altura de 41,0 metros.

- Área de chimeneas.

El área de las chimeneas cumple la función crucial de evacuar los gases generados durante el proceso de combustión. Estas estructuras, que son visualmente destacables en la central térmica, se caracterizan por ser de forma cilíndrica, con un diámetro de 6,00 metros y una altura de 60,00 metros. Su fundación está constituida por hormigón armado y adopta el formato de losa de fundición (CELEC (2022)).

- Sala de control

- Regulador de voltaje y de velocidad

- Subestación eléctrica Para la distribución de la energía producida por la Central se dispone de dos subestaciones: una de 69 kV para servir a la ciudad de Esmeraldas y otra de 138 kV para el Sistema Nacional Interconectado.

- Transformadores: Se encargan de ajustar el voltaje de la electricidad generada para su posterior distribución (TERMOESMERALDAS, 2022).

Para la distribución de la energía producida por la Central se dispone de dos subestaciones: una de 69 kV para servir a la ciudad de Esmeraldas y otra de 138 kV para el Sistema Nacional Interconectado (CELEC (2022)).

Estos componentes forman parte fundamental del sistema de una central térmica y trabajan en conjunto para generar energía eléctrica a partir del proceso de combustión y vaporización del agua.

4.3. Sistemas de generación

4.3.1. Turbogenerador

El generador de corriente alterna (CA) de la figura 4, acoplado a la turbina entrega directamente la CA inducida al circuito exterior, que la lleva en barras colectoras o buses, sea para que de ellas la tomen los circuitos de distribución primaria o de transmisión corta, si los centros de consumo están próximos y el voltaje de generación es suficientemente alto; o bien a los transformadores elevadores, que levantan el nivel del potencial a uno adecuado para la transmisión (Carrera Orellana, 2011).

Figura 4

Turbo-generador Central Térmica Esmeraldas I



Nota: Fotografía del turbo generador de la CTE - I.

Dentro del contexto del turbogenerador en la generación de electricidad, se llevan a cabo una serie de conversiones de energía que resultan fundamentales en el proceso. Estas conversiones se detallan a continuación:

- Conversión de energía calorífica del vapor a energía cinética en las toberas de la turbina: Mediante el suministro de vapor de alta presión a las toberas de la turbina, se logra que dicho vapor se expanda rápidamente, transformando la energía térmica contenida en él en energía cinética. Esta conversión de energía térmica a energía cinética permite que el vapor en movimiento genere el impulso necesario para hacer girar la turbina.
- Conversión de energía cinética del vapor a energía mecánica en los álabes de la turbina: A medida que el vapor de alta velocidad atraviesa los álabes de la turbina, su energía

cinética se transfiere a los álabes, provocando su movimiento y generando energía mecánica. Es en este punto donde la energía cinética del vapor se transforma en energía mecánica acumulada en la flecha de la turbina, que es el eje principal de rotación.

- Conversión de energía mecánica a energía eléctrica, desde la flecha hasta el embobinado del generador: La energía mecánica acumulada en la flecha de la turbina se transfiere al embobinado del generador. Aquí, la energía mecánica se convierte en energía eléctrica a través de la interacción entre los campos magnéticos y la inducción electromagnética en el embobinado del generador. De esta manera, se genera la electricidad lista para ser utilizada.

4.3.2. Caldera

La generación de vapor en una central térmica, como la Central Térmica Esmeraldas I, implica la utilización de una caldera para aprovechar el calor producido por la combustión de combustibles, en este caso, Fuel Oil. El proceso se inicia con la introducción de agua en la caldera a través de un economizador, donde es precalentada mediante los gases de la combustión. A continuación, como se ilustra en la Figura 5, el agua desciende hacia la parte inferior del hogar de la caldera y asciende a través de los tubos arrollados de los intercambiadores, formando las paredes de la caldera y continuando su calentamiento hasta alcanzar el estado de evaporación.

El vapor generado pasa por separadores de humedad para separar el agua del vapor. Posteriormente, el vapor es dirigido a los sobrecalentadores, ubicados en la zona de convección (primarios) o en la zona de radiación (secundarios) según se muestra en la Figura 5. Esto tiene como objetivo alcanzar la temperatura de servicio necesaria. Para controlar esta temperatura, se emplean atemperadores en las tuberías de entrada de los sobrecalentadores. Además, la temperatura final del vapor recalentado es regulada mediante la recirculación de gases.

Finalmente, el vapor con la temperatura y presión adecuadas es conducido hacia las turbinas, donde experimenta una expansión y luego retorna a la caldera para completar el ciclo Rankine (Lozano, s.f.).

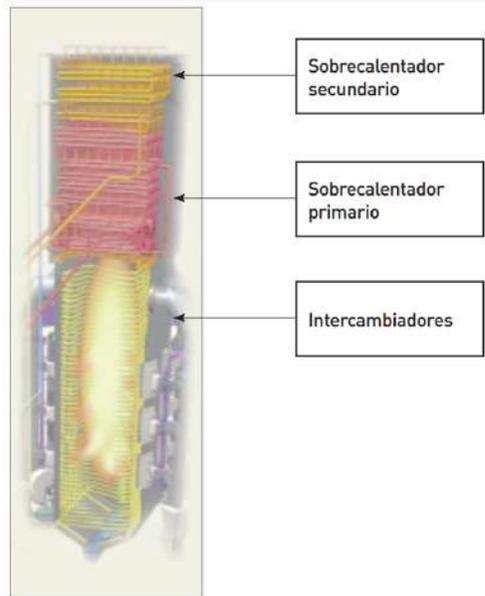
La caldera de la Central Térmica Esmeraldas I es fabricada por FRANCO TOSSI bajo la licencia de Combustión Engineering, y presenta las siguientes especificaciones clave:

- Máxima evaporación continua: 432.000 Kg/h
- Presión máxima de diseño: 162 Kg/cm²
- Temperatura de vapor sobrecalentado: 540° C
- Temperatura de agua de alimentación: 245° C

— Combustible: Fuel Oil N.6 (CELEC, 2022).

Figura 5

Diagrama Caldera Central Térmica Esmeraldas I



Nota: Diagrama ilustrativo de la caldera (Pallo, 2015).

4.3.3. Turbina

La turbina (figura 6) como parte de una central termoeléctrica es de los equipos más importantes, ya que es en ella en donde la energía contenida en el vapor es convertida en energía mecánica, para luego ser transformada en energía eléctrica en el generador (Burbano, 2000).

En la turbina, la energía térmica del vapor se convierte en energía mecánica, que luego se transforma en energía eléctrica mediante el generador. Para asegurar el correcto funcionamiento de la turbina, se utilizan varios sistemas auxiliares, entre ellos:

- Circuito de aceite a alta presión: Este sistema suministra aceite a alta presión para el control de las protecciones y el accionamiento de las válvulas de la turbina.
- Circuito de aceite de lubricación: Proporciona lubricación a los componentes móviles de la turbina para garantizar su funcionamiento suave y reducir el desgaste.

- Circuito de aceite de regulación: Controla la presión y el caudal del aceite para regular la velocidad y la potencia de la turbina.
- Sistema de vapor de sello: Se utiliza para evitar fugas de vapor en las partes selladas de la turbina, asegurando así su eficiencia y minimizando las pérdidas.

Además, la turbina está equipada con dispositivos de corte que cierran todas las válvulas de entrada de vapor o condensado cuando se detectan condiciones inapropiadas de funcionamiento. Estas válvulas incluyen las de regulación, toma, retención, interceptación y check de extracciones. El circuito de aceite a alta presión controla estas protecciones, garantizando un funcionamiento seguro de la turbina.

El sistema de lubricación tiene la función de mantener los cojinetes de la turbina correctamente lubricados. Durante la operación normal, el aceite es suministrado por varias bombas, como la bomba de aceite principal, la bomba de aceite auxiliar, la bomba del virador y la bomba de emergencia.

En una empresa eléctrica de generación, uno de los controles importantes de la calidad de la producción es el control de frecuencia, lo que implica que la transformación de energía debe ocurrir a una velocidad constante. Para lograr esto, la turbina cuenta con un sistema de control de flujo de vapor, el cual se lleva a cabo mediante el control del circuito de aceite de regulación.

Antes de poner en marcha la turbina, es necesario activar el sistema de vapor de sello y vacío. Esto se realiza con el fin de evitar que el vapor de la turbina escape a través de los sellos laberínticos. Mediante los eyectores de arranque y principal, se extrae el aire y otros gases no condensables que se encuentran en el condensador (Pallo, 2015).

Figura 6

Turbina de la Central Térmica Esmeraldas I.



Nota: Fotografía de las cámaras de las turbinas de la CTE - I.

Supervisorios de la turbina

Para garantizar la integridad de la turbina y prevenir daños durante los procesos de calentamiento, carga y eventos anómalos, se han implementado una serie de elementos conocidos como supervisorios. Estos supervisan y verifican diversos parámetros clave. Algunos de ellos son:

- Expansión térmica: Controla la expansión de la turbina debido al aumento de temperatura durante el funcionamiento.
- Expansión de la carcasa: Supervisa la expansión de la carcasa de la turbina para asegurar su correcto funcionamiento.
- Expansión diferencial: Verifica la diferencia de expansión entre distintas partes de la turbina, lo que ayuda a identificar posibles desequilibrios.
- Posición del rotor: Monitoriza la posición del rotor para asegurar su alineación y funcionamiento adecuados.
- Excentricidad: Controla la excentricidad del rotor para detectar desalineaciones o deformaciones anormales.
- Vibración de cojinetes: Supervisa las vibraciones en los cojinetes de la turbina, lo que indica posibles desgastes o problemas en el sistema.

- Sensores de sobre velocidad: Detectan y activan disparos de emergencia si la velocidad de la turbina excede los límites preestablecidos (disparo 1: 3960 rpm, disparo 2: 3996 rpm).
- Anticipador de pérdida de carga: Previene situaciones de pérdida de carga en la turbina mediante la activación de mecanismos de protección.
- Válvula de emergencia o cierre rápido: Permite un cierre rápido de las válvulas de la turbina en situaciones de emergencia.
- Palanca de prueba: Proporciona una opción para realizar pruebas y verificar el correcto funcionamiento de los sistemas de la turbina.

4.3.4. Transformador principal

El transformador tiene la utilidad de elevar el voltaje de generación según la necesidad de la potencia y longitud de transición (Carrera Orellana, 2011).

5. Marco metodológico

5.1. Parámetros actuales de funcionamiento del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I.

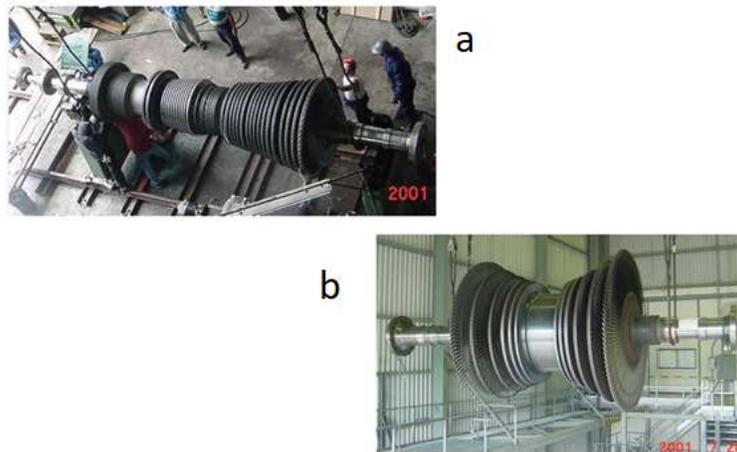
5.1.1. Datos técnicos y visibles en la Central

Características de la Turbina

La turbina utilizada en el sistema de la Central Térmica Esmeraldas I (figura 7) es del tipo “Tandem-Compound“, lo que significa que consta de dos características principales. En primer lugar, es “Tande“, lo que implica que las turbinas están montadas en un mismo eje y están alineadas, compartiendo un generador común. En segundo lugar, es “Compound“, lo que indica que la turbina está compuesta por dos o más carcasas, lo que permite un diseño más eficiente y optimizado para su funcionamiento. Además, esta turbina es de doble flujo en el escape de baja presión, con capacidad de condensación y recalentamiento, lo que permite maximizar la eficiencia energética y la producción de energía eléctrica. (Sampietro, 2019).

Figura 7

Turbina de la Central Térmica Esmeraldas I



Nota: La fotografía A corresponde a la turbina de alta y media y la fotografía B corresponde a la turbina de baja (Pallo, 2015).

Datos técnicos:

Datos de placa de la Turbina

- Fabricante: Franco Tossi S.p.A
- Licencia: Westinghouse
- Año de Construcción: 1980
- Potencia: 132.5 MW
- Velocidad de giro: 3600 RPM
- Presión Inicial del Vapor: 139 Kg/Cm
- Temperatura Inicial del Vapor: 538 °C
- Temperatura 2 del Vapor Recalentado: 538 °C
- Temperatura agua de alimentar: 30 °C
- Tipo de Turbina: de Acción y Reacción
- Modelo: W 20R/60
- Capacidad continua máxima antes de Re-Potenciación: 132.825 kW
- Flujo Máximo de Vapor a la Turbina: 408577 Kg/hr
- Presión de Escape de Vapor de Turbina: 0.0803 Kg/Cm²
- Consumo de Calor Ciclo de Turbina (100% Carga): 1969.6 Kcal/kW.hr.

Datos de placa del Generador

Fabricante: Ercole Marelli S.p.A	Corriente Nominal: 6.522 A
Año de construcción: 1980	Frecuencia: 60 Hz
Enfriamiento por: Hidrógeno	Velocidad: 3.600 rpm
Potencia constante de generación: 155882 kVA	Número de Polos: 2
COS : 0.85	Tensión de Excitación: 230 V
Tipo de Servicio: Continuo	Corriente: 1.320 A
Tensión en Bornes: 13.800 V	Conexión: Y

La turbina utilizada en la Central Térmica Esmeraldas I es un tipo de turbina de condensación con recalentamiento compuesta por dos cilindros en tándem. Los componentes de alta y media presión están ubicados en el cilindro externo de alta presión, con álabes de alta presión que son una combinación de acción y reacción. El vapor procedente de la caldera ingresa a la turbina de alta presión a través de cinco conductos de entrada conectados a la cámara de las toberas en el cilindro interno mediante acoplamientos deslizantes. Tres de estos conductos se encuentran en la base y dos en la tapa del cilindro. Después de pasar por los álabes de alta presión, el vapor se dirige al recalentador a través de dos aperturas de escape en la base del cilindro externo y luego regresa a la turbina mediante dos válvulas de interceptación en la tapa del cilindro externo. Las válvulas de interceptación están conectadas a la cámara de entrada de la turbina de media presión en el cilindro interno mediante acoplamientos deslizantes.

Los álabes de media presión son de tipo reactivo y se dividen en tres grupos. Después de pasar por los álabes de media presión, el vapor llega al cilindro de baja presión a través de dos tubos de comunicación.

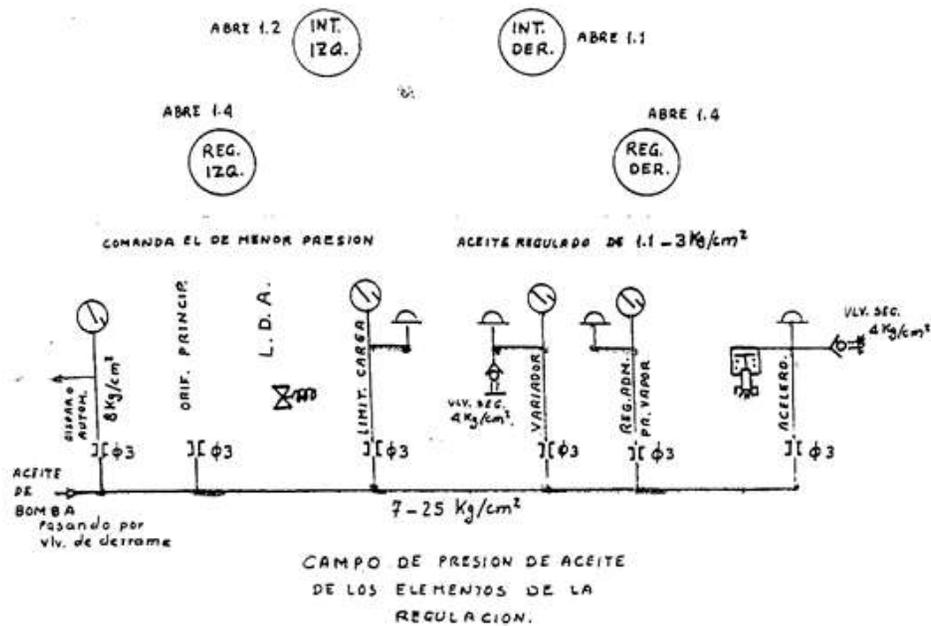
Los álabes de baja presión son de tipo reactivo y de doble flujo, con el vapor ingresando por el centro y fluyendo hacia la salida en ambas extremidades. Se han instalado seis tomas de vapor de presión no regulada en los dos cilindros para el precalentamiento y la desgasificación del agua de alimentación (Sampietro, 2019).

5.1.2. Regulador de velocidad

El sistema de control básico se compone principalmente de dos elementos clave: la rueda taquimétrica y el regulador de velocidad. Ambos desempeñan un papel fundamental en el control de una turbina.

Figura 8

Sistema de aceite del bloque de regulador de la CTE I.



Nota: Diagrama ilustrativo del sistema de aceite del bloque de regulador de la CTE I tomado del curso de sistema de regulación turbina, operación y mantenimiento (Burbano, 2000).

El regulador de velocidad recibe tres señales de fuerza, dos de naturaleza hidráulica y una mecánica. Cuando estas señales están en equilibrio estático, se ajusta la copa de drenaje. Esto garantiza que la presión del aceite de control que fluye por el sistema de aceite (figura 8) y a través del orificio principal se mantenga bajo control.

Este sistema forma parte de los controles hidráulicos operativos que utilizan aceite suministrado por las bombas principales o auxiliares (figura 9), y desempeña una función crucial en la regulación de la turbina en el bloque de regulación de la central que se puede observar en la figura 10.

Figura 9

Sistema de bombas de la Central Térmica Esmeraldas I



Nota: Fotografía de la configuración de las bombas que comandan el sistema oleo hidráulico de la central térmica Esmeraldas I.

Figura 10

Bloque de regulador de la Central Térmica Esmeraldas I



Nota: Fotografía del bloque del regulador en donde se puede observar los componentes principales del sistema de regulación que controlan el flujo de vapor hacia la turbina.

5.1.3. Elementos que componen el sistema de regulación

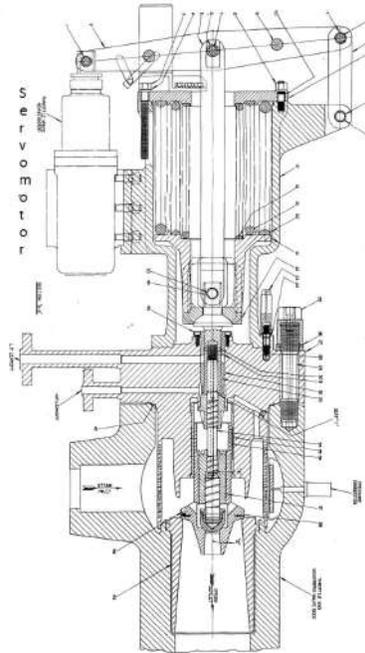
- Servomotor

Se describe al servomotor como un componente que mueve las válvulas de admisión del vapor en la turbina. El servomotor se compone de un pistón que es movido por un pistón distribuidor sensible a las variaciones de presión del aceite. El vástago del pistón del servomotor está unido, mediante dos bielas, con la palanca de accionamiento de las válvulas de admisión. El punto de apoyo de esta palanca está situado de forma que el pistón en su movimiento hacia arriba abre las válvulas y en su movimiento hacia abajo las cierra. Cada cuerpo de válvulas tiene un servomotor propio.

También se lo describe como un componente que se compone de un pistón accionado por el cajón de distribución que se desliza dentro del cilindro. El cajón de distribución admite el aceite a alta presión en la cámara situada debajo del pistón para abrir la válvula y lo descarga para permitir que los resortes cierran la misma, esta configuración se puede observar en la siguiente figura 11.

Figura 11

Disposición de servomotor en válvula - CTE I.



Nota: Figura en la que se puede observar la ubicación del servomotor junto a una de las válvulas del sistema de regulación (Tosi, 2000).

- Limitador de Carga

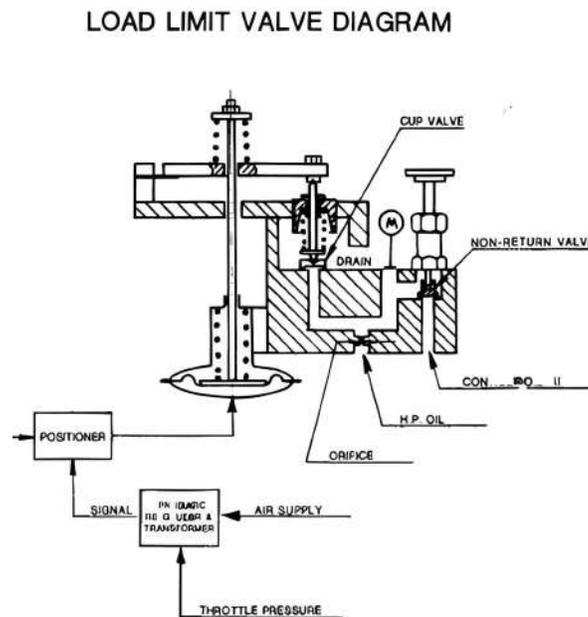
El limitador de carga desempeña un papel crucial en el sistema de regulación de una

turbina al limitar la carga aplicada a la máquina. Su función principal consiste en ajustar la presión del aceite regulado de acuerdo con los requisitos de la demanda, siempre y cuando esta presión sea inferior a la del gobernador principal. Esto garantiza un funcionamiento seguro y eficiente al controlar de manera precisa la carga en la turbina y asegurarse de que no se exceda su capacidad.

Durante el funcionamiento en paralelo con la red eléctrica o con otros grupos de generación, la velocidad de la turbina depende de la frecuencia de la red. En estas circunstancias, el limitador de carga puede reemplazar al variador de velocidad, ya que actúa como un controlador de carga constante. Al no estar influenciado por el regulador principal o la rueda taquimétrica, el limitador de carga mantiene la carga del grupo en un valor predefinido, lo que contribuye a un rendimiento estable y óptimo de la turbina, su diagrama se puede observar a continuación en la figura 12.

Figura 12

Diagrama Limitador de carga CTE I.



Nota: Figura en la que se puede observar la estructura del limitador de carga (Tosi, 2000).

- Regulador principal (Variador de Velocidad)

En el sistema de regulación de una turbina, el regulador principal (figura 14) desempeña un papel fundamental y es conocido como variador de velocidad. Su principal función

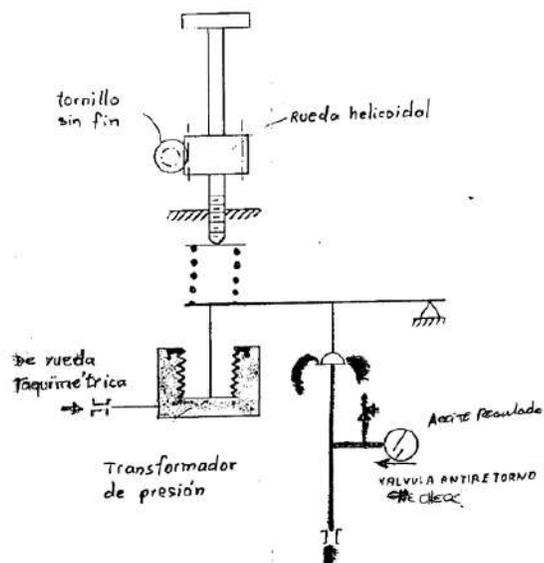
es controlar la velocidad de la máquina en diferentes situaciones, como el arranque, el funcionamiento bajo carga y la velocidad del tornillo sin fin. Este regulador logra su objetivo mediante la generación de una presión de aceite de regulación modulada que varía en función de la velocidad de la turbina.

Cuando la turbina opera en paralelo con la red eléctrica o con otra unidad de generación de gran tamaño en la misma planta, su velocidad está influenciada por la frecuencia de la red. En este escenario, el variador de velocidad cumple la función de un variador de carga. Sin embargo, es posible sustituir este dispositivo por un limitador de carga, el cual no está sujeto a la influencia del regulador principal ni de la rueda taquimétrica, y se encarga de mantener una carga constante predeterminada.

El regulador principal controla la posición de las válvulas de regulación a través de dos servomotores, uno para cada cuerpo de válvula. Un incremento de $0,1 \text{ kg/cm}^2$ en la presión de aceite del impulsor resulta en una reducción de $0,5 \text{ kg/cm}^2$ en la presión de aceite regulado. Estos mecanismos de control y ajuste permiten un funcionamiento preciso y eficiente de la turbina en diferentes condiciones de operación.

Figura 13

Diagrama variador de velocidad CTE I.



Nota: Figura en la que se puede observar la estructura del variador de velocidad (Burbano, 2000).

- Regulador auxiliar (Acelerométrico).

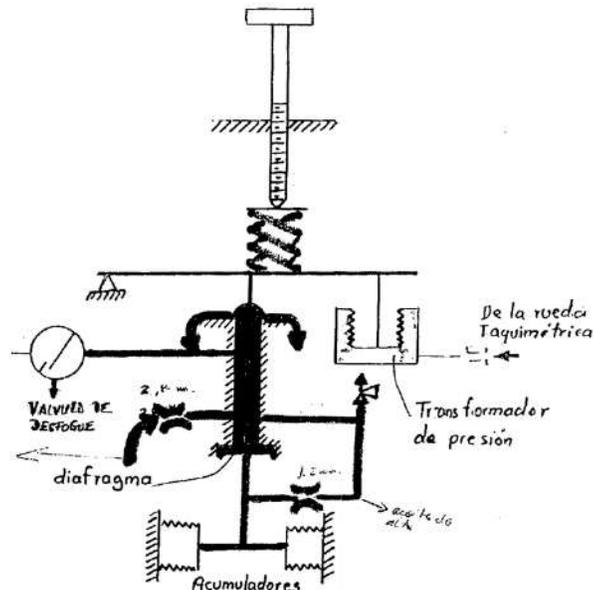
La rueda taquimétrica desempeña un papel fundamental en la regulación de un sistema de turbina, ya que convierte la señal de velocidad angular en una presión de aceite que se envía al regulador de velocidad principal y al regulador auxiliar (acelerométrico) como se puede observar en la figura 14. Para garantizar su correcto funcionamiento, la rueda taquimétrica se alimenta de aceite a una presión de 7 Kg/cm² y cuenta con una válvula de estrangulamiento que debe estar abierta en 7 vueltas para asegurar una presión de 2.1 Kg/cm² a la salida de la rueda taquimétrica a una velocidad de 3600 rpm. La presión de la rueda taquimétrica depende directamente de la velocidad angular y la geometría de la rueda taquimétrica, lo cual se representa mediante la ecuación: $P = f(w, \text{huelgo})$ (Burbano, 2000).

Por otro lado, el regulador auxiliar, también conocido como acelerométrico, es un dispositivo similar al gobernador principal, pero con la capacidad de responder a la aceleración y con una válvula de desfogue. Este regulador responde a la aceleración permitida por la máquina para la sobrevelocidad de la rueda taquimétrica. Está conectado hidráulicamente al sistema de aceite regulado a través de la válvula de desfogue y su operación tiene una duración aproximada de 2 a 5 segundos. Durante su funcionamiento, se cierran las válvulas de regulación e interceptación. Cuando la velocidad es igual o menor al 107%, el regulador auxiliar se rearma cerrando la válvula de desfogue y el control de la unidad se devuelve al regulador principal.

Para garantizar el correcto funcionamiento del acelerométrico, es necesario ajustar la presión del dispositivo a 2.8 Kg/cm² mientras la máquina gira a 3600 rpm. Esto se logra cargando o descargando el resorte mediante la manipulación del volante, incluso antes de poner en marcha la máquina. El dispositivo responde a la aceleración permitida por la máquina para la sobrevelocidad de la rueda taquimétrica. Además (Burbano, 2000), menciona que la válvula de desfogue se calibra para activarse a una presión de 0.8 Kg/cm².

Figura 14

Diagrama acelerométrico CTE I.



Nota: Figura en la que se puede observar la estructura del acelerométrico o regulador auxiliar (Burbano, 2000).

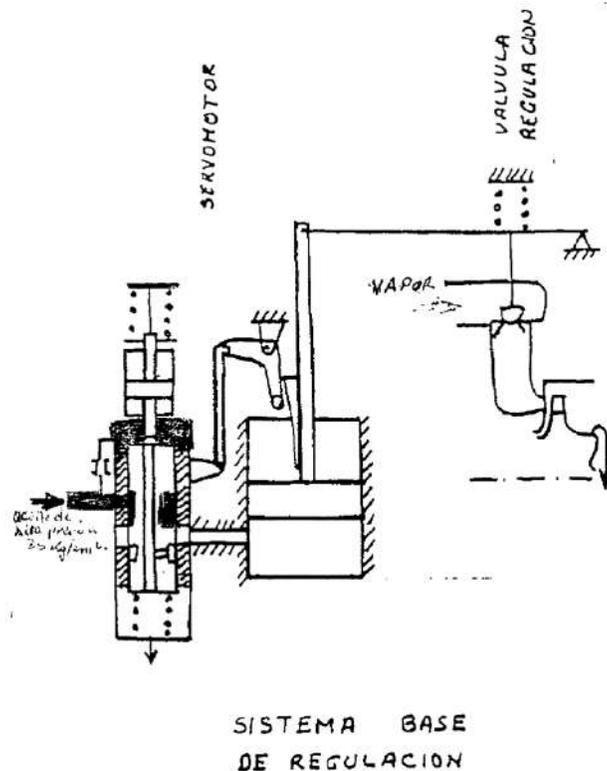
- Válvulas de Toma

Las válvulas de toma desempeñan un papel esencial en el sistema de regulación de velocidad de la turbina de la central, ya que permiten regular el ingreso de vapor durante el proceso de arranque. Estos dispositivos finales se controlan a través de un regulador específico para las válvulas de toma. Su diseño está orientado a lograr un ingreso de vapor controlado, lo que facilita un arranque suave de la máquina incluso en condiciones de arco total.

Es importante destacar que las válvulas de toma se distinguen de las válvulas de regulación en función de su propósito principal. Mientras que las válvulas de regulación se encargan de controlar el flujo de vapor de alta presión hacia la cámara de la turbina (figura 15), las válvulas de toma tienen la responsabilidad de regular el flujo de vapor durante el arranque. Su función es garantizar un ingreso de vapor controlado que permita un funcionamiento óptimo de la turbina en todas las etapas del arranque, evitando situaciones adversas que puedan afectar su rendimiento.

Figura 15

Diagrama sistema base de regulación - CTE I.



Nota: Figura en la que se puede observar la estructura y disposición de los elementos que componen el sistema base de la regulación (Burbano, 2000).

- Válvulas de Regulación

Las válvulas de regulación juegan un papel vital en el sistema de control de flujo de vapor de una turbina central. Estos componentes son esenciales para regular y supervisar la cantidad de vapor de alta presión que ingresa a la cámara de la turbina, lo cual afecta directamente la velocidad y potencia de la turbina.

Estas válvulas están compuestas por una estructura accionada por un sistema de barras acopladas al vástago del correspondiente servomotor, mismo que al estar unido a estas dos barras controla la apertura secuencial de las seis válvulas, tres para lado derecho y tres en el lado izquierdo (figura 16). Sin embargo, debido a la falta de desmontaje, no se dispone de un historial detallado de estas válvulas hasta la fecha.

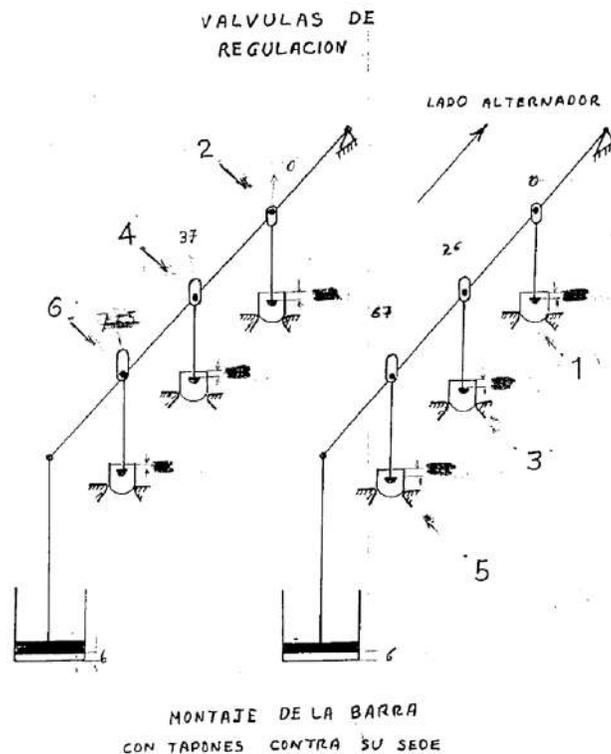
El control de las válvulas de regulación se lleva a cabo mediante la presión de aceite

suministrada por las bombas y regulada por el variador de velocidad o el limitador de carga. Estas válvulas son activadas por medio de relés hidráulicos conocidos como servomotores.

Para calibrar el servomotor, se utiliza un perno de ajuste con resorte, el cual permite modificar la carrera del actuador para una misma presión de aceite regulada.

Figura 16

Diagrama Configuración Válvulas de Regulación - CTE I.



Nota: Figura en la que se puede observar la disposición del montaje de las barras con las seis válvulas de regulación (Burbano, 2000).

- Válvulas de Interceptación

Las válvulas de interceptación en el sistema de admisión de vapor recalentado hacia la turbina de media presión. Estas válvulas están constituidas por un tapón que se desplaza mediante su correspondiente servomotor, conectados por medio de un sistema de barras (figura 17). Su propósito radica en regular el ingreso de vapor en condiciones de carga muy baja o cuando ocurren rechazos de carga.

Asimismo, las válvulas de interceptación se consideran dispositivos esenciales en los sistemas de control de flujo, destinados a regular o interrumpir el paso de un fluido, como vapor o agua, a través de tuberías o conductos. Dichas válvulas pueden ser operadas de manera manual o automática mediante la utilización de un servomotor. Su función principal se centra en el control del flujo de fluido en un sistema, permitiendo o bloqueando su paso de acuerdo a las necesidades específicas.

Figura 17

Válvulas de Interceptación (2 - izquierda y derecha) - CTE I.



Nota: Fotografía en la que se puede observar las dos válvulas de interceptación del sistema de regulación.

- Válvula de emergencia para el cierre rápido de las válvulas de admisión

Esta válvula se encuentra instalada en conjunto con el transformador de presión y el limitador de caudal en el soporte de los componentes de regulación. Su principal función consiste en establecer una conexión entre el conducto del aceite modulado de regulación y la salida de descarga cuando la válvula de aceite del mecanismo de disparo por sobrevelocidad se abre, lo cual provoca una disminución en la presión del aceite de regulación.

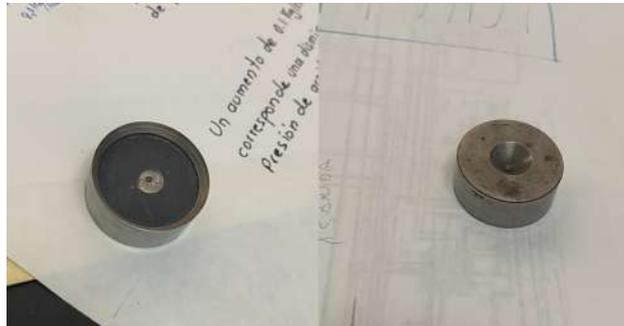
La válvula de emergencia está compuesta por un asiento y una válvula de copa que se encuentra cargada con un resorte. La presión requerida para que la válvula se abra viene determinada por la carga del resorte, la cual puede ser ajustada mediante las tuercas correspondientes.

- Válvula de derrame de aceite

Esta válvula se encuentra montada en un basamento y sus conductos internos se comunican directamente con los del pedestal de la turbina. La cantidad de aceite a alta presión admitida en la cámara practicada en el basamento se determina mediante la posición del tornillo de estrangulación, mientras que la presión en la cámara es determinada por la carga del resorte que ejerce su fuerza hacia abajo sobre la copa, un ejemplo de esta se puede observar en la figura 18.

Figura 18

Copa de derrame que se encuentra en el sistema de regulación - CTE I.



Nota: Fotografía de ambos lados del tipo de copa de derrame que es parte del sistema de regulación.

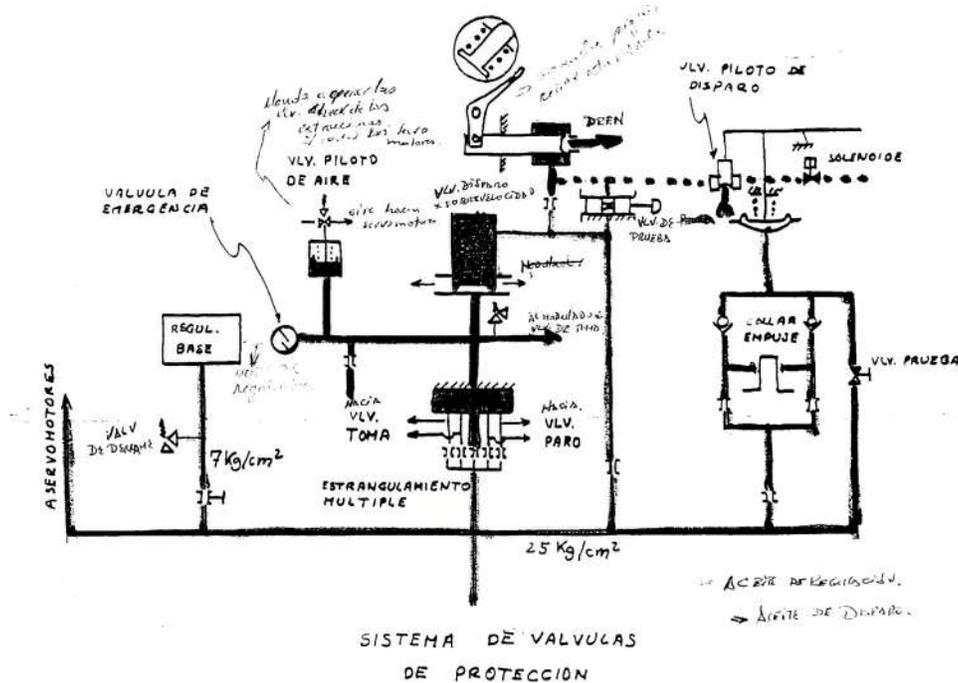
5.1.4. Sistema de válvulas de protección

El sistema de válvulas de protección desempeña un papel fundamental en la protección y control de la turbina, ya que tiene la responsabilidad de salvaguardarla ante posibles daños y de interrumpir el flujo de vapor hacia la turbina en situaciones de emergencia. Este sistema se compone de dos tipos de válvulas: las válvulas de toma y las válvulas de retención de recalentado. Su objetivo principal es controlar y regular el flujo de vapor hacia la turbina.

Las válvulas de toma se utilizan para regular y ajustar el flujo de vapor que ingresa a la turbina. Por otro lado, las válvulas de retención de recalentado son específicamente empleadas en el sistema de control de protección. Estas válvulas cuentan con dos posiciones: abiertas y cerradas. Se abren durante el proceso de rearme de la turbina, cuando se restablece el bloque de orificios múltiples, y se cierran únicamente cuando la turbina es disparada o activada, su sistema de oleohidráulico se muestra a continuación en la figura 19.

Figura 19

Diagrama Sistema de Válvulas de Protección - CTE I.



Nota: Diagrama ilustrativo del sistema de de válvulas de protección y sus componentes (Burbano, 2000).

- Disparo por sobrevelocidad

El mecanismo de disparo por sobrevelocidad es un sistema de protección que se activa cuando la velocidad de la turbina excede un límite predeterminado. Este sistema consta de un peso excéntrico ubicado en el extremo del rotor de la turbina, el cual está equilibrado en su posición interna mediante un resorte. Cuando la velocidad alcanza las 3960 rpm, la fuerza centrífuga supera la fuerza del resorte, lo que hace que el peso se desplace hacia afuera y golpee el gatillo. Esto desactiva el mecanismo de disparo por sobrevelocidad y desvía el aceite de disparo hacia un drenaje. Como resultado, la cámara superior de la válvula de disparo por sobrevelocidad pierde presión y se cierra, evitando así que la turbina entre en sobrevelocidad.

En caso de que este dispositivo falle, se ha instalado un segundo dispositivo similar que opera a 4000 rpm, brindando una capa adicional de seguridad Burbano (2000).

5.2. Problemas presentes en la operación del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I

5.2.1. Modo de operación del regulador de velocidad

La regulación de la velocidad o carga eléctrica de la turbina es llevada a cabo por el componente central conocido como el regulador principal, o también denominado rueda taquimétrica, en conjunto con un dispositivo adicional llamado variador de velocidad. Este regulador se encarga de controlar la posición de las válvulas de regulación mediante la utilización de dos servomotores, uno para cada cuerpo de válvulas. A través de la configuración adecuada del variador de velocidad en los tableros en la sala de control (fig. 20 y fig. 21), el regulador principal logra generar una presión de aceite regulada y modulada, la cual varía de acuerdo a la velocidad de la turbina.

Figura 20

Pulsadores del Variador de velocidad y Limitador de carga.



Nota: Fotografía de los pulsadores del variador de velocidad y limitador de carga, ambos cuentan con dos posiciones que equivalen a los pulsos para el control de carga desde el tablero de la sala de control.

Figura 21

Tablero de supervisión y control de la turbina.



Nota: Fotografía del tablero de mando de la sala de operaciones en las que se puede observar el diagrama de la turbina para su control mediante pulsadores.

Cuando la turbina opera en paralelo con la red eléctrica o con otro grupo de generación de gran tamaño en la misma instalación, su velocidad se encuentra directamente influenciada por la frecuencia de la red, esta se controla mediante un medidor de RPM (figura 22) que está ubicado en el tablero de la sala de control. En estas condiciones de funcionamiento, el

variador de velocidad se transforma efectivamente en un dispositivo de control de carga.

Por otro lado, se encuentra el transformador acelerométrico, ubicado en el soporte de los dispositivos de regulación. Este transformador se encuentra en comunicación con el circuito del aceite modulado de regulación y no cuenta con un variador de velocidad ni un dispositivo para el registro de la velocidad. Si se produce una pérdida total o parcial de carga eléctrica, la velocidad aumentará de forma significativa. En el caso de que el incremento de velocidad supere las 75 revoluciones por segundo, el transformador acelerométrico asume temporalmente el control de la turbina, ocasionando el cierre rápido de las válvulas de regulación y las válvulas de interceptación. Al mismo tiempo, a través de un pequeño motor, el variador de velocidad retorna rápidamente a la posición correspondiente a las 3600 revoluciones por minuto.

Figura 22

Medidor RPM, tablero de sala de control.



Nota: Fotografía del medidor de RPM para el control de la velocidad de la turbina.

Con las válvulas de regulación y las válvulas de interceptación cerradas, la velocidad del grupo de generación disminuirá a un ritmo determinado por la carga residual que aún se encuentre en el generador. Una vez que el grupo alcanza la velocidad establecida por la nueva configuración del variador de velocidad, las válvulas de interceptación nuevamente regularán la cantidad de vapor al vaciar las tuberías de vapor recalentado. Como resultado, al reducirse la

presión del vapor recalentado, las válvulas de interceptación continuarán abriéndose. Cuando el vapor recalentado se agota, las válvulas de regulación también se abrirán, manteniendo así la velocidad en un valor acorde con la configuración del variador de velocidad. Es importante destacar que las válvulas de interceptación se encuentran aproximadamente a la mitad de su apertura cuando las válvulas de regulación comienzan a abrirse.

La presión del aceite de regulación se sitúa en 1.4 atmósferas efectivas al inicio de la apertura de las válvulas de regulación y alcanza las 3 atmósferas efectivas cuando estas se encuentran completamente abiertas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta precisión en la modulación de la regulación puede verse alterada por diversos dispositivos, como la rueda taquimétrica, el variador del número de revoluciones y el transformador de presión del regulador principal, el transformador de presión del regulador auxiliar acelerométrico, el limitador de carga y el regulador de presión del vapor en la toma. Cada válvula cuenta con dos indicadores luminosos, "cerrada" y "abierta", ubicados en el panel de control para facilitar su supervisión y operación.

En cuanto al esquema actual de protecciones de la turbina es el implementado durante la construcción de la central, los disparos son accionados mediante instrumentos hidráulicos que "cortan" la presión de aceite de regulación a los servomotores. Con el tiempo se han añadido nuevos sensores que miden la condición de la turbina (vibraciones, temperaturas, etc.), que son monitoreados desde el sistema Delta V (figura 23), por los operadores, más no disparan directamente la turbina.

Figura 23

Sistema Delta V - CTE I.



Nota: Fotografía de la interfaz del sistema Delta V, ubicado en el tablero de control.

5.2.2. Condiciones actuales del regulador de velocidad

- En el entorno del regulador se puede observar signos de desgaste en los manipuladores debido a diversas situaciones a las que han estado expuestos, como cambios de temperatura, manipulación incorrecta y, sobre todo, la antigüedad de los elementos.
- El continuo funcionamiento a lo largo de los años de operación de la central ha generado un desgaste progresivo y daños mecánicos en algunos componentes del sistema de regulación. Por ejemplo, se han detectado torceduras en los vástagos de los manipuladores del limitador de carga, variador de velocidad y acelerométrico. Asimismo, en el sistema de válvulas se observa un desgaste en los recorridos de apertura y cierre, tanto en las válvulas de interceptación (2) una izquierda y una derecha, como en las válvulas reguladoras (6) 3 derechas y 3 izquierdas, estas observaciones se indican a continuación en las figuras 24, 25, 26 y 27.

Figura 24

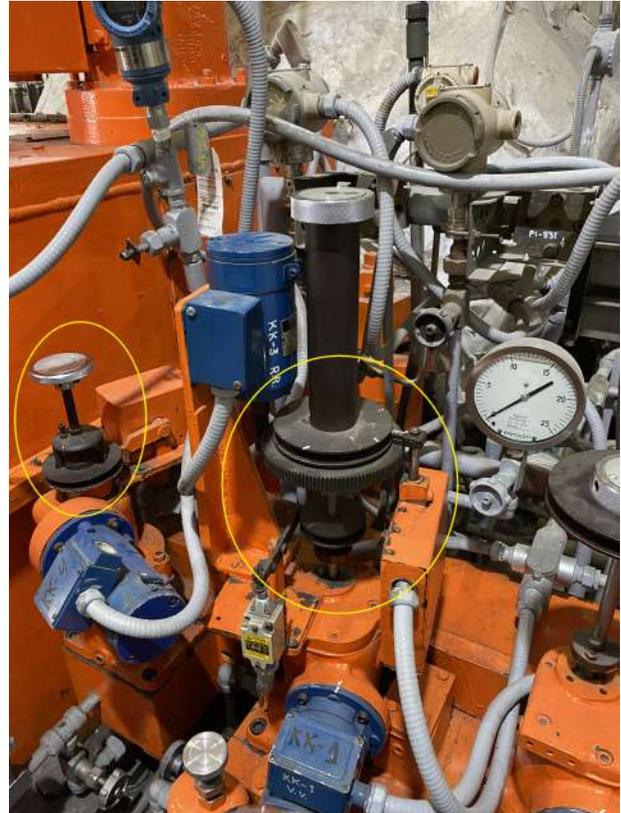
Elementos con desgaste y manipuladores con incorrecta alineación.



Nota: Fotografía en la que se puede observar el desgaste en el manipulador del acelerométrico, en el vástago que esta unido al sistema y elementos con falta de fijación.

Figura 25

Manipuladores con desgaste e incorrecta alineación.



Nota: Fotografía en la que se puede observar torceduras en los ejes de los manipuladores, a la derecha se puede observar indicadores puestos por los operadores para aproximar posiciones debido a la falta de precisión que ahora presentan los manipuladores.

Figura 26

Manipuladores con incorrecta alineación y palanca de disparo con acción deficiente.



Nota: Fotografía en la que se puede observar el desgaste en el manipulador e incorrecta alineación con el mismo, a la izquierda se encuentra la palanca de disparo, mal sujeta debido al desgaste de los materiales.

Figura 27

Actuadores de las válvulas con desgaste (parcialmente desmontados).



Nota: Fotografía en la que se puede observar el desgaste en los actuadores, y la correcta atención con ellos, lo cual repercute en la apertura correcta de las válvulas.

- La falta de fiabilidad en la puesta a punto de la máquina se debe al mal estado de algunos de los elementos mencionados anteriormente, lo cual ocasiona una respuesta inadecuada por parte de los actuadores que conforman el sistema de regulación. Como resultado, el arranque y la puesta a punto difieren de cómo respondía el sistema cuando se encontraba en óptimas condiciones de operación.
- Las variaciones de carga han persistido a lo largo de los años debido al desgaste y a la calibración ya irreparable de algunos componentes. Esto ha dado lugar a variacio-

nes/fluctuaciones en la carga tanto durante el arranque como durante la operación, lo cual representa un factor de riesgo durante la generación y el enlace con el sistema interconectado.

- Debido a la antigüedad de los componentes que forman parte del sistema de regulación de la CTE-1, las opciones de reparación y mantenimiento se han visto limitadas por la falta de disponibilidad de repuestos en el mercado actual.

5.3. Propuestas de modernización para el regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I

5.3.1. Propuestas para la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor

Con base en el análisis previo, se han formulado dos propuestas concretas para la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor en la Central Térmica Esmeraldas I.

Al plantear las propuestas de modernización del regulador de velocidad, se han considerado los requisitos tanto del operador del sistema como los requerimientos propios de la central. Esto ha llevado a plantear dos propuestas de modernización:

Propuesta de modernización parcial:

Esta propuesta se basa en la necesidad específica de los operadores de mantener el sistema actual, teniendo en cuenta su familiaridad con la configuración actual. Se contempla una modernización parcial del sistema, con el objetivo de mejorar y actualizar ciertos componentes y funcionalidades del regulador de velocidad.

Propuesta de modernización completa:

Esta propuesta se enfoca en cumplir con los requisitos específicos de la central (Anexo: 3) y plantea una modernización integral del sistema de regulación de velocidad. Se busca implementar tecnologías y componentes más avanzados, que permitan una mayor eficiencia, rendimiento y control del regulador de velocidad.

Para ello también la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor en la Central Térmica Esmeraldas I debe cumplir con las normas y regulaciones internas establecidas por la propia central. Entre las normas aplicables se encuentran:

- **Seguridad:**

Para garantizar la seguridad durante el proceso de modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor en la Central Térmica Esmeraldas I, se deben cumplir con las siguientes normas relacionadas con seguridad de maquinaria y sistemas de control:

- ISO 12100: Safety of machinery - Basic concepts, general principles for design (*ISO 12100: Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction*, 2010).
- IEC 62061: Safety of machinery - Functional safety of safety-related electrical, electronic and programmable electronic control systems (*IEC 62061: Safety of machinery - Functional safety of safety-related electrical, electronic, and programmable electronic control systems*, 2005).
- IEC 61508: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems (*IEC 61508: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*, 2010).
- IEC 13849: Safety of machinery – Safety related parts of control systems (*IEC 13849: Safety of machinery – Safety related parts of control systems*, 2006).

■ **Turbinas de Vapor:**

Para la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor, es importante seguir las normas específicas relacionadas con turbinas de vapor para garantizar su correcto funcionamiento y seguridad:

- IEC 60045-1: Steam turbines.
- IEC 61064: Acceptance test for steam turbine speed control systems.

■ **Guías Generales:**

Además de las normas de seguridad y turbinas de vapor, también es relevante cumplir con las siguientes guías generales para asegurar la compatibilidad electromagnética y el correcto funcionamiento del sistema de control:

- IEC/TS 61000-6-5: Electromagnetic compatibility (EMC) – Generic standards – Immunity for power station and substation environments.
- IEC 61131-3: Programmable controllers – programming language.
- IEC 61326: Electrical equipment for measurement, control, and laboratory use - EMC requirements.

El cumplimiento de estas normas y guías es esencial para garantizar la seguridad, funcionalidad y compatibilidad del sistema de regulación de velocidad durante su modernización en la Central Térmica Esmeraldas I.

Ambas propuestas se describirán detalladamente a continuación, considerando los beneficios y posibles impactos asociados a cada una de ellas.

Actividad general de desmontaje e instalación.

Para ambas soluciones, se prevé las siguientes actividades/suministros mecánicos e hidráulicos:

- Retirar todas las piezas consideradas obsoletas y no integradas en el nuevo sistema de control y protección:
 - Controladores hidráulicos (impulsor, regulador de estrangulamiento, válvula de límite de carga, gobernador de retroceso rápido).
 - Los componentes que no se puedan retirar se pondrán en modo pasivo de manera adecuada.
- Instalar una rueda dentada para el nuevo sensor de velocidad, posicionado en el eje de la turbina de vapor, para obtener la mejor respuesta para las sondas de sobrevuelo.
- Instalar tres sensores de velocidad dedicados al sistema de control y al disparo por sobrevuelo al 112%, más una sonda para velocidad cero.
- Todos los componentes actuales (orificios múltiples, servomotor de la válvula de parada del recalentador, bomba principal de aceite, etc.) que no sean objeto de modificación serán revisados en general para garantizar su correcto funcionamiento.
- Reemplazar la prueba de solenoide de la válvula de parada del recalentador (2 - izquierda y derecha)
- Instalar una nueva línea de control de aceite (desde la nueva unidad de aceite hidráulico)

Además, se incluirá instrucciones adicionales que faciliten el mantenimiento en el menor tiempo posible. Se presentarán alarmas en las estaciones de operación de la consola de control y el detalle del problema a lo largo de la estación de ingeniería.

A. Propuesta de modernización parcial del sistema de regulación

La presente propuesta tiene como objetivo implementar mejoras en la Central Térmica Esmeraldas para aumentar la eficiencia operativa del equipo y reducir los costos de mantenimiento. Se plantea realizar una modernización parcial, manteniendo la configuración actual del equipo y llevando a cabo las siguientes intervenciones:

1. Implementación de un nuevo sistema moderno de monitoreo:

En los tableros locales que actualmente funcionan con tecnología analógica (figura 28) y que existe deficiencia en su supervisión, se pretende realizar las siguientes acciones:

- Instalación de un sistema de monitoreo que permita visualizar en tiempo real los estados del regulador y los procesos.
- El sistema incluirá una Interfaz HMI que almacenará componentes gráficos de operación y mostrará estos desplegados a solicitud del operador.
- El sistema mostrará una actualización de datos de procesos de la planta cada segundo, con acceso a hasta 200 000 puntos dinámicos.
- El software de visualización deberá mostrar datos almacenados en tiempo real de cualquier fuente conectada al sistema, como variables de proceso, alarmas y cambios realizados por el operador.
- Funcionalidades adicionales incluirán la operación del sistema desde las pantallas HMI, permitiendo el manejo de reportes, históricos, alarmas y eventos, así como la visualización de diagnósticos de fallas de equipos.

Figura 28

Sistema actual de tableros y paneles analógicos para la supervisión de la turbina.



Nota: Fotografía del tablero actual en donde se pretende adaptar las nuevas tecnologías.

2. Implementación de sensores:

- Instalación de sensores en cada una de las válvulas para lograr un mayor control del caudal y la presión en el limitador de carga, el regulador de velocidad y el acelerómetro.
- Estos sensores permitirán un control más preciso de la operación del equipo y facilitarán la detección temprana de posibles problemas.

3. Protección por sobrevelocidad:

- Se suministrará un sistema de protección digital independiente del controlador del regulador de la turbina para evitar situaciones de sobrevelocidad.
- El sistema de protección estará certificado según la norma IEC 61508:2010.
- Contará con tres módulos monitores de protección que permitirán una lógica 2 de 3.
- Para la detección de sobrevelocidad de la máquina, se utilizarán tres sensores pasivos (Pick Ups magnéticos) que estarán cableados a tarjetas de velocidad independientes.

- Características del control y protección de sobrevelocidad:
 - Medición de la frecuencia de la señal de salida de velocidad de los pickup.
 - Aceptación de salidas sinusoidales o tren de impulsos.
 - Frecuencia de actualización de 5 ms para la detección de exceso de velocidad.
 - Tasa de actualización variable para la regulación de velocidad.
 - Detección de velocidad con control independiente y disparo utilizando dos salidas de relé de forma C.
 - Alimentaciones eléctricas redundantes.
 - Resistencia dieléctrica de aislamiento eléctrico de 1000 V entre la señal de la lógica y las entradas de campo.
 - Capacidad de intercambio en caliente.

4. **Monitorio y control de las válvulas de retención:**

- Implementación del monitoreo y control de la apertura y cierre de las seis válvulas de regulación mediante los contactos de fin de carrera que permitirá un mejor control de las operaciones de apertura y cierre de las válvulas.

5. **Anticipador de Carga:**

- Diseño e implementación de una función que cierre rápidamente las válvulas de regulación (admisión e Interceptación) en caso de pérdida rápida o imprevista de carga, o por la apertura del interruptor de la máquina.
- El bloque de disparo actuará directamente sobre la electroválvula de disparo de la turbina.

6. **Diseño y adaptación de una interfaz en el sistema de supervisión actual:**

- Desarrollo de una interfaz de usuario intuitiva para la lectura de parámetros de operación del regulador de velocidad.

– Interfaz de usuario (local):

- Instalación de un panel local de operación en el grupo de tableros ya existentes del SCT (figura 29), con una pantalla industrial de al menos 15 pulgadas de diagonal.
- El panel local de operación incluirá funciones equivalentes a la estación de operación ubicada en la sala de control, adaptado al sistema actual Delta V.

- Se mostrará un listado de eventos y alarmas en orden cronológico, con estampas de tiempo proporcionadas por el controlador u otro equipo.

Figura 29

Sistema actual de monitoreo de la turbina.



Nota: Fotografía del tablero actual en donde se pretende mantener y adaptar el nuevo diseño de supervisión.

- Estación de operación principal:
- Se dispondrá de una estación de operador principal en la Sala de Control, que permitirá monitorizar y operar todas las pantallas gráficas de control del

sistema.

- La estación principal contará con características adecuadas para su óptimo funcionamiento.

7. Características de las fuentes de poder:

- Los controladores estarán equipados con fuentes redundantes de alimentación para suministrar la potencia requerida por el controlador y sus componentes.
- Las fuentes de poder se alimentarán a 120 VDC desde los bancos de batería existentes en la central.
- Las fuentes de alimentación contarán con aislamiento galvánico entre las tensiones de entrada y salida, medios de filtrado y elementos de protección contra sobrecarga, cortocircuito y sobre/baja tensión para garantizar la integridad del equipo.

B. Propuesta de modernización completa del sistema de regulación

La nueva configuración contemplará un comando remoto para las válvulas de control a fin de que sean operadas por el nuevo sistema de control digital. El nuevo sistema de regulación básicamente incluirá las siguientes funciones:

- Verificación de la velocidad de la turbina desde la velocidad del motor de giro hasta la velocidad de sincronización, manteniendo la misma filosofía de funcionamiento en las aperturas de las válvulas.
- Adquisición de tres sensores de velocidad dentro del sistema de gobierno para la supervisión durante la puesta en marcha y la detección de protección acelerométrica. Los sensores de velocidad adquiridos por el sistema de gobierno también se utilizan como umbral secundario de sobrevuelo establecido en el 112%.
- El sistema de regulación generará el comando para la válvula de control y recogerá la posición del servomotor con la instalación de un nuevo LVDT (Transductor de desplazamiento lineal variable) redundante.
- Sincronización, el sistema de gobierno gestionará las señales procedentes del dispositivo de sincronización.
- Carga inicial.

- Carga con diferentes gradientes que pueden ser seleccionados manualmente por el operador.
- El sistema de gobierno incluirá dos limitadores: el limitador de admisión de baja presión de vapor y el limitador de carga.
- El sistema de regulación incluirá dos transductores de potencia activa que se insertarán dentro de los gabinetes. Cada transductor de potencia adquirirá las medidas eléctricas del transductor de voltaje (100 V) y del transformador de corriente (5A) para generar una señal de 4-20 mA significativa de la medida de MW.

1. Sistema de automatización de la turbina de vapor.

- El sistema de automatización de la turbina de vapor incluye el sistema de regulación, el sistema de parada y de interfaz con el sistema de supervisión.
- El sistema de automatización electrónica de la turbina de vapor, llamado STCS (Steam Turbine Control System), está construido utilizando elementos de sistemas electrónicos modulares. Se basa en una plataforma de sistema de control distribuido.

– Configuración de hardware

STCS incluye una o más particiones independientes, cada una de ellas compuesta por una CPU y módulos de E/S, que interfazan con los demás sistemas mediante placas terminales. En cada partición hay CPUs completamente redundantes. Los procesadores son absolutamente idénticos.

Para el control de turbinas, se han definido los siguientes requisitos básicos:

- Diseño modular. Los módulos de hardware electrónico y el software del controlador son altamente estandarizados. El grado de redundancia y el número de funciones del controlador se pueden adaptar fácilmente según los requisitos de la planta. La estructura funcional del controlador es fácilmente comprensible, ya que los diversos módulos del controlador utilizan elementos funcionales estandarizados.
- Tiempo de ciclo de control del proceso corto para lograr un comportamiento óptimo en situaciones transitorias. La actualización de las señales de salida se realiza cada 20 ms. Esto incluye la adquisición de la señal medida (por

ejemplo, velocidad de la turbina) al bus, el procesamiento en la CPU y la señal de salida desde el bus hasta el posicionador de la válvula de control.

- Alta confiabilidad y monitorización integrada. DEHC-TTS será diseñado para aplicaciones de plantas de energía. Las tarjetas pueden ser reemplazadas bajo voltaje de alimentación. Esto es muy raro vez necesario debido a la alta confiabilidad de las tarjetas. La monitorización integrada en las tarjetas facilita la localización de errores.

– Gabinete

Los gabinetes del sistema de automatización de la turbina de vapor tienen un grado de protección IP42 y pueden ser instalados en un ambiente con un rango de temperatura de 0 a 50 grados Celsius sin ningún problema. Para trabajar en el rango de temperatura de -5 a 50 grados Celsius, la central debe suministrar energía a los calentadores del gabinete mediante una fuente muy confiable (UPS, batería). Suministro de 4 gabinetes de sistema de plataforma con las siguientes características.

- Dimensiones: 800x800x2100 mm
- Color: RAL 7035
- Grado de protección: IP42
- Conexión de cables con el sistema externo o instrumento existente para adquirir las señales necesarias para el regulador (por ejemplo, presión de admisión de vapor principal).

– Estación del operador

- * Interfaz del operador.

El sistema estará equipado con dos estaciones de operador. La estación del operador, de tipo escritorio, consta de:

- Torre de unidad de procesamiento
- Terminal de vídeo
- Teclado y ratón

Todas las operaciones necesarias para controlar y supervisar la turbina de vapor pueden ser gestionadas por la estación del operador mediante pantallas gráficas de proceso, páginas de alarmas, registradores, tendencias analógicas, páginas de secuencia y comandos de ventanas, utilizando el ratón.

* Interfaz de ingeniería.

Se suministra una estación de trabajo de ingeniería (EWS), basada en una PC de escritorio, con todos los paquetes de software necesarios para la configuración y ajuste.

2. Interfaz de serie redundante.

El STCS se interconecta con el DCS mediante una línea de comunicación serie Ethernet y el protocolo relacionado TCP/IP. La arquitectura de hardware prevé el uso de un servidor, que incluye la base de datos en tiempo real del sistema de control de la turbina de vapor.

El sistema descrito puede abrirse al nivel superior con las siguientes comunicaciones estándar: servidor OPC (OLE para control de procesos). Los servidores trabajan con un tiempo de muestreo OPC de 500 ms.

Es posible intercambiar a través del enlace serie:

- Medidas y estado de los contactos
- Alarmas y eventos con la marca de tiempo correspondiente
- Puntos de ajuste y comandos

Para garantizar un alto rendimiento en el enlace, es necesario que la red TCP/IP suministrada con el DCS sea una red “switching” a 100 Mbit/seg.

El sistema de control de la turbina de vapor estará equipado con un puerto de comunicación Ethernet con protocolo OPC para poder estar listo para ser interfazado con el DCS. Las señales críticas se intercambiarán a través de cableado.

3. Modo de renovación del regulador.

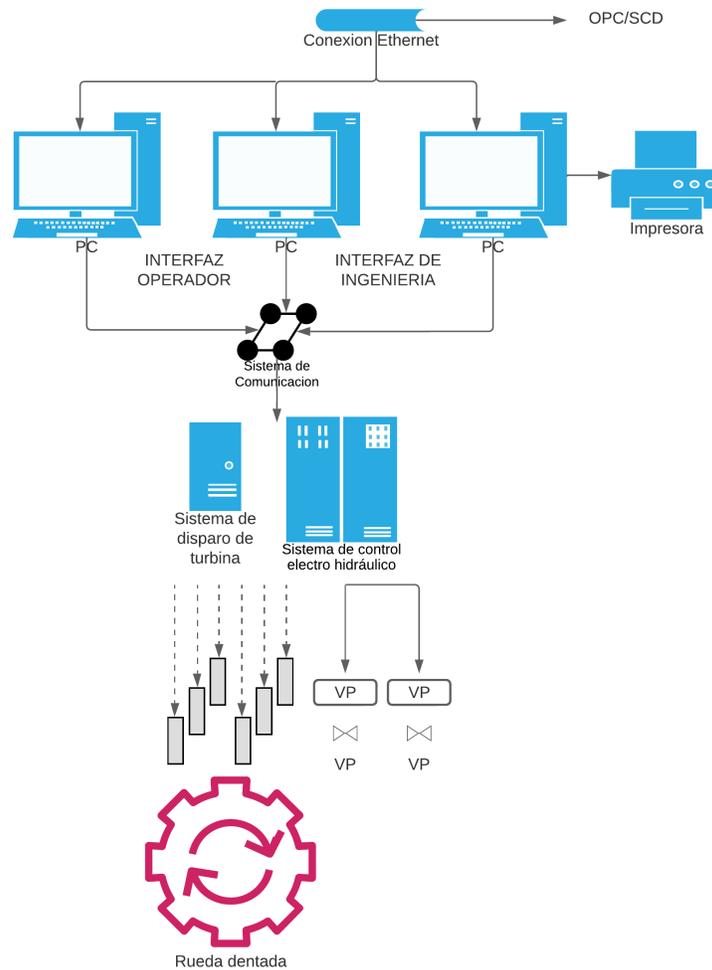
Se prevé una solución para mejorar el regulador y el sistema de disparo de la turbina de vapor para poder obtener las características descritas anteriormente.

En este documento no se describirán los detalles electrónicos utilizados para la solución de renovación, las propuestas se desarrollarán en la plataforma del control distribuido (por ejemplo, Symphony/Harmony de ABB u Ovation de Emerson) como se ejemplifica en la figura 30.

La solución para el control de aceite de alta presión consiste en eliminar todos los servomotores y actuar directamente sobre todas las válvulas de control con actuadores de aceite a alta presión (10 actuadores).

Figura 30

Arquitectura propuesta para el nuevo control - CTE I.



Nota: Diseño ejemplo de la estructura que se propone integrar en el sistema de control actual en la CTE - I.

4. Solución HPCO (High Pressure Control Oil)

La solución propuesta permite mejorar el rendimiento y minimizar la obsolescencia, transformando el actual regulador hidráulico de baja presión en un controlador electrohidráulico digital (doble lazo de control), accionado con aceite a alta presión, como suele ocurrir en las turbinas de vapor modernas.

La solución prevé el reemplazo total de los servomotores existentes y la eliminación de los vínculos entre las válvulas del regulador, utilizando servomotores hidráulicos

de alta presión para cada válvula (mejora del rendimiento, procedimientos automáticos de alineación de válvulas). Los nuevos servomotores están equipados con un colector hidráulico para operar en todas las condiciones de ejercicio, y las líneas de aceite a alta presión están conectadas al colector para controlar la posición de control y las válvulas de disparo.

El aceite hidráulico está disponible a través de un grupo central de aceite a alta presión equipado con filtros dúplex, dos bombas, circuito de enfriamiento, acumulador e instrumentación, este será gestionado por el SCDEH (Sistema de control electro hidráulico).

La posición de las válvulas está determinada por la acción directa de los servomotores instalados para reemplazar los servomotores actuales.

Los actuadores están provistos de un bloque de control hidráulico que consta de:

- Convertidor electrohidráulico (servoválvula), capaz de actuar en la posición del servomotor.
- Solenoide de control redundante (aplicable: válvulas de interceptor y válvulas de estrangulamiento).
- Relé hidráulico de cierre rápido.
- Solenoide anticipador de caída de carga (LDA) (cierre rápido).

y están equipados con un transductor de posición (tipo LVDT) (redundante doble para las válvulas de interceptor y las válvulas de estrangulamiento).

– El control redundante se obtiene de la siguiente manera:

- Válvulas de regulación (total 6) figura 32: las válvulas se controlan individualmente (6 en total), asegurando la disponibilidad de la turbina en caso de un máximo de dos fallas (2 de 6 líneas de admisión). (comando singular y retroalimentación singular).
- Válvulas de intercepción (figura 31) y válvulas de estrangulamiento (total 4): las válvulas son controladas por un convertidor electrohidráulico, la redundancia se logra mediante un solenoide de derivación de aceite hidráulico que permite su funcionamiento en todas las condiciones de carga (excepto el arranque de la turbina), la servoválvula se puede reemplazar cuando la turbina se detiene. (comando redundante particular y doble retroalimentación).

Las válvulas de parada del recalentador se mantendrán con el actual accionamiento de aceite de baja presión (control de la válvula de estrangulamiento) y se acompañarán de un LVDT solo para monitorizar.

Figura 31

Válvulas de intercepción.



Nota: Fotografía de la válvula del lado derecho, lugar donde se pretende colocar los sensores para su control (existe dos, una del lado derecho y una del lado izquierdo, en ambas se aplica).

Figura 32

Válvulas de regulación.



Nota: Fotografía de las válvulas de regulados del lado derecho, lugar donde se pretende colocar los sensores para su control (existe seis, tres del lado derecho y tres del lado izquierdo, en ambos lados se aplica).

- Interfaz del sistema de disparo de la turbina de vapor:

Para conectar el aceite de disparo de baja presión (sobrevuelo y nuevo bloque de disparo 2003) y todos los servomotores de alta presión, la propuesta prevé la instalación de un relé de interfaz hidráulica (monitorizado por DEHC-TTS), que pone a disposición la línea de aceite de disparo de alta presión y permite el control hidráulico de todas las servoválvulas. Cuando la turbina se detiene, no hay aceite de disparo y no se pueden abrir las válvulas.

5. Sistema de disparo de la turbina de vapor.

El sistema de disparo de la turbina de vapor comprende toda la lógica necesaria para proteger la máquina contra todo tipo de mal funcionamientos relacionados

con los auxiliares, el equilibrio de la planta y cualquier otro sistema relacionado con la turbina de vapor.

Durante una modernización de actualización, es necesario gestionar la coordinación entre las modificaciones mecánicas e hidráulicas y los requisitos del sistema de control electrónico, para que la modernización completa del sistema de control sea un proyecto exitoso.

Se adoptará para la turbina de vapor modernizada el mismo concepto utilizado en las nuevas aplicaciones, cuando sea posible.

Las funciones proporcionadas serían las siguientes:

- Disparo por sobre velocidad electrónica al 110
- Desmontar y poner en modo pasivo el disparo mecánico.
- Instalar tres sensores con tarjetas electrónicas dedicadas y contactos libres para interrumpir el suministro de energía en el bloque de disparo.

- Presión de vacío:
 - Eliminar el sistema de presión actual.
 - Suministrar e instalar 3 sensores con lógica 2 de 3.

- Presión del aceite de lubricación de los cojinetes:
 - Eliminar el sistema de presión actual.
 - Suministrar e instalar 3 sensores con lógica 2 de 3.

Todos los sensores están conectados a la sección de automatización de la turbina de vapor dedicada a la seguridad de la turbina y, al detectar un valor de disparo, el sistema emite automáticamente un comando de disparo.

Se prevé la instalación de solenoides de disparo de la turbina en el sistema hidráulico de seguridad. Esta modificación prevé la instalación de válvulas solenoides redundantes que son accionadas por el sistema de automatización de la turbina de vapor, estos sensores constituyen la interfaz entre el sistema de automatización de la turbina de vapor y la máquina en lo que respecta a la seguridad.

Se inserta un nuevo sistema de disparo de la turbina de vapor basado en un sistema 2 de 3 para garantizar un sistema de disparo moderno y confiable, que se puede probar durante la operación. Con el nuevo sistema, los comandos de disparo

y reinicio para la turbina se pueden ejecutar de forma remota, no se necesitan operaciones locales.

6. Modo de renovación del sistema de disparo de turbina.

Se prevé mejorar el sobrevuelo mecánico con un disparo electrónico moderno, que estará directamente conectado al nuevo bloque de disparo 2 de 3. El sistema de disparo digital estará contenido en el armario STCS (adecuadamente segregado).

– Acción mecánica e hidráulica.

- Desmontar y poner en modo pasivo el sobrevuelo mecánico.
- Se eliminarán y reemplazarán todas las partes consideradas obsoletas y no integrables en el nuevo sistema de protección:
 - Dispositivo de disparo de baja presión del aceite de lubricación e instalación del instrumento dedicado (3 elementos).
 - Dispositivo de disparo del cojinete de empuje e instalación del instrumento dedicado (3 elementos).
 - Dispositivo de disparo de vacío bajo e instalación del instrumento dedicado (3 elementos).
 - Válvula solenoide para bloqueo de disparo remoto por vacío.

Las componentes que no se pueden eliminar se pondrán en modo pasivo de manera adecuada.

- Suministrar e instalar un nuevo bloque de disparo 2 de 3.
- Suministrar e instalar un relé redundante de interfaz hidráulica.
- Suministrar e instalar una nueva línea de aceite de disparo.
- Suministrar e instalar una unidad de aceite hidráulico (alta presión).
- Suministrar e instalar filtros dúplex.

7. Sistema de supervisión de la turbina de vapor.

Actualmente, se instala un sistema de CEMB. Las tarjetas electrónicas están disponibles para fines de mantenimiento, pero no para nuevas instalaciones.

Se proporcionará como solución base un nuevo bastidor de CEMB (Línea TDSP) y también adquirirá algunas señales adicionales que actualmente se realizan con tecnología diferente (por ejemplo, desgaste del cojinete de empuje).

El nuevo bastidor de TSI se alojará en un gabinete dedicado y se conectará por cable al sistema DEHC (Digital Electro Hydraulic Control System) y reemplazará la conexión actual con los sistemas actuales.

– Acción en campo:

- Instalar 3 nuevos sensores de consumo del cojinete de empuje con caja de conexiones.
- Verificar toda la instrumentación y las interconexiones actuales.

Se prevé desmantelar la detección de desgaste del cojinete de empuje existente y reemplazarla con sondas inductivas modernas sin contacto. Las sondas detectan una tensión de brecha y convierten este valor en una medida proporcional al desplazamiento del eje.

5.3.2. Ventajas y desventajas sobre los distintos métodos aplicables para la modernización del regulador de velocidad.

Establecer una descripción de las ventajas y desventajas de los distintos métodos aplicables para la modernización del regulador de velocidad, proporciona una base sólida para la toma de decisiones, optimización de recursos, identificación de limitaciones y riesgos, consideración del estado actual del sistema y evaluación del impacto a largo plazo. Esto conduce a una modernización más informada, eficiente y efectiva del regulador de velocidad.

A continuación, se presenta una descripción de las ventajas y desventajas de los distintos métodos aplicables para la modernización del regulador de velocidad, tomando en consideración el estado actual del sistema y las dos propuestas planteadas:

1. Método de modernización parcial, manteniendo la configuración actual del equipo:

a) Ventajas

- Mejora de la eficiencia operativa y detección temprana de problemas: La implementación de un nuevo sistema de monitoreo permitirá visualizar en tiempo real los estados del regulador y los procesos, facilitando la detección temprana de problemas y una respuesta más rápida y precisa.
- Reducción de costos de mantenimiento y reemplazo de componentes desgastados: Al modernizar parcialmente el sistema de regulación, se podrán reemplazar los componentes desgastados, mejorando la confiabilidad de la máquina y reduciendo los costos de mantenimiento a largo plazo.

- Mayor control y precisión en la operación: La instalación de sensores en las válvulas permitirá un control más preciso del caudal y la presión, contribuyendo a una operación más estable y confiable del regulador de velocidad.
- Familiaridad con la configuración actual: Al mantener la configuración existente, los operadores y personal de mantenimiento ya están familiarizados con el sistema, lo que facilita la transición y reduce la curva de aprendizaje.
- Costos de implementación más económicos: Este método resulta más económico en comparación con una modernización completa, ya que no implica cambios significativos en la estructura y componentes principales del sistema.
- Menor tiempo de implementación: Al no requerir cambios drásticos en la configuración, el tiempo necesario para la implementación y puesta en marcha puede ser menor.

b) Desventajas

- Limitaciones en la capacidad de modernización y oportunidades de mejora: Al realizar una modernización parcial, es posible que algunos componentes no se puedan actualizar debido a la configuración actual del equipo, lo que podría limitar el alcance de las mejoras y su efectividad en comparación con una modernización completa. Además, al no realizar cambios significativos en la configuración, es posible que no se puedan aprovechar todas las oportunidades de mejora y optimización del sistema.
- Dependencia de componentes antiguos y limitaciones a largo plazo: Aunque se reemplazarán algunos componentes desgastados, es posible que todavía existan limitaciones debido a la antigüedad de otros elementos del sistema de regulación. Esto puede afectar la confiabilidad y el rendimiento general de la modernización parcial a largo plazo. Al mantener la antigua configuración, también se corre el riesgo de depender de componentes desgastados y obsoletos, lo que podría limitar la eficiencia y confiabilidad del sistema en el futuro.

2. Método de modernización completa del sistema:

a) Ventajas

- Funcionalidad y rendimiento mejorados: Mediante la modernización completa del sistema de regulación, se implementará un nuevo sistema de control digital que ofrecerá una mayor funcionalidad y un rendimiento mejorado en

comparación con el sistema actual. Esto permitirá un control más preciso y una respuesta más rápida a las variaciones de carga.

- Integración con tecnologías modernas: Al adoptar un sistema de control distribuido y utilizar tecnologías modernas, como la comunicación Ethernet y el protocolo OPC, se facilitará la integración con otros sistemas y la interoperabilidad con componentes más nuevos.
- Mayor confiabilidad y redundancia: La implementación de una arquitectura redundante con CPUs y módulos de E/S redundantes brindará mayor confiabilidad y redundancia en el sistema de regulación, lo que contribuirá a la operación segura y confiable de la turbina de vapor.
- Mejora en la supervisión y monitoreo: La actualización del sistema de supervisión permitirá una mejor visualización de los parámetros de operación del regulador de velocidad, así como una mayor capacidad de monitoreo y diagnóstico de fallas.
- Protección contra sobrevelocidad mediante un sistema de protección independiente: La incorporación de un sistema de protección independiente ayudará a evitar situaciones de sobrevelocidad, garantizando la seguridad tanto de la máquina como del personal.
- Mejora integral del sistema: Al realizar una modernización completa, se tienen mayores oportunidades de mejora en términos de eficiencia, confiabilidad y funcionalidad del sistema de regulación de velocidad.
- Incorporación de tecnología avanzada: Al actualizar todos los componentes, se puede aprovechar la última tecnología disponible en el mercado, lo que puede proporcionar un mejor rendimiento y facilidades de mantenimiento.
- Reducción de costos a largo plazo: Aunque la inversión inicial puede ser mayor, una modernización completa puede resultar en una reducción significativa de los costos de mantenimiento a largo plazo, al minimizar la necesidad de repuestos obsoletos y prolongar la vida útil del sistema.

b) Desventajas

- Costo y complejidad: Una modernización completa del sistema de regulación puede requerir una inversión significativa en términos de costos y tiempo de implementación. Además, la integración de diferentes componentes y tecnologías puede ser compleja y requerir experiencia especializada.

- Interrupción de la operación: Durante el proceso de modernización completa, puede ser necesario detener la operación de la turbina de vapor, lo que puede resultar en una interrupción temporal en la generación de energía y en los procesos asociados.
- Riesgos de implementación: Cualquier proceso de modernización implica ciertos riesgos, como problemas de compatibilidad, fallas en la integración de sistemas y posibles interrupciones en la operación. Es importante realizar una planificación detallada y contar con un equipo especializado para minimizar estos riesgos.
- Curva de aprendizaje: Al realizar cambios significativos en la configuración, es probable que se requiera un período de aprendizaje para que el personal se familiarice con el nuevo sistema y sus operaciones.
- Mayor inversión inicial: Una modernización completa implica una inversión más significativa en comparación con una modernización parcial, lo que puede requerir un análisis de costos y beneficios detallado.

La modernización parcial del sistema de regulación presenta ventajas en términos de mejora de la eficiencia operativa, reducción de costos de mantenimiento y control más preciso del equipo. Además, proporciona protección contra situaciones de sobrevelocidad y mejoras en la monitorización y control de las válvulas de retención. Sin embargo, este enfoque tiene limitaciones en cuanto a la actualización total del sistema y su capacidad de adaptación a futuros avances tecnológicos.

Por otro lado, la modernización completa del sistema de regulación ofrece una actualización integral y mejoras significativas en términos de precisión en el control de la turbina de vapor, integración con sistemas de automatización avanzados, funciones de sincronización y carga personalizables, y mayor confiabilidad con monitoreo integrado. Aunque este enfoque implica una mayor complejidad en la implementación y configuración, así como una inversión más significativa, brinda la oportunidad de aprovechar la última tecnología disponible en el mercado.

Para ambas propuestas, el uso de instrumentos redundantes aumenta la confiabilidad del sistema y minimiza la posibilidad de que la turbina de vapor se detenga debido a eventos espurios, lo que también aumenta la disponibilidad.

5.4. Establecimiento de la propuesta con mayor viabilidad para la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I.

Al establecer la propuesta más viable para la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I, es esencial considerar los requerimientos específicos del sistema y cómo cada propuesta se ajusta a ellos. Esto implica analizar el estado actual del sistema, así como las ventajas y desventajas de las propuestas de modernización parcial y completa. A continuación, se presenta un resumen de estos aspectos:

5.4.1. Propuesta más viable de acuerdo al ámbito económico.

Para determinar la propuesta más viable desde el punto de vista económico para la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I, es necesario considerar las ventajas y desventajas de los métodos de modernización planteados, así como el estado actual del sistema y los objetivos específicos de la planta.

Tras analizar las ventajas y desventajas de las propuestas de modernización parcial y completa, se pueden identificar aspectos económicos clave para tomar una decisión informada. A continuación, se presentan estos puntos:

1. Propuesta de modernización parcial:

a) Ventajas económicas:

- Costos de implementación más bajos en comparación con una modernización completa, ya que no requiere cambios significativos en la estructura y componentes principales del sistema.
- Menor tiempo de implementación debido a la menor complejidad en los cambios realizados.
- Potencial reducción de costos de mantenimiento a largo plazo al reemplazar componentes desgastados y mejorar la confiabilidad del sistema.

b) Desventajas económicas:

- Limitaciones en la capacidad de modernización debido a la configuración actual del equipo, lo que podría limitar las mejoras y su efectividad en comparación con una modernización completa.

- Dependencia de componentes antiguos, lo que puede afectar la eficiencia y confiabilidad del sistema a largo plazo.

2. Propuesta de modernización completa:

a) Ventajas económicas:

- Mejora integral del sistema que puede resultar en eficiencia, confiabilidad y funcionalidad mejoradas, lo que podría conducir a una reducción de costos a largo plazo.
- Posibilidad de aprovechar la última tecnología disponible en el mercado, lo que puede proporcionar un mejor rendimiento y facilidades de mantenimiento.

b) Desventajas económicas:

- Mayor costo de implementación debido a la necesidad de actualizar todos los componentes y realizar cambios significativos en la configuración del sistema.
- Posible interrupción temporal en la generación de energía y los procesos asociados durante la implementación.
- Riesgos de implementación que podrían generar costos adicionales, como problemas de compatibilidad y fallas en la integración de sistemas.

Con base en estos criterios, se determinó que la propuesta más viable desde el ámbito económico es la modernización parcial del sistema de regulación. Esta opción permite aprovechar las ventajas económicas de mantener la configuración existente, al tiempo que se realizan mejoras específicas para aumentar la eficiencia y reducir los costos de mantenimiento a largo plazo. Al reemplazar los componentes desgastados y utilizar tecnologías modernas en áreas seleccionadas, se logra un equilibrio entre la inversión inicial y los beneficios económicos a largo plazo.

5.4.2. Propuesta más viable de acuerdo a los requerimientos del sistema.

Al establecer la propuesta más viable para la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I, es esencial considerar los requerimientos específicos del sistema y cómo cada propuesta se ajusta a ellos. Esto implica analizar el estado actual del sistema, así como las ventajas y desventajas de las propuestas de modernización parcial y completa. A continuación, se presenta un resumen de estos aspectos:

1. Propuesta de modernización parcial:

a) Ventajas con relación a los requerimientos del sistema:

- Mejora de la eficiencia operativa mediante la implementación de un nuevo sistema de monitoreo que permitirá visualizar en tiempo real los estados del regulador y los procesos, facilitando la detección temprana de problemas y respuestas más rápidas y precisas.
- Reducción de costos de mantenimiento a largo plazo al reemplazar componentes desgastados y mejorar la confiabilidad del sistema.
- Mayor control y precisión en la operación del regulador de velocidad mediante la instalación de sensores en las válvulas, contribuyendo a una operación más estable y confiable.
- Protección independiente contra situaciones de sobrevelocidad, garantizando la seguridad de la máquina y del personal.

b) Desventajas con relación a los requerimientos del sistema:

- Limitaciones en la capacidad de modernización debido a la configuración actual del equipo, lo que podría limitar las mejoras y su efectividad en comparación con una modernización completa.
- Dependencia de componentes antiguos, lo que puede afectar la eficiencia y confiabilidad del sistema a largo plazo.

2. Propuesta de modernización completa:

a) Ventajas con relación a los requerimientos del sistema:

- Funcionalidad y rendimiento mejorados mediante la implementación de un nuevo sistema de control digital, lo que permitirá un control más preciso y una respuesta más rápida a las variaciones de carga.
- Integración con tecnologías modernas, como la comunicación Ethernet y el protocolo OPC, facilitando la interoperabilidad con otros sistemas y componentes más nuevos.
- Mayor confiabilidad y redundancia en el sistema de regulación mediante la implementación de una arquitectura redundante, lo que contribuirá a una operación segura y confiable de la turbina de vapor.
- Mejora en la supervisión y monitoreo a través de la actualización del sistema de supervisión, lo que permitirá una mejor visualización de los parámetros de operación y un mayor diagnóstico de fallas.

b) Desventajas con relación a los requerimientos del sistema:

- Mayor costo y complejidad en la implementación debido a los cambios significativos en la configuración del sistema y la integración de diferentes componentes y tecnologías.
- Posible interrupción prolongada en la generación de energía y los procesos asociados durante la modernización completa.
- Riesgos de implementación, como problemas de compatibilidad y fallas en la integración de sistemas, que podrían afectar la operación y requerir un equipo especializado para minimizar estos riesgos.

Con base en estos requerimientos del sistema, se determinó que la propuesta más viable es la modernización completa del sistema de regulación. Esta opción permite una mejora integral del sistema, con funcionalidad y rendimiento mejorados, integración con tecnologías modernas, mayor confiabilidad y redundancia, y un monitoreo y diagnóstico de fallas mejorados. Aunque requiere una inversión inicial más significativa y puede implicar una interrupción temporal en la operación, esta propuesta cumple con los requerimientos del sistema y proporciona una solución a largo plazo con beneficios tecnológicos y operativos significativos.

Con el fin de evaluar las dos propuestas de modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la Central Térmica Esmeraldas I se ha optado por usar como herramienta una matriz de decisión. A continuación, se presenta una matriz considerando los parámetros especificados:

Tabla 1

Matriz 1 de Decisión para la Modernización del Regulador de Velocidad

Parámetros	Propuestas de Modernización	
	Parcial	Completa
Costo de Implementación	Baja	Alta
Costos de Mantenimiento a Largo Plazo	Reducción menor	Mayor reducción
Mejora de la Eficiencia Operativa	Moderada	Significativa
Integración con Tecnologías Modernas	Limitada	Avanzada
Confiabilidad	Mejora moderada	Mejora significativa

Nota: La tabla contiene los parámetros propuestos con los índices comparativos entre las dos propuestas.

Para cada parámetro, se asigna una calificación en función de la propuesta de modernización que mejor se ajusta a dicho parámetro. A continuación, se utiliza una escala de calificación del 1 al 5, donde 1 representa una baja calificación y 5 representa una alta calificación.

Con base en la matriz de decisión y las calificaciones asignadas, se procede a sumar las puntuaciones correspondientes para cada propuesta:

Tabla 2

Matriz 2 de Decisión para la Modernización del Regulador de Velocidad

Parámetros	Propuestas de Modernización	
	Parcial	Completa
Costo de Implementación	4	3
Costos de Mantenimiento a Largo Plazo	3	4
Mejora de la Eficiencia Operativa	2	4
Integración con Tecnologías Modernas	3	4
Confiabilidad	2	4

Nota: La tabla contiene los parámetros propuestos con calificación entre las dos propuestas.

- Propuesta de modernización parcial: $4 + 3 + 2 + 2 + 3 = 14$
- Propuesta de modernización completa: $2 + 4 + 4 + 4 + 4 = 18$

De acuerdo con la evaluación realizada, la propuesta de modernización completa obtiene una puntuación total más alta que la propuesta de modernización parcial. Esto indica que la modernización completa es la opción más viable en términos de los parámetros evaluados.

6. Resultados

La modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor en la Central Térmica Esmeraldas I es una decisión estratégica que requiere una evaluación exhaustiva de las diferentes propuestas. Con el objetivo de determinar la propuesta más viable, se han considerado dos aspectos fundamentales: el ámbito económico y los requerimientos del sistema. Para ello, se ha utilizado una matriz de decisión que evalúa los parámetros clave en la toma de decisiones.

Con relación al aspecto económico, se ha efectuado un análisis que engloba el costo de implementación y los gastos de mantenimiento a largo plazo. Durante una entrevista con el ingeniero Jorge Carrera, se pudo estimar que el costo aproximado de la modernización parcial

ascendería a un millón de dólares, mientras que la modernización completa tendría un valor cercano a un millón y medio de dólares (Carrera, 2023). Este aspecto otorga a la propuesta de modernización parcial una ventaja económica inicial en comparación con la opción completa.

Adicionalmente, ambas propuestas anticipan una disminución de los gastos de mantenimiento a largo plazo. Sin embargo, esta reducción se manifestaría de manera más significativa en el caso de la modernización completa, debido a la integración de componentes más actuales y eficientes. Este enfoque contribuiría a la disminución de los costos operativos y de mantenimiento a lo largo de la vida útil del sistema, aportando a la viabilidad económica de la propuesta seleccionada.

Por otro lado, los requerimientos del sistema también son cruciales para determinar la viabilidad de las propuestas. En términos de mejora de la eficiencia operativa, ambas propuestas ofrecen mejoras significativas, si bien la modernización completa permite un mayor incremento en la eficiencia debido a la implementación de un sistema de control digital más avanzado, lo que permite una optimización precisa y una mayor eficiencia en la operación del sistema regulación y protección. En cuanto a la integración con tecnologías modernas, la modernización completa se caracteriza por su capacidad de integrarse con sistemas y componentes más nuevos mediante el uso de tecnologías modernas, lo que promueve una mayor compatibilidad y eficiencia en la operación global de la central térmica.

La confiabilidad es un aspecto crítico en la operación segura de la central térmica. La modernización parcial y completa ofrecen mejoras en este aspecto, pero la modernización completa se destaca por su arquitectura redundante, asegurando una mayor confiabilidad del sistema mediante la implementación de CPUs, módulos de E/S y configuraciones redundantes. Esto brinda una mayor seguridad y evita posibles fallos en el funcionamiento de la turbina de vapor.

Considerando todos estos parámetros y utilizando la matriz de decisión, se ha realizado una evaluación detallada de las dos propuestas de modernización en la tabla 2. Después de asignar calificaciones a cada parámetro y sumar los valores correspondientes, se ha determinado que la propuesta de modernización completa obtiene una puntuación total más alta que la propuesta de modernización parcial.

Con base en esta evaluación, se confirma que la modernización completa del regulador de velocidad de la turbina de vapor en la Central Térmica Esmeraldas I es la opción más viable y beneficiosa para la mejora y optimización del regulador de velocidad de la CTE - I. Aunque implica una mayor inversión inicial y mayor complejidad en la implementación, los beneficios a largo plazo en términos de eficiencia operativa, integración tecnológica moderna y confiabilidad del sistema hacen de esta propuesta la elección adecuada para asegurar un

funcionamiento óptimo y eficiente de la turbina de vapor.

Al tomar esta decisión, la Central Térmica Esmeraldas I se posicionará estratégicamente para enfrentar los desafíos energéticos futuros y contribuir significativamente al desarrollo sostenible del sector energético en el país.

7. Conclusiones

Con base en el análisis exhaustivo realizado, se ha logrado desarrollar una propuesta de modernización para el regulador de velocidad de la turbina de vapor de la CTE - I. Mediante la evaluación de distintas opciones, ventajas y desventajas, se determinó que la modernización completa del sistema es la opción más viable y beneficiosa. Esta propuesta permitirá mejorar la eficiencia operativa, integrar tecnologías modernas, aumentar la confiabilidad y redundancia, y reducir los costos de mantenimiento a largo plazo.

Se logró establecer de manera precisa los parámetros actuales de funcionamiento del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la CTE - I, fue fundamental para tener una comprensión completa del estado actual del sistema. Esto permitió identificar claramente las áreas de mejora y las deficiencias que necesitaban ser abordadas mediante la modernización. A su vez, esto proporcionó una base sólida para la evaluación y comparación de las propuestas de modernización, permitiendo identificar las áreas de mejora necesarias.

Se realizaron análisis detallados y exhaustivos para identificar los problemas presentes en la operación del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la CTE - I. Estos problemas sirvieron como base para la búsqueda de soluciones a través de la modernización del sistema de regulación.

Se llevó a cabo la realización de propuestas de modernización para el regulador de velocidad de la turbina de vapor de la CTE - I. Estas propuestas fueron analizadas detalladamente, considerando ventajas, desventajas y parámetros clave. La evaluación comparativa permitió determinar la propuesta más viable y beneficiosa. La matriz de decisión fue una herramienta clave para evaluar y comparar las propuestas de modernización.

A través del análisis objetivo y la matriz de decisión realizada, se estableció la propuesta con mayor viabilidad para la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor de la CTE - I. La modernización completa del sistema fue identificada como la opción más beneficiosa, considerando la mejora en la eficiencia operativa, la integración tecnológica, la confiabilidad y eficacia, y los costos de mantenimiento a largo plazo.

La modernización completa ofrece ventajas significativas, como un mayor rendimiento

y funcionalidad, una mejor integración con tecnologías modernas, una mayor confiabilidad y redundancia, así como una mejora sustancial en la eficiencia operativa. Aunque implica una inversión inicial más alta y puede requerir mayor complejidad en la implementación, los beneficios a largo plazo, como la reducción de costos de mantenimiento y la utilización de tecnologías avanzadas, hacen de esta propuesta la más adecuada para garantizar un funcionamiento óptimo y eficiente de la turbina de vapor.

8. Recomendaciones

Esta tesis de grado de ingeniería en mecatrónica ha proporcionado una valiosa referencia para otros proyectos de modernización en el campo de la generación de energía, impulsando el avance de la ingeniería y la implementación de tecnologías modernas para un futuro energético más eficiente y sostenible.

Con base en las investigaciones y análisis realizados, se presentan las siguientes recomendaciones que pueden enriquecer y ampliar el campo de estudio:

1. **Investigación de Nuevas Tecnologías:** Se recomienda llevar a cabo una investigación más profunda sobre las últimas tecnologías emergentes en el campo de la mecatrónica y su aplicabilidad en la modernización de sistemas de generación de energía. Esto incluye la exploración de avances en sistemas de control digital, inteligencia artificial, monitoreo en tiempo real y optimización de procesos, que podrían potencialmente mejorar aún más la eficiencia y confiabilidad de la turbina de vapor.
2. **Estudio de Impacto Ambiental:** Para asegurar la sostenibilidad y el cumplimiento de normas ambientales, se sugiere realizar un estudio detallado de impacto ambiental que evalúe los efectos de la modernización en la Central Térmica Esmeraldas I. Esto permitirá identificar posibles impactos en la emisión de gases y residuos, así como en el consumo de recursos naturales, con el objetivo de mitigar y minimizar cualquier impacto negativo en el medio ambiente.
3. **Evaluación de Ciberseguridad:** Dado que la modernización implica la incorporación de tecnologías de comunicación y control digital más avanzadas, es esencial realizar una evaluación de ciberseguridad para identificar posibles vulnerabilidades y garantizar la protección contra ataques cibernéticos. La implementación de medidas de seguridad adecuadas es crucial para proteger la infraestructura de generación de energía contra posibles amenazas externas.

4. **Análisis de Costo-Beneficio a Largo Plazo:** Se sugiere realizar un análisis más detallado de costo-beneficio a largo plazo que tome en consideración un horizonte temporal extendido. Esto permitirá una mejor comprensión de los ahorros y beneficios acumulados a lo largo de la vida útil del sistema modernizado, así como una evaluación más precisa del retorno de la inversión y la rentabilidad económica a largo plazo.
5. **Estudio de Factibilidad en Otras Plantas:** Se recomienda llevar a cabo un estudio de factibilidad para evaluar la aplicabilidad de la modernización del regulador de velocidad de la turbina de vapor en otras plantas de generación de energía similares. Esto permitirá identificar oportunidades de mejora en otras instalaciones y fomentar la adopción de tecnologías modernas en todo el sector energético.

Estas recomendaciones buscan enriquecer y ampliar el conocimiento en el campo de la modernización de sistemas de generación de energía mediante la integración de tecnologías mecatrónicas avanzadas. Estos enfoques adicionales pueden contribuir al desarrollo sostenible y eficiente del sector energético, así como a la búsqueda de soluciones innovadoras para los desafíos energéticos del futuro.

Referencias

- Aguirre Bustos, J. (2014). *Propuesta de mejoramiento del sistema contra incendios en celec-ep termoesmeraldas*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba.
- ALMACHI, P., GUACHI, T., PAUCAR, E., SÁNCHEZ, M., TIPÁN, J., y VELASCO, J. (2018, enero). *UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI*. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Carrera de Ingeniería en Medio Ambiente. Procesos Industriales. Visita Técnica de la Termoeléctrica Esmeraldas (CELEC EP). (CICLO: SEXTO “A”. FECHA: 04-01-2018. LATACUNGA-COTOPAXI-ECUADOR)
- Burbano, E., Ing. (2000). *Curso sistema de regulación turbina operación y mantenimiento*. Camarena, B. (2020).
Ingeniería Mecánica, 34(1), 78-93.
- Camarena, J. (2020). *Termodinámica*. Pearson Educación.
- Carrera, J. (2023). *Entrevista personal*. Entrevista personal en la empresa COVALCO CIA. LTDA., 26 de julio de 2023.
- Carrera Orellana, J. A. (2011). Modernización del sistema de regulación de velocidad en la central hidroeléctrica carlos mora. Descargado de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1188>
- Castillo, A. (2019).
Energías Renovables, Volumen(Número), 45-58.
- CELEC. (2022). *Central térmica esmeraldas 1*. Corporación Eléctrica del Ecuador. Descargado 2022-12-05, de <https://www.celec.gob.ec/termoesmeraldas/index.php/central-termica-esmeraldas-i>
- Central térmica esmeraldas i*. (2023). Provincia de Esmeraldas, Ecuador. URL: <https://www.google.com/maps/place/CELEC+EP+Termoesmeraldas/@0.9265713,-79.6903016,17z/data=!4m6!3m5!1s0x8fd4bf024a2c463b:0xa2ba8574d82cbe9d!8m2!3d0.9265659!4d-79.6877267!16s%2Fg%2F12lscpd06?entry=ttu>.
- Iec 13849: Safety of machinery – safety related parts of control systems*. (2006). Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission.
- Iec 61508: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*. (2010). Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission.
- Iec 62061: Safety of machinery - functional safety of safety-related electrical, electronic, and programmable electronic control systems*. (2005). Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission.
- Iso 12100: Safety of machinery - general principles for design - risk assessment and risk*

- reduction*. (2010). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Lozano, A. (s.f.). Uso de combustibles fósiles: las centrales térmicas. *LITEC, CSIC – Universidad de Zaragoza*.
- Martínez, R. (2020). Análisis exergoeconómico y ambiental de una central de cogeneración para la producción de electricidad y calor. *Revista Politécnica*, 41(2), 36-42.
- Moya, F. (2021). *Ingeniería Eléctrica*, 45(4), 210-225.
- Pallo, E. (2015). Turbina cte1.
- Rodríguez, C. (2019). *Análisis exergético y termodinámico de ciclo de potencia de gas con inyección de agua*. Universidad de Cuenca.
- Rodríguez, G. (2019). *Energía Térmica*, 18(3), 112-125.
- Sampietro, J. (2019). Especificaciones técnicas del sistema de control de la turbina.
- TERMOESMERALDAS, C. E. (2022). *Central térmica esmeraldas II*. Descargado 2022-12-05, de <https://www.celec.gob.ec/termoesmeraldas/index.php/central-termica-esmeraldas-ii>
- Tosi, F. (2000). *Manual de instrucciones central termoelectrica esmeraldas 1*.
- Tovar, C. A. (2018). *Estudio técnico-económico de una planta de generación de energía eléctrica con base en gas natural*. Universidad de San Buenaventura.
- Tovar, G. (2018). *Energía Sostenible*, 12(1), 56-69.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2010). *Air pollution regulations in maritime*. Descargado de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/marine-rev0805.pdf>

ANEXOS

Anexo A: Requerimientos generales CELEC

Tabla 3

Especificaciones para el sistema de control distribuido:

Funcionalidad	Descripción
Redundancia	Redundancia de controladores Redundancia de fuentes de alimentación Redundancia de comunicaciones
Programación/ Configuración	Rastreo de cambios en la configuración de dispositivos Características para auditar configuraciones
Tecnología de control avanzada	Lógica difusa Tecnología de red neuronal Control Predictivo Multivariable
Arquitectura del Sistema	Soporte técnico 24/7 Soporte para OPC Manejo de tiempos en el sistema Diagnósticos del sistema
Servicio y Soporte	Escalable Servicios para configuración Servicios para mantenimiento de hardware Soporte de software y Soporte de actualizaciones
Manejo del sistema	Histórico de eventos Secuencia de eventos Manejo de acceso Base de datos global Estampa de tiempo para alarmas
Aceptaciones en el sistema	Capacidad para sincronización de tiempos Actualizaciones en-línea Modificaciones sin apagar el equipo Soporte para control en el sitio Alarmas y eventos OPC

Nota: La tabla resume las especificaciones para el sistema de control distribuido de la CTE - I: (*Sampietro, 2019*)